

SISTEMÁTICA DE CÁLCULO PARA O DIMENSIONAMENTO DE GALERIAS DE ÁGUAS PLUVIAIS: UMA ABORDAGEM ALTERNATIVA

SYSTEMATICS OF CALCULATION FOR THE DESIGN OF STORM SEWER SYSTEMS: AN ALTERNATIVE APPROACH

Frederico Carlos Martins de Menezes Filho¹, Alfredo Ribeiro da Costa²,

Recebido em 20 de abril de 2012; recebido para revisão em 24 de junho de 2012; aceito em 05 de julho de 2012; disponível on-line em 25 de julho de 2012.

PALAVRAS CHAVES:

Drenagem Urbana;
Sistematização de cálculo;
Galerias de águas pluviais.

RESUMO: O emprego de tabelas para o dimensionamento de galerias de águas pluviais é visto tanto pelos profissionais da área quanto para os alunos em formação, como um processo trabalhoso pela necessidade de interpolações sucessivas na busca da relação altura-diâmetro e da velocidade impostas como limites, dada a condição precípua do dimensionamento como condutos livres. Deste modo, a substituição do uso de tabelas e nomogramas por equações que possam ser dispostas em planilha eletrônica, agiliza o processo e entendimento dos cálculos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma sistemática de cálculo para o dimensionamento de galerias de águas pluviais em contraposição ao uso de tabelas baseadas na Fórmula de Manning. Entende-se uma vantagem em relação ao processo tradicional por interpolações sucessivas pelo tempo despendido e pela possibilidade de utilização de planilhas eletrônicas dispostas nos computadores pessoais. O desenvolvimento do conjunto de equações baseou-se no trabalho de Saatçi (1990), impondo-se limites para a relação altura lâmina d'água-diâmetro e velocidade. Outra etapa necessária foi a adimensionalização para o cálculo do ângulo central visto os diferentes diâmetros comerciais existentes. As equações para o ângulo central e altura lâmina d'água diâmetro apresentaram alto coeficiente de determinação ($R^2=0,99$). As equações foram testadas para oito trechos hipotéticos de galerias de águas pluviais contemplando como restrições: a relação altura lâmina d'água-diâmetro e a velocidade resultando em valores semelhantes aos tabelados. Tal processo visa reduzir o tempo e facilitar a análise de alternativas como mudanças de diâmetros e mesmo a declividade no dimensionamento de galerias de águas pluviais.

* Contato com os autores:

¹ e-mail : menezesfilho.frederico@gmail.com (F. C. M. MENEZES FILHO)

Eng. Civil Mestre em Engenharia do Meio Ambiente, (UFG - GO)

Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, (IPH-UFRGS - RS)

² e-mail : alfredoribeirocosta@gmail.com (A. R. COSTA)

Eng. Civil Dr. em Engenharia Hidráulica e Saneamento, (UFG - GO).

KEYWORDS:

Urban Drainage;
Systematic calculation of
drainage systems;
Storm sewer systems.

ABSTRACT: The use of tables for the design of storm sewer system is considered by both professionals and training students as a hard task due to the need for successive interpolations in the search of the depth-diameter ratio and of velocity imposed as thresholds, given the essential condition of the design as partially filled pipes. In this way, the replacement of tables and nomographs by equations that can be arranged in a spreadsheet speeds up the process and understanding of calculations. This study aimed at developing a systematic calculation for the design of storm sewer systems as opposed to the use of tables based on the Manning's Formula. An advantage in relation to the traditional process using interpolations lies on the time spent and the possibility of using spreadsheets available in personal computers. The development of the set of equations was based on Saatçi (1990), by imposing thresholds for the depth-diameter ratio and velocity. Another required step was the adimensionalization for calculating the central angle given the different existing commercial diameters. The equations for the central angle and depth-diameter ratio presented a high coefficient of determination ($R^2=0.99$). The equations were tested for eight hypothetical stretches of storm sewer systems including the following restrictions: the depth-diameter ratio and velocity resulting in values similar to tabulated. This process aims to reduce the time and ease the analysis of alternatives such as changes of diameters and even the slope in the design of storm sewer systems.

1. INTRODUÇÃO

Por muito tempo a drenagem urbana foi realizada de maneira a esgotar rapidamente as águas de montante para jusante numa concepção higienista com origem na Europa (SILVEIRA, 1998). Esta prática tinha o intuito de afastar rapidamente o volume indesejado das águas de origem pluvial como também os esgotos sanitários. Neste contexto se realizaram obras onerosas para conduzir tais volumes precipitados e gerados, enquanto que a conscientização sobre os erros admitidos deste procedimento era deixada de lado. Foi necessário, com o passar do tempo, que aquelas medidas estruturais compostas por obras vultosas fossem aliadas a medidas não-estruturais juntamente com a integração de planos estaduais e federais.

A ausência de sistemas de drenagem eficientes afeta à saúde pública por trazer à tona doenças de veiculação hídrica bem como perdas econômicas decorrentes das inundações. A importância de tais sistemas talvez não se apresente de forma clara, contudo são peças fundamentais no planejamento urbano e são responsáveis diretamente pela sustentabilidade do ambiente urbano frente às adversidades da natureza como as tormentas.

Tanto a ausência como a ineficiência dos sistemas de drenagem urbana geram o aumento excessivo do volume de escoamento superficial, podendo ainda ser agravado pela expansão urbana. Este aumento do volume de escoamento superficial promove as enchentes que por consequência trazem consigo enormes prejuízos. A proposição de critérios a serem assumidos no dimensionamento das galerias de águas pluviais, o uso de equacionamento, sem qualquer emprego de ábaco, são partes integrantes de uma

sistemática de cálculo que permite fixar diâmetro, declividade, recobrimento da galeria, bem como vazão e velocidade de escoamento, além de cotas do terreno, da galeria e de poços de visita que nortearão a construção da rede.

1.1 JUSTIFICATIVA

A dispersão das orientações para o projeto de galerias de águas pluviais, dada à pulverização das informações dispostas em manuais de drenagem diferenciando-se pelos critérios adotados, bem como, a inexistência de norma específica conduzem, como objeto deste estudo, à sistematização de cálculo discutindo os parâmetros adotados e fornecendo as diretrizes para tal processo. Complementarmente, a substituição das tabelas, ábacos ou nomogramas por equações reduzem o tempo gasto no dimensionamento possibilitando, atualmente, a disposição em planilhas eletrônicas com a verificação de alternativas de projeto de forma mais rápida, como a análise da substituição de diâmetros ou a alteração da declividade do trecho.

