

Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água

Evaluation of relative roughness of PVC pipes for dimensioning the water distribution networks

Erich Kellner¹, Jorge Akutsu¹, Luisa Fernanda Ribeiro Reis²

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivos determinar a rugosidade relativa dos tubos de PVC e avaliar a sua influência no dimensionamento das redes de distribuição de água, segundo as exigências das NBR 5647-1:2004 e 5647-3:1999. As avaliações foram realizadas para três amostras de tubulações novas de DN 50, 75 e 100 e testemunhos em duplicata de DN 50 e 75, extraídos de campo após 10 e 34 anos de uso, respectivamente. Nas tubulações novas, a rugosidade relativa variou de $5,416 \text{ E-}05 \pm 0,834 \text{ E-}5$ a $6,125 \text{ E-}4 \pm 0,756 \text{ E-}4$. Já para as usadas, ela se alterou de $4,853 \text{ E-}04 \pm 3,221 \text{ E-}4$ a $1,056 \text{ E-}03 \pm 0,419 \text{ E-}3$. Essas rugosidades relativas não influenciaram a determinação do fator de atrito quando calculado pela fórmula de Swamee-Jain.

Palavras-chave: rede de distribuição de água; exigências normativas; rugosidade relativa.

ABSTRACT

This study aimed at determining the relative roughness of PVC pipes and evaluating its influence on dimensioning the water distribution networks, according to the requirements of the Brazilian regulations NBR 5647-1:2004 and 5647-3:1999. The evaluations were conducted for three samples of new pipes of DN 50, 75 and 100, besides double testimonies of DN 50 and 75, which were taken from the field after 10 and 34 years of use, respectively. In the new pipes, the relative roughness ranged from $5.416 \text{ E-}05 \pm 0.834 \text{ E-}5$ to $6.125 \text{ E-}4 \pm 0.756 \text{ E-}4$. The used pipes ranged from $4.853 \text{ E-}04 \pm 3.221 \text{ E-}4$ to $1.056 \text{ E-}03 \pm 0.419 \text{ E-}3$. These amounts of relative roughness did not influence the friction factor determination when calculated through Swamee-Jain equation.

Keywords: water distribution network; regulatory requirements; relative roughness.

INTRODUÇÃO

O dimensionamento das redes de distribuição de água pressupõe a verificação das pressões dinâmicas de maneira a serem mantidas em um intervalo preestabelecido a fim de garantir vazão e pressão suficientes aos propósitos de abastecimento dos usuários. Segundo a NBR 12218:1994 (ABNT, 1994), o cálculo da perda de carga distribuída deve ser realizado, preferencialmente, pela fórmula universal de Darcy-Weisbach, conforme a Equação 1, considerando o efeito de envelhecimento do material das tubulações da rede:

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (1)$$

onde:

H_f é a perda de carga de pressão (mH₂O);

D é o diâmetro interno da tubulação que compõe o trecho (m);

L é o comprimento do trecho (m);

g é a aceleração em função da gravidade (m.s⁻²);

V é a velocidade média de escoamento (m.s⁻¹);

f é o fator de atrito (adimensional).

Uma fórmula bastante empregada para a determinação do fator de atrito aos tubos lisos foi proposta por Blasius em 1947, conforme representada pela Equação 2:

¹Doutor pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (USP). Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - São Carlos (SP), Brasil.

²Doutora pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP. Professora Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da USP - São Carlos (SP), Brasil.

Endereço para correspondência: Erich Kellner - Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, Rodovia Washington Luis, km 235 - 13565-905 - São Carlos (SP), Brasil - E-mail: erich.kellner@ufscar.br

Recebido: 27/09/14 - **Aceito:** 01/09/15 - **Reg. ABES:** 141081

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,28}} \quad (2)$$

onde:

Re é o número de Reynolds (adimensional).

Em 1976, Swamee-Jain propôs uma formulação, válida tanto para tubos lisos quanto rugosos e para escoamentos laminares e turbulentos, expressa pela Equação 3:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (3)$$

onde:

Re é o número de Reynolds (adimensional);

D é o diâmetro interno da tubulação que compõe o trecho (mm);

ε é a rugosidade média da parede do tubo (mm).

Segundo Andrade e Carvalho (2001), um dos primeiros problemas encontrados pelos projetistas, ao se empregar a formulação proposta por Swamee-Jain para estabelecer o fator de atrito, é a obtenção do parâmetro referente à rugosidade absoluta (ε). Embora este seja essencial para a determinação da perda de carga de pressão, raramente os fabricantes de tubulações apresentam essas características.

Ao mesmo tempo, para um material similar, a literatura reporta amplas faixas representativas para os valores que a rugosidade absoluta pode assumir, dificultando sobremaneira a tomada de decisão por parte dos projetistas.

Em uma pesquisa bibliográfica realizada, os autores não encontraram trabalhos mais atuais que apresentassem medições das rugosidades absolutas em tubos de PVC. A Tabela 1 indica alguns valores e intervalos de rugosidades absolutas para tais materiais encontrados na literatura técnica.

Dessa maneira, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar as rugosidades absolutas e relativas das tubulações de PVC normalmente empregadas nos projetos das redes de distribuição de água, assim como avaliar a sua influência na equação de Darcy-Weisbach.

Tabela 1 - Valores referenciais de rugosidades absolutas para tubos de PVC, segundo diferentes autores.

