VERIFICAÇÃO DO COEFICIENTE DE MANNING EM TUBOS DE PVC DE DIFERENTES IDADES, DECLIVIDADE MÍNIMA E CRITÉRIO DA TENSÃO TRATIVA PARA PROJETO DE REDES COLETORAS DE ESGOTO SANITÁRIO

Glauber Nelson Voigt[1]
Graduado em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Católica de Santa Catarina. MBA em Gerenciamento de Projetos pela Universidade do Contestado – UnC.
Diogo Marcelo Zimmermann[2]
Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Sociedade Educacional de Santa Catarina – UNISOCIESC e em Geografia pela Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE. Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
Robison Negri[3]
Graduado em Engenheiro Civil e Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Endereço[1]**:** Rua XV de Novembro, 3950 - Bairro Glória - Joinville - SC - CEP: 89.216-202 - Brasil - Tel: +55 (47) 2105-1600 - Cel: +55 (47) 99901-5112 - e-mail: glauber.voigt@aguasdejoinville.com.br

RESUMO

Historicamente, a maioria dos engenheiros utilizou o coeficiente de rugosidade n de Manning como 0,013 para todos os materiais disponíveis antes do advento dos tubos de PVC destinados a redes coletoras. Considerando a divergência entre as condições específicas desse parâmetro hidráulico entre as normas NBR9649/1986, que recomenda um valor de 0,013 e a NBR14486/2000 que indica a adoção de 0,010 para o valor de n, para determinação da declividade mínima calculada em redes coletoras de esgoto sanitário, este estudo pretende realizar a verificação do coeficiente de Manning através de testes experimentais em laboratório, utilizando tubos de PVC de diferentes idades. A metodologia consiste na realização de ensaios em canal de escoamento hidráulico utilizando amostras de tubulações coletadas em trechos de redes de esgoto existente, em operação há: 05; 15; 25; e 35 anos. Os resultados mostraram que o coeficiente de rugosidade de Manning apresenta uma variação ao longo do tempo causada pela formação de uma película de limo biológico aderente às paredes dos condutos, sendo prudente a escolha para o valor de n=0,013 a ser adotada pelo projetista no cálculo e dimensionamento de redes coletoras, independentemente do tipo de material da tubulação utilizada, conforme já preconizado pela norma ABNT NBR9649/86.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de Manning, Tensão trativa, Rede coletora de esgoto.

INTRODUÇÃO

O processo de elaboração de projeto de redes coletoras de esgoto, do tipo separador absoluto, é realizado levando em consideração diversos critérios e parâmetros hidráulicos envolvidos, visando promover condições adequadas para o bom funcionamento do sistema.

Os materiais sólidos presentes nos esgotos são constituídos de partículas orgânicas e inorgânicas. Devido ao efeito da gravidade essas partículas tendem a depositar-se no fundo das tubulações. Para equalizar esse problema deve ser considerado em projetos condições hidráulicas favoráveis à ação de autolimpeza das tubulações de esgoto, de modo a evitar problemas operacionais envolvendo obstruções da rede e redução da sua capacidade hidráulica.

A declividade mínima admitida em coletores para evitar problemas desse tipo é dependente de diversas variáveis, como: vazão inicial, altura da lâmina líquida, do diâmetro da tubulação e do coeficiente de rugosidade.

Muitas fórmulas empíricas foram desenvolvidas para resolver uma variedade de problemas relacionados ao fluxo em tubulações. No entanto, a equação de Manning tem sido uma das principais equações utilizadas no cálculo e

dimensionamento de coletores de esgoto. O coeficiente de rugosidade obtido através dessa equação, ajuda a determinar perdas por atrito nas tubulações. Quanto maiores as perdas, maior o valor de n de Manning.

A norma NBR 9649 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986) é a principal norma utilizada por projetistas para elaboração de projetos de redes coletoras de esgoto. Outra norma mais recente, a NBR 14486 (ABNT, 2000), recomenda novos critérios e parâmetros de dimensionamento hidráulico que se contrapõem às sugestões da norma NBR 9649 (ABNT,1986). Entre as condições hidráulicas recomendadas por essa norma, encontram-se valores bem mais ousados para o coeficiente de Manning e para o critério da tensão trativa, com implicação direta na redução da declividade mínima a ser adotada nos coletores.

OBJETIVO

A fim de orientar engenheiros projetistas, sobre qual o valor do coeficiente de rugosidade n de Manning preferencialmente deve ser utilizado como parâmetro hidráulico em projetos de redes coletoras de esgoto sanitário, esse trabalho pretende realizar a verificação do coeficiente de Manning, através de testes experimentais em laboratório de hidráulica, utilizando tubos de PVC de diferentes idades.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 EQUAÇÕES GERAIS

O escoamento livre se processa em seções parciais de condutos fechados, ou em canais abertos e sob pressão atmosférica, podendo ser classificados como: permanente, não permanente, variado ou uniforme.

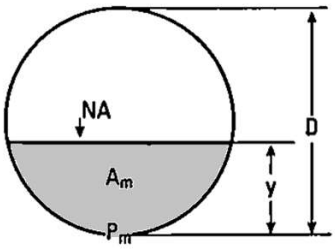
No caso do escoamento permanente e uniforme a vazão e a velocidade são constantes ao longo do conduto. Além disso, a forma geométrica do conduto, sua rugosidade e declividade são únicas. Sendo assim, a seção de escoamento e a profundidade do líquido não se alteram, permanecendo uma linha d'água longitudinal na superfície paralela ao fundo do conduto (NUVOLARI, 2011).

Os coletores de esgoto sanitário, por exemplo, funcionam como condutos livres onde, quase sempre, são utilizados condutos fechados de seção circular.

