

# Método para diâmetro e fator de atrito: rede de distribuição

• **Data de entrada:**  
26/10/2015

• **Data de aprovação:**  
05/01/2016

## *Diameter and friction factor method: distribution network*

Renata Shirley de Andrade Araújo | Alessandro de Araújo Bezerra

DOI 10.4322/dae.2016.005

### Resumo

Além dos limites de velocidade presentes na NBR 12218/1994, em algumas companhias de saneamento, é exigido que o máximo gradiente hidráulico seja igual a 8m/km, como estabelecido na antiga NB 594/1977, uma vez que isso permite a ampliação de vazão. Neste trabalho desenvolveu-se uma tabela de seleção de diâmetros, a ser aplicada em trechos de redes de distribuição, que atende os critérios de velocidade da NBR 12218/1994 e visa atender, ao máximo possível, o critério de gradiente hidráulico da NB 594/1977. A tabela foi comparada às três mais usuais e apresentou diâmetros que atendem principalmente à norma atual. Com o uso da nova tabela, foram desenvolvidas equações para o cálculo do fator de atrito em função da vazão, que apresentaram bons resultados quando comparados à Colebrook e White. Por fim, foram realizadas nove simulações de dimensionamento de uma rede de distribuição para comprovar a eficiência da tabela de seleção de diâmetros e as equações para cálculo do fator de atrito.

**Palavras-chave:** seleção de diâmetros; fator de atrito; redes de distribuição.

### Abstract

*Some sanitation companies set the actual velocity limits in the Brazilian NBR 12218/1994 and the old hydraulic gradient limit on the NB 594/1977 to design a water distribution network. A diameters selection table was developed to agree with the velocity limits and, as much as possible, to agree with the hydraulic gradient limit. The developed table was compared to the three most usual tables and presents diameter that mainly agrees with the NBR 12218/1994. With the developed table using, it was developed friction factor equations that depend only on the flow. These equations presented good results when compared to Colebrook and White equations. Finally, nine simulations of sizing a water distribution network were performed to prove the efficiency of the developed diameters selection table and of the developed friction factor equations.*

**Keywords:** diameters selection; friction factor; water distribution networks.

**Renata Shirley de Andrade Araújo**<sup>1</sup> - Doutoranda em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Recursos Hídricos pela mesma universidade. Engenheira civil pela mesma universidade. Professora assistente do Departamento de Recursos Hídricos, Geotecnia e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Piauí (UFPI).

**Alessandro de Araújo Bezerra** - Doutorando em Recursos Hídricos da UFC. Mestre em Recursos Hídricos pela mesma universidade. Engenheiro civil pela mesma universidade. Professor assistente do Departamento de Recursos Hídricos, Geotecnia e Saneamento Ambiental da UFPI.

\* **Endereço para correspondência:** <sup>1</sup> Universidade Federal do Piauí – Campus Universitário Ministro Petrônio Portella – Centro de Tecnologia – Departamento de Recursos Hídricos, Geotecnia e Saneamento Ambiental (Bloco 7) – Ininga – Teresina-PI. Telefone: (86) 3237-1825. E-mail: renatashirley@ufpi.edu.br.

## INTRODUÇÃO

Uma das mais comuns dificuldades ao projetar uma rede de distribuição de água é definir o diâmetro a ser utilizado para o dimensionamento de seus trechos, uma vez que, para alguns intervalos de vazão, mais de um diâmetro atende ao estabelecido pela NBR 12218:1994.

Como critério de dimensionamento, a citada norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) determina que a velocidade mínima nas tubulações da rede deve ser de 0,6 m/s, enquanto a máxima deve ser de 3,5 m/s.

Para Tsutiya (2006), as baixas velocidades favorecem a durabilidade, do ponto de vista de desgaste por atrito, e minimizam os efeitos de transitórios hidráulicos, mas facilitam o depósito de materiais existentes na água. Heller e Pádua (2010) apresentam que o limite mínimo de 0,6 m/s deve ser adotado para minimizar o desgaste da tubulação por atrito e o depósito de materiais em suspensão existentes na água.

Tsutiya (2006) ainda alerta que velocidades altas permitem menores diâmetros, ou seja, menores custos de aquisição e assentamento de tubulação, porém causam ruídos ao longo do escoamento, facilitam o desgaste da tubulação por atrito e cavitação, aumentando os custos de manutenção, além de causar maiores perdas de carga, o que aumenta os custos com bombeamento ou altura de reservatório. Por sua vez, Heller e Pádua (2010) informam que o limite máximo de 3,5 m/s deve ser adotado para minimizar o desgaste das tubulações e acessórios devido ao atrito e o efeito de ruídos desagradáveis, assim como para limitar o gradiente hidráulico dos trechos da tubulação.

Discorrem, ainda, que redes de distribuição de água são dimensionadas para atender a uma projeção populacional e que, muitas vezes, devido a problemas como crescimento desordenado, adensamento populacional ou aumento do consumo *per capita* da região, a vazão nas tubulações costu-

ma ser maior que a prevista, aumentando, também, a velocidade projetada. Assim, não é aconselhado projetar os trechos das redes de distribuição com velocidades muito próximas de 3,5 m/s.

Apesar de não haver nada estabelecido pela NBR 12218:1994, alguns autores, como Cardoso et al. (2008), acreditam que os diâmetros das tubulações de uma rede de distribuição de água dependem, também, da magnitude da perda de carga admissível no sistema pelo projetista.

Segundo Tsutiya (2006), a antiga norma da ABNT – NB 594:1977 – recomendava que os limites máximos de vazão para cada diâmetro e material das tubulações secundárias fossem aqueles cujo gradiente hidráulico não superasse 8 m/km. Esse critério acabou sendo ampliado para tubulações principais. Vários autores, em suas pesquisas ou projetos, continuam a usar o critério do máximo gradiente hidráulico como limitante na vazão dos trechos de uma rede de distribuição, como, por exemplo, Gameiro (2003) e Barreto et al. (2006).

Além disso, algumas prefeituras, como a de Rio Acima (2013), em Minas Gerais, e a de Vitória (2009), no Espírito Santo, assim como algumas companhias de saneamento, como, por exemplo, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE, 2010) e a Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA, 2004), utilizam o critério do máximo gradiente hidráulico de 8 m/km como limitante de vazão em cada trecho das redes de distribuição. A justificativa das companhias de saneamento para a adoção desse critério é que permite a ampliação de vazão dentro das tubulações, excluindo a necessidade de substituição por diâmetros maiores.

Com base no grande uso dos dois critérios de dimensionamento (limites de velocidade e de gradiente hidráulico), tabelas ou gráficos que apresentassem os limites de vazão para os diâmetros de redes de distribuição que atendessem, ao máximo possível, a ambos os critérios facilitariam

bastante o trabalho de projetistas e pesquisadores no que se trata de implantação, ampliação, manutenção e outros estudos sobre redes de distribuição de água.