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é propor uma sistemática de cálculo para as galerias de águas pluviais em sintonia com as diversas referências da literatura, utilizando o equacionamento proposto; visto a gama de orientações existentes sobre o assunto. O equacionamento proposto torna o processo por meio da utilização em planilha eletrônica mais ágil em comparação ao processo tradicional de interpolações sucessivas.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1 SUBDIVISÕES DO SISTEMA DE DRENAGEM URBANA

Os sistemas de drenagem urbana podem ser dimensionados em dois níveis (TUCCI, 2004):

- a) **Macro-drenagem:** relaciona-se aos escoamentos em fundos de vale que normalmente são bem definidos mesmo que não correspondam a um curso de água perene;
- b) **Micro-drenagem:** relaciona-se a áreas onde o escoamento natural não é bem definido e, portanto, acaba sendo determinado pela ocupação do solo. Em áreas urbanas é essencialmente definida pelo traçado das ruas.

Segundo a PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2002 apud BRASIL, 2003) e do mesmo modo consoante o Guia para elaboração de planos municipais de saneamento (BRASIL, 2006), a micro-drenagem é considerada como o conjunto da rede formada por galerias tubulares com diâmetro igual ou superior a 0,30m e inferior a 1,20m, assim como pelas galerias celulares cuja área da seção transversal é inferior a 1m². A macro/meso-drenagem é constituída pelas estruturas que recebem a contribuição da micro-drenagem, sendo formadas por cursos d'água, galerias tubulares com diâmetro igual ou superior a 1,20 m e galerias celulares cuja área da seção transversal seja igual ou superior a 1 m².

Conforme o Departamento de Águas e Energia Elétrica e a Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas (DAEE/CETESB, 1980), em seu Manual de Projeto de Drenagem Urbana, pode-se ainda subdividir o sistema de micro-drenagem em sistema inicial de drenagem e sistema de galerias de águas pluviais; sendo o primeiro composto pelas ruas, valetas e sarjetas e o segundo pelas bocas de lobo, poços de visita e tubulações coletoras de águas pluviais. Ambas explicações são complementares e não divergem entre si.

Existem outras referências, embora não divergentes, em âmbito internacional, utilizadas para a divisão dos sistemas urbanos de drenagem de águas pluviais conforme aborda Smith (2006). Este autor divide o sistema em dois, denominados respectivamente de sistema superficial ou principal composto por ruas, valetas e vários canais naturais e artificiais e o outro de sistema de sub-superficial ou sistema secundário.

Smith (2006) evidencia a clara distinção entre estas divisões do sistema de drenagem do mesmo modo que o Manual de Drenagem Urbana editado pelo DAEE/CETESB (1980) e mesmo Tucci (2004). Diferenças estas já mencionadas quanto às disposições físicas e outras relacionadas à utilização do período de retorno no projeto de dimensionamento, sendo de 2 a 10 anos para o sistema secundário ou micro-drenagem e de 25 a 100 anos para o sistema principal ou macro-drenagem.

3.2 MÉTODO RACIONAL

Desde a primeira exposição da famosa Teoria Racional por Emil Kuichiling (1880) *apud* Wilken (1978) que originou a Equação Racional (1) e assim o Método Racional muitos ainda a utilizam. Esta equação expressa o máximo caudal ou a maior vazão em uma seção da bacia contribuinte dada, em função das características da própria bacia e da quantidade de chuva precipitada.

$$Q_{loc} = C i A \quad [Eq.1]$$

Onde:

Q_{loc} = vazão superficial local (m³/s);

C = coeficiente de escoamento superficial;

i = intensidade da chuva (m/s);

A = área da bacia contribuinte local (m²).

A aplicação do Método Racional é válida para bacias urbanas ou rurais pequenas com áreas de até 500 ha e pode ser aplicado com segurança até 50 ha ou 100 acres (WILKEN, 1978; DEBO, REESE, 2003). Entretanto há outros autores que consideram o limite de área para aplicação deste método de 2km² (TUCCI, 2004) e até 3km² ou 300 ha como Festi (2005). Para áreas superiores a 2km² recomenda-se para estimativa de vazão, a utilização do Método do Hidrograma Unitário, proposto pelo NRCS (*Natural Resources Conservation Service*), antigo SCS (*Soil Conservation Service*).

3.2.1 Dimensionamento pelo Método Racional

Para o dimensionamento das galerias de águas pluviais pelo Método Racional, em síntese, utiliza-se a Tabela 1, baseada na equação de Manning que fornece o valor da velocidade e vazão para um certo diâmetro comercial arbitrado. Esta escolha obedece frequentemente a decisão mais econômica adotando-se inicialmente a declividade do terreno conduzindo a menores custos relacionados à escavação. Com o cálculo da vazão à seção plena e tendo a vazão a ser escoada pela tubulação determina-se a razão Q/Q_p e pela tabela determina-se por interpolação a velocidade do escoamento. Caso os valores ultrapassem os limites estabelecidos para a velocidade e também para a relação altura-diâmetro, galerias dimensionadas como condutos livres, deve-se decidir pela troca de diâmetro ou proceder a alterações na declividade da galeria. Deve-se ressaltar que apesar do procedimento ser simples, o processo torna-se dispendioso visto a não observância dos limites estabelecidos em projetos quando do dimensionamento das galerias de águas pluviais e a necessidade de sucessivas interpolações para se chegar à solução.

3.3 MÉTODO DE SAATÇI

Como a rotina de cálculo pode consumir tempo e limitar possíveis alternativas quanto ao cálculo da velocidade e da profundidade do escoamento, Saatçi

(1990) introduziu uma solução usando considerações geométricas (Figura 1) e a Equação de Manning. Sendo dados a vazão (Q), a declividade (I) e o diâmetro (D), calcula-se a constante “k” pela Eq. 2 e o ângulo central (Θ) pela Eq. 3. Calcula-se a área molhada (A_m) pela Equação 4 e procede-se ao cálculo da velocidade (V) e da profundidade com as Equações 5 e 6 respectivamente.

$$k = Q n D^{-8/3} I^{-1/2} \quad [\text{Eq.2}]$$

Onde:

K = constante;

Q = vazão (m³/s);

D = diâmetro (m);

I = declividade (m/m).

$$\theta = \frac{3\pi}{2} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \sqrt{\pi K}}} \quad [\text{Eq.3}]$$

Onde:

Θ = ângulo central (rad);

K = constante.