1.1.1 Elementos Geométricos da Seção Circular

Na figura abaixo são apresentados os elementos geométricos e grandezas que intervêm nos cálculos de dimensionamento dos condutos de seção circular:

Figura 1 - Elementos geométricos dos condutos de seção circular



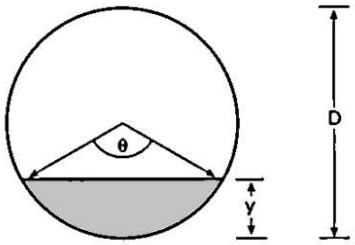
Fonte: Nuvolari, 2011.

Onde:
D = diâmetro interno do conduto;
y = altura da lâmina líquida;
Am = área molhada;

Pm = perímetro molhado;
I = declividade longitudinal.

A área molhada Am é a área da seção útil de escoamento, ou seja, a área que corresponde à lâmina líquida na seção transversal do conduto. O perímetro molhado Pm é a parte do perímetro total do conduto em contato com a lâmina líquida. Por definição a relação Am/Pm é chamada de raio hidráulico Rh.

Figura 2 - Esquema para cálculo das relações trigonométricas da seção circular



Fonte: Nuvolari, 2011.

$$\mathbf{Am} = \frac{\mathbf{D^2 \times (\theta - sen\ \theta)}}{\mathbf{8}} \qquad \text{equação (1)}$$

$$\mathbf{Pm} = \frac{\mathbf{D \times \theta}}{\mathbf{2}} \qquad \text{equação (2)}$$

Sendo:
θ em radianos; e
D = diâmetro interno do conduto em metro.

1.1.2 Equações do Regime de Escoamento Livre

De acordo com Tsutiya e Alem Sobrinho (2000), as equações básicas atualmente envolvidas no cálculo e dimensionamento de coletores de esgoto sanitário, admitido o escoamento em regime permanente e uniforme, são:

a) Equação de Bernoulli;
b) Equação da Continuidade;
c) Equação de Manning.

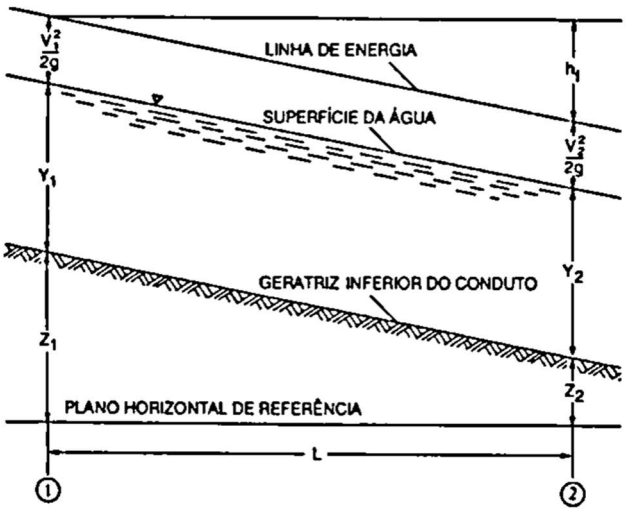
1.1.2.1 Equação de Bernoulli

Considerando duas seções transversais, conforme esquema para o escoamento livre, permanente e uniforme, representado na Figura 3, pode-se escrever a seguinte equação:

$$\mathbf{Z_1 + Y_1 + \frac{v^2_1}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{v^2_2}{2g} + h_f} \qquad \text{equação (3)}$$

A equação é conhecida como equação de Bernoulli. Para regime permanente e uniforme tem-se $v_1 = v_2$ e $Y_1 = Y_2$, resultando em $Z_1 - Z_2 = h_f = IL$, ou seja, a diferença de nível entre as superfícies livres em 1 e 2 é igual à diferença de nível entre os respectivos fundos dos condutos e igual à perda de carga por atrito (h_f) nesse trecho. Neste caso, a perda de carga unitária (I) coincide com a declividade da linha de água e declividade do conduto.

Figura 3 - Elementos do conduto livre em regime permanente e uniforme



Fonte: Tsutiya e Alem Sobrinho, 2000.

Onde:
Z = carga geométrica em metro;
Y = P /Y = carga piezométrica em metro;
$v^2/2g$ = carga cinética em metro; e
h_f = perda de carga em metro.

1.1.2.2 Equação da Continuidade

Para as mesmas seções observadas na Figura 3, a vazão que passa através desse conduto, em movimento permanente e uniforme, é constante e igual ao produto da área de escoamento pela velocidade do líquido.

$$\mathbf{Q = v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 = v \times A = constante} \qquad \text{equação (4)}$$

Onde:
Q = vazão em metro cúbico por segundo;
v = velocidade média em metros por segundo; e
A = área de escoamento em metro quadrado.

Vale destacar que o escoamento do esgoto em um conduto é admitido em regime permanente e uniforme, sendo desprezadas em cálculo de dimensionamento, em cada trecho de conduto, as variações de vazão devido à contribuição líquida recebida ao longo dele.