Há muito tempo, buscam-se novas equações empíricas para a substituição da equação de Colebrook-White para o cálculo do fator de atrito por equações mais simples de ser aplicadas. Assim, de posse de uma tabela de diâmetros que atenda aos critérios mencionados, é possível criar equações para o cálculo do fator de atrito que auxiliem o dimensionamento de redes de distribuição sem a necessidade de cálculos iterativos, como exige a equação de Colebrook-White.

### OBJETIVOS

Obter os limites de vazões máximas e mínimas para cada diâmetro comercial de tubulações em PVC para redes de distribuição de água, visando a atender, ao máximo, aos critérios de velocidade estabelecidos pela atual NBR 12218:1994 e aos critérios de gradiente hidráulico determinados

na antiga NB 594:1977. De posse dos limites, criar equações empíricas, que atendam a esses limites, para o cálculo do fator de atrito. Além disso, aplicar o conceito criado no cálculo de uma rede de distribuição e comparar os resultados e atendimento à norma vigente considerando a utilização da tabela de diâmetros proposta e das três tabelas mais usuais para seleção de diâmetro de redes de distribuição, além de uma das equações desenvolvidas.

### METODOLOGIA

É de conhecimento geral, entre pesquisadores e projetistas, que a utilização do PVC para diâmetros com até 500 mm, em redes de distribuição de água, é prioridade, sendo aceita por critérios técnicos e, principalmente, econômicos.

Inicialmente, para cada um dos diâmetros internos dos tubos de PVC, apresentados na Tabela 1, com base nos limites de velocidade estabelecidos pela NBR 12218:1994, foram calculadas suas vazões mínimas e máximas.

**Tabela 1** – Material e diâmetro interno (DI) para cada diâmetro nominal (DN).

Material	DN (mm)	DI (mm)
PVC PBA CL12	50	54,6
PVC PBA CL12	60	68,2
PVC PBA CL12	75	77,2
PVC PBA CL12	100	100,0
PVC DEFoFo	150	156,4
PVC DEFoFo	200	204,2
PVC DEFoFo	250	252,0
PVC DEFoFo	300	299,8
PVC DEFoFo	350	347,6
PVC DEFoFo	400	394,6
PVC DEFoFo	500	489,4

Fonte: Tigre S/A – Tubos e Conexões (2011).

Utilizando a Equação 1, de Swamee-Jain, também para cada diâmetro interno, foram calculadas as vazões máximas considerando o critério do máximo gradiente hidráulico de 8 m/km estabelecido pela NB 594:1977 e ainda utilizado por várias entidades de saneamento.

$$Q = -\frac{\pi D^2 \sqrt{gDJ}}{\sqrt{2}} \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{1,78v}{D\sqrt{gDJ}}\right) \quad 1$$

Em que: Q (m<sup>3</sup>/s) é a vazão máxima, D (m) é o diâmetro interno da tubulação, g (9,806 m/s<sup>2</sup>) é a aceleração da gravidade, J (0,008 m/m) é o gradiente hidráulico, ε (0,00006 m, conforme recomenda Tigre S/A – Tubos e Conexões [2011]) é a rugosidade absoluta do tubo de PVC e v (1,01 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, conforme recomenda Rossman [2000]) é a viscosidade cinemática da água.

Em seguida, por meio da Equação 2, de Colebrook-White, e da Equação 3, de Darcy-Weisbach, foi possível encontrar os valores de perda de carga unitária, mínimos e máximos, para cada diâmetro.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad 2$$

Em que: f (adimensional) é o fator de atrito e Re<sub>y</sub> (adimensional) é o número de Reynolds para cada valor de velocidade e diâmetro.

$$J = \frac{f V^2}{D 2g} \quad 3$$

Os cálculos realizados possibilitaram a construção da Tabela 2, que apresenta para cada diâmetro as vazões mínima e máxima para os dois critérios, velocidade máxima para o critério do máximo gradiente hidráulico e perdas de carga unitária mínima e máxima.

**Tabela 2** – Vazões e gradientes hidráulicos mínimos e máximos.

DN (mm)	DI (mm)	Qmin (L/s)	Q (L/s) p/ 8m/km	Qmax (L/s)	V(m/s) p/ 8m/km	J min (m/m)	J max (m/m)
50	54,6	1,405	1,342	8,195	0,573	0,0087	0,2456
60	68,2	2,192	2,436	12,786	0,667	0,0066	0,1862
75	77,2	2,809	3,393	16,383	0,725	0,0056	0,1597
100	100,0	4,712	6,764	27,489	0,861	0,0041	0,1161
150	156,4	11,527	22,168	67,241	1,154	0,0024	0,0671
200	204,2	19,650	44,865	114,622	1,370	0,0017	0,0485
250	252,0	29,926	78,128	174,566	1,566	0,0013	0,0376
300	299,8	42,355	123,417	247,071	1,748	0,0011	0,0305
350	347,6	56,938	182,080	332,137	1,919	0,0009	0,0255
400	394,6	73,376	254,021	428,028	2,077	0,0008	0,0219
500	489,4	112,868	446,719	658,394	2,375	0,0006	0,0170

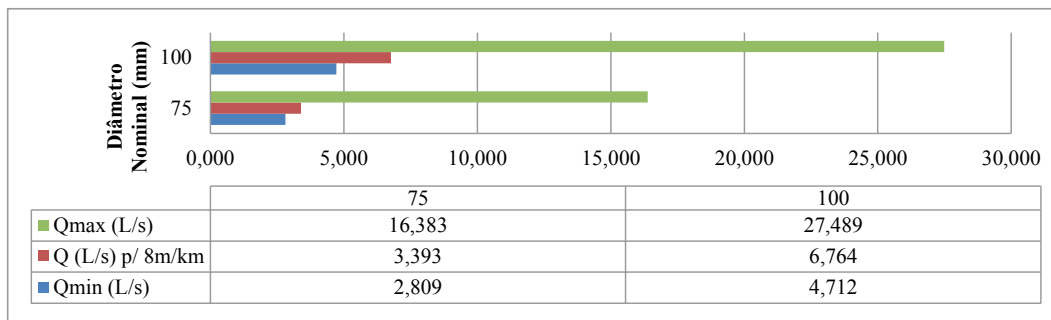


Figura 1 – Relação entre as vazões para DN75 e DN100.

