

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANDREA FERRAZ SILVA

**QUANTIFICAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM CONEXÕES DE PVC SOLDÁVEL:
DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES K E COMPRIMENTOS EQUIVALENTES**

Alegrete

2016

ANDREA FERRAZ SILVA

**QUANTIFICAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM CONEXÕES DE PVC SOLDÁVEL:
DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES K E COMPRIMENTOS EQUIVALENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Me. Marília Ferreira
Tamiosso

Coorientadora: Prof. Dra. Fátima Cibele
Soares

Alegrete
2016

ANDREA FERRAZ SILVA

**QUANTIFICAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM CONEXÕES DE PVC SOLDÁVEL:
DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES K E COMPRIMENTOS EQUIVALENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29/11/2016.

Banca examinadora:



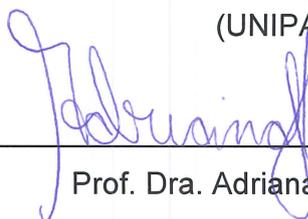
Prof. Me. Marília Ferreira Tamiosso

Orientadora
(UNIPAMPA)



Prof. Dra. Fátima Cibele Soares

Coorientadora
(UNIPAMPA)



Prof. Dra. Adriana Gindri Salbego

(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Ederli Marangon

(UNIPAMPA)

AGRADECIMENTO

Primeiramente, a Deus, por tantas bênçãos e por permitir o alcance dos objetivos traçados ao longo da minha vida.

Aos meus pais, Roberto e Elizabete, por toda a dedicação, amor, carinho e apoio devotos a mim e meu irmão, desde o início de nossas vidas.

Ao meu irmão pela compreensão da minha ausência.

Minha professora e orientadora, Marília Ferreira Tamiosso, por todo suporte, apoio e compreensão durante o andamento deste trabalho, por toda a sua disponibilidade, todas as oportunidades dadas a mim durante a graduação e a quem tenho com carinho e muita admiração.

Ao curso de Engenharia Civil e ao Laboratório de Hidráulica Experimental da Universidade Federal do Pampa - Campus Alegrete, que viabilizaram a realização do presente trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Hidráulica Experimental, Giulian e Cleber, por todo suporte e disponibilidade durante as montagens e ensaios tornando possível a realização deste trabalho.

Aos voluntários de pesquisa, Charles e Mariane, por toda a disponibilidade, confiança e interesse no projeto.

Aos amigos de graduação que contribuíram de forma significativa nesses anos e em minha vida: Thayse, Pedro, Carla, Maurício, Paulo Henrique, Jessica, Diego, Leticia, Eduarda, Paulo Rogério, João Vitor Salinas, Deividi, Helena, Micheli, Juliano, Anna Carolina e muitos outros, porém não menos importantes, por serem parceiros dentro e fora de sala.

Aos meus companheiros de todos os dias: Ihândora Ourique, Jéferson Lima, Leandro Oliveira, Eduarda Donicht, Carliana Melo, Fillipe Teixeira, Manoela Sauthier e Gabriele Espindola, por todo o companheirismo, diversão e apoio.

E a todos aqueles que, de alguma forma, direta ou indiretamente, acrescentaram neste trabalho e durante minha graduação.

RESUMO

Em dimensionamentos hidráulicos, a determinação das perdas de carga que ocorrem ao longo das tubulações e em pontos localizados faz-se necessária para a boa funcionalidade de um sistema de distribuição de água. O fenômeno é denominado como perda de carga e divide-se em perda de carga distribuída e localizada. Nos pontos onde há alteração do sentido do fluxo, são inseridas conexões hidráulicas de modo a viabilizar que o fluido em escoamento chegue até o ponto de distribuição. Verifica-se em normativas e literaturas consagradas, valores de parâmetros hidráulicos necessários em dimensionamentos para conexões mais usuais. Entretanto, algumas conexões não apresentam parâmetros quantificados, como exemplo, a conexão do tipo Curva de Transposição. Assim, o presente estudo objetivou determinar o coeficiente de perda de carga K e comprimento equivalente para duas conexões: Joelho 90° e Curva de Transposição. Para a conexão do tipo Joelho 90° de diâmetro nominal 32mm, fez-se aferição dos resultados experimentais de comprimento equivalente ao verificado na NBR 5626:1998 e o coeficiente K baseado em bibliografias consagradas. Ainda para Joelho 90°, fizeram-se também estimativas de perda de carga através de equações usuais em dimensionamentos de sistemas hidráulicos para a análise dos desempenhos das equações frente aos dados experimentais. Para a conexão do tipo Curva de Transposição, quantificou-se em laboratório as perdas de carga para os diâmetros nominais 20, 25 e 32mm e fez-se a verificação dos valores experimentais para coeficientes K e comprimentos equivalentes. Ao término do estudo, constatou-se que para as condições experimentais verificadas, a conexão do tipo Joelho 90° apresentou valores de comprimento equivalente experimentais inferiores ao verificado em normativa. Para a estimativa de perda de carga, verificou-se para a perda localizada no Joelho 90° utilizando valor correspondente ao diâmetro verificado em norma, que a equação de Fair-Whipple-Hsiao mais se aproximou dos dados experimentais. Para a conexão do tipo curva de transposição, através da perda de carga observada para a conexão avaliada, constatou-se valor de comprimento equivalente significativo, sendo necessária uma maior investigação para determinação de parâmetros hidráulicos não quantificados para essa conexão.

Palavras-Chave: Conexões, Perda de Carga, Equação de Bernoulli.

ABSTRACT

In hydraulic design, the determination of the load losses occurring along the pipes and at localized points is necessary for the good functionality of a water distribution system. The phenomenon is called a loss of charge and is divided into distributed and localized loss of charge. At points where there is a change in direction of the flow, the hydraulic connections are inserted in a way to allow the flow to reach the distribution point. It is verified in norms and consecrated literatures, values of hydraulic parameters necessary in the dimensioning for more usual connections. However, some connections do not have quantified parameters, such as the Curve Transposition type connection. Thus, the present study aimed to determine the coefficient of loss of load K and equivalent length for two connections: knee 90° and Transposition Curve. For the connection of type knee 90° nominal diameter 32mm, the experimental results of equivalent length to that verified in NBR 5626: 1998 and the coefficient K based on consecrated bibliographies were verified. Also for Knee 90° , load loss estimates were also made using standard equations in hydraulic system designs to analyze the performance of the equations versus the experimental data. For the Transposition Curve type connection, the load losses for the nominal diameters 20, 25 and 32mm were quantified in the laboratory and the experimental values were checked for the coefficients K and equivalent lengths. At the end of the study, it was verified that for the experimental conditions verified, the connection of the knee 90° type presented values of equivalent experimental length inferior to the one verified in normative. For the estimation of the loss of load, the loss for knee 90° , using a value corresponding to the diameter verified in the standard, was verified that the Fair-Whipple-Hsiao equation approached the experimental data. For the transposition curve type binding, through the observed loss of charge for the binding assessed, a significant equivalent length value was found, showing a significance e need of a study to determine the unquantified hydraulic parameters for this binding.

Keywords: Connections, Loss of Load, Bernoulli Equation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de classificação do movimento dos fluidos.....	16
Figura 2 – Experimento de Reynolds	19
Figura 3 - Representação gráfica da equação de Bernoulli	22
Figura 4 – Perfil de velocidades	24
Figura 5 – Harpa de Nikuradse	27
Figura 6 – Diagrama de Moody	30
Figura 7 – Mudança de direção do escoamento numa curva.....	37
Figura 8 – Conexões em forma de curva e joelho.....	38
Figura 9 - Representação esquemática do método de comprimentos equivalentes .	40
Figura 10 – Tipos de manômetros.....	44
Figura 11 – Simplificação da metodologia utilizada.....	46
Figura 12 – Bancada de perda de carga	47
Figura 13 – Curvas de transposição nos diâmetros 20mm (a), 25mm (b) e 32mm (c)	48
Figura 14 – Trecho com conexão do tipo Joelho 90° diâmetro 32mm (a) e trecho retilíneo de mesmo diâmetro (b).....	48
Figura 15 – Representação esquemática do trecho dotado de Joelho 90° na bancada experimental.....	49
Figura 16 – Trechos experimentais retilíneos e trechos contendo as curvas de transposição.....	50
Figura 17 – Conexões especiais utilizadas para adaptação entre bancada e trechos experimentais.....	51
Figura 18 – Conexão do tipo união soldável após lixamento	52
Figura 19 - Detalhe das extremidades dos trechos experimentais prontos para encaixe na bancada	53
Figura 20 - Base inferior do engate rápido pneumático para encaixe na tubulação..	54
Figura 21 - Implantação dos engates nos pontos de tomada de pressão dos trechos	54
Figura 22 - Detalhe do registro globo (a) e montante do percurso inserido na bancada dotado de registro gaveta (b).....	55
Figura 23 - Manômetros acoplados à montante e jusante da conexão	56
Figura 24 - Hidrômetro da bancada de perda de carga.....	57

Figura 25 - Manômetro analógico.....	58
Figura 26 - Detalhe de mangueira manométrica acoplada em engate para leitura de pressão	58
Figura 27 - Leitura de variação de pressão em trecho com conexão	59
Figura 28 - Leitura de variação de pressão em trecho retilíneo	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perda de Carga x Vazão correspondente à conexão do tipo Joelho 90°77

Gráfico 2 – Perda de carga experimental vs. Vazão para Curva de Transposição ..78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das regiões verificadas na Experiência de Nikuradse	28
Tabela 2 – Valores de rugosidade absoluta equivalente	32
Tabela 3 – Valores do coeficiente K para diversos acessórios	36
Tabela 4 – Perda de carga em conexões – Comprimento equivalente para tubo liso (tubo de plástico, cobre ou liga de cobre)	41
Tabela 5 - Perda de carga em conexões – Comprimento equivalente para tubo rugoso (tubo de plástico, cobre ou liga de cobre).....	41
Tabela 6 – Nomenclatura das montagens experimentais	49
Tabela 7 – Perda de carga distribuída para o trecho TRJ32.....	62
Tabela 8 – Perda de carga total para o trecho JO32.....	63
Tabela 9 – Parâmetros obtidos experimentalmente para Joelho 90°	64
Tabela 10 - Perda de carga obtida pela fórmula de Darcy-Weisbach	65
Tabela 11 – Perda de carga obtida pela fórmula de Fair-Whipple-Hsiao	65
Tabela 12 - Perda de carga obtida pela fórmula de Hazen-Williams.....	66
Tabela 13 - Comparativo entre valores de perda de carga observados em laboratório aos calculados pelas equações usuais	66
Tabela 14 – Perdas de carga distribuídas experimentais para trecho retilíneo com DN 20mm (Trecho TR20).....	68
Tabela 15 - Perda de carga experimental para trecho com conexão do tipo curva de transposição com DN 20mm (Trecho CT20).....	69
Tabela 16 - Coeficientes de perda de carga localizada e comprimentos equivalentes experimentais para conexão do tipo curva de transposição com DN 20mm (Trecho CT20)	70
Tabela 17 - Perdas de carga distribuídas experimentais para trecho retilíneo com DN 25mm (Trecho TR25)	71
Tabela 18 – Perda de carga experimental para trecho com conexão do tipo curva de transposição com DN 25mm (Trecho CT25).....	72
Tabela 19 - Coeficientes de perda de carga localizada e comprimentos equivalentes experimentais para conexão do tipo curva de transposição com DN 25mm (Trecho CT25)	73
Tabela 20 - Perdas de carga distribuídas experimentais para trecho retilíneo com DN 32mm (Trecho TR32)	74