Rugosidade absoluta - ε (mm)	Fonte
0,0015-0,010	Porto (2000)
0,01-0,06	Marques & Souza (2011)
0,08-0,12	PNB 591/77 (ABNT, 1977)
0,1	Azevedo Netto & Alvarez (1982)
0,0015	Rossmann (2000)
0,0015-0,12	Faixa resultante

METODOLOGIA

Foram analisadas cinco amostras de tubos de PVC de diâmetros nominais (DN) 50, 75 e 100, fornecidas pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE), no estado de São Paulo, das quais três foram obtidas de tubos novos (sem uso) e duas de usados.

Para as tubulações novas, foram considerados os DN 50, 75 e 100, sendo obtidas amostras de aproximadamente 50 cm de comprimento, retiradas da parte central da tubulação. Para cada uma, anotaram-se o nome do fabricante, a classe de pressão e o código de produção. Essas tubulações estavam armazenadas em depósito coberto e dispostas longitudinalmente em pilhas com aproximadamente 1,0 m de altura.

Foram obtidos testemunhos de DN 50 e 75, provenientes de reparos realizados nas redes de distribuição de água de São Carlos, para as tubulações usadas. Para cada amostra considerada, foi possível obter o nome do fabricante e a classe de pressão, além de estimar, a partir dos dados cadastrais da concessionária, o tempo que a tubulação esteve em uso.

Para cada uma das amostras consideradas, foram tomados cinco pontos característicos na seção transversal dos testemunhos, separados por ângulo de aproximadamente 72°, conforme indicação da Figura 1A. Para o plano que cortava cada um desses pontos, foram medidos o diâmetro externo (D_e), a espessura da parede (e_1 e e_2) e o diâmetro interno da tubulação (D_i), como é possível analisar na Figura 1B. Os cinco pontos serviram também como guias para o traçado de cinco linhas longitudinais a serem percorridas para medição das rugosidades médias (R_a).

Após a determinação das dimensões características das amostras dos tubos de PVC, para cada linha característica considerada, estabeleceu-se a rugosidade média (ε) da parede interna da amostra. Para viabilizar tais medições, os testemunhos foram cortados no sentido longitudinal.

De acordo com a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME, 2002) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2002), a rugosidade média (ε) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m), ou seja, ao longo do comprimento longitudinal das amostras consideradas. Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta daquelas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m). A Figura 2 ilustra as medidas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade ($y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$), tendo como referência a linha média longitudinal, referente ao percurso de medição (l_m).

Posteriormente à indicação das medidas para caracterização física das amostras, foram determinados os valores mais prováveis de cada parâmetro analisado (VMP_x), conforme a Equação 4:

$$VMP_x = M_x \pm \bar{d} \quad (4)$$

onde:

VMP_x é o valor mais provável do parâmetro x ;

M_x é a média aritmética das medidas realizadas para o parâmetro x , calculada pela Equação 5;

\bar{d} é o desvio absoluto médio do parâmetro x analisado, calculado pela Equação 6:

$$M_x = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (5)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - M_x|}{n} \quad (6)$$

onde:

x_i é a i -ésima leitura da medida do parâmetro x e n é o número de leituras realizadas para uma determinada amostra;

M_x é a média aritmética das medidas feitas para o parâmetro x ;

\bar{d} é o desvio médio do parâmetro x estudado.

A fim de avaliar se os desvios eram compatíveis com as medidas realizadas, calculou-se o desvio relativo (d_r), conforme a Equação 7:

$$d_r = \frac{\bar{d}}{M_x} \cdot 100 \quad (7)$$

onde:

d_r é o desvio relativo em relação à média (%);

M_x é a média aritmética das medidas realizadas para o parâmetro x ;

\bar{d} é o desvio médio do parâmetro x analisado.

As rugosidades relativas das amostras foram calculadas conforme a Equação 8:

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = \frac{M_\varepsilon}{M_{D_i}} \pm \frac{M_\varepsilon}{M_{D_i}} \cdot \left(\frac{\bar{d}_\varepsilon}{M_\varepsilon} + \frac{\bar{d}_{D_i}}{M_{D_i}} \right) \quad (8)$$

onde:

ε / D_i é a rugosidade relativa ao diâmetro interno (adimensional);

M_ε é a média aritmética da rugosidade absoluta (mm);

M_{D_i} é a média aritmética do diâmetro interno da tubulação (mm);

\bar{d}_ε é o desvio médio da rugosidade absoluta da tubulação (mm);

\bar{d}_{D_i} é o desvio médio do diâmetro interno da tubulação (mm).

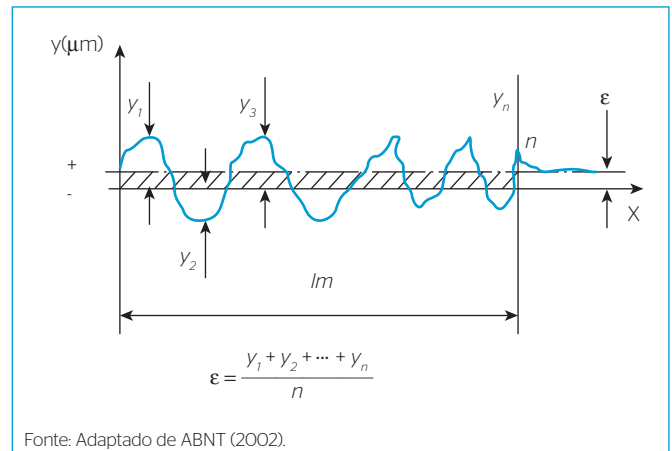


Figura 2 - Medidas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média do percurso de medição.