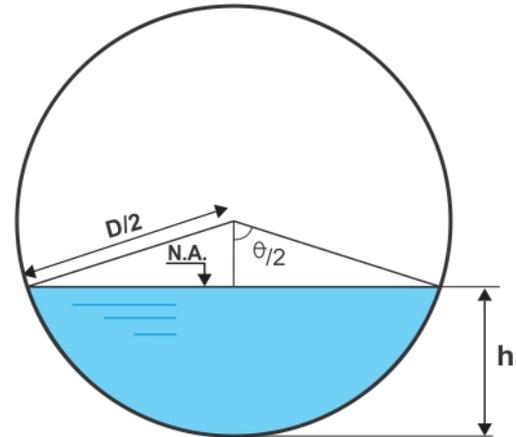


Figura 1: Características geométricas do conduto livre de seção circular

Tabela 1: Valores calculados para seção circular

h/D	ângulo central (rad)	Rh/d	A/d ²	V/Vp	Q/Qp
0,01	0,400	0,006	0,001	0,08	0,0001
0,05	0,902	0,032	0,014	0,25	0,0048
0,10	1,287	0,063	0,040	0,40	0,0208
0,20	1,854	0,120	0,111	0,61	0,0875
0,25	2,094	0,146	0,153	0,70	0,1369
0,30	2,318	0,170	0,198	0,77	0,1958
0,35	2,532	0,193	0,245	0,84	0,2629
0,40	2,738	0,214	0,293	0,90	0,3369
0,45	2,941	0,233	0,342	0,95	0,4165
0,50	3,141	0,250	0,392	1,00	0,5000
0,55	3,341	0,264	0,442	1,03	0,5857
0,60	3,544	0,277	0,492	1,07	0,6718

Por meio da Figura 1, tem-se que:

$$A_m = \frac{D^2(\theta - \text{sen}\theta)}{8} \quad [\text{Eq.4}]$$

Onde:

A_m = área molhada (m²).

Deste modo, calcula-se a velocidade e a relação altura lâmina d'água-diâmetro:

$$V = Q/A_m \quad [\text{Eq.5}]$$

$$\frac{h}{D} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \right] \quad [\text{Eq.6}]$$

Onde:

V = velocidade do escoamento (m/s);

h/D = relação altura lâmina d'água-diâmetro;

h = profundidade do escoamento (m);

D = diâmetro (m).

Deve-se ressaltar que a aplicação deste método é válido para o ângulo central e variando de 0° até 265° (0 a 4,625 rad), equivalente a uma relação altura-diâmetro (h/D) de 0,84.

3.4 CRITÉRIOS ADOTADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DAS GALERIAS DE ÁGUAS PLUVIAIS

As galerias de águas pluviais consistem em condutos destinados a captar as águas pluviais por meio

das bocas de lobo e ligações privadas e conduzi-las a um desaguadouro natural como um córrego ou rio ou a um sistema adequado de disposição provisória ou permanente. Elas são compostas de tubos de ligação (ramais) e poços de visita. Os poços de visita são

instalados nas mudanças de direção, de declividade, de diâmetro e servem para a inspeção e limpeza das canalizações. A porção entre dois poços de visita é denominada trecho. Na Figura 2 tem-se um esquema geral destes elementos.

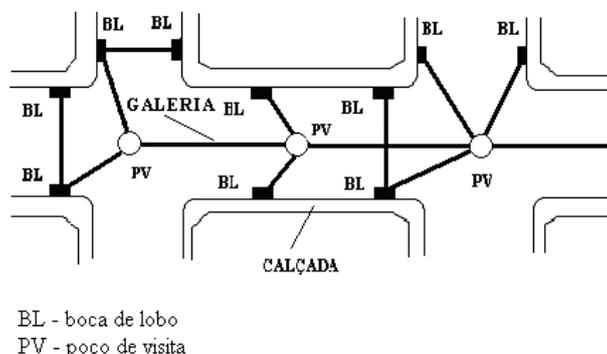


Figura 2: Esquema da disposição dos elementos de uma galeria.

Diversos são os critérios e parâmetros adotados para o dimensionamento de uma rede de águas pluviais, envolvendo grandezas como o tempo de concentração, velocidade mínima e máxima, tipo de escoamento considerado no cálculo, influência de remanso, dentre outros. Tendo em vista a diversidade observada, é preciso analisar os critérios e fixá-los dentro de certas restrições para se dimensionar as galerias de águas pluviais.

Na Tabela 2 tem-se uma gama de parâmetros e critérios adotados por autores e instituições, notando-se a variação de valores quanto à velocidade máxima "Vmáx", mínima "Vmín", recobrimento mínimo "rm", tempo de concentração inicial "tci", relação máxima da lâmina de água-diâmetro adotada "h/D" e o tipo de escoamento sendo uniforme "Unif." ou gradualmente variado "Grad. Variado".

Aqui, será fixada a velocidade mínima em 0,75 m/s, considerando que velocidades menores dificultariam a autolimpeza das tubulações e, por outro lado, a velocidade máxima será fixada em 5,0 m/s, já que velocidades superiores exporiam demais as tubulações ao processo de abrasão. Outro aspecto importante diz respeito à consideração do regime permanente com as tubulações funcionando como condutos livres.

Os sistemas de drenagem urbana devem ser projetados como condutos livres minimizando possíveis transtornos relacionados à sobrepressão nas tubulações.

Levando-se em conta que a praxe é de localizar as galerias de águas pluviais no eixo das vias, adota-se 1,0 m como recobrimento mínimo sobre as tubulações.

Tabela 2: Parâmetros utilizados em canais e/ou seção circular das galerias de águas pluviais

Autor/ Instituição	Vmín (m/s)	Vmáx (m/s)	Tci (min)	Rm (m)	Seção plena ou h/D	Tipo de escoamento
Tucci et al. (2004)	0,60	5,00	10 ^a	1,00	Plena	Unif.
Azevedo Netto e Araújo (1998)	0,75	5,00	5	1,00	Plena ou 0,90	Unif.
Wilken (1978)	0,75	3,50 ^e	5 a 15	-	Plena	Unif.
Alcântara apud Azevedo Netto (1969)	1,00	4,00	7 a 15	-	0,70	Grad. Variado
Porto (1999)	Vméd = 4 a 6 ^b		-	-	0,75	Unif.
Cirilo (2003)	0,60	4,50	-	-	h/D ^c	Unif.

(continua na página seguinte)

Tabela 2: Parâmetros utilizados em canais e/ou seção circular das galerias de águas pluviais (continuação)

Autor/ Instituição	V _{mín} (m/s)	V _{máx} (m/s)	T _{ci} (min)	rm (m)	Seção plena ou h/D	Tipo de escoamento
Methods e Durrans ^d (2003)	0,60 a 0,90	4,50	-	0,90	0,85	Unif. e Grad. Variado
DAEE-CETESB (1980)	-	-	-	-	0,82	Unif.
Prefeitura Municipal de Goiânia	0,75	5,00	-	-	0,85 a 0,90	Unif.
Valores recomendados pelos autores	0,75	5,00	5	1,00	0,85	Unif.