Tabela 21 - Perda de carga experimental para trecho com conexão do tipo curva de transposição com DN 32mm (Trecho CT32)	75
Tabela 22 - Coeficientes de perda de carga localizada e comprimentos equivalentes experimentais para conexão do tipo curva de transposição com DN 32mm (Trecho CT32)	76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
1.1.3 Justificativa	14
1.1.4 Estrutura do Trabalho	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Tipos e Regimes de Escoamento	16
2.2 Equações Fundamentais do Escoamento	20
2.2.2 Equação de Bernoulli	21
2.3 Perda de Carga em tubulações	23
2.3.1 Perda de carga distribuída	24
2.3.1.1 Fator de atrito	25
2.3.1.2 Equações empíricas para escoamento turbulento	33
2.3.1.2.1 Equação de Hazen-Williams	33
2.3.1.2.2 Equação de Fair-Whipple-Hsiao	34
2.3.2 Perda de carga localizada	35
2.3.2.1 Joelhos e curvas	36
2.3.3 Método dos comprimentos equivalentes	39
2.4 Análises experimentais de perda de carga	42
2.4.1 Medidas de Pressão	43
2.5 Estudos realizados	44
3 METODOLOGIA	46
3.1 Preparo dos trechos experimentais	46
3.1.1 Joelho 90°	49
3.1.2 Curva de Transposição	50
3.2 Ligação dos trechos com Curva de Transposição ao sistema fechado	55
3.3 Determinação da vazão experimental	56
3.4 Determinações de perda de carga experimental	57
3.5 Cálculo do parâmetro K e Leq das conexões	60

3.6	Comparação dos dados observados com os obtidos com base nas bibliografias	61
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
4.1	Joelho 90°	62
4.2	Curva de Transposição	67
4.3	Análises Gráficas	77
4.3.1	Joelho 90°	77
4.3.2	Curva de Transposição	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.1	Conclusões	80
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

Para os sistemas de dimensionamento de instalações hidráulicas prediais, a quantificação das perdas de carga ocorridas ao longo do comprimento das tubulações e em pontos localizados devido à presença de peças e/ou dispositivos hidráulicos é de suma importância para a boa funcionalidade do sistema de distribuição.

Estas instalações são compostas por trechos retilíneos, fazendo-se da utilização de acessórios e conexões de modo a viabilizar o sistema de distribuição e possibilitando o fluxo de água até o ponto de fornecimento.

Contudo, verifica-se em condutos forçados a ocorrência de dissipação de energia do escoamento em forma de calor, que ocorre devido ao atrito entre as partículas do fluido e, também, entre o contato das partículas com a parede da tubulação. Esse fenômeno é denominado como perda de carga e divide-se em dois tipos: distribuído e localizado. Trechos retilíneos são responsáveis pela perda de carga distribuída e nos locais onde há alteração do sentido do fluxo, inserção de conexões ou outras peças que interfiram no escoamento, ocorrem as perdas localizadas.

Para instalações de distribuição de pequenos diâmetros, as perdas de carga são significativas. Para as tubulações feitas de diferentes materiais, tais como PVC, ferro fundido e aço galvanizado, são disponibilizadas pelos fabricantes as informações necessárias sobre as conexões (como parâmetros que possibilitam o dimensionamento) devido à grande variedade de conexões atualmente no mercado e a evolução das tecnologias de fabricação desses materiais.

Tais parâmetros são diferentes para cada acessório pelo fato de relacionar-se diretamente com a geometria singular de cada conexão. Assim, há a possibilidade de comprometimento dos sistemas de distribuição quando não há uma caracterização dos parâmetros, acarretando em erros grosseiros no dimensionamento.

A motivação para estudo das conexões singulares abordadas neste trabalho se dá devido à falta de disponibilidade de parâmetros para algumas das conexões, como por exemplo: curva de transposição, luva de redução, tê de redução, entre outras.

Assim, o presente trabalho visa quantificar as perdas causadas pela presença de peças hidráulicas, determinando valores para os coeficientes de perda de carga K das conexões verificadas e respectivos comprimentos equivalentes L_{eq} .

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar experimentalmente as perdas de carga em condutos forçados ocasionadas pela presença de conexões singulares em um sistema de tubulação feito em material PVC soldável.

1.1.2 Objetivos Específicos

Estão, a seguir, descritos os objetivos específicos deste trabalho.

I. Quantificar experimentalmente a perda de carga localizada em condutos forçados para os diâmetros de 32mm da conexão hidráulica em material PVC soldável do tipo Joelho 90°.

II. Quantificar experimentalmente a perda de carga localizada em condutos forçados para os diâmetros de 20mm, 25mm e 32mm da conexão hidráulica em material PVC soldável do tipo curva de transposição.

III. Determinar o valor do coeficiente de perda de carga K para as conexões verificadas.

IV. Determinar o comprimento equivalente L_{eq} , em metros de tubulação, das conexões verificadas.

V. Comparar os dados verificados experimentalmente aos obtidos através dos métodos usuais e valores verificados na bibliografia.

1.1.3 Justificativa

O conhecimento das perdas de carga decorrentes da presença de conexões singulares em um sistema de tubulação se faz necessário para o dimensionamento eficaz de um sistema de distribuição de água.

Atualmente, a verificação da perda de carga localizada é feita através de uma analogia, para facilitar os cálculos, onde as singularidades (conexões) existentes são expressas em termos de comprimentos equivalentes de condutos retilíneos ou em número de diâmetros (dependendo do material da conexão), que provoquem a mesma perda de carga gerada pelo acessório.

Há grande variedade de parâmetros já quantificados para peças hidráulicas mais usuais em sistemas de tubulações prediais, como curvas 90°, joelhos 90°, tês, registros, entre outros.

Contudo, alguns formatos singulares de conexões não constam valores práticos de perda de carga localizada em bibliografias de fácil acesso para auxílio no dimensionamento de conexões, sendo também bastante utilizadas em redes hidráulicas.

Além disso, sabe-se que a perda de carga nas diferentes peças sofrem variações em função do diâmetro da mesma, da vazão transportada e do material das paredes internas da tubulação. A estimativa da perda de carga em projetos hidráulicos deve considerar estes fatores e, para que o condutor (tubulação) seja dimensionado e funcione corretamente, é essencial que as perdas de carga calculadas correspondam aos valores mais próximos da realidade.

1.1.4 Estrutura do Trabalho

Capítulo 1: Contempla a introdução, delimitação do assunto abordado e exposição do tema. Apresenta, também, os objetivos gerais, objetivos específicos e justificativa da investigação do trabalho realizado.

Capítulo 2: Contempla a revisão bibliográfica em torno das atividades desenvolvidas para o embasamento teórico e entendimento do trabalho.

Capítulo 3: Apresenta a descrição integral da metodologia, materiais utilizados e procedimentos para execução da investigação.

Capítulo 4: Contempla uma análise criteriosa para os resultados obtidos na investigação e demais comparações delimitadas nos objetivos específicos do trabalho.

Capítulo 5: Apresenta as conclusões baseadas nos resultados obtidos da investigação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente estudo, serão abordados os conceitos referentes à hidrodinâmica, que consiste no ramo da Hidráulica que estuda o movimento dos fluidos e as causas relacionadas ao movimento.

2.1 Tipos e Regimes de Escoamento

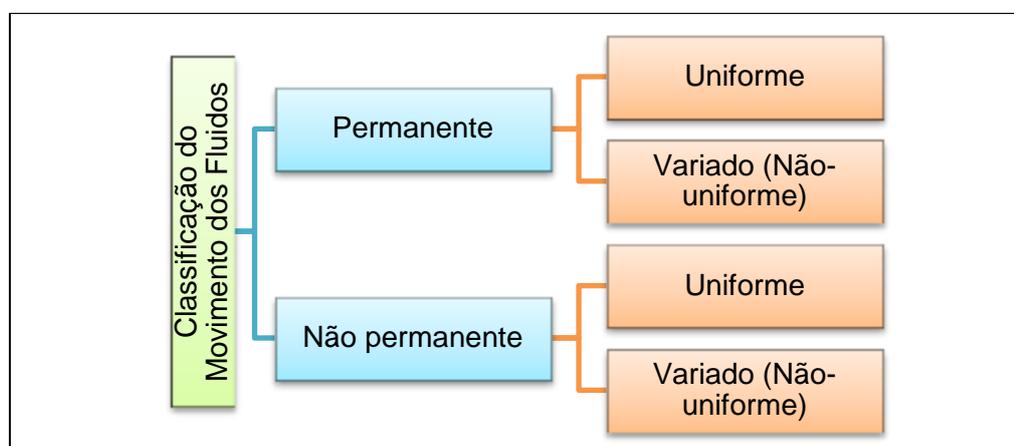
Na hidráulica, existe grande variedade de conceitos para escoamentos dado em função das características observadas no fluxo, são as classificações: laminar, turbulento, permanente, variável, uniforme, livre, forçados, entre outras denominações.

Diz-se que um escoamento é permanente quando a velocidade e pressão do fluido em um ponto do escoamento não variam com o tempo. O contrário ocorre em escoamentos não permanentes, ou seja, a velocidade e pressão variam de um ponto a outro no escoamento.

Quando em uma trajetória todos os pontos apresentam mesma velocidade não havendo variação, diz-se tratar de um escoamento uniforme. Quando não há constância no espaço de velocidade em um tempo considerado ao longo dos pontos em uma trajetória, trata-se de escoamento variado, ou não uniforme.

Abaixo, a Figura 1 esquematiza como se procede a classificação mais simplificada do movimento dos fluidos.

Figura 1 – Fluxograma de classificação do movimento dos fluidos



Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação à pressão de escoamento, os condutos são divididos em dois tipos: escoamento em superfície livre (ou simplesmente livre) e em pressão (ou forçado), como colocado por Porto (2004).

Em condutos livres, devido ao escoamento apresentar uma superfície livre, a pressão atuante consiste na pressão atmosférica, qualquer que seja a seção transversal. Como característica deste tipo de escoamento, pode-se dizer que ele se dá necessariamente pela ação da gravidade e que qualquer perturbação em trechos localizados pode dar lugar a modificações na seção transversal da corrente em outros trechos (PORTO, 2004, p. 4).

Já em condutos forçados, a seção é plena (ou cheia, o fluido ocupa toda a seção) e sempre fechada de modo a garantir uma pressão interna nas tubulações diferente da pressão atmosférica, o que possibilita um fluxo ascendente ou descendente. Porto (2004) descreve que nesta situação de escoamento qualquer perturbação do regime, em uma seção da tubulação, acarreta em alterações de velocidade e pressão em diversos pontos no escoamento, sem que haja alteração na seção transversal.