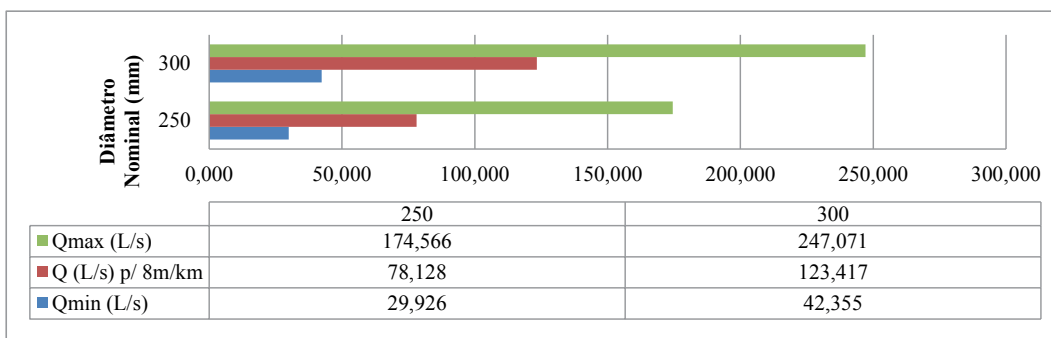


Figura 2 – Relação entre as vazões para DN250 e DN300.

Para facilitar a análise da Tabela 2 e a criação da tabela final de limites de vazões para cada diâmetro, foram criados gráficos que relacionam as vazões de diâmetros subsequentes; por exemplo, a Figura 1 apresenta a relação entre os diâmetros de 75 e 100 mm de PVC PBA e a Figura 2, a relação entre os diâmetros de 250 e 300 mm de PVC DEFoFo.

Atualmente, para selecionar os diâmetros de trechos das redes de distribuição, os projetistas optam pelos valores estabelecidos na Tabela 3.

Em virtude do ano de publicação da tabela de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006), não era usual o DN60. Para encontrar o valor de vazão máxima inserido na Tabela 3, foi desenvolvida uma equação parabólica  $Q(L/s) \times DI(mm)$  envolvendo apenas os diâmetros de PVC PBA.

Além da tabela, Porto (2006) apresenta uma equação (4) para o cálculo da velocidade máxima em função do diâmetro.

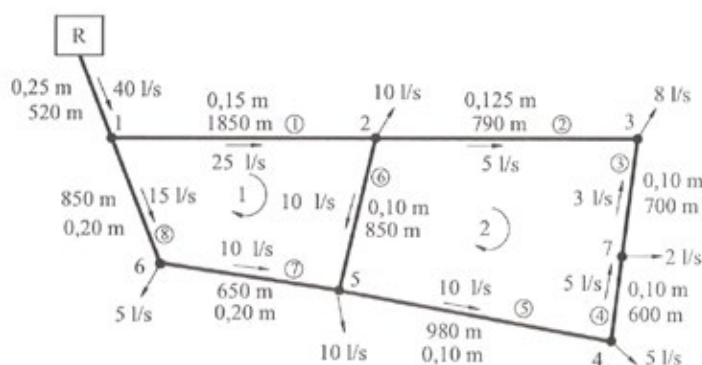
$$V_{max}(m/s) = 0,60 + 1,5D(m) \quad 4$$

Com o auxílio da Tabela 2 e dos gráficos que relacionam as vazões de diâmetros subsequentes, foi possível criar uma tabela que atendesse, ao máximo possível, aos critérios de velocidade estabelecidos pela atual NBR 12218:1994 e aos critérios de gradiente hidráulico determinados na antiga NB 594:1977. Além da tabela, os diâmetros podem ser selecionados mediante gráficos ou equações. Os valores encontrados foram comparados com os valores usuais apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** – Valores usuais de limites de vazão por diâmetro.

Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006)			Azevedo Netto (1998), Heller e Pádua (2010)			Porto (2006)		
DN (mm)	DI (mm)	Qmax (L/s)	DN (mm)	DI (mm)	Qmax (L/s)	DN (mm)	DI (mm)	Qmax (L/s)
50	54,6	1,00	50	54,6	1,40	50	54,6	1,34
60	68,2	1,57	60	68,2	2,30	60	68,2	1,95
75	77,2	2,20	75	77,2	4,00	75	77,2	3,14
100	100	4,70	100	100	8,00	100	100	5,89
150	156,4	14,10	150	156,4	18,00	150	156,4	14,67
200	204,2	28,30	200	204,2	35,00	200	204,2	28,27
250	252	53,90	250	252	54,00	250	252	47,86
300	299,8	84,80	300	299,8	85,00	300	299,8	74,22
350	347,6	125,00	350	347,6	125,00	350	347,6	108,72
400	394,6	176,00	400	394,6	176,00	400	394,6	150,80
500	489,4	314,00	500	489,4	314,00	500	489,4	265,10

Fonte: Adaptado de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006), Azevedo Netto (1998), Heller e Pádua (2010) e Porto (2006).

**Figura 3** – Rede de distribuição simulada.

Fonte: Porto (2006).

De posse de um novo formato de seleção de diâmetros, ao atendê-lo, desenvolveram-se equações empíricas para o cálculo do fator de atrito. Para cada diâmetro comercial de PVC, dentro de seus limites de vazões, pela equação de Colebrook-White, foram calculados fatores de atrito para dez valores de vazão. Assim, com a utilização do *software* Microsoft Excel, foram traçadas as linhas de tendência e, conseqüentemente, desenvolvidas equações para o cálculo do fator de atrito.

As equações desenvolvidas relacionam o fator de atrito em função apenas da vazão, tendo como pré-requisito, para sua utilização, a seleção do diâmetro por meio da tabela proposta neste trabalho. Dependendo da precisão desejada, pode-se optar por calcular o fator de atrito de duas formas: com uma equação só ou com a utilização de uma equação diferente por diâmetro.

Com base nos dados usuais de diâmetros apresentados na Tabela 3 e na tabela de diâmetros

proposta neste trabalho, foi calculada a rede de distribuição apresentada por Porto (2006), mostrada na Figura 3. Foram realizadas nove simulações na rede, calculadas pela equação de Hardy-Cross, das quais sete tiveram suas perdas de carga calculadas pelo método de Hazen-Williams e a seleção do diâmetro realizado, respectivamente, pela tabela de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006), de Azevedo Netto (1998), de Porto (2006), pela tabela proposta neste trabalho, com o pré-dimensionamento pela tabela de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006) e atualização do diâmetro a cada iteração para atender à NBR 12218:1994, com o pré-dimensionamento pela tabela de Azevedo Netto (1998) e atualização do diâmetro e com o pré-dimensionamento pela tabela de Porto (2006) e atualização do diâmetro.