^a Valor citado, porém, segundo o autor pode estar superestimado, necessitando ser calculado em caso de dúvida

^b Fonte: Curso de Canais, EE-UFGM, Dep. Engenharia Hidráulica, Edições Engenharia 58/72

^c valor não fixado

^d valores adotados pela ASCE (1992) – American Society of Civil Engineers

^e Pode-se adotar até 6m/s se for previsto revestimento adequado para o conduto

V_{mín} – velocidade mínima

V_{máx} – velocidade máxima

V_{méd} – velocidade média

t_{ci} – tempo de concentração inicial

rm – recobrimento mínimo

h/D – relação altura-diâmetro

3.5 DIMENSIONAMENTO DAS GALERIAS DE ÁGUAS PLUVIAIS

Para o dimensionamento das galerias de águas pluviais utilizou-se o Método Racional que é o mais difundido. Por sua vez, o Método de Saatçi (1990), visa a reduzir o tempo gasto no dimensionamento ao utilizar equações ao invés de tabelas e nomogramas, tão presentes nos projetos de galerias de águas pluviais. Deste modo, procurou-se então obter um equacionamento que tivesse as mesmas características desse método e que se utilizasse dentro do Método Racional, tão difundido nos meios acadêmicos e órgãos públicos ligados a projetos de sistemas coletores de águas pluviais. Tal equacionamento foi empregado com o uso da planilha eletrônica Excel[®] que tornou o dimensionamento mais prático pela rapidez dos cálculos e análises envolvidas.

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho dividiu-se em três partes principais. A primeira destina-se a obtenção da constante K, presente no artigo de Saatçi (1990), obtida a partir da Equação de Manning. Dadas a vazão, a declividade e o diâmetro arbitrado para o trecho, esta constante K pode ser obtida, do mesmo modo, que também pode ser obtida em função do ângulo central da superfície livre para certa relação altura lâmina d'água-diâmetro, como será descrito a seguir.

As etapas seguintes demonstram a obtenção

do ângulo central da superfície livre em função de "k" e a obtenção do ângulo central da superfície livre em função da área molhada. Ambas condições respeitam os limites para a relação altura lâmina d'água-diâmetro (h/d) no intervalo de 0,10-0,85, que restringe para valores abaixo ao limite inferior a necessidade para trechos iniciais da existência de galerias, e, evita para o limite superior a condição de condutos forçados para as galerias de águas pluviais. Todas as etapas são descritas a seguir.

4.1 OBTENÇÃO DA CONSTANTE "k"

Tal constante, presente no artigo de Saatçi (1990), pode ser obtida através da Equação de Manning (Equação 7) pela substituição das equações da área e do raio hidráulico em função do ângulo central da superfície (θ).

$$V = \frac{1}{n} Rh^{2/3} I^{1/2} \quad [\text{Eq.7}]$$

Onde:

V = velocidade (m/s);

n = coeficiente de Manning ($m^{-1/3}.s$);

Rh = raio hidráulico (m);

I = declividade (m/m).

A Equação 8, mostra a relação da área molhada "A_m" com o ângulo central "θ", expresso em radianos:

$$A_m = D^2 \frac{(\theta - \text{sen } \theta)}{8} \quad [\text{Eq.8}]$$

Como,

$$Rh = \frac{A_m}{P_m} \quad [\text{Eq.9}]$$

Sendo que:

$$P_m = \frac{D}{2} \theta \quad [\text{Eq.10}]$$

Tem-se que:

$$Rh = D \frac{(\theta - \text{sen} \theta)}{4 \theta} \quad [\text{Eq.11}]$$

Substituindo as Equações 9 e 11 em 7 obtêm-se:

$$V = \frac{1}{n} \frac{D^{2/3} (\theta - \text{sen} \theta)^{2/3}}{4^{2/3} \theta^{2/3}} I^{1/2} \quad [\text{Eq.12}]$$

Multiplicando a Equação 12 pela Equação 8, da área molhada em função de "θ", obtêm-se:

$$Q = \frac{1}{n} \frac{D^{2/3} (\theta - \text{sen} \theta)^{2/3} I^{1/2}}{4^{2/3} \theta^{2/3}} D^2 \frac{(\theta - \text{sen} \theta)}{8} \quad [\text{Eq.13}]$$

Simplificando a Equação 13,

$$Q = \frac{1}{n} 0,0496062 \theta^{-2/3} (\theta - \text{sen} \theta)^{5/3} D^{8/3} I^{1/2} \quad [\text{Eq.14}]$$

Deste modo, tem-se que:

$$k = 0,0496062 \theta^{-2/3} (\theta - \text{sen} \theta)^{5/3} \quad [\text{Eq.15}]$$

ou

$$Q = \frac{1}{n} k D^{8/3} I^{1/2} \quad [\text{Eq.16}]$$

Isolando-se "k":

$$k = Q n D^{-8/3} I^{-1/2} \quad [\text{Eq.17}]$$

Onde:

k = constante;

Q = vazão (m³/s);

n = coeficiente de Manning (m^{-1/3}.s);

D = diâmetro (m);

I = declividade (m/m).

Emprega-se nos cálculos o escoamento uniforme, o que permite igualar a declividade I da Equação 17 à declividade da galeria Sg.

$$k = Q n D^{-8/3} S_g^{-1/2} \quad [\text{Eq.18}]$$

Onde:

Sg = declividade da galeria (m/m).

4.2 OBTENÇÃO DO ÂNGULO CENTRAL DA SUPERFÍCIE LIVRE "θ" EM FUNÇÃO DE "k"

Para determinar o ângulo central conhecendo-se a vazão, a declividade e o diâmetro após o cálculo da constante "k", fez-se necessário determinar a

equação de "θ" em função da constante "k". A partir de valores de "θ"(rad) geraram-se valores de "k", de acordo com a Equação 15, observando a faixa de variação de "h/D".

Por meio da relação altura lâmina de água-diâmetro (h/D) também em função do ângulo central através da Equação 6, fixou-se uma faixa para o enchimento entre 10 % e 85 % visto que valores abaixo do primeiro isentariam para os trechos iniciais a necessidade de galerias de águas pluviais e valores acima do último levariam à situação de conduto forçado, o que não se recomenda para o dimensionamento das galerias de águas pluviais. Pôde-se então calcular "k" em função do ângulo central para esta faixa (Tabela 3). Tal seqüência é apresentada no fluxograma (Figura 3).