No presente trabalho, a análise da pressão de funcionamento das tubulações se restringirá à situação de ocorrência de escoamento em condutos forçados por se tratar da condição de funcionamento das tubulações no procedimento experimental, sendo então o foco de estudo.

Classifica-se um escoamento como laminar quando as partículas do fluido movem-se em trajetória definida, de modo onde há a preservação da identidade do meio. Nesse tipo de escoamento, a ação da viscosidade do fluido é preponderante no que tange à propensão ao surgimento de turbulência. Escoamento laminar ocorre em fluidos muito viscosos e que escoam em baixas velocidades, conforme colocado por Azevedo Netto (1998).

Em escoamentos turbulentos, ocorre movimento aleatório, ocasionando trajetórias irregulares e transferência de quantidade de movimento entre regiões da massa líquida, situação esta bastante comum em problemas práticos de Engenharia. No estudo da hidráulica, o fluido em questão, de modo geral é a água, a qual possui baixa viscosidade, observando assim a ocorrência mais frequente de escoamentos turbulentos para esse líquido, como colocado por Baptista (2010).

Osborne Reynolds, em 1883, realizou um experimento que ficou conhecido por Experimento de Reynolds, o qual buscou observar o comportamento de fluidos

líquidos em escoamento. A Figura 2(a) representa esquematicamente o experimento realizado para observação. Azevedo Netto (1998) descreve o experimento realizado por Reynolds, consistindo das etapas descritas a seguir.

O aparato montado consiste em um tubo transparente colocado em um recipiente com paredes de vidro para observação do fluxo. O formato alargado da entrada do tubo à montante é proposital para evitar a formação de turbulência, de modo a não prejudicar a observação à jusante. Na seção de entrada, é inserido o corante e a vazão do fluxo pôde ser controlada por uma torneira na extremidade.

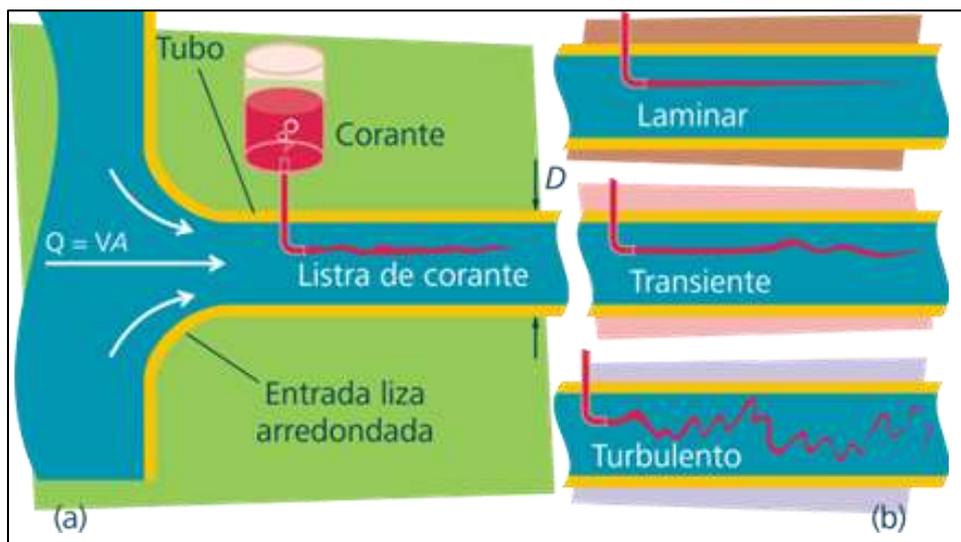
Com a abertura gradual da torneira, observou-se a formação do um filamento retilíneo colorido. Para tal movimento, onde as linhas se dão em trajetória retilínea, paralela e definida, verifica-se a ocorrência de escoamento laminar.

Abrindo um pouco mais a torneira, ocorre um aumento da velocidade, e o filete colorido começa a apresentar ondulações. Para essas características, há a denominação de escoamento de transição.

Para um dado aumento da vazão através da abertura da torneira, há o aumento da velocidade do líquido no escoamento, causando difusão do filete colorido no fluxo, acarretando em um movimento oscilante e desordenado nas partículas. Para qualquer instante, há uma componente transversal de velocidade. Para esta situação, verifica-se ocorrência de escoamento turbulento.

A Figura 2 (b) mostra o comportamento do filete colorido no escoamento. Em primeiro momento, escoamento laminar; em segundo momento, escoamento de transição; e por fim, escoamento turbulento.

Figura 2 – Experimento de Reynolds



Fonte: VILANOVA (2015, não paginado)

Reynolds, após suas investigações teóricas e experimentais, trabalhando com diferentes diâmetros e temperaturas, concluiu que o melhor critério para se determinar o tipo de movimento em uma canalização não se prende exclusivamente ao valor da velocidade, mas ao valor de uma expressão sem dimensões, na qual se considera também a viscosidade do líquido (AZEVEDO NETTO, 1998, p. 112).

A equação 1 determina o adimensional Número de Reynolds.

$$Rey = \frac{vD}{\nu} \quad \dots(1)$$

onde:

v = velocidade do fluido (m/s);

D = Diâmetro da tubulação (m);

ν = viscosidade cinemática do fluido (m²/s).

Se o escoamento se verificar com Rey superior a 4000, o movimento será turbulento. Em condições ideais de laboratório, já se tem observado o regime laminar com valores de Re superiores a 40000; entretanto, nessas condições, o regime é muito instável, bastando qualquer causa perturbadora, por pequena que seja, para modificá-lo. Na prática, admite-se que tais causas perturbadoras estejam sempre presentes (AZEVEDO NETTO, 1998, p. 112).

Em tubulações, verifica-se ocorrência de regime laminar estável para valores de Rey inferiores a 2000. Azevedo Netto (1998) denomina como zona crítica a faixa entre 2000 e 4000 para valores de número de Reynolds, faixa onde não é possível determinar com segurança a perda de carga em tubulações que apresentam esta característica de escoamento. O autor ainda destaca que, em condições práticas, que o regime de escoamento em tubulações que conduzem água é sempre turbulento.

2.2 Equações Fundamentais do Escoamento

2.2.1 Equação da Continuidade

Segundo Baptista (2010), decorrente da Lei da Conservação de Massa, a Equação da Continuidade estabelece a afirmação de que a quantidade de massa que entra em uma determinada seção de uma tubulação é a mesma que sai da seção. Considerando duas seções de uma tubulação, entrada (seção 1) e saída (seção 2), tem-se o disposto na equação 2.

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad \dots(2)$$

onde:

ρ : Massa específica do fluido (kg/m^3);

A : Área da seção transversal do escoamento (m^2);

V : Velocidade média do escoamento (m/s).

Levando em consideração de que o interesse da hidráulica é tratar praticamente de escoamentos onde fluido em questão é a água, sendo este considerado incompressível, de massa específica constante em regime permanente, tem-se, então, vazão constante. Assim, a Equação da Continuidade pode ser representada pela equação 3.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad \dots(3)$$

onde:

Q = Vazão do escoamento (m^3/s);

V = Velocidade média do escoamento (m/s);

A = Área da seção transversal do escoamento (m²).

2.2.2 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli consiste em um caso particular da Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece que a mudança de energia interna de um sistema é igual à soma da energia adicionada ao fluido com o trabalho realizado pelo fluido.

A equação 4 consiste na forma geral de abordar a afirmação anterior, considerando um caso de um escoamento entre duas seções, para um fluido incompressível em regime permanente de escoamento.

Cada parcela representa um tipo de energia do elemento fluido de peso unitário, cuja unidade pode se expressa por N.m/N de fluido, ou apenas metro (m), possuindo assim dimensão linear e cada parcela recebe a denominação de carga.

$$\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right) = Hm + \Delta h \quad \dots(4)$$

onde:

P = Pressão no ponto (N);

γ = Peso específico do fluido (N/m³);

α = Coeficiente de Coriolis (adimensional);

Z = Energia ou carga de posição (m);

$\frac{P}{\gamma}$ = Energia ou carga de pressão (m);

$\alpha \frac{V}{2g}$ = Energia ou carga cinética (m);

Hm = Energia inserida ou removida do sistema considerada caso exista alguma máquina como bomba ou turbina (m);

Δh = Perda de carga (m).

O fator α presente na parcela referente à carga cinética é denominado como coeficiente da energia cinética, ou de Coriolis, para correção do cálculo referente à parcela da energia cinética. Isto porque dentro de uma seção, devido ao atrito com

as paredes do conduto, a velocidade é variável, podendo distanciar muito do valor médio, sendo que cada trajetória possui uma linha de energia.

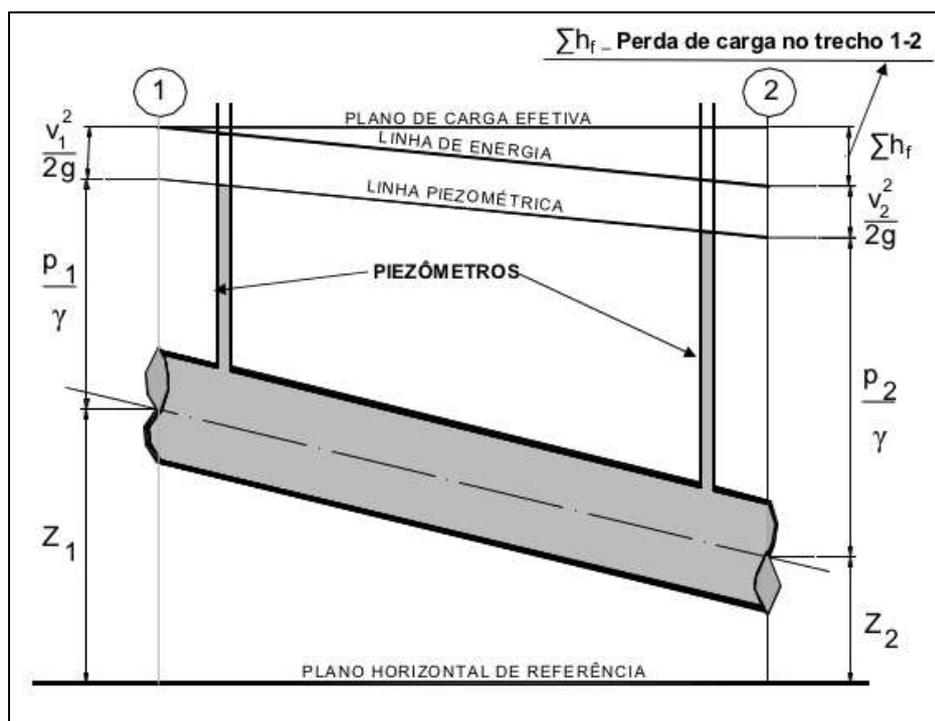
Em condutos forçados, a distribuição de velocidades geralmente é uniforme, e a linha de energia é correspondente à velocidade média. Por este motivo, em geral adota-se o valor de α igual a 1, exceto em situações que demandem precisão ou onde exijam fortes razões para supor variações significativas das velocidades nas seções do escoamento, como descrito por Baptista (2010).