A oitava simulação foi realizada com a utilização da tabela de diâmetro proposta e a perda de carga calculada por meio da equação de Darcy-Weisbach, com o fator de atrito calculado pela equação de Colebrook-White. Finalmente, a nona simulação foi realizada com a utilização da tabela proposta e a perda de carga calculada pela equação universal da perda de carga, com o fator de atrito calculado pela equação proposta neste trabalho.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando a Tabela 2 e a Figura 1, percebe-se que a vazão de 3,393 L/s, para o diâmetro de 75 mm, apresenta o máximo gradiente hidráulico, ou seja, 8 m/km. Entretanto, essa mesma vazão, para o diâmetro de 100 mm, apresenta velocidade inferior a 0,6 m/s, sendo, para esse diâmetro, a vazão que oferece a velocidade mínima aceita pela norma brasileira igual a 4,712 L/s. Assim, as vazões situadas entre 3,393 e 4,712 L/s não atendem ao critério de máximo gradiente hidráulico citado na antiga NB 594:1977, utilizando DN75, nem atendem ao critério de veloci-

dade mínima estabelecido pela NBR 12218:1994, utilizando DN100. Dessa forma, visando a obedecer à norma vigente, para esse intervalo de vazão foi adotado o menor diâmetro nominal entre os dois, mesmo obtendo perdas de carga unitária superiores a 8 m/km.

Esse conceito foi considerado para todos os diâmetros de PVC PBA (50, 60, 75 e 100 mm), tendo em vista que situações homólogas ocorreram para essa faixa de diâmetros.

No entanto, analisando a Tabela 2 e a Figura 2, percebe-se que a vazão de 78,128 L/s, para o diâmetro de 250 mm, apresenta o máximo gradiente hidráulico, ou seja, 8 m/km, sendo que esse valor de vazão, para o diâmetro de 300 mm, apresenta velocidade superior a 0,6 m/s. Para esse diâmetro, a vazão de 42,355 L/s fornece a velocidade mínima estabelecida por norma. Assim, as vazões situadas entre 42,355 e 78,128 L/s atendem a ambos os critérios: o critério de máximo gradiente hidráulico citado na antiga NB 594:1977, utilizando DN250, e o critério de velocidade mínima estabelecido pela NBR 12218:1994, utilizando DN300. Dessa forma, visando a menores custos, para esse intervalo de vazão foi adotado o menor diâmetro nominal entre os dois, sendo que a vazão inicial de DN300 apresenta velocidade superior a 0,6 m/s. Esse conceito foi considerado para todos os diâmetros de PVC DEFoFo (150, 200, 250, 300, 350, 400 e 500 mm), tendo em vista que situações homólogas ocorreram para essa faixa de diâmetros.

Por possuírem pequenas vazões, as tubulações de pequenos diâmetros apresentam pequenas velocidades, já as de grande diâmetro, por terem o limite de vazão dado pela perda de carga unitária, também não obtiveram velocidades próximas a 3,5 m/s, sendo a maior velocidade encontrada igual a 2,375 m/s, para o diâmetro de 500 mm.

**Tabela 4** – Seleção de diâmetro e seus limites.

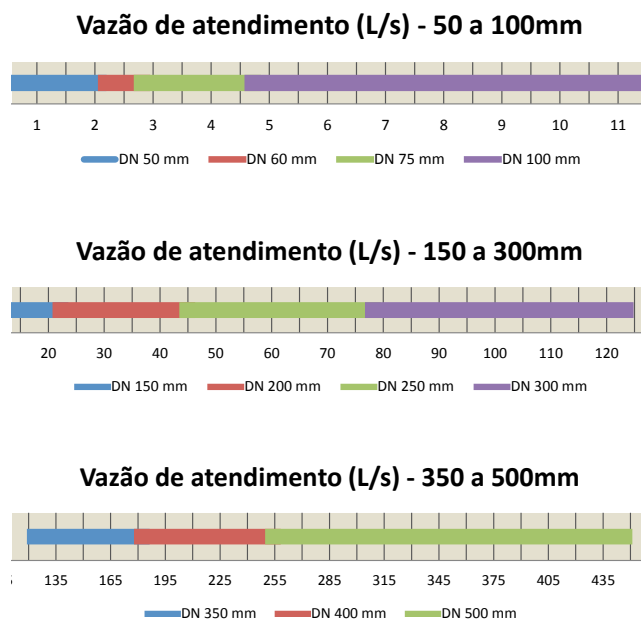
Material	DN (mm)	DI (mm)	Qmax (L/s)	Vmin (m/s)	Vmax (m/s)	J min (m/m)	J max (m/m)
PVC PBA CL12	50	54,6	2,192	-	0,936	-	0,0198
PVC PBA CL12	60	68,2	2,809	0,600	0,769	0,0066	0,0104
PVC PBA CL12	75	77,2	4,712	0,600	1,007	0,0056	0,0148
PVC PBA CL12	100	100,0	11,527	0,600	1,468	0,0041	0,0218
PVC DEFoFo	150	156,4	22,168	0,600	1,154	0,0024	0,0080
PVC DEFoFo	200	204,2	44,865	0,677	1,370	0,0021	0,0080
PVC DEFoFo	250	252	78,128	0,900	1,566	0,0028	0,0080
PVC DEFoFo	300	299,8	123,417	1,107	1,748	0,0034	0,0080
PVC DEFoFo	350	347,6	182,080	1,301	1,919	0,0038	0,0080
PVC DEFoFo	400	394,6	254,021	1,489	2,077	0,0042	0,0080
PVC DEFoFo	500	489,4	446,719	1,350	2,375	0,0027	0,0080

A Tabela 4 apresenta, para cada diâmetro de tubulação de PVC, a vazão máxima, as velocidades mínimas e máximas e os gradientes hidráulicos mínimos e máximos, ou seja, mostra os valores de vazão propostos neste trabalho para seleção do diâmetro dos trechos de uma rede de distribuição de água.

A fim de fornecer uma escolha de diâmetro mais direta, a Figura 4 permite a seleção do diâmetro pelo método visual.

Como os tubos de PVC PBA e PVC DEFoFo apresentaram comportamentos diferentes quanto ao máximo gradiente hidráulico e mínima velocidade em diâmetros subsequentes, para escolher um diâmetro para a rede utilizando equações, por meio do método proposto, foi necessário dividir a faixa de diâmetros entre PBA e DEFoFo.

Os limites de vazão para tubos de PVC PBA em função de seus diâmetros nominais apresentaram um comportamento que se adapta melhor a uma curva do tipo logaritmo, como mostra a Figura 5.

**Figura 4** – Seleção direta de diâmetro.



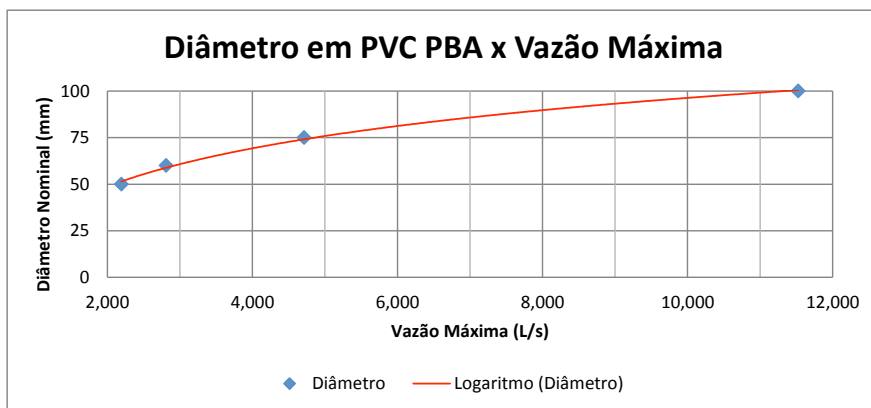


Figura 5 – Linha de tendência dos diâmetros de PVC PBA.