Estabeleceu-se através de um ajuste polinomial de quinto grau a Equação 19. Tal ajuste mostrou-se o mais acurado com um coeficiente de determinação de 99,98%.

$$\theta = 5915,8.k^5 - 5201,2.k^4 + 1786,6.k^3 - 298,89.k^2 + 32,113.k + 1,1487 \quad [\text{Eq.19}]$$

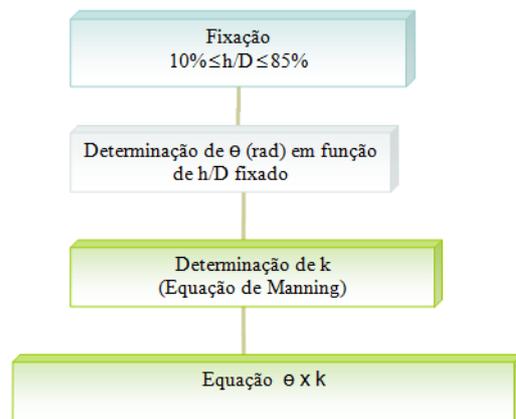


Figura 3: Fluxograma das etapas para obtenção da equação de θ x k.

Tabela 3: Valores calculados para seção circular

θ (rad)	h/D	K
1,2915	0,10068	0,0066009
1,3090	0,10332	0,0069697
1,3265	0,10599	0,0073531
1,3439	0,10870	0,0077514
1,3614	0,11143	0,0081648
1,3788	0,11419	0,0085938
1,3963	0,11692	0,0090272
1,4138	0,11965	0,0094606
1,4313	0,12238	0,0098940
1,4488	0,12511	0,0103274
1,4663	0,12784	0,0107608
1,4838	0,13057	0,0111942
1,5013	0,13330	0,0116276
1,5188	0,13603	0,0120610
1,5363	0,13876	0,0124944
1,5538	0,14149	0,0129278
1,5713	0,14422	0,0133612
1,5888	0,14695	0,0137946
1,6063	0,14968	0,0142280
1,6238	0,15241	0,0146614
1,6413	0,15514	0,0150948
1,6588	0,15787	0,0155282
1,6763	0,16060	0,0159616
1,6938	0,16333	0,0163950
1,7113	0,16606	0,0168284
1,7288	0,16879	0,0172618
1,7463	0,17152	0,0176952
1,7638	0,17425	0,0181286
1,7813	0,17698	0,0185620
1,7988	0,17971	0,0189954
1,8163	0,18244	0,0194288
1,8338	0,18517	0,0198622
1,8513	0,18790	0,0202956
1,8688	0,19063	0,0207290
1,8863	0,19336	0,0211624
1,9038	0,19609	0,0215958
1,9213	0,19882	0,0220292
1,9388	0,20155	0,0224626
1,9563	0,20428	0,0228960
1,9738	0,20701	0,0233294
1,9913	0,20974	0,0237628
2,0088	0,21247	0,0241962
2,0263	0,21520	0,0246296
2,0438	0,21793	0,0250630
2,0613	0,22066	0,0254964
2,0788	0,22339	0,0259298
2,0963	0,22612	0,0263632
2,1138	0,22885	0,0267966
2,1313	0,23158	0,0272300
2,1488	0,23431	0,0276634
2,1663	0,23704	0,0280968
2,1838	0,23977	0,0285302
2,2013	0,24250	0,0289636
2,2188	0,24523	0,0293970
2,2363	0,24796	0,0298304
2,2538	0,25069	0,0302638
2,2713	0,25342	0,0306972
2,2888	0,25615	0,0311306
2,3063	0,25888	0,0315640
2,3238	0,26161	0,0319974
2,3413	0,26434	0,0324308
2,3588	0,26707	0,0328642
2,3763	0,26980	0,0332976
2,3938	0,27253	0,0337310
2,4113	0,27526	0,0341644
2,4288	0,27799	0,0345978
2,4463	0,28072	0,0350312
2,4638	0,28345	0,0354646
2,4813	0,28618	0,0358980
2,4988	0,28891	0,0363314
2,5163	0,29164	0,0367648
2,5338	0,29437	0,0371982
2,5513	0,29710	0,0376316
2,5688	0,29983	0,0380650
2,5863	0,30256	0,0384984
2,6038	0,30529	0,0389318
2,6213	0,30802	0,0393652
2,6388	0,31075	0,0397986
2,6563	0,31348	0,0402320
2,6738	0,31621	0,0406654
2,6913	0,31894	0,0410988
2,7088	0,32167	0,0415322
2,7263	0,32440	0,0419656
2,7438	0,32713	0,0423990
2,7613	0,32986	0,0428324
2,7788	0,33259	0,0432658
2,7963	0,33532	0,0436992
2,8138	0,33805	0,0441326
2,8313	0,34078	0,0445660
2,8488	0,34351	0,0449994
2,8663	0,34624	0,0454328
2,8838	0,34897	0,0458662
2,9013	0,35170	0,0462996
2,9188	0,35443	0,0467330
2,9363	0,35716	0,0471664
2,9538	0,35989	0,0475998
2,9713	0,36262	0,0480332
2,9888	0,36535	0,0484666
3,0063	0,36808	0,0488999
3,0238	0,37081	0,0493333
3,0413	0,37354	0,0497667
3,0588	0,37627	0,0501999
3,0763	0,37900	0,0506333
3,0938	0,38173	0,0510667
3,1113	0,38446	0,0514999
3,1288	0,38719	0,0519333
3,1463	0,38992	0,0523667
3,1638	0,39265	0,0527999
3,1813	0,39538	0,0532333
3,1988	0,39811	0,0536667
3,2163	0,40084	0,0540999
3,2338	0,40357	0,0545333
3,2513	0,40630	0,0549667
3,2688	0,40903	0,0553999
3,2863	0,41176	0,0558333
3,3038	0,41449	0,0562667
3,3213	0,41722	0,0566999
3,3388	0,41995	0,0571333
3,3563	0,42268	0,0575667
3,3738	0,42541	0,0579999
3,3913	0,42814	0,0584333
3,4088	0,43087	0,0588667
3,4263	0,43360	0,0592999
3,4438	0,43633	0,0597333
3,4613	0,43906	0,0601667
3,4788	0,44179	0,0605999
3,4963	0,44452	0,0610333
3,5138	0,44725	0,0614667
3,5313	0,44998	0,0618999
3,5488	0,45271	0,0623333
3,5663	0,45544	0,0627667
3,5838	0,45817	0,0631999
3,6013	0,46090	0,0636333
3,6188	0,46363	0,0640667
3,6363	0,46636	0,0644999
3,6538	0,46909	0,0649333
3,6713	0,47182	0,0653667
3,6888	0,47455	0,0657999
3,7063	0,47728	0,0662333
3,7238	0,48001	0,0666667
3,7413	0,48274	0,0670999
3,7588	0,48547	0,0675333
3,7763	0,48820	0,0679667
3,7938	0,49093	0,0683999
3,8113	0,49366	0,0688333
3,8288	0,49639	0,0692667
3,8463	0,49912	0,0696999
3,8638	0,50185	0,0701333
3,8813	0,50458	0,0705667
3,8988	0,50731	0,0709999
3,9163	0,51004	0,0714333
3,9338	0,51277	0,0718667
3,9513	0,51550	0,0722999
3,9688	0,51823	0,0727333
3,9863	0,52096	0,0731667
4,0038	0,52369	0,0735999
4,0213	0,52642	0,0740333
4,0388	0,52915	0,0744667
4,0563	0,53188	0,0748999
4,0738	0,53461	0,0753333
4,0913	0,53734	0,0757667
4,1088	0,54007	0,0761999
4,1263	0,54280	0,0766333
4,1438	0,54553	0,0770667
4,1613	0,54826	0,0774999
4,1788	0,55099	0,0779333
4,1963	0,55372	0,0783667
4,2138	0,55645	0,0787999
4,2313	0,55918	0,0792333
4,2488	0,56191	0,0796667
4,2663	0,56464	0,0800999
4,2838	0,56737	0,0805333
4,3013	0,57010	0,0809667
4,3188	0,57283	0,0813999
4,3363	0,57556	0,0818333
4,3538	0,57829	0,0822667
4,3713	0,58102	0,0826999
4,3888	0,58375	0,0831333
4,4063	0,58648	0,0835667
4,4238	0,58921	0,0839999
4,4413	0,59194	0,0844333
4,4588	0,59467	0,0848667
4,4763	0,59740	0,0852999
4,4938	0,60013	0,0857333
4,5113	0,60286	0,0861667
4,5288	0,60559	0,0865999
4,5463	0,60832	0,0870333
4,5638	0,61105	0,0874667
4,5813	0,61378	0,0878999
4,5988	0,61651	0,0883333
4,6163	0,61924	0,0887667
4,6338	0,62197	0,0891999
4,6513	0,62470	0,0896333
4,6688	0,62743	0,0900667
4,6863	0,63016	0,0904999
4,7038	0,63289	0,0909333
4,7213	0,63562	0,0913667
4,7388	0,63835	0,0917999
4,7563	0,64108	0,0922333
4,7738	0,64381	0,0926667
4,7913	0,64654	0,0930999
4,8088	0,64927	0,0935333
4,8263	0,65200	0,0939667
4,8438	0,65473	0,0943999
4,8613	0,65746	0,0948333
4,8788	0,66019	0,0952667
4,8963	0,66292	0,0956999
4,9138	0,66565	0,0961333
4,9313	0,66838	0,0965667
4,9488	0,67111	0,0969999
4,9663	0,67384	0,0974333
4,9838	0,67657	0,0978667
5,0013	0,67930	0,0982999
5,0188	0,68203	0,0987333
5,0363	0,68476	0,0991667
5,0538	0,68749	0,0995999
5,0713	0,69022	0,1000333
5,0888	0,69295	0,1004667
5,1063	0,69568	0,1008999
5,1238	0,69841	0,1013333
5,1413	0,70114	0,1017667
5,1588	0,70387	0,1021999
5,1763	0,70660	0,1026333
5,1938	0,70933	0,1030667
5,2113	0,71206	0,1034999
5,2288	0,71479	0,1039333
5,2463	0,	