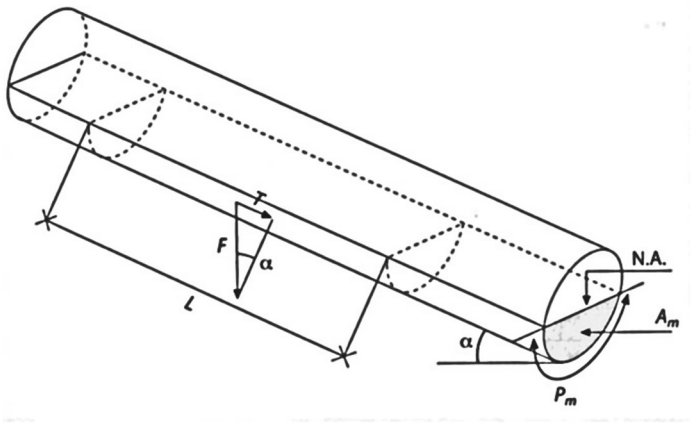
1.1.2.3 Equação de Manning

Para o cálculo das perdas de cargas em conduto livre podem ser utilizadas diversas equações já conhecidas e documentadas em literaturas e manuais de hidráulica, como Chézy, Manning, Universal, Hazen-Williams, Ganguillet e Kutter, Bazin etc. Sendo as mais utilizadas no dimensionamento de coletores de esgoto as equações de Chézy e Manning, com a equação de Manning obtida a partir da equação de Chézy.

Para o entendimento da origem dessas equações é necessária uma breve revisão dos princípios físicos e conceitos por trás da "equação geral do escoamento livre".

De acordo com Nuvolari (2011), para que o escoamento se realize, é necessário que a força que anima o movimento iguale a força de resistência resultante dos atritos. Sendo a força que anima o movimento, a componente tangencial do peso de um certo volume V de líquido, contido num trecho de comprimento unitário L, conforme demonstrado na figura abaixo:

Figura 4 - Corte esquemático de um trecho de conduto sob escoamento livre



Fonte: Azevedo Netto, 2015.

Sendo F esse peso, α (alfa) o ângulo de inclinação do conduto e T a componente tangencial do peso F, tem-se:

$$\mathbf{T = \gamma \times Am \times L \times sen\alpha}$$ equação (5)

A força de resistência ao escoamento (atrito interno), é proporcional ao peso específico do líquido γ, à área de contato do líquido com as paredes do conduto (atrito externo) e é também uma função da velocidade média $\emptyset(v)$. Sendo R essa força de resistência, pode-se escrever a seguinte equação:

$$\mathbf{R = \gamma \times Pm \times L \times \emptyset(v)}$$ equação (6)

Igualando as equações 5 e 6 tem-se:

$$\mathbf{\gamma \times Am \times L \times sen\alpha = \gamma \times Pm \times L \times \emptyset(v)}$$ equação (7)

Resultando em:

$$\mathbf{\emptyset(v) = \frac{Am}{Pm} \times sen\alpha}$$ equação (8)

Fundamentando-se na condição de que "Na prática, em geral, a declividade nos canais é relativamente pequena, menor que 10º ($\alpha < 10°$), permitindo que se tome: $\text{sen}\ \alpha \approx \tan \alpha = \text{I (declividade)}$, resultando: $\text{Am/Pm} \times \text{I} = \emptyset(v)$." (AZEVEDO NETTO, 2015, p.334), então:

$$\mathbf{\emptyset(v) = Rh \times I}$$ equação (9)

Sendo essa a equação conhecida como "equação geral do escoamento livre" ou, ainda, "equação geral da resistência".

1.1.2.3.1 Equação de Manning a partir de Chézy

A primeira expressão relacionando essas grandezas foi proposta em 1775 pelo engenheiro francês Antoine de Chézy, sob a forma que ficou conhecida como equação de Chézy:

$$\mathbf{v = C(Rh \times I)^{1/2}} \qquad \text{equação (10)}$$

Onde:
v = velocidade média na seção em metros por segundo;
C = coeficiente de atrito de Chézy;
Rh = raio hidráulico em metro; e
I = declividade do conduto em metro por metro.

A partir dessa equação fundamental, o coeficiente C vem sendo obtido de forma empírica por diversas experiências conduzidas por pesquisadores, entre os quais se destaca o proposto por Manning em 1890:

$$\mathbf{C = \frac{1}{n} \times (Rh)^{1/6}} \qquad \text{equação (11)}$$

Sendo:
n = coeficiente de rugosidade de Manning.

Sua aplicação à equação de Chézy, associada à equação da continuidade, resulta na equação de Manning:

$$\mathbf{Q = \frac{Am}{n} \times (Rh)^{2/3} \times I^{1/2}} \qquad \text{equação (12)}$$

Conforme descrito por Nuvolari (2011), essa equação, dada sua simplicidade e eficácia, tem sido experimentada e provada em canais de várias dimensões e materiais diversos, sempre com resultados de obra satisfatoriamente compatíveis com as propostas do projeto, tornando-se preferida nos cálculos de condutos com escoamento livre. Além disso, sua variação é relativamente pequena, conforme pode ser observado na tabela abaixo, onde são apresentados os valores de n para vários tipos de condutos, o que dá consistência à fórmula de Manning.

Tabela 1 - Valores do coeficiente n de Manning

Material dos condutos	n de Manning
Cerâmico	0,013
Concreto	0,013
PVC	0,010
Ferro fundido com revestimento	0,012
Ferro fundido sem revestimento	0,013
Cimento amianto	0,011
Aço soldado	0,011
Poliéster, polietileno	0,011

Fonte: Tsutiya e Alem Sobrinho, 2000.

Embora o coeficiente de rugosidade n de Manning seja função de diversos fatores relacionados, como: diâmetro, material dos condutos, altura da lâmina d'água e das características do esgoto, tem sido historicamente utilizado em escoamento de esgoto o valor de n = 0,013. "[...] Esse valor deve ser mantido, mesmo quando se utilizam materiais inicialmente menos rugosos e com comprimentos maiores do que os tradicionais, devido ao fato de que, em sistema de esgoto, o número de ligações, poços de visita e demais singularidades permanece o mesmo, independentemente do tipo de material da tubulação utilizada." (METCALF & EDDY, 1981 apud TSUTIYA E ALEM SOBRINHO, 2000, p.80).