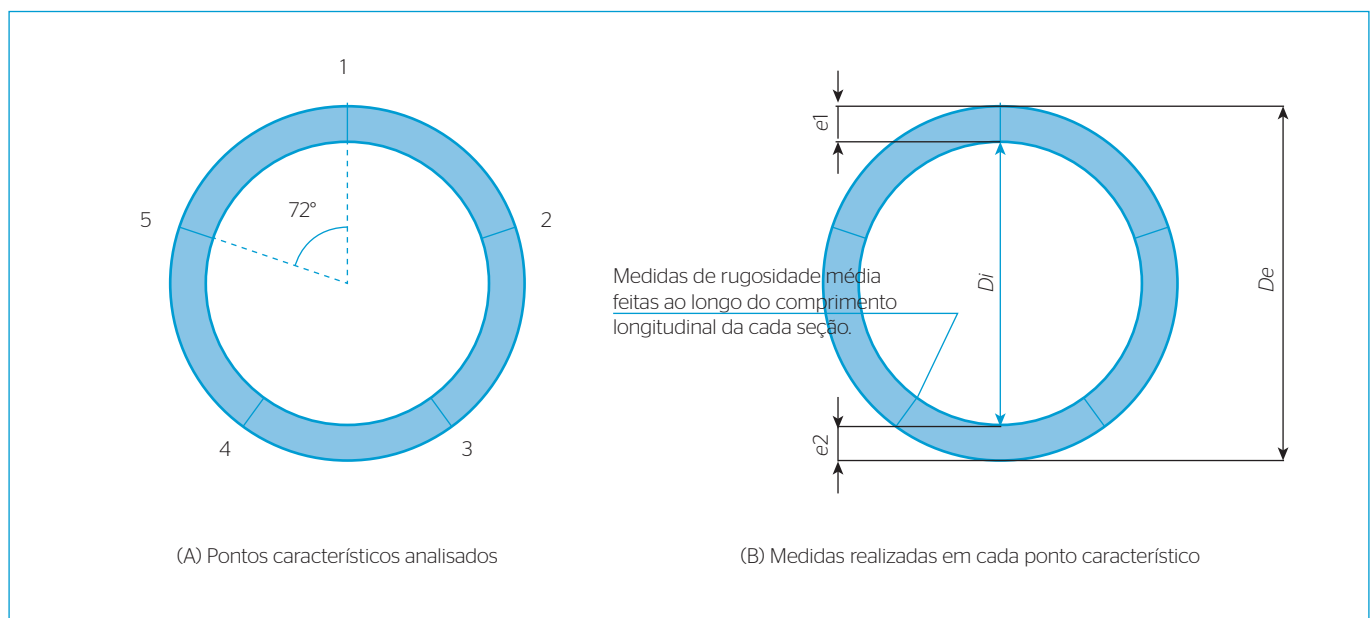


Figura 1 - Pontos característicos e medidas realizadas em cada um deles para caracterização física das amostras.

Após a caracterização das dimensões físicas das amostras, procedeu-se à avaliação visual, empregando-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) a fim de visualizar as superfícies internas da amostra com DN 75, para as condições nova e usada.

A partir dos dados das rugosidades absolutas e dos diâmetros internos observados, procedeu-se ao estudo de como eles influenciam os resultados estimados a partir da equação da Darcy-Weisbach.

Determinação das dimensões características das amostras

Para cada plano que passava pelo centro da tubulação e por um dos cinco pontos característicos, foram medidos o diâmetro externo (D_e), a espessura da parede (e_1, e_2) e diâmetro interno (D_i). Essas dimensões foram obtidas com paquímetro analógico de 6", marca Zaas, com fundo de escala de 0,05 mm.

Com os dados obtidos, foram estabelecidos os valores mais prováveis da série de medidas para o diâmetro externo (D_e), a espessura da parede (e) e o diâmetro interno (D_i) para cada uma das cinco amostras analisadas.

Os resultados estão na Tabela 2, sendo que, para o caso dos tubos novos, os valores obtidos foram comparados com as NBR 5647-1:2004 (ABNT, 2004) e 5647-3:1999 e Errata n. 1 de ABR 2000 (ABNT, 1999).

Determinação da rugosidade média de parede interna dos tubos

Antes da realização das medidas de rugosidade, as amostras foram submetidas a uma corrente de ar a fim de remover possíveis grânulos ou poeira depositados em sua superfície interna.

As medidas da rugosidade média (R_a) foram realizadas no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), em São Carlos, São Paulo. Empregou-se um rugosímetro portátil, marca Mitutoyo, modelo SJ-201P, utilizando-se comprimentos de amostragem (l , ou "cut-off") e avaliação (l_m), conforme recomendações da ABNT (2002) e indicados na Tabela 2. A Figura 3 ilustra o procedimento de medição da rugosidade.

Análise óptica por microscopia eletrônica de varredura

As superfícies foram obtidas de uma parcela de aproximadamente 6 cm² da superfície interna de cada tubo, com o auxílio de uma serra.

Tabela 2 - Parâmetros recomendados para realização das medições de rugosidade.

Rugosidade média (ϵ) (μm)	Comprimento de amostragem l (mm)	Comprimento de avaliação l_m (mm)
$0,006 < \epsilon \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < \epsilon \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < \epsilon \leq 2$	0,8	4
$2 < \epsilon \leq 10$	2,5	12,5
$10 < \epsilon \leq 80$	8	40

Fonte: NBR ISO 4287:2002 (ABNT, 2002).

As superfícies foram recobertas com uma camada nanométrica de ouro, por meio do equipamento Sputter Coater, modelo SCD 050 – Balzers.

Tais unidades puderam então ser analisadas em MEV, modelo STEREOSCAN 440 – LEICA, utilizando-se um detector de elétrons secundários com ampliações de 500, 2.500 e 5.000 x, conforme apresentado na Figura 4.