4.3 OBTENÇÃO DO ÂNGULO CENTRAL "θ" EM FUNÇÃO DA ÁREA MOLHADA "A_m"

Para se determinar o ângulo central em função da área correspondente a uma certa vazão e velocidade, fez-se necessário determinar uma equação. Deste modo, fixou-se novamente uma faixa para a relação altura-diâmetro (h/D) entre 10% e 85 % pelo mesmo propósito já mencionado anteriormente

Com o cálculo de "h/D" em função do ângulo central "θ", variou-se então o diâmetro da tubulação (300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500 e 2000 mm) para o cálculo da área da seção transversal sob determinado ângulo central. Assim obteve-se um ajuste satisfatório com um coeficiente de determinação de praticamente 100 % para todos os diâmetros analisados. A Figura 5 demonstra a equação e o gráfico para o diâmetro de 300 mm. Tais etapas são apresentadas no fluxograma (Figura 4).

Na Tabela 4, percebem-se as diversas equações do ângulo central em função da área e em função do diâmetro.

Visto o dispendioso trabalho que seria o uso destas equações para o cálculo do ângulo central, decidiu-se fazer uma análise adimensional.

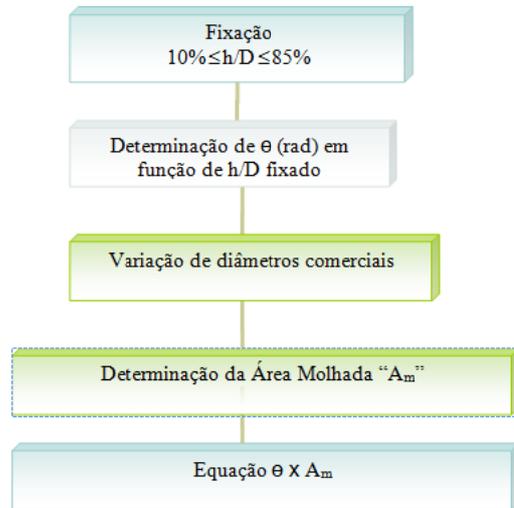


Figura 4: Fluxograma das etapas para obtenção da equação de θ x A_m.