Ainda, "[...] havendo formação de limo, as paredes da tubulação tornam-se uma superfície uniforme e permanecem constantes ao longo do tempo, portanto, a rugosidade em tubulações de esgoto é a mesma e independe do material da tubulação." (WPCF, 1970 apud TSUTIYA E ALEM SOBRINHO, 2000, p.80).

1.1.3 Autolimpeza da Tubulação e Critério da Tensão Trativa

Para Tsutiya e Alem Sobrinho (2000), o projeto hidráulico-sanitário das tubulações de esgoto envolve considerações sobre três aspectos: hidráulicos; reações bioquímicas (controle de sulfetos); e deposição de materiais sólidos encontrados no esgoto (ação de autolimpeza).

> Tradicionalmente admite-se que a ação de autolimpeza em coletores de esgoto sanitário, para enfrentar o aspecto de deposição de materiais sólidos, é obtida pela manutenção de uma velocidade mínima independente do diâmetro da tubulação. Devido ao fato de que o mecanismo básico da ação de autolimpeza é uma força hidrodinâmica exercida pelas paredes do conduto pelo escoamento do esgoto, tem sido utilizado a tensão trativa ou tensão de arraste para o dimensionamento das tubulações, em substituição ao critério da velocidade de autolimpeza (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 2000, p.86).

Por definição, a tensão trativa é a tensão tangencial exercida sobre a parede do conduto pelo líquido em escoamento que atua sobre o material sedimentado, promovendo seu arraste. A equação da tensão trativa apresentada abaixo, representa um valor médio da tensão ao longo do perímetro molhado da seção transversal considerada.

$$\boldsymbol{\sigma = \gamma \times Rh \times I} \qquad \text{equação (13)}$$

Onde:
σ = tensão trativa média em Pascal;
γ = peso específico do líquido em Newton por metro cúbico.

As partículas sólidas são normalmente depositadas nas tubulações de esgoto nas horas de menor contribuição. A tensão trativa crítica é definida como uma tensão mínima necessária para o início do movimento das partículas depositadas nas tubulações de esgoto. A maioria das pesquisas realizadas, a respeito da tensão trativa crítica para promover a autolimpeza em coletores de esgoto chegaram a valores entre 1,0 e 2,0 Pa.

A norma NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986) recomenda o valor mínimo da tensão trativa média σ = 1,00 Pa, adequada para garantir o arraste de partículas inorgânicas de até 1,0 mm de diâmetro. O valor recomendado para o coeficiente de Manning é n = 0,013, independente do material da tubulação, em razão das múltiplas singularidades ocorrentes na rede coletora. Já a declividade mínima recomendada que satisfaz essa condição pode ser determinada pela expressão aproximada abaixo:

$$\boldsymbol{Imin = 0,0055 \times Qi^{-0,47}} \qquad \text{equação (14)}$$

Sendo:
Imin = declividade mínima em metro por metro; e
Qi = vazão inicial em litros por segundo.

Considerando o menor valor de vazão 1,5 l/s em qualquer trecho, recomendado por esta norma, correspondente ao pico instantâneo decorrente de descarga de vaso sanitário, obtém-se uma declividade mínima a ser admitida em um conduto de 0,00454 m/m.

O critério da tensão trativa para a determinação da declividade mínima, adotando o valor de σ = 1,00 Pa, apresenta resultados satisfatórios para a autolimpeza das tubulações, porém em relação às reações bioquímicas que ocorrem nos coletores de esgoto, "[...] esse limite é desfavorável à formação de sulfetos em canalizações com diâmetros maiores que DN 300." (SABESP, 1983 apud AZEVEDO NETTO, 2015, p.451).

1.1.4 Declividade Mínima

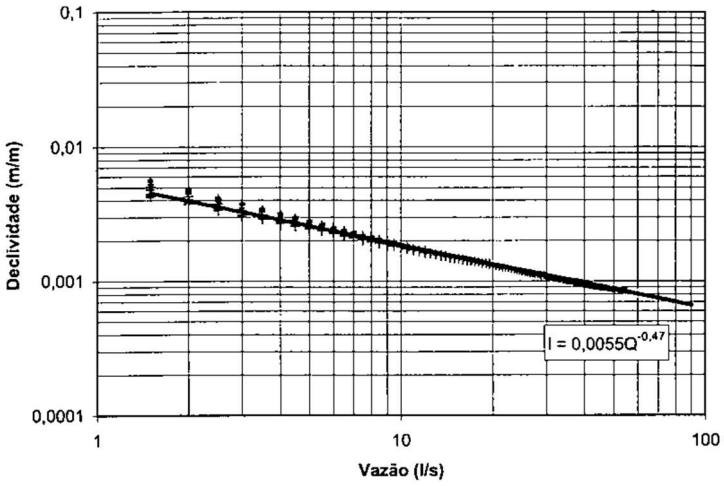
A expressão aproximada para a determinação da declividade mínima, apresentada na norma NBR 9649 (ABNT, 1986), foi obtida a partir da relação entre a equação da tensão trativa com as equações de Chézy e equação de Manning associada à equação da continuidade, considerando o valor de σ = 1,00 Pa e n = 0,013.