Avaliação da influência da rugosidade absoluta na equação de Darcy-Weisbach

As rugosidades absolutas (ϵ) observadas foram então comparadas àquelas reportadas na literatura. Foram definidos também intervalos para as rugosidades relativas (ϵ/D_p) obtidas, conforme indicações da Tabela 1. O conjunto dos valores da rugosidade absoluta pode ser observado na Figura 5.

Considerando a viscosidade cinemática da água para 20°C ($\nu=10^{-6}\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), as velocidades mínima (0,6 m.s⁻¹) e máxima (3,0 m.s⁻¹) previstas no dimensionamento das redes de distribuição de água, conforme NBR 12218:1994 (ABNT, 1994), e os diâmetros nominais normalmente empregados nas redes secundárias da distribuição de água (DN 50 a DN 250), determinaram-se os intervalos de possíveis valores do número de Reynolds, os quais podem ocorrer nas redes de distribuição de água.

Assim, baseando-se no conjunto de dados ($\epsilon/D_p, Re$), avaliou-se o coeficiente de rugosidade (f), empregando-se a formulação de Swamee-Jain e comparando-a com a formulação proposta por Blasius, produzindo os resultados apresentados na Figura 6.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os resultados das leituras obtidas dos parâmetros analisados em cada uma das seções características consideradas nas cinco amostras analisadas, assim como seus valores mais prováveis.



Figura 3 – Aplicação de rugosímetro para determinação da rugosidade em tubos de PVC.

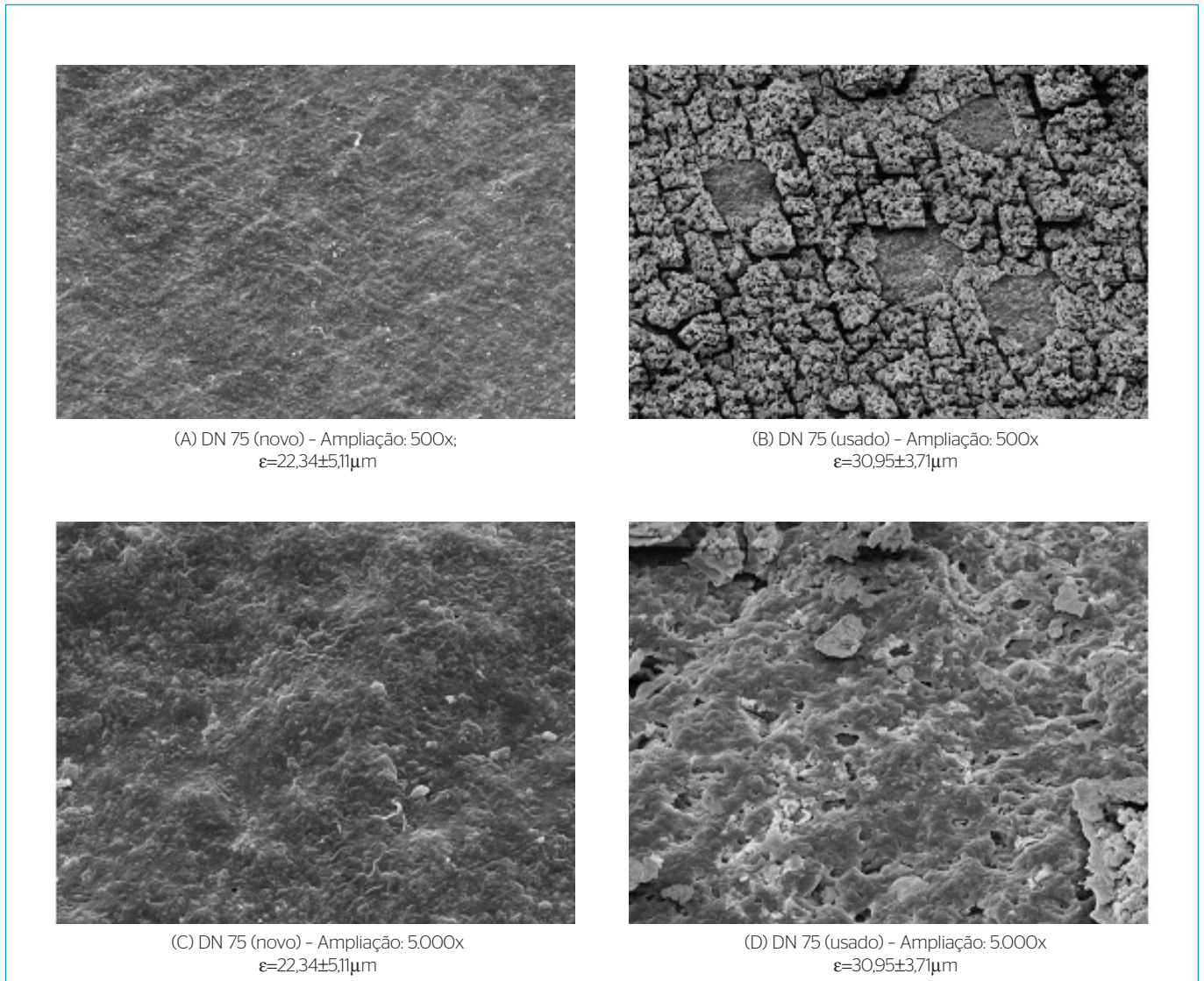


Figura 4 - Imagens da microscopia eletrônica de varredura da parede interna das amostras obtidas das tubulações com DN 75 para as condições nova e usada, respectivamente.