Na expressão anterior, o somatório das parcelas $Z + \frac{p}{\gamma}$ recebe a denominação de Energia Potencial, ou cota piezométrica; a parcela $\alpha \frac{v^2}{2g}$ é denominada Energia Cinética.

De forma simples pode ser feita a determinação da perda de carga em obras hidráulicas, pois os termos da equação 4 são facilmente determinados. Contudo, prever a perda em tubulações hidráulicas tem sido foco de investigação por várias gerações de cientistas, segundo Baptista (2010).

A Figura 3 esquematiza a representação gráfica da Equação de Bernoulli para conduto forçado.

Figura 3 - Representação gráfica da equação de Bernoulli



Fonte: Tronolone (2011, não paginado)

A Linha Piezométrica corresponde à parcela de energia potencial $\left(Z + \frac{P}{\gamma}\right)$; a Linha de Energia corresponde ao somatório de todas as parcelas de carga $\left(Z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{v^1}{2g}\right)$ e, por fim, o Plano de Carga Efetivo corresponde à Linha de Carga Efetiva acrescida da perda de carga no escoamento $\left[\left(Z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{v^1}{2g}\right) + \Delta h\right]$.

Todas as linhas são tomadas em relação a um plano horizontal de referência.

2.3 Perda de Carga em tubulações

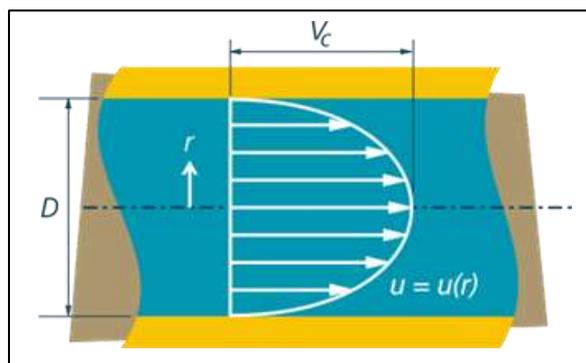
O líquido a escoar transforma parte de sua energia em calor. Essa energia não é mais recuperada na forma de energia cinética e/ou potencial e, por isso, denomina-se perda de carga.

Para efeito de estudo, a perda de carga, denotada por Δh , é o somatório da perda de carga contínua (ou distribuída) $\Delta h'$ com a perda de carga localizada $\Delta h''$, sendo a primeira considerada ao longo da tubulação, e a outra, devido à presença de conexões, aparelhos, entre outros, em pontos particulares do conduto (BAPTISTA, 2010, p. 67).

Como pode ser observado na Figura 3, o somatório das três cargas no ponto 2 não se iguala à carga total verificada no ponto 1. A diferença entre as cargas nos pontos, denominada anteriormente como perda de carga, é de grande importância nos problemas de engenharia hidráulica e alvo de várias investigações, como destacado por Azevedo Netto (1998).

Azevedo Netto (1998) ainda destaca que, em situações onde se verifica ocorrência de regime laminar, a resistência ao escoamento se dá devido inteiramente à ação da viscosidade do fluido. Contudo, comumente essa perda de carga é denominada como perda por atrito ou fricção, como ocorre em sólidos, o que não deve se supor. O fluido junto às paredes da tubulação apresenta velocidade nula, uma vez que não há movimentação deste junto às paredes, como colocado na Figura 5.

Figura 4 – Perfil de velocidades



Fonte: VILANOVA (2015, não paginado)

Observa-se no perfil de velocidades que a velocidade do fluido varia de zero junto à parede da tubulação até o seu valor máximo no eixo central da mesma.

2.3.1 Perda de carga distribuída

A perda de carga contínua consiste na perda ocorrida ao longo do comprimento da tubulação, devendo-se ao efeito causado pela viscosidade do fluido em escoamento e da rugosidade das paredes da tubulação, causando variação no perfil de velocidades.

A perda de carga distribuída e o comprimento da tubulação determinam a razão que expressa a inclinação ou o gradiente da linha de carga, chamada de perda de carga unitária. A equação 5 fornece o gradiente da linha de carga.

$$J = \frac{\Delta h'}{L} \text{ (m/m)} \quad \dots(5)$$

onde:

$\Delta h'$ = Perda de carga distribuída (m);

L = Comprimento da tubulação (m).

A perda de carga distribuída $\Delta h'$ pode ser determinada a partir da relação que leva em consideração os parâmetros geométricos do escoamento no conduto e propriedades do fluido, expressa pela Equação de Darcy-Weisbach, também chamada de Equação Universal. A expressão é aplicável aos problemas de

escoamento para qualquer líquido em tubulação, sendo que para condutos circulares apresenta-se conforme equação 6.

$$\Delta h = f \frac{L.v^2}{D.2g} \quad \dots(6)$$

Também pode ser expressa em função da vazão, assumindo a forma da equação 7.

$$\Delta h = 0,0827f \frac{L.Q^2}{D^5} \quad \dots(7)$$

onde:

f : Fator de atrito;

L : Comprimento da tubulação (m);

v : velocidade do fluído (m/s);

Q : Vazão (m³/s)

D : Diâmetro da tubulação (m).

2.3.1.1 Fator de atrito

O fator de atrito deve ser calculado conforme descrito adiante, sendo dependente do tipo de regime de escoamento, número de Reynolds e da rugosidade do material.

Quando o escoamento é laminar, a perda de carga deve-se unicamente à resistência oferecida pelo fluido em escoamento em função da sua viscosidade. Já no escoamento turbulento, além da viscosidade, existe ainda perda de energia nos choques moleculares oriundos do movimento desordenado das partículas, podendo este escoamento ainda ser classificado com Liso, Rugoso ou de Transição.

Pelo princípio da aderência, uma partícula fluida em contato com a parede do tubo tem velocidade nula e existe uma camada delgada de fluido, adjacente à parede, na qual a flutuação da velocidade não atinge os mesmos valores que nas regiões mais distantes da parede. A região onde isso acontece é chamada de subcamada limite laminar e caracteriza-se por uma variação praticamente linear da velocidade na direção principal do escoamento, como descrito por Porto (2004).

A partir da subcamada limite laminar, desenvolve-se uma pequena zona de transição e nas regiões mais distantes da parede o núcleo turbulento, ocupando praticamente toda a área da seção.

Porto (2004) destaca três situações:

I) Quando as rugosidades da parede da tubulação estão totalmente cobertas pela subcamada limite laminar;

II) Quando as asperezas da parede afloram a subcamada limite laminar, alcançando o núcleo turbulento e assim ocasionando fortes turbulências;

III) Condição intermediária, quando apenas as asperezas maiores transpassam a subcamada limite laminar, alcançando o núcleo turbulento.

Porto (2004) coloca que o termo $\frac{u^* \cdot \varepsilon}{\nu}$ é denominado como número de Reynolds da rugosidade, onde ε é a rugosidade da tubulação, em m; u^* é a velocidade de atrito, em m/s; e ν é a viscosidade cinemática m²/s. O termo substitui o diâmetro na equação do número de Reynolds (equação 1) pela rugosidade da tubulação.

Para a situação I, o escoamento é denominado como Escoamento Turbulento Hidraulicamente Liso e apresenta número de rugosidade de Reynolds inferior a 5.

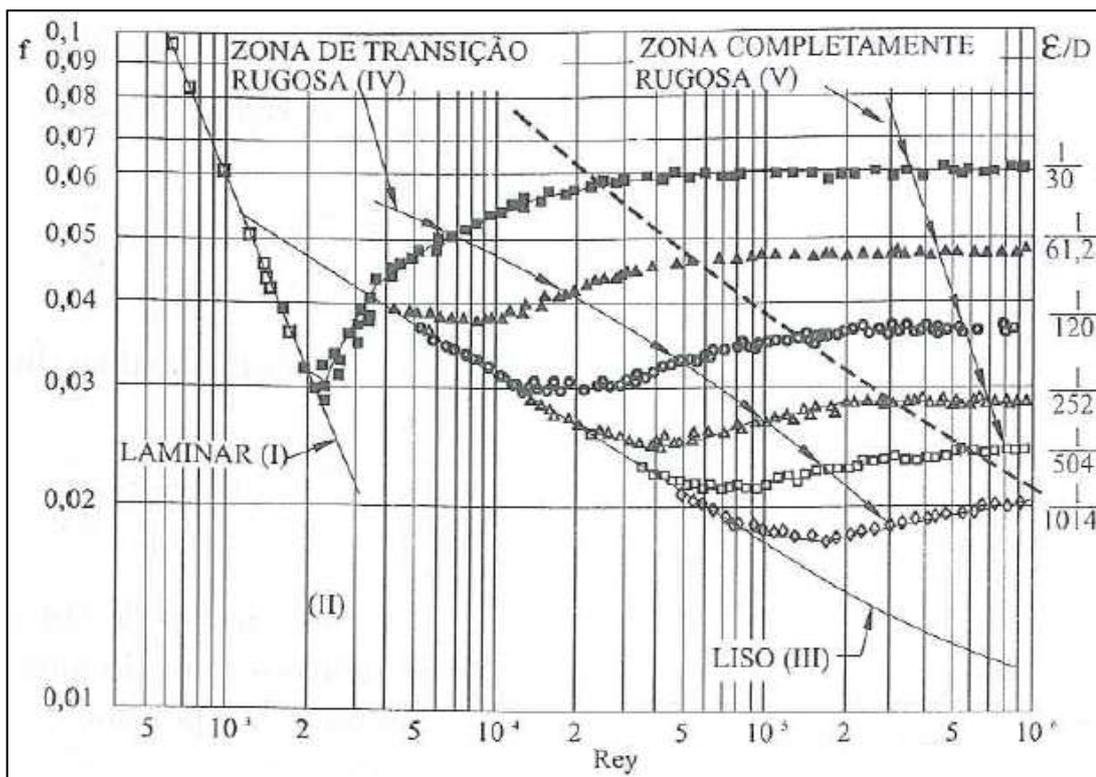
Para a situação II, o escoamento é denominado como Escoamento Turbulento Hidraulicamente Rugoso, apresentando número de rugosidade de Reynolds maiores que 70.

E por fim, para a situação III, o escoamento é denominado como Escoamento Turbulento Hidraulicamente Misto ou de Transição, apresentando número de rugosidade no intervalo de $5 \leq \frac{u^* \cdot \varepsilon}{\nu} \leq 70$.

J. Nikuradse, em 1933, divulgou resultados de investigações experimentais que visavam determinação do fator de atrito para tubulações circulares.

Para a determinação, Nikuradse criou uma rugosidade artificial com uso de areia em tubulações lisas a fim de levantar a relação entre vários parâmetros como fator de atrito, rugosidade relativa do material e número de Reynolds, criando um gráfico denominado Harpa de Nikuradse (Figura 5), que apresenta um resumo do resultado dos testes.