A partir do reagrupamento dessas equações básicas, pode-se escrever a declividade I em função da vazão, do raio hidráulico, da tensão de arraste e do coeficiente de Manning, obtendo a equação:

$$\mathbf{I} = \left(\frac{\mathbf{n \times Q}}{\mathbf{Rh^{2/3}}}\right)^{\mathbf{2}} \times \frac{\boldsymbol{\gamma}}{\boldsymbol{\sigma}} \qquad \text{equação (15)}$$

Adotando-se a variação de lâmina d'água (y/D) de 0,20 a 0,75 relativas aos diâmetros usuais, valor de σ = 1,00 Pa e $\gamma = 10^4$ N/m³, com resolução através do método de solução numérica de Newton-Raphson, é possível plotar em gráfico bi logarítmico um feixe de curvas de fraca curvatura correlacionadas a uma única reta conforme demonstrado no gráfico abaixo:

Gráfico 1 - Ajuste para σ = 1,00 Pa e n = 0,013, para determinação da equação I em função de Q



Fonte: Tsutiya e Alem Sobrinho, 2000.

1.1.5 Recomendações da ABNT para Projeto de Redes Coletoras com Tubos De PVC

Em março de 2000 foi promulgada a norma NBR 14486: Sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário – Projeto de redes coletoras com tubos de PVC (ABNT, 2000). Essa norma vigente fixa as condições exigíveis para a elaboração de projeto de redes coletoras enterradas de esgoto sanitário com tubos de PVC (Policloreto de Vinila), incluindo órgãos acessórios (tubos de inspeção e limpeza) constituídos desse mesmo material.

Contrapondo-se à norma NBR 9649 (ABNT,1986), essa norma apresenta a utilização de novos critérios de dimensionamento hidráulico, com valores bem mais ousados do que os valores recomendados até então por associações, literaturas e manuais de hidráulica, com destaque especial à declividade mínima admissível a ser adotada em cada trecho determinada a partir da expressão aproximada abaixo:

$$\mathbf{Imin = 0,0035 \times Qi^{-0,47}} \qquad \text{equação (16)}$$

Sendo:
Imin = declividade mínima em metro por metro; e
Qi = vazão inicial em litros por segundo.

Essa equação foi estabelecida adotando-se o critério da tensão trativa média de valor mínimo σ = 0,60 Pa e coeficiente de Manning n = 0,010. Considerando o menor valor de vazão 1,5 l/s em qualquer trecho, obtém-se uma declividade mínima admissível de 0,00289 m/m.

1. MATERIAIS E MÉTODOS

Com base na divergência desses parâmetros hidráulicos, esse trabalho tem por objetivo realizar testes experimentais em laboratório de hidráulica, utilizando tubos de PVC de diferentes idades, para verificação de uma possível variação do valor do coeficiente n de Manning ao longo do tempo, uma vez que esse coeficiente de rugosidade, utilizado no cálculo e dimensionamento de coletores de esgoto, possui forte influência na condição de autolimpeza das canalizações e na determinação da declividade mínima a ser adotada em projeto.

Para chegar a tal objetivo foi necessário realizar o desenvolvimento e preparação de um canal de escoamento hidráulico que fosse compatível com as características das tubulações de PVC utilizadas nos ensaios. Esse tipo de equipamento demonstra o comportamento dos fluidos através de observações do escoamento pelo canal, facilitando assim a compreensão dos fenômenos do escoamento e suas consequências em condutos abertos.

O tipo de pesquisa desenvolvida é classificada, segundo a abordagem, como quantitativa, do tipo aplicada e explicativa. A metodologia consiste na realização de ensaios no canal de escoamento hidráulico para determinação do coeficiente n de Manning utilizando primeiramente um tubo novo de PVC para condução de esgoto com parede maciça (idade = 0) e outras quatro amostras de tubulações, de mesma característica dimensional, coletadas em trechos de redes coletoras de esgoto em operação há: 05; 15; 25; e 35 anos.

Os ensaios foram realizados utilizando a estrutura física e equipamentos disponíveis no laboratório de hidráulica do Centro Universitário Católica de Santa Catarina. Já as tubulações de PVC utilizadas foram extraídas do Sistema de Esgotamento Sanitário – SES existente do município de Joinville/SC. Os locais escolhidos para retirada de uma amostra dessas tubulações foram definidos com base em alguns critérios:

a) Ano de implantação do coletor e data de início de operação;
b) Característica da tubulação (mesmo material e diâmetro);
c) Coletor existente funcionando com altura da lâmina líquida superior à altura de lâmina líquida a ser aplicada no canal de escoamento hidráulico;
d) Vazão e declividade do coletor existente compatível com a vazão e declividade a ser adotada no canal de escoamento hidráulico.

Fotografia 1 - Remoção de uma amostra de tubulação de PVC em trecho de rede de esgoto existente



Fonte: Fonte: O autor, 2023.

Os tubos de PVC utilizados nos testes experimentais atendem as especificações previstas na norma NBR 7362: Sistemas enterrados para condução de esgoto – Requisitos para tubos com parede maciça e conexões de PVC (ABNT, 1988). Essa norma fixa os requisitos complementares para os tubos de PVC com parede maciça, na cor ocre, destinados a redes coletoras. As dimensões das amostras coletadas seguem descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões das amostras de tubos de PVC com parede maciça

Diâmetro Nominal DN (mm)	Diâmetro Externo DE (mm)	Espessura de parede (mm)	Comprimento da amostra (m)
150,0	160,0	3,6	2,5

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO CANAL DE ESCOAMENTO HIDRÁULICO

O canal de escoamento hidráulico preparado para os ensaios de determinação do coeficiente de Manning, possui as seguintes características construtivas:

a) Reservatórios de entrada e saída em PVC, cada um com capacidade para 300 litros de água;
b) Dois Tê's de redução 90° para coletor de esgoto em PVC DN250x150 mm, permitindo a instalação de conduto de seção circular DN150 mm com 2,50 metros de comprimento e ajuste da declividade;
c) Uma bomba centrífuga de 0,33 CV (220V) monofásico;
d) Um manômetro de pressão;
e) Um registro de gaveta de bronze 1.1/4";
f) Um medidor de vazão tipo rotâmetro;
g) Tubulação de recirculação de água em PVC soldável DN50 e DN32 mm;
h) Conexões hidráulicas de PVC.