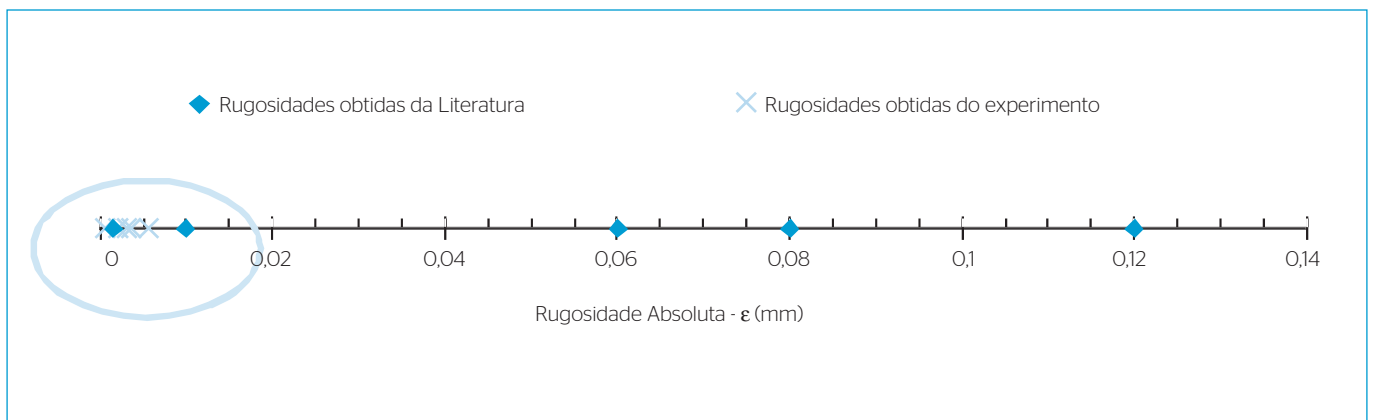


Figura 5 - Distribuição dos valores das rugosidades médias absolutas (ϵ) obtidas das amostras analisadas em relação aos valores reportados na literatura técnica.

Ao analisar os dados apresentados na Tabela 3, é possível notar que os desvios relativos para o conjunto amostral variam de 0,17 a 3,67%, dependendo do parâmetro analisado.

De acordo com a Tabela 3, os maiores desvios relativos ocorreram para a espessura da parede das tubulações, cujos valores variaram de 1,27 a 3,67%. Os diâmetros externos tiveram um desvio relativo em relação aos valores médios, alterando-se de 0,17 a 0,83%. Já para os diâmetros internos, os quais, do ponto de vista hidráulico, são os mais importantes dos parâmetros físicos analisados, sob a avaliação da perda de carga, o desvio relativo do conjunto amostral ficou entre 0,24 a 1,29%.

Para avaliar os diâmetros internos e externos das tubulações novas, foram comparados os valores mais prováveis obtidos das amostras com aqueles estabelecidos pela NBR 5647-3:1999, conforme indicado na Tabela 4.

É possível verificar, ao examinar os valores apresentados na Tabela 4, que, para o diâmetro externo dos tubos novos, a variação do desvio relativo dos dados amostrais em relação àqueles estabelecidos pela NBR 5647-3:1999 variaram de 0,15 a 1,59%, enquanto que, para a espessura das paredes, de 1,72 a 43,94%.

É interessante que, embora a NBR 5647-3:1999 (ABNT, 1999) venha a estabelecer os requisitos específicos para tubos de PVC com

diâmetros de até DN 100, nada se menciona a respeito do diâmetro interno da tubulação, o qual, para o projeto das redes de distribuição, é um parâmetro considerado mais fundamental.

A Tabela 5 mostra os totais obtidos de leituras das rugosidades medidas em cada uma das seções características das amostras analisadas, bem como os seus valores mais prováveis.

Por meio do estudo dos dados apresentados na Tabela 5, é possível observar que a rugosidade média das paredes internas das tubulações novas variou de $5,31 \pm 0,78 \mu\text{m}$ a $30,95 \pm 3,71 \mu\text{m}$, intervalo estabelecido a partir de um conjunto de valores definidos por 0,000409 e 0,003841 mm. Já para as amostras referentes aos tubos usados, a rugosidade média das paredes internas se alterou de $35,98 \pm 23,79 \mu\text{m}$ para $56,42 \pm 22,09 \mu\text{m}$, e que correspondem a um conjunto de valores estabelecidos por 0,001150 e 0,009589 mm.

Ao se compararem as amostras novas DN 50 e 75 com as usadas, para todos os casos, a rugosidade média aumentou. Para a amostra com DN 50, ela passou de $30,95 \pm 3,71 \mu\text{m}$ para $56,42 \pm 22,09 \mu\text{m}$, enquanto que, para aquela com DN 75, a rugosidade média se alterou de $22,34 \pm 5,11 \mu\text{m}$ para $35,9 \pm 23,79 \mu\text{m}$. Vale mencionar ainda que, para ambos os casos, e provavelmente devido ao uso, os valores médios da rugosidade absoluta aumentaram, assim como o desvio

Tabela 3 - Dimensões características e VMP_x dos parâmetros analisados.