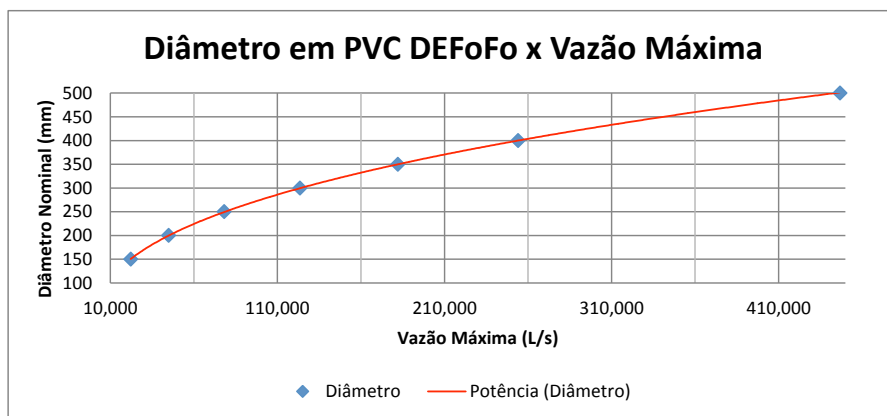


Figura 6 – Linha de tendência dos diâmetros de PVC DEFoFo.

Já os limites de vazão para tubos de PVC DEFoFo em função de seus diâmetros nominais apresentaram um comportamento que se adapta melhor a uma curva do tipo potência, como mostra a Figura 6.

Assim, para escolher um diâmetro de PVC PBA, deve-se calcular o diâmetro pela Equação 5 e

adotar o diâmetro comercial imediatamente superior. De forma semelhante, para PVC DEFoFo, utiliza-se a Equação 6.

Pela Figura 7, percebe-se que as vazões máximas presentes, para cada diâmetro, estabelecidas neste estudo são sempre maiores que as usuais apresentadas na Tabela 3.

$$D_{PBA}(mm) = 29,5795 \ln[Q(L/s)] + 28,2690 \quad 5$$

$$D_{DEFoFo}(mm) = 43,6297[Q(L/s)]^{0,4} \quad 6$$

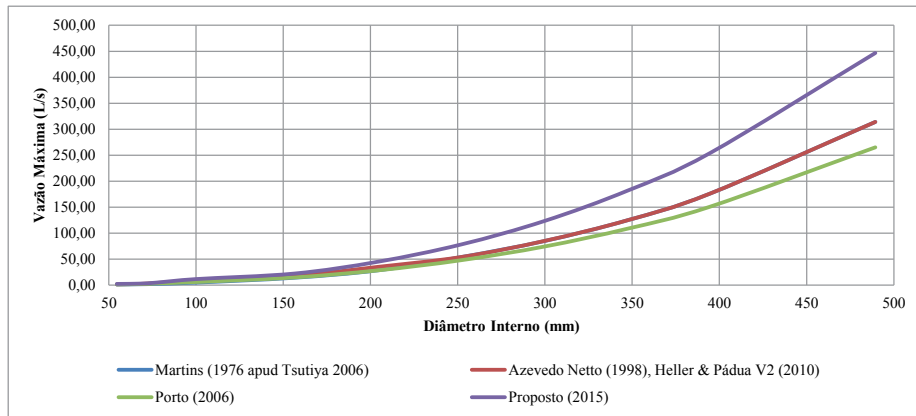


Figura 7 – Comparação entre as tabelas de diâmetros.

As Figuras 8 a 11 apresentam as faixas de funcionamento de velocidade e perda de carga unitária para cada diâmetro nominal, para as tabelas de seleção de diâmetro, respectivamente, de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006), de Azevedo Netto (1998), de Porto (2006) e para a Tabela 4 proposta neste trabalho.

Como se pode observar na Figura 8, pela tabela de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006), em nenhum caso da faixa de vazões, para tubos de PVC PBA, a velocidade mínima é atingida. Para tubos de PVC DEFoFo, os três menores diâmetros comerciais apresentam vazões com velocidades abaixo da mínima. Entretanto, ao analisar o gradiente hidráulico, para todos os diâmetros, o critério de 8 m/km é obedecido.

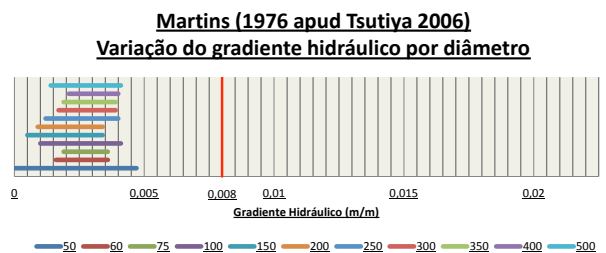
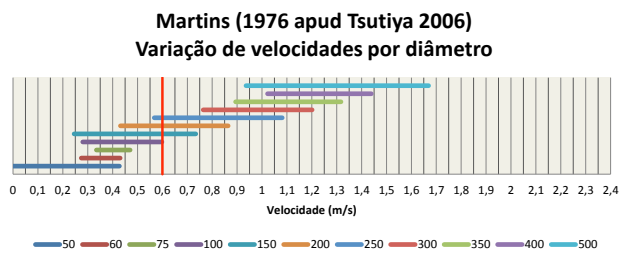


Figura 8 – Faixas de velocidade e perda de carga unitária por diâmetro pela tabela de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006).

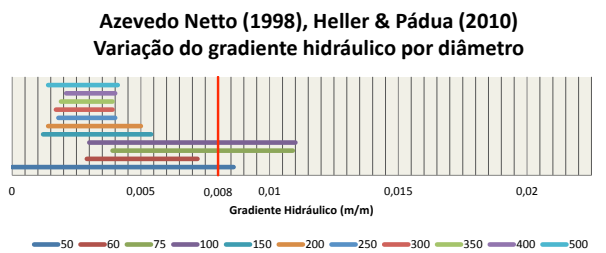
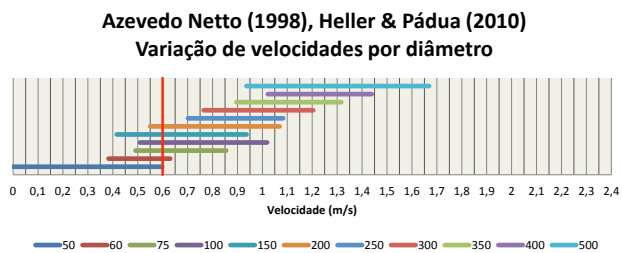


Figura 9 – Faixas de velocidade e perda de carga unitária por diâmetro pela tabela de Azevedo Netto (1998).