O equipamento desenvolvido especialmente para esse experimento permite determinar o valor do coeficiente de rugosidade n de Manning de cada tubulação testada. Esse parâmetro hidráulico é obtido após as leituras de vazão Q, altura da lâmina líquida y e declividade longitudinal de fundo I. Após conhecimento dessas grandezas, é realizado o cálculo utilizando a equação de Manning associada à equação da continuidade (vide equação 12).

Fotografia 2 - Canal de escoamento hidráulico desenvolvido para o experimento



Fonte: Fonte: O autor, 2023.

O esgoto é constituído por um líquido contendo cerca de 99,9% de água e 0,1% de substâncias orgânicas e inorgânicas. A similaridade entre essas substâncias permite que as mesmas leis que regem o movimento da água em condutos livres sejam aplicadas também ao escoamento do esgoto. Partindo desse pressuposto, para esse experimento foram utilizados cerca de 500 litros de água nos reservatórios do canal de escoamento hidráulico.

Após acionamento do sistema, o líquido armazenado no reservatório de saída é sugado pela bomba centrífuga através da tubulação de recirculação de água instalada na parte inferior do equipamento, passando pelo medidor de vazão (rotâmetro) onde é realizada a leitura direta da vazão. Após passagem por esses componentes, o líquido acessa o reservatório de entrada e por fluxo ascendente entra no canal de escoamento hidráulico. Após alguns segundos de funcionamento do sistema, a vazão e a velocidade se estabilizam e o fluxo no canal assume um regime de escoamento permanente e uniforme, permitindo dessa forma a realização das leituras para aplicação na fórmula de Manning.

Nesse sistema, a vazão que passa pelo rotâmetro instalado na tubulação de recirculação de água, em conduto fechado e sob pressão maior que a atmosférica, é a mesma que passa pelo conduto de seção circular com 2,50 metros de comprimento, instalado na parte superior do equipamento, onde se processa o escoamento livre. Nesse caso, a seção de escoamento e a profundidade do líquido não se alteram, permanecendo uma linha d'água longitudinal na superfície paralela ao fundo do conduto.

Fotografia 3 - Imagens do escoamento no interior do canal (b), na entrada (a) e na saída (c)



a) b) c)

Fonte: Fonte: O autor, 2023.

As leituras de altura da lâmina líquida y, fundamentais para o cálculo da área molhada Am e raio hidráulico Rh, foram realizadas através de três orifícios abertos na parte superior da tubulação. Sendo um orifício posicionado no centro e outros dois orifícios distantes 50 cm da entrada e da saída do canal. Quando as leituras de altura da lâmina líquida y apresentaram valores diferentes (não sendo observado em nenhum dos ensaios valores superiores a 1,0 mm), foi aplicada uma simples média aritmética entre as três leituras.

O medidor de vazão do tipo rotâmetro, marca e modelo AppliTech AP-10000, instalado no canal de escoamento hidráulico, é um instrumento de simples funcionamento e operação, indicado para medir vazão instantânea de qualquer tipo de fluido em tubulações, dentro dos limites de pressão e temperatura especificados pelo fabricante. Seu funcionamento baseia-se no princípio de área variável e consiste na entrada do fluido na extremidade inferior do tubo, passando pelo flutuador, que corre livre dentro do tubo, e por fim saindo na extremidade oposta.

Fotografia 4 - Medidor de vazão tipo rotâmetro (a) e tubulação de recirculação de água (b)



a) b)

Fonte: Fonte: O autor, 2023.

A leitura da vazão é feita comparando visualmente o maior diâmetro do flutuador com uma escala graduada no tubo de medição. O range de medição do instrumento varia de 20 a 160 litros por minuto, onde $\pm$ 2% de precisão de fundo de escala é aplicável. Portanto, considerando as características desse medidor de vazão, o valor real da vazão pode variar 3,33 l/min (0,0000555 m³/s) para mais ou para menos. Por conta dessa variação serão apresentados três valores de n de Manning em cada ensaio, sendo adotado como valor de referência a condição mais desfavorável, com o menor valor de vazão possível $Q_{-2\%}$ passando pelo canal.

A leitura da declividade da tubulação instalada no canal hidráulico foi realizada através de equipamento de precisão com auxílio de nível topográfico e mira estadimétrica (com graduação milimetrada no fundo), marca e modelo Leica Geosystems NA-324, permitindo a obtenção da declividade do canal com a mais alta precisão e exatidão. Para cada tubo testado no canal hidráulico a leitura da declividade da tubulação era novamente realizada com o auxílio desses equipamentos de topografia.

Fotografia 5 - Leitura da declividade com auxílio de nível topográfico



Fonte: Fonte: O autor, 2023.

Foi observad nas amostras de tubulações de 25 e 35 anos uma pequena deformação diametral, medidas no sentido de aplicação da carga de terra, com redução do diâmetro interno vertical do conduto na ordem de 2,4 mm para o tubo de PVC com 25 anos e 4,9 mm para a tubulação de 35 anos, o que representa uma deformação de 1,57% e 3,20% respectivamente. Nesse caso, não sendo possível determinar o valor do raio hidráulico e perímetro molhado através de relações trigonométricas utilizadas em um conduto de seção circular. Os valores de Pm, Am e Rh foram obtidos com auxílio do software AutoCAD a partir de desenho de uma seção elipsoidal com as medidas exatas das distâncias verticais e horizontais (eixo menor e eixo maior) verificadas nas amostras.

2. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos cálculos realizados a partir da equação de Manning (12) apresentada no item 1.1.2.3, foi possível determinar os coeficientes de rugosidade das amostras de tubulações de PVC de diferentes idades. Estes coeficientes determinados seguindo procedimento técnico, através de pesquisa experimental em laboratório, a fim de refletir os valores de n de Manning mais próximos possíveis da realidade.

A tabela a seguir apresenta um resumo dos dados coletados no canal hidráulico e as grandezas que intervêm nos cálculos de dimensionamento dos condutos de seção circular, obtidos durante a realização dos ensaios em laboratório de hidráulica de cada amostra de tubo de PVC com parede maciça, destinado a redes coletoras de esgoto.

Tabela 3 - Valores de n de Manning para tubos de PVC de diferentes idades determinados nos ensaios

	Tubo PVC (Idade 0)	Tubo PVC (05 anos)	Tubo PVC (15 anos)	Tubo PVC (25 anos)	Tubo PVC (35 anos)
y	0,03280	0,03780	0,03980	0,03760	0,04030
Am	0,00290	0,00356	0,00377	0,00360	0,00390
Pm	0,14746	0,15956	0,16323	0,16070	0,16760
Rh	0,01967	0,02231	0,02311	0,02240	0,02327
y/d	0,21466	0,24738	0,26047	0,24900	0,27174
Q	0,00200	0,00216	0,00212	0,00212	0,00212
I	0,00801	0,00641	0,00594	0,00717	0,00611
Valor de n	0,0095	0,0104	0,0111	0,0114	0,0117
n ($Q_{+2\%}$)	0,0092	0,0102	0,0109	0,0111	0,0114
n ($Q_{-2\%}$)	**0,0097**	**0,0106**	**0,0113**	**0,0117**	**0,0121**

Fonte: O autor, 2023.

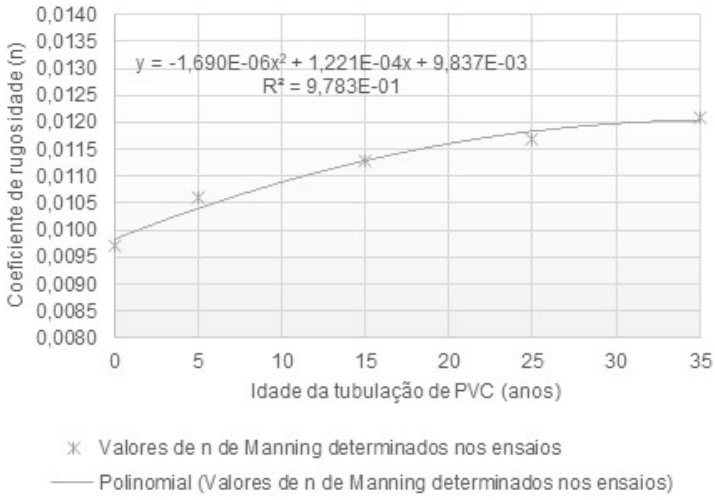
A tabela acima também apresenta um resumo dos dados coletados no canal hidráulico e as grandezas que intervêm nos cálculos de dimensionamento dos condutos de seção circular, obtidos durante a realização dos ensaios em laboratório de hidráulica de cada amostra de tubo de PVC com parede maciça, destinado a redes coletoras de esgoto.

O valor do coeficiente de Manning determinado experimentalmente, utilizando uma amostra de tubo novo de PVC (idade = 0), encontra-se compatível com valores mencionados em literaturas, catálogos de fabricantes e testes realizados corriqueiramente por pesquisadores, considerando o mesmo tipo de material e as mesmas condições ideais, com o valor de n variando entre 0,009 e 0,010.

No entanto, os resultados mostram que o coeficiente de rugosidade de Manning para tubos de PVC em rede de esgoto apresenta uma variação ao longo do tempo, conforme já precedido em manual publicado por *Water Pollution Control Federation – WPCF* e *American Society of Civil Engineers – ASCE*, citado por Tsutiya e Alem Sobrinho (2000). O experimento realizado com a amostra de tubulação operando no sistema de esgotamento sanitário há 35 anos revelou um valor de n na ordem de 0,012, superior ao valor indicado na norma NBR 14486 (ABNT, 2000).

A partir dos resultados encontrados é possível plotar um gráfico de dispersão para analisar com maior profundidade o comportamento da variação do coeficiente de Manning em função do tempo. Os pontos apresentados no gráfico abaixo representam os valores de n de Manning determinados nos ensaios. Aplicando métodos de cálculo numérico, através de polinômios interpoladores por diferenças divididas de Newton, é possível inserir uma linha de tendência gerada por uma equação polinomial de segundo grau de fortíssima correlação para estimar valores intermediários entre os dados encontrados.

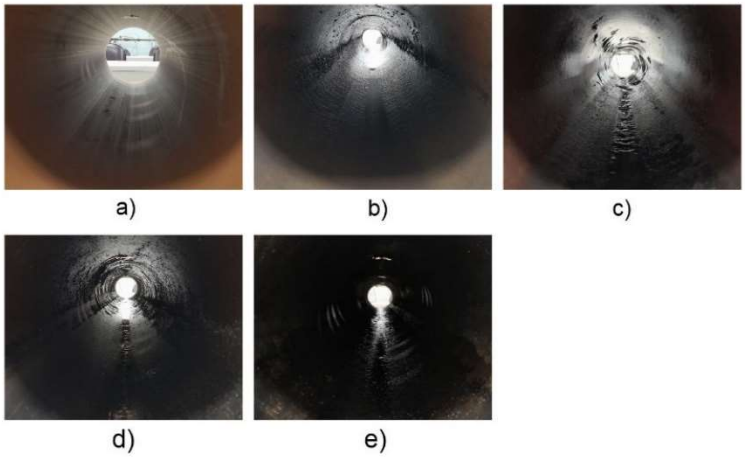
Gráfico 2 - Variação do coeficiente de Manning em função do tempo



Fonte: O autor, 2023.