Amostra	Fabricante	Parâmetro analisado	Seções das características					VMP_x (mm)	Desvio relativo (%)
			1	2	3	4	5		
DN 50 Novo	A	D_e	60,25	59,95	60,05	59,95	59,95	$60,03 \pm 0,10$	0,17
		e_1	4,65	4,75	4,95	5,05	4,65	$4,75 \pm 0,14$	2,11
		e_2	4,75	4,95	4,45	4,55	4,75		
		D_i	50,85	50,25	50,65	50,35	50,55	$50,53 \pm 0,18$	0,36
DN 75 Novo	B	D_e	85,55	87,85	86,25	86,65	85,45	$86,35 \pm 0,72$	0,83
		e_1	4,95	4,95	5,35	5,05	5,05	$5,14 \pm 0,19$	3,67
		e_2	5,45	4,95	5,35	4,95	5,35		
		D_i	75,15	77,95	75,55	76,65	75,05	$76,07 \pm 0,98$	1,29
DN 100 Novo	C	D_e	108,95	110,95	110,55	109,95	111,15	$110,31 \pm 0,69$	0,63
		e_1	6,05	6,05	6,00	6,05	6,55	$6,10 \pm 0,10$	1,64
		e_2	6,05	6,05	5,95	6,15	6,05		
		D_i	96,85	98,85	98,60	97,75	98,55	$98,12 \pm 0,66$	0,67
DN 50 Usado (10 anos)	D	D_e	60,95	60,45	60,85	60,35	60,65	$60,65 \pm 0,20$	0,33
		e_1	3,55	3,75	3,45	3,65	3,65	$3,62 \pm 0,06$	1,66
		e_2	3,65	3,65	3,65	3,55	3,65		
		D_i	53,75	53,05	53,75	53,15	53,35	$53,41 \pm 0,27$	0,51
DN 75 Usado (34 anos)	E	D_e	85,05	85,05	85,05	85,00	85,55	$85,14 \pm 0,16$	0,19
		e_1	5,65	5,55	5,35	5,45	5,55	$5,51 \pm 0,07$	1,27
		e_2	5,45	5,55	5,45	5,50	5,55		
		D_i	73,95	73,95	74,25	74,05	74,45	$74,13 \pm 0,18$	0,24

Nota: Todas as medidas estão em milímetro (mm).

médio se ampliou. Essa informação corrobora com a literatura técnica, conforme mencionado por Azevedo Netto e Alvarez (1982), Porto (2000), Marques e Souza (2011), na qual se afirma que o coeficiente de rugosidade das tubulações tende a aumentar consideravelmente com o passar do tempo.

A Figura 4 mostra a distribuição dos valores das rugosidades absolutas determinadas neste experimento (Tabela 5) em relação ao intervalo daqueles reportados na literatura técnica (Tabela 1), na qual se pode perceber que, no geral, os totais obtidos para rugosidade absoluta ficaram muito próximos ao limite inferior de 0,0015 mm mencionado na literatura (ROSSMAN, 2000; PORTO, 2000), tendo sido observado, especificamente, valores inferiores àqueles reportados na Tabela 1.

Na Tabela 6 são indicados, além de valores para os parâmetros físicos determinados para o conjunto amostral, os valores das rugosidades relativas (ϵ/D_i).

Embora as rugosidades relativas (ϵ/D_i) e absolutas não sejam comumente informadas pelos fabricantes, são parâmetros importantes para a determinação da perda de carga de pressão, que podem refletir algumas características do controle de qualidade na fabricação dessas peças.

No caso das amostras de tubulações novas, os valores mais prováveis para as rugosidades relativas (ϵ/D_i) variaram de $5,416 \text{ E-}05 \pm 0,834 \text{ E-}5$ a $6,125 \text{ E-}4 \pm 0,756 \text{ E-}4$, que correspondem a um conjunto de valores definidos em $4,582 \text{ E-}5$ e $6,881 \text{ E-}4$.

A Figura 5 mostra a imagem da superfície interna da tubulação DN 75 sem uso e após 34 anos de uso, obtida por MEV, com ampliações de 500 e 5.000 x.

Acredita-se que essas figuras possam exemplificar o efeito do aumento da rugosidade absoluta nas paredes internas da tubulação DN 75, ocasionada pelo uso.

Após considerar as rugosidades absolutas observadas neste experimento com aquelas já reportadas na literatura, definiu-se um conjunto de possíveis valores estabelecidos em 0,000409 e 0,12 mm. Esses valores relacionados aos diâmetros internos comerciais normalmente empregados em redes de distribuição de água (DN 50, 75, 100, 150, 200 e 250) resultaram no seguinte conjunto de rugosidades relativas: 1,5 E-5 e 2,5 E-3.

Considerando o número de Reynolds, variando de 1.000 a 800.000, calcularam-se os fatores de atrito (f) usando a fórmula de Blasius (Equação 2). Para esse mesmo intervalo de tal número, com base no conjunto de possíveis valores para rugosidade relativa (ϵ/D_i) estabelecidos, foram mensurados

Tabela 4 - Valores dos parâmetros físicos das amostras analisadas em relação aos valores estabelecidos pela NBR 5647-3:1999.

Amostra de tubo novo	Parâmetro analisado	Valores obtidos das amostras (mm)	Desvio relativo da amostra (%)	Valores estabelecidos pela NBR 5647-3:1999 (mm)	Desvio relativo da NBR (%)
50	D_e	$60,03 \pm 0,10$	0,17	$60,0 \pm 0,2$	0,15
	e	$4,75 \pm 0,14$	2,11	$3,3 \pm 0,5$	43,94
	D_i	$50,53 \pm 0,18$	0,36	Não definido	-
75	D_e	$86,35 \pm 0,72$	0,83	$85,0 \pm 0,3$	1,59
	e	$5,14 \pm 0,19$	3,67	$4,7 \pm 0,6$	9,36
	D_i	$76,07 \pm 0,98$	1,29	Não definido	-
100	D_e	$110,31 \pm 0,69$	0,63	$110,0 \pm 0,3$	0,68
	e	$6,10 \pm 0,10$	1,64	$6,1 \pm 0,8$	1,72
	D_i	$74,13 \pm 0,18$	0,67	Não definido	-