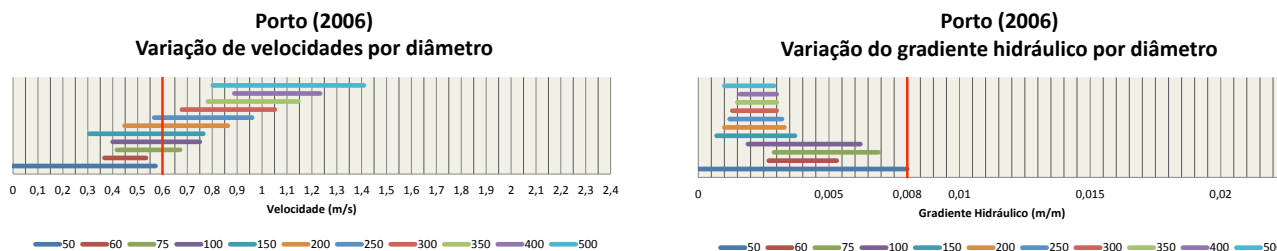


Figura 10 – Faixas de velocidade e perda de carga unitária por diâmetro pela tabela de Porto (2006).

Pela Figura 9, utilizando a tabela de Azevedo Netto (1998), observa-se que os seis menores diâmetros comerciais de PVC apresentam vazões com velocidades abaixo da mínima. Para os trechos com DN50, não é possível alcançar a velocidade mínima estabelecida pela NBR 12218:1994. Entretanto, ao analisar o gradiente hidráulico, apenas três diâmetros ultrapassam o limite máximo estabelecido, variando, no máximo, 3 m/km para DN100.

A Figura 10 mostra que, utilizando a tabela de Porto (1998), os sete menores diâmetros comerciais de PVC apresentam vazões com velocidades abaixo da mínima. Para os trechos com DN50 e DN60, não é possível alcançar a velocidade mínima estabelecida pela NBR

12218:1994. Entretanto, ao analisar o gradiente hidráulico, para todos os diâmetros, o critério de 8 m/km é obedecido.

De acordo com o que se observa na Figura 11, ao utilizar a Tabela 4 proposta neste trabalho, apenas o diâmetro mínimo indicado pela NBR 12218:1994 apresenta vazões com velocidades abaixo da mínima, porém não há como atender a esse critério para vazões abaixo de 1,40 L/s utilizando DN50. Ao analisar o gradiente hidráulico, para todos os diâmetros de PVC PBA, há vazões em que o critério de 8 m/km não é obedecido. Isso ocorre para que o diâmetro imediatamente superior atenda ao critério de velocidade mínima. Já os diâmetros de PVC DEFoFo atendem ao critério de máximo gradiente hidráulico.

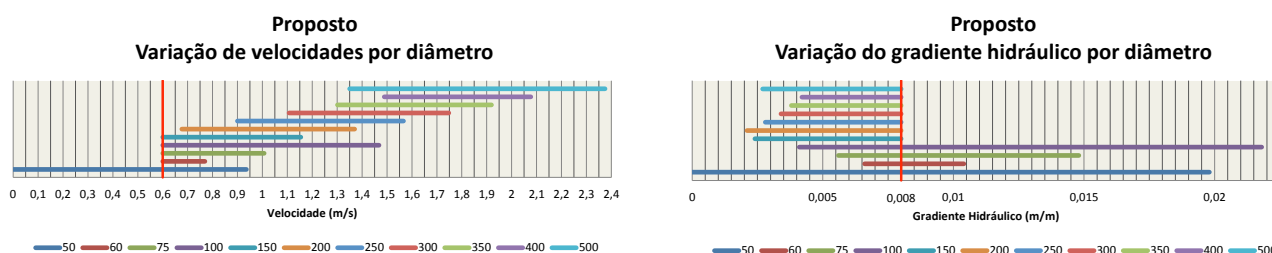


Figura 11 – Faixas de velocidade e perda de carga unitária por diâmetro pela Tabela 4 de seleção de diâmetros proposta neste trabalho.

Utilizando os diâmetros determinados por meio dos limites de vazões estabelecidos pela Tabela 4 e calculando o fator de atrito pela equação de Colebrook-White, desenvolveram-se equações empíricas para o cálculo do fator de atrito, por diâmetro, com base nos gráficos das Figuras 12 e 13, que foram desenvolvidos mediante o uso de dez valores de vazões igualmente espaçadas.

Repetindo o procedimento apresentado nas Figuras 12 e 13 e variando os diâmetros comerciais, foi possível desenvolver as Equações 7 a 17, que calculam o fator de atrito para cada diâmetro comercial de PVC em função apenas da vazão, em L/s.

Juntando todos os valores de fator de atrito encontrados em um único gráfico (Figura 14), tem-se a Equação 18, que calcula o fator de atrito em função apenas da vazão, em L/s, para qualquer valor de vazão entre 0,0 e 446,719 L/s. A Equação 18, assim como as Equações 7 a 17, tem como pré-requisito o uso da Tabela 4, para definição do diâmetro a ser utilizado, e do PVC com rugosidade absoluta igual a 0,00006 m, conforme recomenda Tigre S/A – Tubos e Conexões (2011).

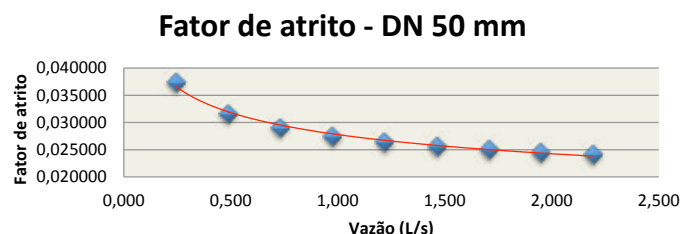


Figura 12 – Fator de atrito x vazão para DN50.