Figura 5 – Harpa de Nikuradse



Fonte: Porto (2004, p. 37)

O gráfico proposto por Nikuradse permite determinar o fator de atrito a partir do número de Reynolds e da rugosidade relativa (ϵ/D), apresentando cinco regiões, descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das regiões verificadas na Experiência de Nikuradse

Região	Faixa de número de Reynolds	Descrição
I	$Re < 2300$	Escoamento Laminar; fator de atrito independente da rugosidade devido ao efeito da subcamada limite laminar ($f=64/Re$).
II	$2300 < Re < 4000$	Região crítica no qual o valor do fator de atrito não fica caracterizado.
III	-	Escoamento Turbulento Hidraulicamente Liso. Influenciada pela subcamada limite laminar; o fator de atrito só depende do número de Reynolds.
IV	-	Transição entre o escoamento turbulento hidraulicamente liso e rugoso; o fator de atrito depende simultaneamente da rugosidade relativa e do número de Reynolds.
V	-	Escoamento Hidraulicamente Rugoso. Turbulência completa; o fator de atrito depende da rugosidade relativa e independe do número de Reynolds.

Fonte: Adaptado de Porto (2004, p. 36)

O fator de atrito é um elemento básico na verificação e análise de vários tipos de problemas verificados em escoamentos. A determinação desse parâmetro é feita levando em consideração a rugosidade das tubulações em questão. As equações foram propostas por Nikuradse, em 1932.

Porto (2004) cita as faixas de rugosidade de Reynolds para a aplicação das equações de determinação de fator de atrito. Para tubos lisos, a determinação do fator de atrito se dá pela aplicação da equação 8, válida para $\frac{u^* \cdot \varepsilon}{\nu} < 5$ e $\frac{Re \sqrt{f}}{D/\varepsilon} < 14,14$.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{Re \sqrt{f}}{2,51} \right) \quad \dots(8)$$

Para a situação de tubos rugosos, o fator de atrito é dado pela equação 9, válida para: $\frac{u^* \cdot \varepsilon}{\nu} > 70$ e $\frac{Re \sqrt{f}}{D/\varepsilon} > 198$.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(3,71 \frac{D}{\varepsilon} \right) \quad \dots(9)$$

onde:

ε : Rugosidade da tubulação (m);

u^* : Velocidade de atrito (m/s);

ν : viscosidade cinemática (m²/s);

$\frac{u^* \cdot \varepsilon}{\nu}$: número de Reynolds da rugosidade.

Colebrook e White, em 1939, baseou-se nos dados experimentais da Experiência de Nikuradse e propôs a equação (10) para determinação do fator de atrito em tubulações com escoamento turbulento de transição. A equação é uma combinação das equações 8 e 9, aplicável apenas ao seguinte intervalo:

$$14,14 < \frac{Re \sqrt{f}}{D/\varepsilon} < 198.$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \dots(10)$$

onde:

f : Fator de atrito da tubulação (adimensional);

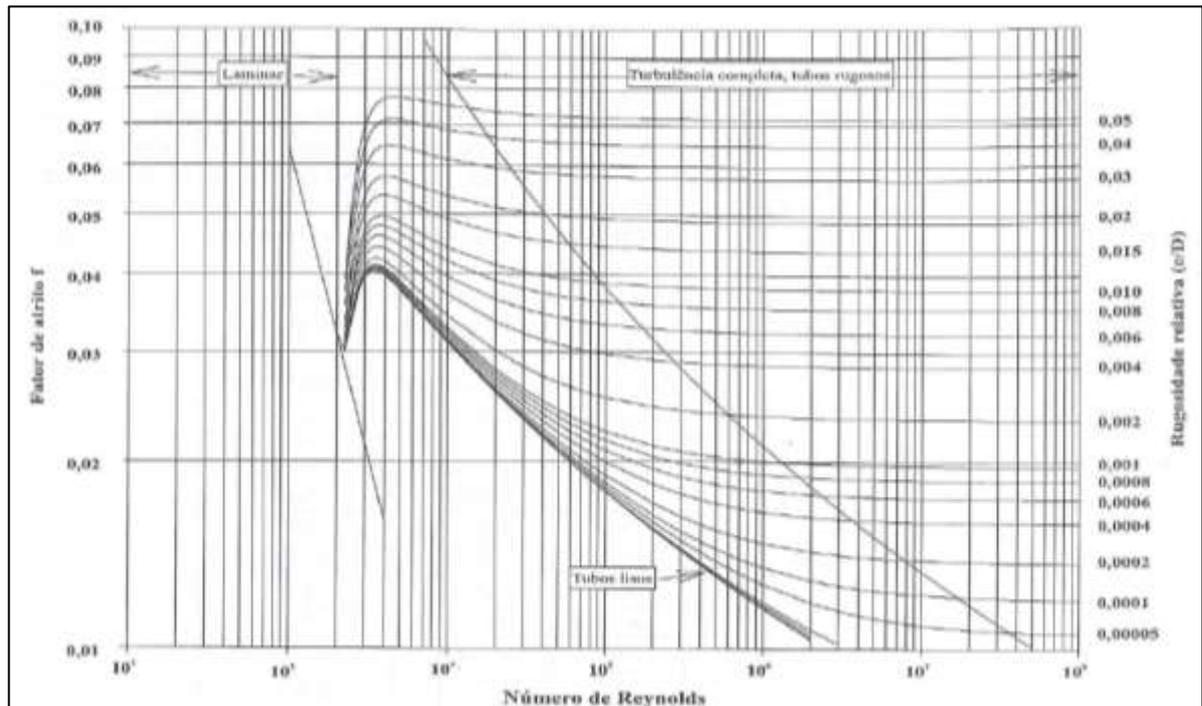
D : Diâmetro interno da tubulação (m);

ε : Rugosidade da tubulação (m).

Moody, em 1944, realizou a ampliação do trabalho feito por Colebrook e White, representando a equação em um gráfico e a formulação do fator de atrito trabalhando com tubulações comerciais de variados materiais.

A Figura 6 representa o Diagrama de Moody, gráfico na forma de diagrama apresentando eixos coordenados em escala logarítmica, com fator de atrito f em ordenadas e número de Reynolds em abcissas, para variados valores de rugosidade relativa (ε/D).

Figura 6 – Diagrama de Moody



Fonte: Porto (2004, p. 47)

Devido à dificuldade computacional de utilização da expressão de Colebrook-White por não explicitar o valor de f , o fator pode ser expresso reescrevendo a formulação em relação à velocidade média, como na equação 11.

$$V = -2\sqrt{2gDJ} \log\left(\frac{\epsilon}{3,71D} + \frac{2,51v}{D\sqrt{2gDJ}}\right) \quad \dots(11)$$

onde:

V: Velocidade média do escoamento (m/s);

J: Perda de carga unitária (m/m).

Para sanar esta dificuldade, algumas fórmulas explícitas e aproximadas para determinação do fator de atrito têm sido apresentada na literatura, entre elas, a de Swamee-Jain (PORTO, 2004, p. 45).

A fórmula explícita proposta por Swamee-Jain, aplicável para $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 10^{-2}$ e $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^8$ é colocada pela equação 12.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right) \right]^2} \quad \dots(12)$$

Para diversos materiais, as especificações da rugosidade absoluta equivalente não são de fácil especificação devido aos processos industriais de fabricação e grau de acabamento, como colocado por Azevedo Netto (1998).

A Tabela 2 fornece valores médios indicativos da rugosidade equivalente para vários materiais.

Tabela 2 – Valores de rugosidade absoluta equivalente

Material	Rugosidade absoluta equivalente
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,40
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6,0
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,3
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,1
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,2
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

Fonte: Azevedo Netto (1998, p. 49)

Os parâmetros de rugosidade existentes são valores numéricos resultantes de integrações ou de operações matemáticas simples de perfis amostrais se

superfícies. Logo, são representações sujeitas a diversos erros de medição e interpretação. Contudo, sua praticidade é inegável. (FACCIO, 2003, p. 72).

2.3.1.2 Equações empíricas para escoamento turbulento

Visto a complexidade da determinação do fator de atrito, foram desenvolvidas diversas equações empíricas para o cálculo da perda de carga, de forma a facilitar sua estimativa.

A perda de carga unitária no escoamento hidraulicamente turbulento rugoso varia proporcionalmente ao quadrado da velocidade média, e depende apenas da rugosidade relativa, não dependendo do número de Reynolds. Existem na bibliografia várias formulações empíricas - equações de resistência – aplicáveis às tubulações com seção circular e, de maneira geral, sendo expressas na forma da equação 13.

$$J = K \frac{Q^n}{D^m} \quad \dots(13)$$

onde:

D = Diâmetro interno da tubulação (m);

Q = Vazão média do escoamento (m³/s).

Os parâmetros K, n e m são variáveis para cada formulação e faixa de aplicabilidade das equações, geralmente com valores de K que dependem apenas do tipo de material do conduto, pois depende do valor fator de atrito f e este, por sua vez, relaciona-se diretamente com o tipo de material e grau de turbulência.

Para tais fórmulas, apesar de apresentar grande praticidade, deve-se cuidado às limitações de utilização.

Na sequência, estão descritas as equações empíricas mais utilizadas na prática para estimativa da perda de carga em tubulações hidráulicas: Equação de Hazen-Williams e Equação de Fair-Whipple-Hsiao.

2.3.1.2.1 Equação de Hazen-Williams

A equação de Hazen-Williams (equação 14) encontra-se entre as mais utilizadas nos dimensionamentos hidráulicos e é bastante utilizada na prática pela Engenharia Sanitária americana, segundo Baptista (2010).

$$J = 10,64 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad \dots(14)$$

onde:

J = Perda de carga unitária (m/m);

Q = Vazão (m³/s);

D = Diâmetro da tubulação (m);

C = Coeficiente de Hazen-Williams.

A equação de Hazen-Williams é recomendada para ocorrência de escoamento turbulento de transição, com fluido em temperatura de 20° C (por não levar em consideração efeitos viscosos), diâmetros geralmente iguais ou maiores que 100mm e é aplicável à redes de distribuição de água, adutoras e sistemas de recalque.

2.3.1.2.2 Equação de Fair-Whipple-Hsiao

Esta equação é indicada para o cálculo da perda de carga em trechos curtos de tubulações, com pequenos diâmetros, geralmente menores que 100mm, e presença de grande número de conexões. Um exemplo de aplicação é em projetos de instalações hidráulicas prediais de água fria ou quente, sendo recomendada pela norma ABNT NBR 5626:1998.

A equação varia dependendo do tipo de material empregado na tubulação.

A equação 15 é utilizada em situações de tubulação feita em material aço galvanizado novo conduzindo água fria.

$$J = 0,002021 \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}} \quad \dots(15)$$

Para situações de tubulação em material PVC rígido conduzindo água fria, faz-se uso da equação 16.

$$J = 0,0008695 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad \dots(16)$$

onde:

J = Perda de carga unitária (m/m);

Q = Vazão (m³/s);

D = Diâmetro da tubulação (m).