Tabela 5 - Rugosidades médias e VMP_x das seções características para as amostras analisadas

Amostra	Fabricante	Rugosidade média (μm) das seções características					VMP_x (μm)	Desvio relativo (%)
		1	2	3	4	5		
DN 50 Novo	A	25,52	38,41	30,00	28,05	32,76	$30,95 \pm 3,71$	11,99
DN 75 Novo	B	21,84	16,41	21,20	17,14	35,12	$22,34 \pm 5,11$	22,88
DN 100 Novo	C	6,21	5,50	6,19	4,09	4,58	$5,31 \pm 0,78$	14,74
DN 50 Usado (10 anos)	D	95,89	17,26	72,18	42,30	54,46	$56,42 \pm 22,09$	39,16
DN 75 Usado (34 anos)	E	11,50	19,36	29,04	95,46	24,52	$35,98 \pm 23,79$	66,14

também os fatores de atrito (f) avaliados segundo a fórmula de Swamee-Jain (Equação 3), cujos resultados são apresentados no gráfico da Figura 6.

Os gráficos na Figura 5 permitem avaliar a variação do fator atrito (f), empregando-se a formulação proposta por Blasius e aquela proposta por Swamee-Jain, utilizando-se as rugosidades relativas observadas neste experimento para os tubos de PVC descritos.

Da Figura 6, pode-se verificar que os valores para f , obtidos pela fórmula de Swamee-Jain, resultaram em inferiores àqueles obtidos pela fórmula de Blasius, classicamente definida para tubos lisos, especialmente para $30.000 \leq Re \leq 750.000$, para faixa usual de operação das redes de distribuição de água, considerando-se a viscosidade cinemática a

20°C ($\nu=1,0E-6\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) e velocidade de escoamento entre 0,6 e 3,0 $\text{m}.\text{s}^{-1}$, conforme estabelecido pela NBR 12218:1994 (ABNT, 1994).

Ao se ajustar uma curva aos pontos obtidos pela fórmula de Swamee-Jain, encontrou-se a correlação definida pela Equação 9, normalmente empregada quando se tem escoamento laminar ($Re < 2.000$).

$$f = \frac{64}{Re} \tag{9}$$

onde:

f é o fator de atrito (adimensional);

Re é o número de Reynolds (adimensional).

Tabela 6 - Características físicas e rugosidade relativa das amostras analisadas.

Amostra	De (mm)	ϵ (mm)	Di (mm)	ϵ (μm)	ϵ/D_i (adimensional)
DN 50 Novo	60,03±0,10	4,75±0,14	50,53±0,18	30,95±3,71	6,125 E-4±0,75 6E-4
DN 75 Novo	86,35±0,72	5,14±0,19	76,07±0,98	22,34±5,11	2,937 E-4±0,710 E-4
DN 100 Novo	110,31±0,69	6,10±0,10	98,12±0,66	5,31±0,78	5,416 E-05±0,834 E-5
DN 50 Usado (10 anos)	60,65±0,20	3,62±0,06	53,41±0,27	56,42±22,09	1,056 E-03±0,419 E-3
DN 75 Usado (34 anos)	85,14±0,16	5,51±0,07	74,13±0,18	35,98±23,79	4,853 E-04±3,221 E-4