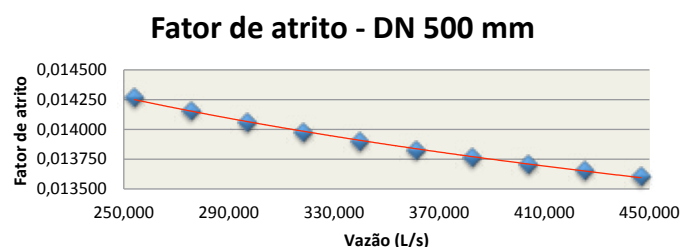


Figura 13 – Fator de atrito x vazão para DN500.

$$f_{50} = 0,027777[Q(L/s)]^{-0,195596} \quad \mathbf{7}$$

$$f_{60} = 0,027462[Q(L/s)]^{-0,148940} \quad \mathbf{8}$$

$$f_{75} = 0,027331[Q(L/s)]^{-0,139315} \quad \mathbf{9}$$

$$f_{100} = 0,026934[Q(L/s)]^{-0,125532} \quad \mathbf{10}$$

$$f_{150} = 0,027446[Q(L/s)]^{-0,129263} \quad \mathbf{11}$$

$$f_{200} = 0,026802[Q(L/s)]^{-0,119249} \quad \mathbf{12}$$

$$f_{250} = 0,025636[Q(L/s)]^{-0,106940} \quad \mathbf{13}$$

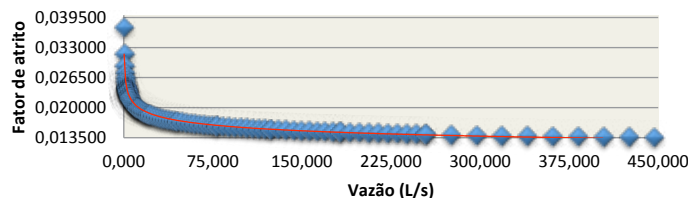
$$f_{300} = 0,024625[Q(L/s)]^{-0,097904} \quad \mathbf{14}$$

$$f_{350} = 0,023748[Q(L/s)]^{-0,090894} \quad \mathbf{15}$$

$$f_{400} = 0,022977[Q(L/s)]^{-0,085184} \quad \mathbf{16}$$

$$f_{500} = 0,022626[Q(L/s)]^{-0,083493} \quad \mathbf{17}$$

### Fator de atrito



$$f = 0,026811[Q(L/s)]^{-0,115995}$$

18

Figura 14 – Fator de atrito x vazão para DN50 a DN500.

Ao empregar as Equações 7 a 17 para o cálculo do fator de atrito, analisando os 110 valores de vazão utilizados e comparando os valores encontrados com os da equação de Colebrook-White, encontrou-se um erro médio de 0,16%. Os maiores erros foram encontrados nas pequenas vazões, sendo o erro máximo de 2,17%, para a vazão de 0,244 L/s.

Os valores de fator de atrito encontrados com o uso da Equação 18, para os 110 dados de vazão utilizados, quando comparados aos da equação de Colebrook-White, apresentaram erro médio de 1,27%. Os maiores erros encontrados foram para vazões menores que 1,0 L/s, sendo os erros máximos de 15,62%, 7,98% e 4,37%, respectiva-

mente, para as vazões de 0,244, 0,487 e 0,731 L/s. Excluindo as vazões inferiores a 1,0 L/s, o erro máximo encontrado não chega a 3,0%.

Para melhor analisar os resultados da utilização da tabela de seleção de diâmetros e equações para o cálculo do fator de atrito desenvolvidas neste trabalho, foi dimensionada a rede de distribuição apresentada na Figura 3.

Para cada simulação, a Tabela 5 apresenta o número de trechos, com diâmetro superior a 50 mm, não atendidos no critério de velocidade mínima estipulado pela NBR 12218:1994 e o número de trechos que não atenderam ao critério de máximo gradiente hidráulico.

Tabela 5 – Resumo das simulações de dimensionamento da rede de distribuição.

Simulação	Método para cálculo de J	Tabela utilizada para seleção de diâmetros	Trechos que não atenderam $V_{min} \leq 0,6$ m/s	Trechos que não atenderam $J \leq 8$ m/km
1	Hazen-Willians	Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006)	5	0
2	Hazen-Willians	Azevedo Netto (1998)	2	0
3	Hazen-Willians	Porto (2006)	5	0
4	Hazen-Willians	Proposta	0	2
5	Hazen-Willians	Pré-dimensionamento Martins e atualização do D	0	2
6	Hazen-Willians	Pré-dimensionamento Azevedo Netto e atualização do D	0	2
7	Hazen-Willians	Pré-dimensionamento Porto e atualização do D	0	2
8	Darcy-Weisbach	Proposta com f de Colebrook- White	0	2
9	Darcy-Weisbach	Proposta com f proposto pela Equação 18	0	2

Como mostra a Tabela 5, utilizando as tabelas de seleção de diâmetro propostas por Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006), Azevedo Netto (1998) e Porto (2006) para o dimensionamento dos trechos da rede de distribuição, há trechos com diâmetro nominal maior que DN50, com velocidades abaixo do mínimo estabelecido pela norma vigente.

É válido citar que, ao utilizar a tabela de seleção de diâmetros proposta neste trabalho e qualquer uma das três tabelas citadas como pré-dimensionamento, atualizando o diâmetro a cada iteração para atender ao critério de velocidade mínima, além de atender a esse critério, têm-se os mesmos resultados de vazão e diâmetro para todos os trechos da rede de distribuição. Isso mostra que utilizar a Tabela 4 como dimensionamento gerou os mesmos resultados que a utilização das tabelas usuais como pré-dimensionamento.

Analisando a 8ª e 9ª simulações, em que foi utilizada a fórmula universal para o cálculo da perda de carga, obtiveram-se os mesmos diâmetros e uma diferença nas vazões, em L/s, na terceira casa decimal, o que gerou um erro máximo de 20 cm de coluna d'água na perda de carga dos trechos. Para a 9ª simulação, foi utilizada a Equação 18 para o cálculo dos fatores de atrito, o que mostra uma ótima precisão no seu uso.

Na Tabela 5, também é possível perceber que as três primeiras simulações atenderam ao critério de máximo gradiente hidráulico, mas não ao critério de velocidade mínima. Já da 4ª à 9ª simulação, cumpriu-se o critério de velocidade mínima, mas não o de máximo gradiente hidráulico.

A Tabela 6 apresenta a última iteração do cálculo de Hardy-Cross da 4ª simulação, a Tabela 7, da 8ª simulação e a Tabela 8, da 9ª simulação.