2.3.2 Perda de carga localizada

Juntamente às perdas distribuídas, em tubulações prediais em geral, também há ocorrência de perdas de carga localizadas, causadas pela presença de desvios e mudanças de fluxo nas tubulações, representadas por conexões e acessórios hidráulicos. Estes causam aumento da turbulência do escoamento, causando dissipação de energia, ou seja, perda de carga.

As perdas de carga localizadas, de maneira geral, para cada conexão singular podem ser expressas pela equação 17.

$$\Delta h = K \frac{V^2}{2g} (m) \quad \dots(17)$$

onde:

V = Velocidade média na seção (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

K = Coeficiente de perda de carga.

O coeficiente K é um adimensional que se relaciona à geometria da seção, número de Reynolds, rugosidade do material e, em algumas situações, às condições de escoamento.

Porto (2004) ressalta que os valores recomendados do coeficiente K devem ser tomados como valores médios para algumas singularidades, pois sua determinação experimental é facilmente influenciada por vários fatores, sendo a perda de carga dependente do tipo acabamento interno da conexão, diâmetro,

existência de rebarbas ou ângulos vivos, das condições de instalação do ensaio, como a fixação das conexões, e outros.

Ademais, o valor K apresenta variações nos ensaios para conexões de diferentes fabricantes.

A seção que segue discorre de alguns valores obtidos experimentalmente para o coeficiente adimensional tratando-se de algumas singularidades já analisadas bibliograficamente.

A Tabela 3 fornece valores de coeficiente de perda de carga K vistos na literatura para as conexões abordadas no presente estudo.

Tabela 3 – Valores do coeficiente K para diversos acessórios

Acessório	K
Joelho de 90° raio curto	0,9
Joelho de 45°	0,4
Curva de 45°	0,2

Fonte: Adaptado Azevedo Netto (1998, p. 77)

Não foram encontrados em literatura conceituada valores de coeficiente K para as conexões do tipo curva de transposição, luva de redução e tê de redução.

2.3.2.1 Joelhos e curvas

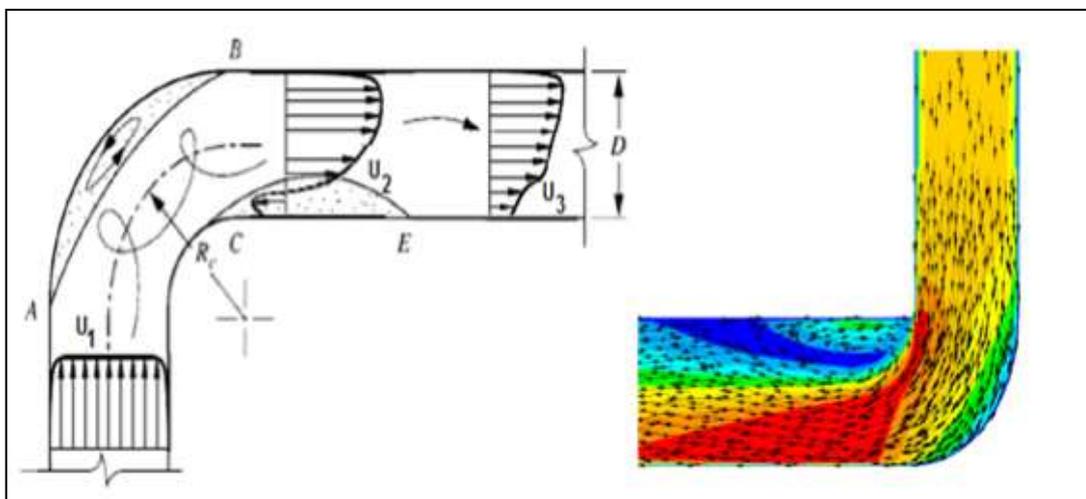
Joelhos e curvas são conexões utilizadas de forma frequente em condutos. A diferença entre essas duas conexões é seu raio de curvatura que é menos acentuado em curvas.

Com a inserção de uma conexão do tipo curva ou joelho em um sistema de tubulações, por exemplo, há a indução de redução de energia no sentido do fluxo de escoamento comparado a um sistema com as mesmas condições de escoamento, porém sem conexões.

A perda de carga nesses pontos singulares é relativa à mudança de sentido do escoamento, pois com a separação do fluido das paredes da tubulação, verifica-se o surgimento de fluxos secundários na seção decorrente da aceleração centrípeta causada pela angulação dos trechos, gerando rotações no fluido.

A Figura 7 representa esquematicamente os perfis de velocidade dentro dos sistemas de tubulação com desvios de fluxo.

Figura 7 – Mudança de direção do escoamento numa curva



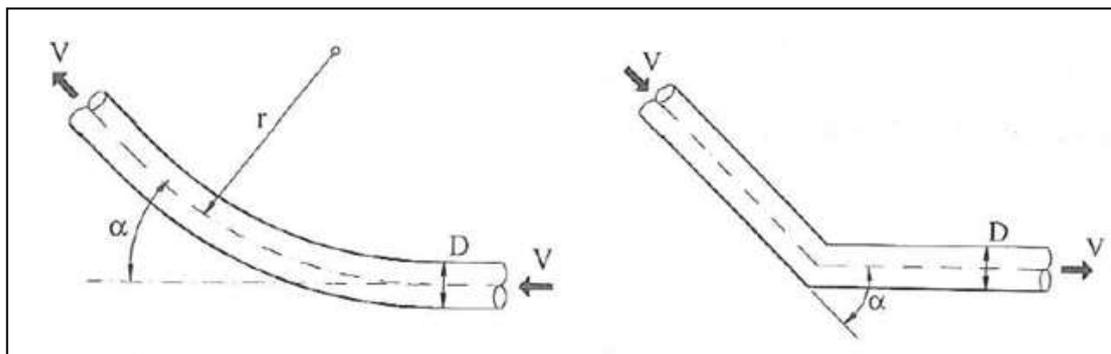
Fonte: Freitas (2011, p. 14)

Em um primeiro momento, o perfil de pressão e velocidades U_1 é dado de maneira uniforme no trecho que antecede a seção A. Em um segundo momento, o fluido começa a atravessar o trecho o qual contém o desvio de fluxo, causando alteração no perfil de velocidades a jusante do trecho.

Freitas (2011) verifica que, na zona interna do fluxo, há o aumento da velocidade das linhas de corrente e diminuição da pressão no trecho, no passo em que nas zonas AB e CE ocorrem o inverso, criando rotação no fluxo dessas zonas, causando a alteração no perfil de velocidades visto em U_2 . Após a seção E há a tendência de uniformidade do fluxo, como observado no perfil de velocidades U_3 .

A Figura 8 representa esquematicamente os parâmetros utilizados na determinação no coeficiente K para curvas circulares e cotovelos com angulação α .

Figura 8 – Conexões em forma de curva e joelho



Fonte: Adaptado de Porto (2004, p. 75)

Para estas conexões, os valores para o coeficiente K pode ser calculado em função do ângulo α , em graus, através da equação 18 (para curvas circulares) e equação 19 (para cotovelos).

$$K = \left[0,13 + 0,16 \left(\frac{r}{D} \right)^{-3,5} \right] \sqrt{\frac{\alpha}{180^\circ}} \quad \dots(18)$$

$$K = 67,6 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha^{2,17} \quad \dots(19)$$

onde:

r = Raio da curva circular (m)

α = Ângulo de desvio da curva circular (graus).

O raio de curvatura exerce grande influência em termos de perdas de carga. Para grandes raios de curvatura, menor será a perda de carga no trecho.

Sabe-se que a perda de carga, além do coeficiente K, relaciona-se com outros parâmetros, como rugosidade da parede da tubulação, número de Reynolds, diâmetro, vazão, entre outros. Alguns destes estão considerados indiretamente na equação da perda de carga, ao utilizar a velocidade média em seu cálculo. Porém, nem todos os parâmetros inerentes ao escoamento são considerados, fato que leva a diferentes valores encontrados experimentalmente em trabalhos de investigação.

Para a conexão do tipo curva de transposição, não foi detectada na bibliografia equações de determinação do coeficiente de perda de carga que levem em conta a geometria dessa conexão, verificando-se apenas valores obtidos experimentalmente em estudos de caso.

2.3.3 Método dos comprimentos equivalentes

Outra forma de quantificar as perdas de cargas localizadas é utilizando o método dos comprimentos equivalentes. Este é uma simplificação do procedimento de cálculo, onde as singularidades presentes são expressas em termos de comprimento equivalente às tubulações retilíneas de mesmo diâmetro que produzem a mesma perda de carga causada pelo acessório e comportando a mesma vazão.

Verifica-se uma analogia formal entre as equações que determinam a perda de carga distribuída e localizada: ambas são função da energia cinética.

Igualando as equações 6 e 17, tem-se a 20 expressa a seguir.

$$\frac{L_{eq}}{D} = \frac{K}{f} \quad \dots(20)$$

onde:

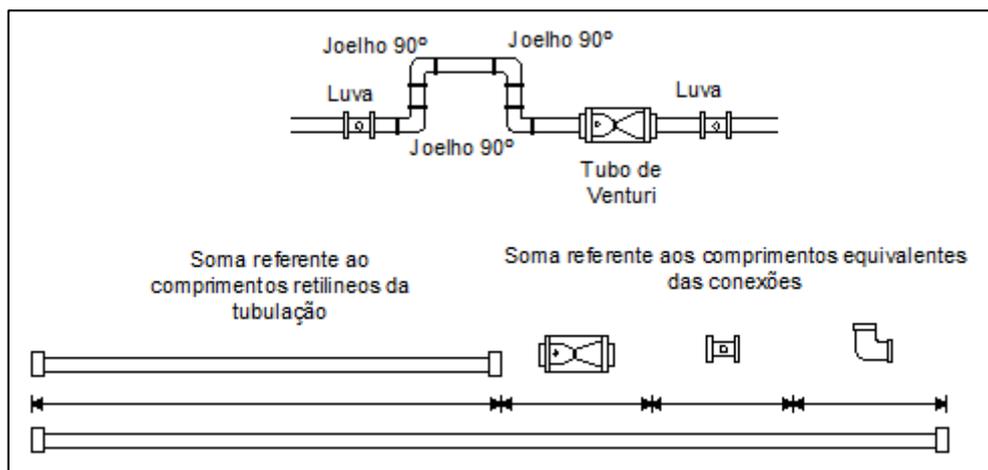
L_{eq} : Comprimento equivalente em metros de tubulação para a conexão (m);

D: Diâmetro da tubulação (m).

Observa-se que o comprimento equivalente é dado em função do coeficiente de atrito f , que não é fixo, mas relaciona-se às condições de escoamento e da rugosidade do conduto e do coeficiente K que se relaciona com a geometria das singularidades.