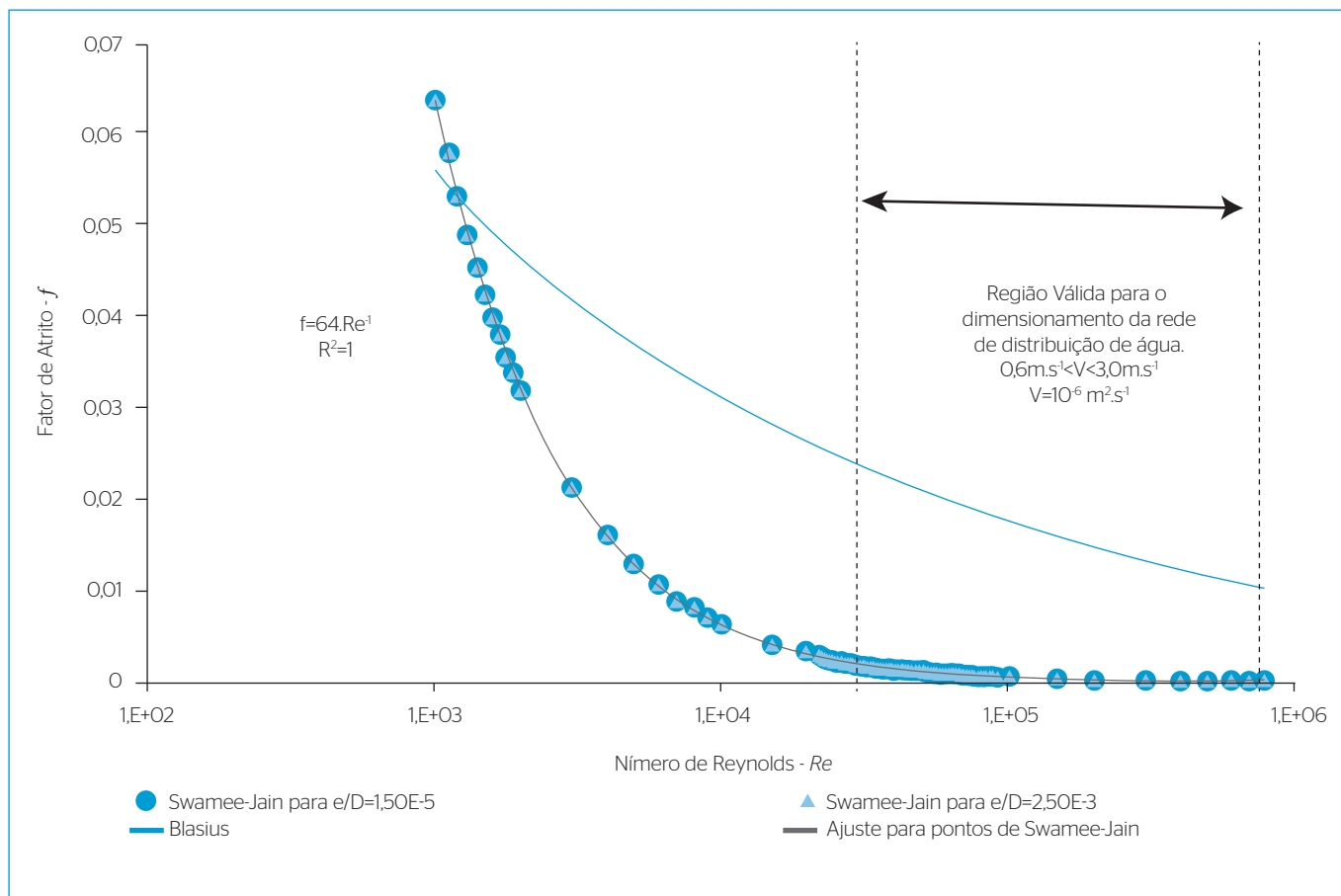


Figura 6 - Variação do fator de atrito (f) pelas fórmulas de Blasius e Swamee-Jain, considerando o intervalo de rugosidade relativa determinada neste experimento.

Substituindo a Equação 9 pela 1, a perda da carga de pressão, para tubos de PVC, com rugosidade relativa entre $[1,5E-5, 5,2E-3]$ e velocidades de escoamento (V), tal que $0,6m.s^{-1} \leq V \leq 3,0m.s^{-1}$, pode ser estimada pela Equação 10:

$$hf = 4,158E - 6 \cdot \frac{Q}{D_i^4} \cdot L \quad (10)$$

onde:

Q é a vazão ($m^3.s^{-1}$);

D_i é o diâmetro interno da tubulação (m);

L é o comprimento da tubulação (m);

hf é a perda da carga de pressão (mH_2O).

Ao se analisar a Equação 10, pode-se notar que, para as tubulações de PVC com baixa rugosidade relativa, a rugosidade absoluta perde a sua importância na determinação da perda de carga de pressão, principalmente na região de turbulência observada nas redes de distribuição de água. Por outro lado, o diâmetro interno da tubulação exerce grande influência sobre a determinação da perda de carga de pressão, uma vez que suas variações são submetidas a um expoente de grau 4.

Assim, o fato de o diâmetro interno exercer grande influência na determinação da perda de carga de pressão sugere que tal parâmetro deva ser incorporado aos requisitos específicos para tubos de PVC e estabelecidos pelas normas técnicas brasileiras.

CONCLUSÕES

As tubulações em PVC (marrom) com DN 50, 75 e 100, novas, apresentaram rugosidade média variável de $5,31 \pm 0,78 \mu m$ a $30,95 \pm 3,71 \mu m$.

Já aquelas com DN 50 e 10 anos de uso tiveram rugosidade média de $56,42 \pm 22,09 \mu m$, enquanto as tubulações em PVC (marrom) com DN 75 e 34 anos de uso mostraram uma de $35,98 \pm 23,79 \mu m$.

Para as condições de escoamento observadas em redes de distribuição de água, com $30.000 \leq Re \leq 750.000$, e construídas em PVC (marrom), a rugosidade relativa (ϵ/D_i) não influenciou significativamente os valores do fator de atrito (f).

O diâmetro interno da tubulação exerce grande influência sobre a determinação da perda da carga de pressão, que deveria ter seu valor mais provável estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, quando da revisão da NBR 5647-3:1999.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS - ASME. (2002) *Surface texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. New York.
- ANDRADE, L. & CARVALHO, J.A. (2001) Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 3, p. 554-557.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2004) *NBR 5647-1: Sistemas para adução e distribuição de água - Tubos e conexões de PVC 6,3 com junta elástica e com diâmetros normais até DN100. Parte 1: Requisitos gerais*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (2002) *NBR ISO 4287:2002: especificação geométrica do produto (GPS). Rugosidade: método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1999) *NBR 5647-3: Sistemas para adução e distribuição de água - Tubos e conexões de PVC 6,3 com junta elástica e com diâmetros normais até DN100. Parte 3: Requisitos específicos para tubos com pressão nominal PNO,75 MPa*. (Errata n. 1 de ABR 2000). Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1994) *NBR 12.218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público - Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1977) *Elaboração de Projetos de Sistemas de Adução de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro: ABNT.
- AZEVEDO NETTO, J.M. & ALVAREZ, G.A. (1982) *Manual de Hidráulica*. 7. ed. v. 2. São Paulo: Edgard Blucher.
- PORTO, R.M. (2000) *Hidráulica básica*. 2. ed. Projeto REENGE. São Carlos: EESC/USP.
- MARQUES, J.A.A.S. & SOUZA, J.J.O. (2011) *Hidráulica urbana*. 3. ed. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- ROSSMAN, L.A. (2000) *EPANET 2 - Users Manual*. Ohio: U.S. Environmental Protection Agency. Cincinnati. Disponível em: <<http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/epanet.html>>. Acesso em: 12 jan. 2016.