Foram observadas nas amostras de tubulações, extraídas do sistema de esgotamento sanitário, o desenvolvimento clássico de uma película de limo biológico impregnada nas paredes internas dos condutos. Nas fotografias abaixo, é possível perceber uma evolução gradual desse fenômeno ao longo do tempo, verificada através da alteração da cor original de fabricação do material plástico (ocre) até alcançar uma nova tonalidade de coloração preta.

Fotografia 6 - Imagens internas das tubulações de PVC com idade = 0 (a), 5 anos (b), 15 anos (c), 25 anos (d) e 35 anos (e), com destaque para a formação de limo biológico nas paredes dos condutos



Fonte: O autor, 2023.

Fica nítido que os tubos de PVC, por mais que apresentem paredes lisas, com o passar do tempo acabam servindo como filtro biológico para o esgoto, permitindo a aderência de materiais orgânicos e inorgânicos, aumentando dessa forma o seu coeficiente de rugosidade.

Fotografia 7 - Comparação entre a tubulação nova de PVC (a) e amostra de tubulação mais antiga coletada no sistema, em operação há 35 anos (b)



a) b)

Fonte: O autor, 2023.

Com base nas evidências apresentadas nesse artigo científico, o valor do coeficiente de Manning em uma determinada rede coletora de esgoto com tubos de PVC, depois de um certo tempo em operação, se aproximará de uma constante, que não é mais função do material do tubo, mas sim representada pelo atrito causado pela formação de limo biológico nas paredes do conduto, indicando uma tendência para o valor de n na ordem de 0,013.

O valor do coeficiente de rugosidade n de Manning, utilizado no cálculo e dimensionamento de coletores de esgoto, possui forte influência na condição de autolimpeza das canalizações. Sobretudo, esse parâmetro hidráulico irá determinar qual a declividade mínima deve ser adotada em projeto a fim de atender o valor mínimo da tensão trativa média $\sigma = 1{,}00$ Pa prevista na norma NBR 9649 (ABNT, 1986).

Um desacerto na escolha correta desse parâmetro hidráulico pelo engenheiro projetista, poderá ocasionar uma série de situações desfavoráveis para o bom funcionamento do sistema, tais como: deposição de materiais sólidos nas tubulações, por conta da redução da velocidade de escoamento do fluido, causada pela força de resistência adicional dos atritos para uma mesma declividade do conduto prevista em projeto, bem como, redução da sua capacidade hidráulica ocasionada pelo aumento da altura da lâmina líquida para uma mesma vazão estimada.

3. CONCLUSÕES

Os resultados dos testes experimentais realizados em laboratório de hidráulica, utilizando amostras de tubos de PVC de diferentes idades, coletadas em trechos de redes coletoras de esgoto existente, mostraram que o coeficiente de rugosidade de Manning apresenta uma variação ao longo do tempo causada pela formação de uma película de limo biológico aderente às paredes dos condutos. O aumento do atrito, causado pela formação dessa nova camada, provoca a redução da velocidade de escoamento do fluido e aumento da altura da lâmina líquida, e, como consequência, redução da sua capacidade hidráulica.

Em razão das múltiplas singularidades ocorrentes na rede coletora e apoiado nos resultados apresentados nesse artigo, torna-se prudente a escolha para o valor do coeficiente de Manning $n = 0{,}013$ a ser adotado pelo projetista no cálculo e dimensionamento de redes de esgoto, conforme preconizado pela norma NBR 9649 (ABNT, 1986), em detrimento aos valores indicados pela norma NBR 14486 (ABNT, 2000).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro,1986.

2. _____. NBR 9649: Projetos de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

3. _____. NBR 14486: Sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário - Projeto de redes coletoras com tubos de PVC. Rio de Janeiro, 2000.

4. _____. NBR 7362: Sistemas enterrados para condução de esgoto - Requisitos para tubos com parede maciça e conexões de PVC. Rio de Janeiro, 1988.

5. TSUTIYA, Milton Tomoyuki; SOBRINHO, Pedro Alem. Coleta e Transporte de Esgoto Sanitário. 2. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

6. NUVOLARI, Ariovaldo. Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola. 2. ed. rev. atualizada e ampl. São Paulo: Blucher, 2011.

7. AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; FERNADEZ, Miguel Fernandez y. Manual de Hidráulica. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

8. MACHADO NETO, Joaquim Gabriel Oliveira; TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Tensão trativa: um critério econômico para o dimensionamento das tubulações de esgoto. Revista DAE, São Paulo, v. 45, n. 140, p. 73-87, mar. 1985. Disponível em: <https://revistadae.com.br/site/artigo/1208-Tensao-trativa-um-criterio-economico-para-o-dimensionamento-das-tubulacoes-de-esgoto>. Acesso em: 01 nov. 2023.

9. METCALF & EDDY INC. *Wastewater Engineering: Collection and Pumping of Wastewater. New York: McGraw-Hill*, 1981.

10. WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction. Manual of Practice NO. FD-5. First Edition. Washington, D.C. Water Environment Federation*, 1982.

11. WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. *Design and Construction of Sanitary and Storm Sewer. Manual of Practice NO. 9. Washington, D.C. WPCF*, 1970.

12. AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION. *Manning's n Values History of Research. Design Data 10. Irwing, TX. ACPA*, 2012.

13. CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. Métodos Numéricos para Engenharia. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.