Com a simplificação, cada comprimento equivalente é acrescido ao comprimento real da tubulação de modo a transformar o problema em um sistema simples de perda de carga distribuída, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática do método de comprimentos equivalentes



Fonte: Elaboração própria

A ABNT NBR 5626:1998 apresenta a equação linear que permite a determinação de comprimentos equivalentes para várias singularidades usadas em instalações hidráulicas para tubulações feitas em materiais metálicos, aço galvanizado e ferro fundido.

Por apresentarem linearidade entre comprimento equivalente e diâmetro da conexão na forma $Leq = \alpha + \beta D$, podem também ser expressos em número de diâmetros.

Para tubulações de PVC rígido ou cobre, a normativa recomenda os valores fixos colocados nas Tabelas 4 e 5 para as conexões abordadas no estudo.

Tabela 4 – Perda de carga em conexões – Comprimento equivalente para tubo liso (tubo de plástico, cobre ou liga de cobre)

Diâmetro Nominal (DN)	Tipo de Conexão		
	Joelho 90°	Joelho 45°	Curva 45°
15	1,1	0,4	0,2
20	1,2	0,5	0,3
25	1,5	0,7	0,4
32	2,0	1,0	0,5
40	3,2	1,0	0,6
50	3,4	1,3	0,7
65	3,7	1,7	0,8
80	3,9	1,8	0,9
100	4,3	1,9	1,0
125	4,9	2,4	1,1
150	5,4	2,6	1,2

Fonte: Adaptado ABNT NBR 5626 (1998)

Tabela 5 - Perda de carga em conexões – Comprimento equivalente para tubo rugoso (tubo de plástico, cobre ou liga de cobre)

Diâmetro Nominal (DN)	Tipo de Conexão		
	Joelho 90°	Joelho 45°	Curva 45°
15	0,5	0,2	0,2
20	0,7	0,3	0,3
25	0,9	0,4	0,4
32	1,2	0,5	0,5
40	1,4	0,7	0,6
50	1,9	0,9	0,8
65	2,4	1,1	1,0
80	2,8	1,3	1,2
100	3,8	1,7	-
125	4,7	2,2	-
150	5,6	2,6	-

Fonte: Adaptado ABNT NBR 5626 (1998)

Diz-se valores fixos por não apresentarem linearidade entre comprimento equivalente e diâmetro da conexão. Assim, para esses materiais, o comprimento equivalente não pode ser expresso em número de diâmetros.

Para as conexões do tipo curva de transposição e tê de redução não foram encontrados na literatura valores para comprimentos equivalentes. Para a conexão do tipo luva de redução, o comprimento equivalente foi verificado em catalogo técnico.

2.4 Análises experimentais de perda de carga

Para a determinação e análise da carga em laboratório, basta aplicar a equação de Bernoulli no início e final do trecho que se quer conhecer. A equação de Bernoulli pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \Delta h \quad \dots(21)$$

Sendo Δh a perda de carga entre os dois pontos. Se os dois pontos distintos (1 e 2) apresentarem a mesma cota geométrica, e supondo não haver diferença de vazão entre os dois pontos (lei de conservação da massa) para o mesmo diâmetro, tem-se:

$$h_1 = h_2 \quad \dots(22)$$

$$v_1 = v_2 \quad \dots(23)$$

Portanto, a equação de Bernoulli simplifica-se à equação 25.

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + \Delta h \quad \dots(24)$$

$$\Delta h = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \quad \dots(25)$$

Dessa forma, para determinação da perda de carga de determinado trecho de tubulação, em laboratório, basta realizar a medida da pressão nos dois pontos de interesse.

2.4.1 Medidas de Pressão

A manometria trata da medição de pressão e para tal determinação faz-se necessária a utilização de dispositivos denominados manômetros. Estes dispositivos realizam a verificação da pressão efetiva que consiste na pressão devido a uma coluna líquida.

Alguns dos dispositivos utilizados são fundamentados na Lei de Stevin, que se baseia na utilização da equação 26, a seguir.

$$P = \gamma h \quad \dots(26)$$

onde:

γ : Peso específico do líquido (kN/m³);

h: Altura da coluna de líquido (m).

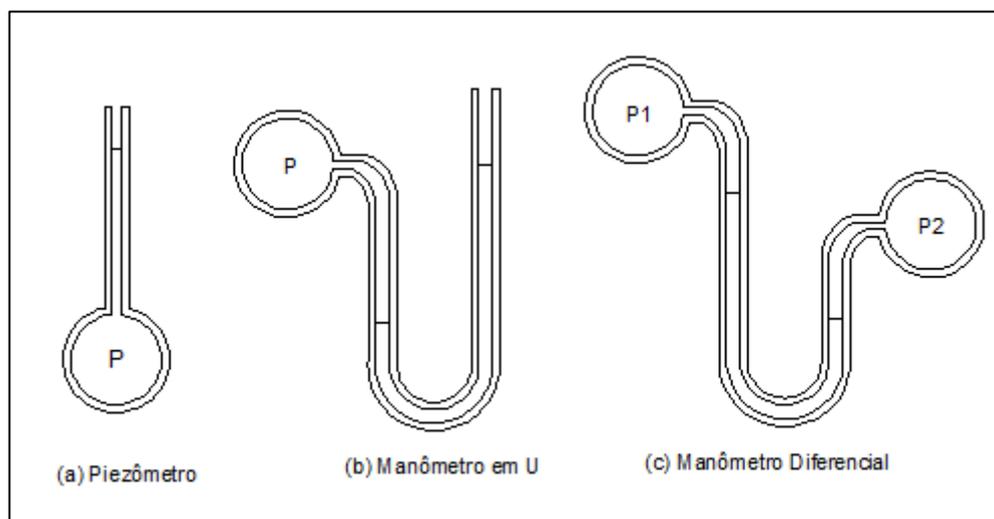
O piezômetro consiste no dispositivo mais simples, constituído de um tubo transparente disposto em posição vertical, acoplado ao sistema para realizar a medição da altura da coluna de líquido. Este dispositivo não serve para medição de pressão de grandes ou gases. O dispositivo pode ser visto na Figura 10(a).

O manômetro em “U”, que possui essa denominação devido ao tudo de medição ter formato em “U”, como visualizado na Figura 10(b), possibilitando a tomada de pressão negativa (abaixo da pressão atmosférica ou vácuo parcial) além da pressão positiva obtida através do medidor do tipo piezômetro. É utilizado para medição de pressões demasiadamente pequenas ou demasiadamente grandes.

Para a realização de medição de pressão elevadas, faz-se o uso de outro tipo, diferente do líquido do sistema, chamado líquido manométrico, devendo ser inerte e imiscível com a substância no interior do sistema, contudo devendo apresentar elevado peso específico. Um exemplo de líquido manométrico bastante utilizado é o mercúrio.

Outro dispositivo consiste no manômetro diferencial, que possibilita realizar a medição de diferença de pressão entre pontos. Tem suas extremidades acopladas apenas nos sistemas em que se deseja medir a diferença de pressão, não tendo contato das extremidades com a atmosfera. A Figura 10(c) representa o esquema do dispositivo.

Figura 10 – Tipos de manômetros



Fonte: Elaboração própria

Com auxílio dos dispositivos citados, são determinadas as pressões nos pontos onde se deseja a verificação de pressão em procedimentos experimentais.

2.5 Estudos realizados

Delforno (2006) realizou verificações experimentais para perda de carga em curvas de transposição em PVC soldável e concluiu que se deve atenção para a perda provocada por essas conexões, pois causam perda de mesma magnitude que conexões mais usuais em dimensionamentos hidráulicos, apesar de não terem quantificação acessível na literatura e ainda sim são bastante utilizadas em sistemas hidráulicos.

Cruz et al. (2012) realizou em seu estudo a definição do coeficiente K referente ao tê de polietileno de compressão em fluxo de passagem direta, comparando com o coeficiente K da conexão em material PVC e concluiu que a perda de carga é menor na conexão feita em material polietileno. Assim, por meio do estudo feito pelo autor, verificaram-se as disparidades de parâmetros de material para material.

Branco (2005) realizou estudo experimental de perda de carga localizada em buchas de redução em material PVC e verificou, ao término da investigação, que a conexão apresentou valor de perda de carga elevada, o que acarretaria em possível

comprometimento em sistemas de distribuição caso não sejam devidamente consideradas as perdas causadas pela singularidade.

Outro exemplo da importância das determinações é visto por Souza (2012) realizando o dimensionamento do sistema hidráulico de uma desensiladeira para uso agrícola onde se mostrou necessário o emprego do método dos comprimentos equivalentes para determinação da perda de carga no sistema.

A determinação de perda de carga em conexões especiais é alvo de investigações devido à grande disponibilidade de conexões disponíveis no mercado e avanço das tecnologias de fabricação.

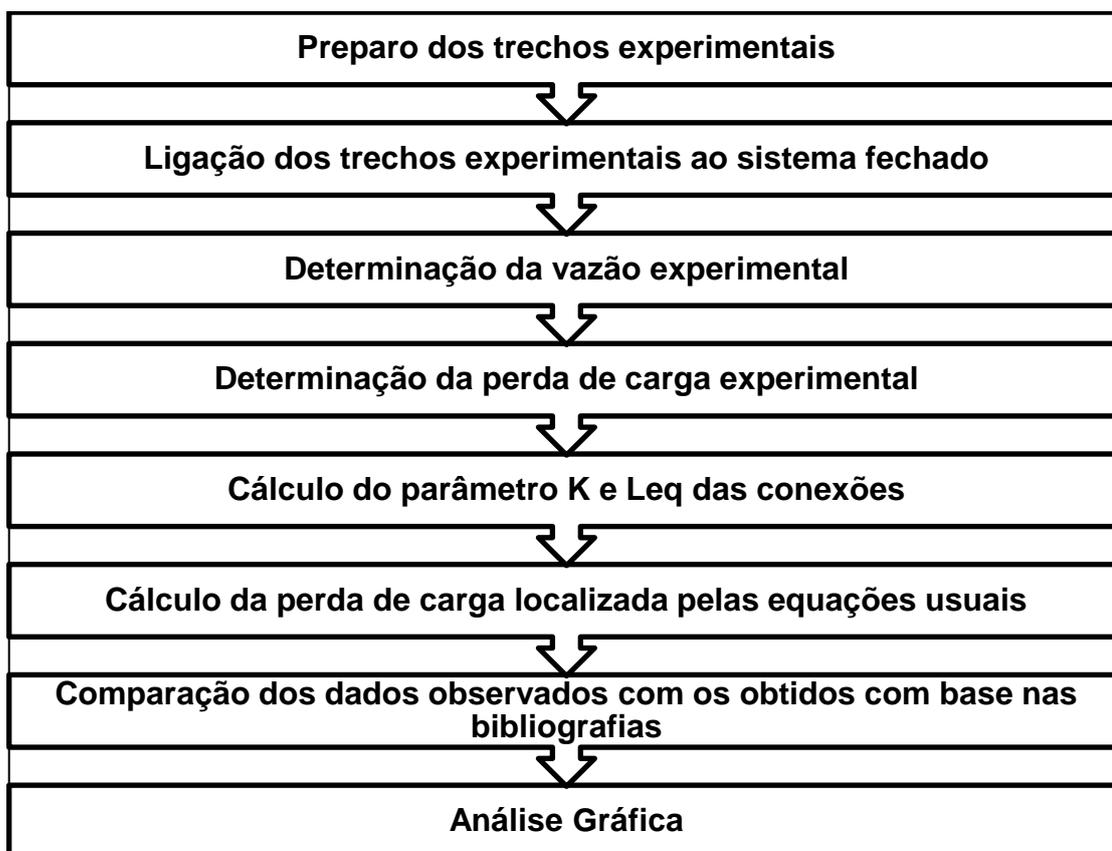
Assim, percebe-se que as determinações de perda de carga, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente são de fundamental importância para dimensionamento de diversos sistemas hidráulicos.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo que segue, estão descritos os métodos e procedimentos adotados durante a realização do presente trabalho.