**Tabela 6** – Última iteração do cálculo de Hardy-Cross da rede de distribuição – 4ª simulação.

ANEL	TRECHO	COMPRIMENTO (m)	VAZÃO (L/s)	DIÂMETRO (mm)	VELOCIDADE (m/s)	PERDA DE CARGA	
						UNITÁRIA	TRECHO
1	1-2	1850	25,831	204,2	0,79	0,003016	5,58052
	5-6	650	-9,169	100	1,17	-0,014365	-9,33730
	6-1	850	-14,169	156,4	0,74	-0,003640	-3,09368
	2-5	850	6,709	100	0,85	0,008059	6,85046
						SOMATÓRIO	0,00000
2	5-2	850	-6,709	100	0,85	-0,008059	-6,85046
	2-3	790	9,122	100	1,16	0,014230	11,24161
	3-7	700	1,122	54,6	0,48	0,005618	3,93231
	7-4	600	-0,878	54,6	0,37	-0,003566	-2,13931
	4-5	980	-5,878	100	0,75	-0,006310	-6,18414
						SOMATÓRIO	0,00000

**Tabela 7** – Última iteração do cálculo de Hardy-Cross da rede de distribuição – 8ª simulação.

ANEL	TRECHO	COMP. (m)	VAZÃO (L/s)	DIÂMETRO (mm)	VELOC. (m/s)	FATOR DE ATRITO	PERDA DE CARGA	
							UNITÁRIA	TRECHO
1	1-2	1850	25.877	204.2	0.79	0.01818	0.002836	5.24569
	5-6	650	-9.123	100	1.16	0.02038	-0.014029	-9.11908
	6-1	850	-14.123	156.4	0.74	0.01948	-0.003433	-2.91824
	2-5	850	6.760	100	0.86	0.02114	0.007990	6.79163
							SOMATÓRIO	
								0.00000
2	5-2	850	-6.760	100	0.86	0.02114	-0.007990	-6.79163
	2-3	790	9.117	100	1.16	0.02038	0.014012	11.06947
	3-7	700	1.117	54.6	0.48	0.02686	0.005714	3.99949
	7-4	600	-0.883	54.6	0.38	0.02803	-0.003724	-2.23417
	4-5	980	-5.883	100	0.75	0.02155	-0.006166	-6.04317
							SOMATÓRIO	
								0.00000

**Tabela 8** – Última iteração do cálculo de Hardy-Cross da rede de distribuição – 9ª simulação.

ANEL	TRECHO	COMP. (m)	VAZÃO (L/s)	DIÂMETRO (mm)	VELOC. (m/s)	FATOR DE ATRITO	PERDA DE CARGA	
							UNITÁRIA	TRECHO
1	1-2	1850	25.884	204.2	0.79	0.01838	0.002869	5.30720
	5-6	650	-9.116	100	1.16	0.02075	-0.014260	-9.26874
	6-1	850	-14.116	156.4	0.73	0.01972	-0.003473	-2.95205
	2-5	850	6.767	100	0.86	0.02148	0.008134	6.91359
							SOMATÓRIO	
								0.00000
2	5-2	850	-6.767	100	0.86	0.02148	-0.008134	-6.91359
	2-3	790	9.117	100	1.16	0.02075	0.014262	11.26684
	3-7	700	1.117	54.6	0.48	0.02647	0.005627	3.93922
	7-4	600	-0.883	54.6	0.38	0.02720	-0.003615	-2.16916
	4-5	980	-5.883	100	0.75	0.02183	-0.006248	-6.12332
							SOMATÓRIO	
								0.00000

### CONCLUSÕES

O método apresentado para seleção dos diâmetros em trechos de redes de distribuição de água atende aos limites de velocidade recomendados pela NBR 12218:1994, exceto para o diâmetro mínimo indicado (DN50).

Os diâmetros referentes a tubos de PVC DEFo-Fo atendem ao critério de gradiente hidráulico máximo estabelecido pela antiga NB 594:1977 e por entidades de saneamento, porém, para atender à norma vigente da ABNT, o mesmo não ocorre para tubos de PVC PBA.

Com a utilização da tabela proposta neste trabalho, há folga entre a velocidade máxima encontrada para as tubulações – 2,375 m/s para o diâmetro de 500 mm – e a máxima estabelecida por norma – 3,5 m/s –, como recomendam Heller e Pádua (2010).

As tabelas de seleção de diâmetros de Martins (1976 apud TSUTIYA, 2006), Azevedo Netto (1998) e Porto (2006) alcançam, como prioridade, o atendimento do critério de máximo gradiente hidráulico recomendado na antiga NB 594:1977. Já a Tabela 4 de seleção de diâmetros, proposta neste trabalho, visa a atender, primordialmente, o estabelecido pela NBR 12218:1994, norma vigente para projeto de rede de distribuição de água.

Apesar de haver, em catálogo de fabricante de tubo de PVC, tabelas com simulações de vazões superiores às máximas propostas, por diâmetro, é importante verificar, experimentalmente, o desgaste dos tubos de maiores diâmetros para perda de carga unitária de 8 m/km, uma vez que as três tabelas atualmente mais utilizadas apresentam, para tubos com diâmetro superior a 200 mm, gradiente hidráulico máximo de 5 m/km.

A utilização simultânea da Tabela 4 para seleção de diâmetros e das equações propostas para cálculo do fator de atrito apresenta boa precisão e é recomendada. O erro relativo encontrado com o uso da Equação 18 para vazões menores que 1,0 L/s não resulta em grandes erros absolutos, uma vez que vazões pequenas geram perdas de carga pequenas, não havendo grande influência nos cálculos de uma rede de distribuição.

O uso da Tabela 4, em uma rede de distribuição, mostrou que ela pode ser aplicada diretamente para o dimensionamento dos trechos, com base em cada vazão. Já as três tabelas usuais devem ser utilizadas apenas como base de pré-dimensionamento, a fim de atender ao que determina, como velocidade mínima, a NBR 12218:1994.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1994.
- Azevedo Netto, J. M. Manual de Hidráulica. 8ª ed. São Paulo. Blucher, 1998.
- Barreto, G. C., Gomes, D. M., Gutierrez, L. A. C. L., Pereira, J. A. R. Impacto da setorização no abastecimento de água em áreas urbanas. VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa, 2006.
- Cardoso, G. G. G., Frizzone, J. A., Rezende, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. Acta Scientiarum: Agronomy, Vol 30, p. 299-305, 2008.
- Companhia de Água e Esgoto do Ceará – CAGECE. Normas Técnicas para Projetos de Sistemas de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário Cagece. Versão 02. Fortaleza, 2010.
- Companhia pernambucana de saneamento – COMPESA. Proposta de atualização da norma interna SOP – 092. Recife, 2004.
- Gameiro, R. C. P. G. Dimensionamento otimizado de redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2003.
- Heller, L.; Pádua, V. L. Abastecimento de água para consumo humano. Universidade Federal de Minas Gerais: Editora UFMG, 2010.
- Porto, R. M. Hidráulica Básica. 4ª ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.
- Prefeitura Municipal de Rio Acima – Minas Gerais. Diagnóstico e diretrizes para melhoria do sistema de abastecimento de água. Vol 1. Rio Acima, 2013.
- Prefeitura Municipal de Vitória – Espírito Santo. Especificação para elaboração do projeto de abastecimento de água. Secretaria de Desenvolvimento da Cidade – SEDEC. Vitória, 2009.
- Rossman, L. A. Epanet 2 – User's manual. National risk management research laboratory office of research and development U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati – OH, 2000.
- Tigre S/A – Tubos e Conexões. Infraestrutura água – Catálogo técnico. Joinville – SC, 2011.
- Tsutiya, M. T. Abastecimento de água. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.