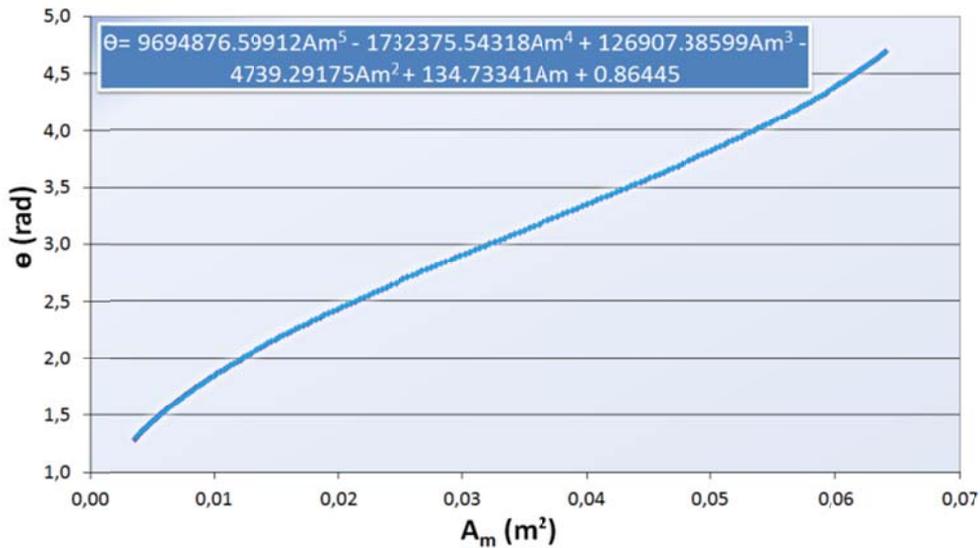


Figura 5. Ângulo central (θ) versus área molhada (A_m) para o diâmetro de 300 mm

Tabela 4: Equações do ângulo central em função da área e do diâmetro da tubulação	
D (mm)	Equações θ x A _m
300	$\theta = 9694876,59912 \cdot A_m^5 - 1732375,54318 \cdot A_m^4 + 126907,38599 \cdot A_m^3 - 4739,29175 \cdot A_m^2 + 134,73341 \cdot A_m + 0,86445$
400	$\theta = 545952,57611 \cdot A_m^5 - 173433,16561 \cdot A_m^4 + 22586,78818 \cdot A_m^3 - 1499,54153 \cdot A_m^2 + 75,78754 \cdot A_m + 0,86445$
.	.
.	.
1500	$\theta = 0,99276 \cdot A_m^5 - 4,43488 \cdot A_m^4 + 8,12207 \cdot A_m^3 - 7,58287 \cdot A_m^2 + 5,38934 \cdot A_m + 0,86445$
2000	$\theta = 0,05591 \cdot A_m^5 - 0,44399 \cdot A_m^4 + 1,44555 \cdot A_m^3 - 2,39927 \cdot A_m^2 + 3,03150 \cdot A_m + 0,86445$

Deste modo, trabalhou-se com a razão adimensional da área molhada "A_m" pela área total "A_t" referente a cada diâmetro. Considerando-se a mesma faixa para a relação altura-diâmetro entre 0,10 e 0,85, calculou-se para cada diâmetro a área molhada e área total e obteve-se a razão adimensional "β". Verificou-se, então, que a relação adimensional manteve-se, independentemente do diâmetro da tubulação, apenas variando com a relação da área molhada "A_m" pela área total "A_t".

Pelo ajuste obteve-se Equação 20 para todos os diâmetros do ângulo central "θ" em função da razão da área molhada e da área total.

$$\theta = 17,108 \beta^5 - 43,248 \beta^4 + 44,821 \beta^3 - 23,679 \beta^2 + 9,524 \beta + 0,864 \quad [\text{Eq.20}]$$

Onde:

$$\beta = A_m/A_t.$$

Em síntese de posse da vazão total "Q", do coeficiente de Manning "n", do diâmetro "D" e da declividade da galeria "Sg", calcula-se "k" pela equação 18. Obtém-se o ângulo central "θ" pela equação 19. Determinam-se, então, a relação "h/D" pela equação 6 que deverá estar entre 0,10 e 0,85, a área molhada "A_m" e por fim a velocidade "V". Caso "h/D" esteja fora dos limites fixa-se este no respectivo limite que não fora respeitado e determina-se a nova declividade "Sg" do trecho de galeria. Caso seja necessário corrigir a velocidade que se encontre fora dos limites de 0,75 m/s e 5,0 m/s, fixa-se esta no respectivo valor que não foi observado, calcula-se a área molhada, obtém-se a relação beta "β" (A_m/A_t). Calcula-se o ângulo central (Equação 20), calcula-se k e a declividade da galeria, finalizando o processo.

Como dito anteriormente, este processo pode ser disposto em planilha eletrônica, facilitando o processo de aprendizagem aos alunos em formação, tão quanto auxiliando os profissionais que lidam com projetos, agilizando o processo de dimensionamento de galerias de águas pluviais.

5. RESULTADOS

5.1 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO DE GALERIAS COM EMPREGO DE DUAS METODOLOGIAS

A comparação em questão diz respeito aos resultados obtidos por dois métodos de cálculo das galerias em que um utiliza tabela e outro emprega equação.

Para a comparação selecionaram-se trechos com velocidades variando entre os limites estabelecidos de 0,75 m/s e 5,0 m/s. Tais trechos compreenderam os diversos diâmetros comerciais empregados. Na Tabela 5 têm-se os valores encontrados para a velocidade e para a relação altura lâmina d'água-diâmetro, utilizando o procedimento tradicional de consulta a tabela (V_{pd} e h/D_{pd}) e a sistemática aqui proposta que emprega exclusivamente equações (V_{prop} e h/D_{prop}).

O dimensionamento utilizando a tabela baseada na Equação de Manning pauta-se na determinação inicial da vazão a seção plena (Q_p). Tendo a vazão a ser conduzida no trecho Q, obtém-se a razão Q/Q_p. Com este valor, busca-se na tabela a relação Q/Q_p, com os valores correspondentes valores para V/V_p e h/D. Caso Q/Q_p não se apresente na tabela, faz-se a interpolação. O mesmo ocorre caso os limites para a velocidade e relação altura lâmina d'água-diâmetro, não são estabelecidos. Arbitra-se, novamente, o diâmetro e repete-se o procedimento com novas interpolações.

Com o equacionamento proposto, não se utiliza tabela para o dimensionamento e as respostas são obtidas conforme a sequencia apresentada anteriormente. A disposição em planilha eletrônica com células inter-relacionadas agiliza ainda o processo, favorecendo sua aplicação.

Verificam-se pelas Figuras 6 e 7 que os valores são praticamente os mesmos, tanto para a velocidade quanto para a relação altura lâmina d'água-diâmetro.

A sistematização com emprego de equações mostrou-se mais eficaz, pela economia de esforço e de tempo.

Tabela 5: Comparação dos valores obtidos pelos diferentes métodos de dimensionamento.

V _{prop}	h/D _{prop}	V _{pd}	h/D _{pd}
0,75	0,732	0,75	0,733
1,30	0,744	1,30	0,745
1,85	0,782	1,85	0,783
2,62	0,578	2,63	0,576
3,21	0,526	3,20	0,527
3,83	0,851	3,83	0,850
4,31	0,413	4,29	0,414
4,96	0,391	4,96	0,391

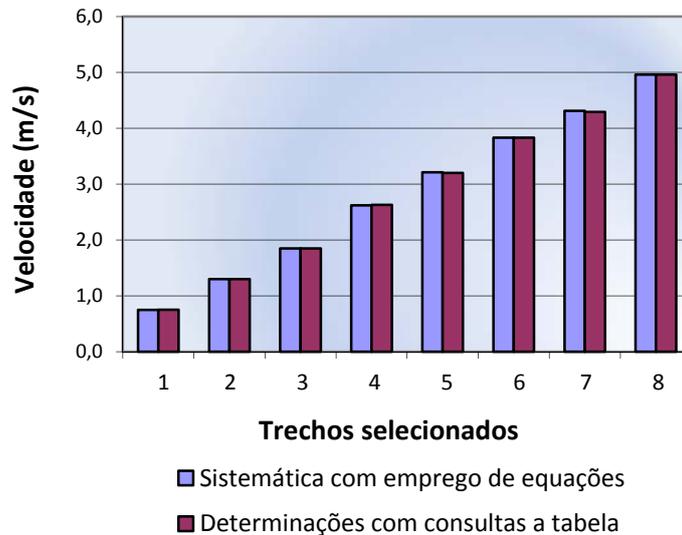


Figura 6: Comparação entre as velocidades calculadas com consultas a tabela e pela sistemática com emprego de equações.

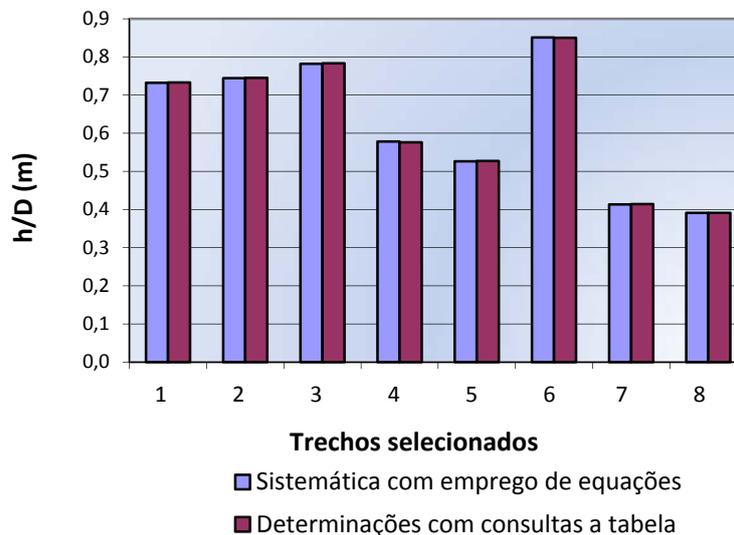


Figura 7: Comparação entre a relação altura lâmina d'água-diâmetro calculada com consulta a tabela e pela sistemática com emprego de equações.

6. CONCLUSÕES

As equações obtidas para o dimensionamento das galerias de águas pluviais em substituição ao uso de tabelas representam um avanço em termos de ganho de tempo, tendo seus resultados respaldados por coeficientes de determinação bem próximos de 100%.

Estas equações possibilitam juntamente com planilhas eletrônicas uma alternativa para o dimensionamento de galerias de águas pluviais, visto a grande abrangência dos computadores pessoais e a ampla utilização dos mesmos nos diversos setores da esfera pública. Deve-se ressaltar também a análise

mais rápida de situações adversas no dimensionamento quanto à busca de valores em tabelas e interpolações sucessivas para chegar a resultados satisfatórios.

O dimensionamento proposto aqui aborda o regime permanente, não considerando condições em regime gradualmente variado como situações de remanso, que em casos específicos deve ser avaliada. No entanto, o estudo possibilita a implementação do equacionamento em linguagem computacional bem como melhorias na consideração do regime variado para o cálculo. Visto a possibilidade da utilização de planilhas eletrônicas, abrem-se possibilidades para a análise de custos integrada ao dimensionamento, possibilitando ao projetista ou ao tomador de decisões a solução ótima na

alteração do diâmetro ou da declividade para o trecho, facilitada aqui pelas equações e não ao uso sucessivo de tabelas para a solução.

7. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido como parte da dissertação de mestrado em Engenharia do Meio Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás. O primeiro autor agradece ao CNPq pela bolsa referente ao projeto CT-Hidro/Edital 14/2005 que subsidiou toda a pesquisa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO NETTO, J. M; VILLELA, S. M. **Manual de hidráulica**. 5. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1969.
- _____. ARAÚJO, R. (coord.). **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.
- BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **A Questão da Drenagem Urbana no Brasil: Elementos para Formulação de uma Política Nacional de Drenagem Urbana**. Brasília: Ministério das Cidades, Texto Para Discussão, 2003.
- _____. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Guia para a elaboração de planos municipais de saneamento**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006. 152 p.
- CIRILO, J. M. (Org). **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- DAEE/CETESB. **Drenagem urbana – manual de projeto**. 2. ed. São Paulo: DAEE/CETESB, 1980. 486p.
- DEBO, T. N; REESE, A. J. **Municipal stormwater management**. 2. ed. Boca Raton, Flórida: Lewis Publishers, 2003.
- FESTI, A. V. **Equações de chuva brasileira**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais, João Pessoa, Paraíba, 20p, 2005.
- METHODS, H; DURRANS, S. R. **Stormwater conveyance modeling and design**. First Edition. Waterbury, USA: Haestad Press, 2003
- PMG – PREFEITURA MUNICIPAL DE GOIÂNIA. **Drenagem Pluvial Urbana: Memorial Justificativo**. Anexo IV. Goiânia, 2005. 11p.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 2. ed. São Carlos: EESC-USP, 1999. cap. 2, p.13.
- SAATÇI, A. **Velocity and depth of flow calculations in partially filled pipes**. ASCE Journal of Environmental Engineering, vol. 116, n. 6, p.1202-1208, nov/dec. 1990.
- SILVEIRA, A. L. L da. **Hidrologia urbana no Brasil**. In: Braga, B. P. F; Tucci, C. E. M; Tozzi, M. Drenagem urbana: gerenciamento, simulação, controle. 1ª.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1998. p.8-25.
- SMITH, M. B. Comment on ‘**Analisis and modeling of flooding in urban drainage systems**’. Journal of Hydrology, Elsevier, 317, 355-363, 2006.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia ciência e aplicação**. 3 ed. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS/ABRH, 2004. 943p.
- WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB, 1978. 477p.