Na Figura 11, encontra-se uma simplificação da metodologia utilizada no estudo.

Figura 11 – Simplificação da metodologia utilizada



Fonte: Elaboração própria

Todos os procedimentos foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete.

3.1 Preparo dos trechos experimentais

Para a realização dos procedimentos experimentais, fez-se uso de uma bancada experimental de perda de carga cuja função é simular um sistema de distribuição de água fria, em circuito fechado. Para sua utilização, foram necessárias

adaptações através do uso de conexões especiais para viabilizar a acoplagem de trechos experimentais de diferentes diâmetros ao sistema fechado.

O sistema utilizado pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Bancada de perda de carga



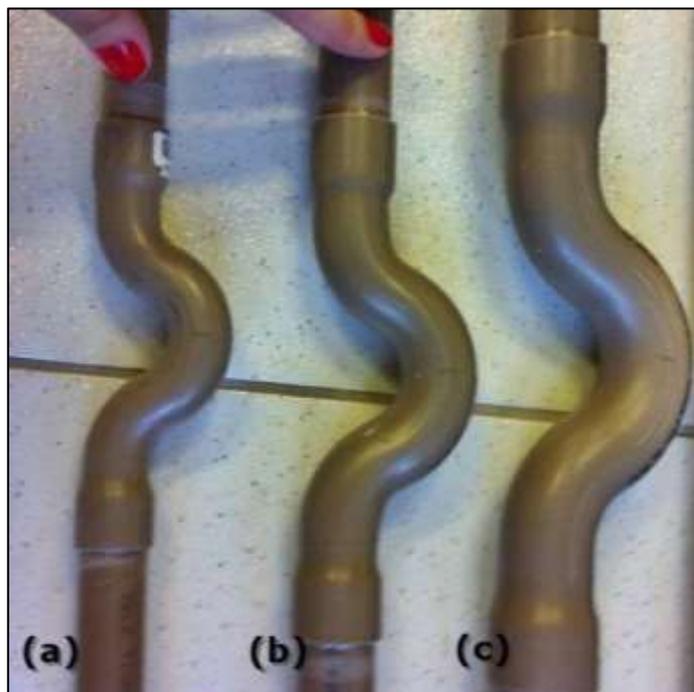
Fonte: Elaboração própria

A composição da bancada de perda de carga consiste em reservatório (I), tubulação de sucção (II), motor-bomba (III), tubulação de recalque (IV), registro de esfera (V), registro de gaveta (VI), hidrômetro (VII) e os trechos a serem verificados experimentalmente (VIII).

O estudo contemplou a verificação de conexões em material PVC soldável, do tipo curva de transposição, para três diâmetros comerciais: 20, 25 e 32mm e Joelho 90° para diâmetro comercial 32mm. Também foram verificadas as perdas de carga distribuída considerando L_{eq} da conexão Joelho 90° para diâmetro 32mm e feitas as comparação com perdas distribuídas obtidas por equações usuais de estimativa de perda de carga.

As conexões avaliadas estão mostradas na Figura 13 e 14.

Figura 13 – Curvas de transposição nos diâmetros 20mm (a), 25mm (b) e 32mm (c)



Fonte: Elaboração própria

Figura 14 – Trecho com conexão do tipo Joelho 90° diâmetro 32mm(a) e trecho retilíneo de mesmo diâmetro (b)



Fonte: Elaboração própria

Inicialmente, se fez necessária uma organização das nomenclaturas para cada montagem a ser realizada. Na Tabela 6, que segue, estão colocadas as nomenclaturas das montagens experimentais.

Tabela 6 – Nomenclatura das montagens experimentais

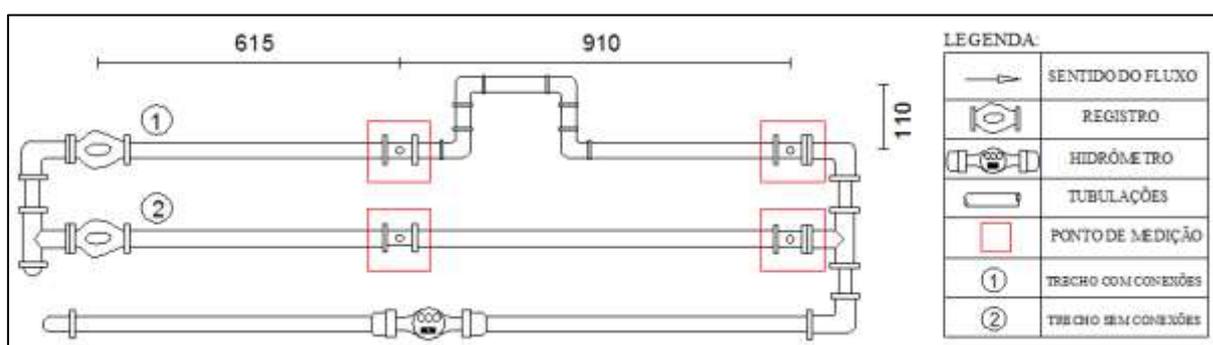
Trecho Experimental	DN (mm)	Nomenclatura
Curva de Transposição	20	CT20
	25	CT25
	32	CT32
Joelho 90°	32	JO32
Tubulação Retilínea	20	TR20
	25	TR25
	32	TR32
	32	TRJ32

Fonte: Elaboração própria

3.1.1 Joelho 90°

A bancada experimental utilizada já contava com a presença da conexão do tipo Joelho 90° e trecho retilíneo de mesmo diâmetro, não necessitando de adaptações para realização dos procedimentos experimentais referentes a esta conexão. Na Figura 15 pode-se observar a configuração do trecho existente na bancada experimental.

Figura 15 – Representação esquemática do trecho dotado de Joelho 90° na bancada experimental



Fonte: Elaboração própria

O Trecho 1 esquematizado na Figura 15 apresenta quatro conexões do tipo Joelho 90°. O Trecho 2 consiste apenas em tubulação retilínea.

3.1.2 Curva de Transposição

Os procedimentos de preparo a seguir descritos referem-se aos trechos de análise da conexão do tipo Curva de Transposição.

Para viabilizar a acoplagem dos trechos experimentais referentes à Curva de Transposição na banca de perda de carga, foram necessárias algumas adaptações. Fez-se a inserção de um novo percurso na bancada experimental, dotado de união soldável nas extremidades, possibilitando acoplagem e a alteração dos trechos experimentais para verificações.

No preparo dos trechos experimentais com conexões, no comprimento central de tubulações retilíneas foram inseridas as conexões a serem verificadas.

Tanto à montante quanto à jusante das conexões, foram utilizados comprimentos retilíneos longos, o suficiente para minimizar as turbulências causadas devido às peças especiais utilizadas na adaptação entre bancada e trecho experimental, como uniões soldáveis e buchas de redução (para as situações de alteração de diâmetro). Assim, é possível minimizar a turbulência causada no fluxo em decorrência da presença dessas peças especiais, de modo a não interferir nos resultados das medições nos pontos de tomada de pressão.

A configuração dos trechos experimentais é observada na Figura 16.

Figura 16 – Trechos experimentais retilíneos e trechos contendo as curvas de transposição

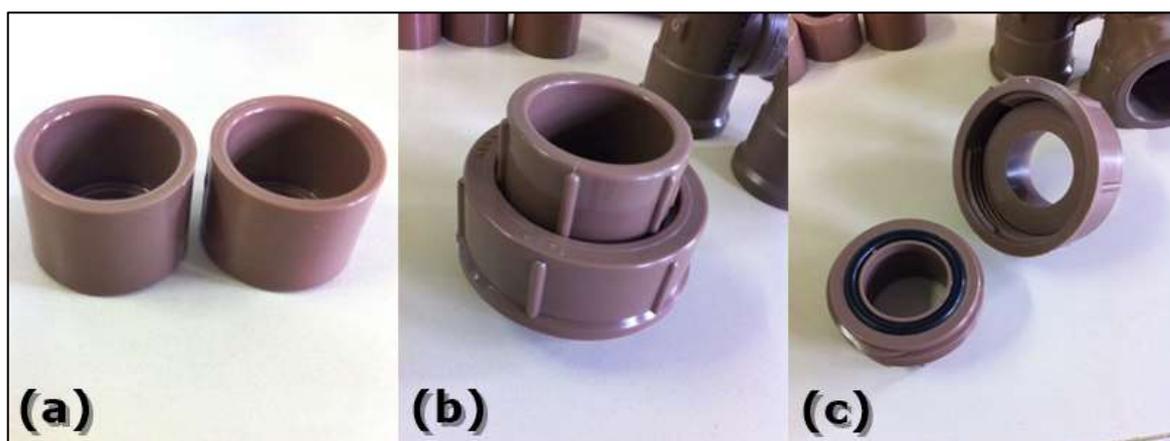


Fonte: Acervo próprio

As conexões utilizadas para ligação entre bancada e trechos experimentais consistem nas apresentadas na Figura 17.

Ademais, todas as conexões analisadas são de mesmo fabricante das tubulações retilíneas, de modo que haja uniformidade de parâmetros, como exemplo, a rugosidade.

Figura 17 – Conexões especiais utilizadas para adaptação entre bancada e trechos experimentais



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 17, podem ser visualizadas as buchas de redução (Figura 17a) de diâmetro de 32 para 25mm e 25 para 20mm; e união soldável (Figura 17b) de diâmetro de 32mm. A abertura da união soldável permite que os trechos experimentais sejam inseridos ou removidos do novo percurso na bancada experimental (como mostrado na Figura 17c).

As superfícies de ligação entre as peças especiais e trechos retilíneos (pontos de encaixe entre conexão e tubulação, sem contato com fluido em escoamento) devem apresentar superfície áspera, de forma a garantir aderência entre conexão e tubulação retilínea, evitando também possíveis vazamentos após o início do fluxo. O procedimento deve ser feito previamente a etapa de soldagem dos elementos.

Assim, foi realizado com auxílio de lixa o acabamento requerido nestas superfícies de contato, seguido da colocação do adesivo instantâneo e imediatamente encaixados os elementos. Utilizou-se lixa de granulação 100, indicada para tubulação em PVC.

O acabamento de uma das conexões lixadas pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Conexão do tipo união soldável após lixamento

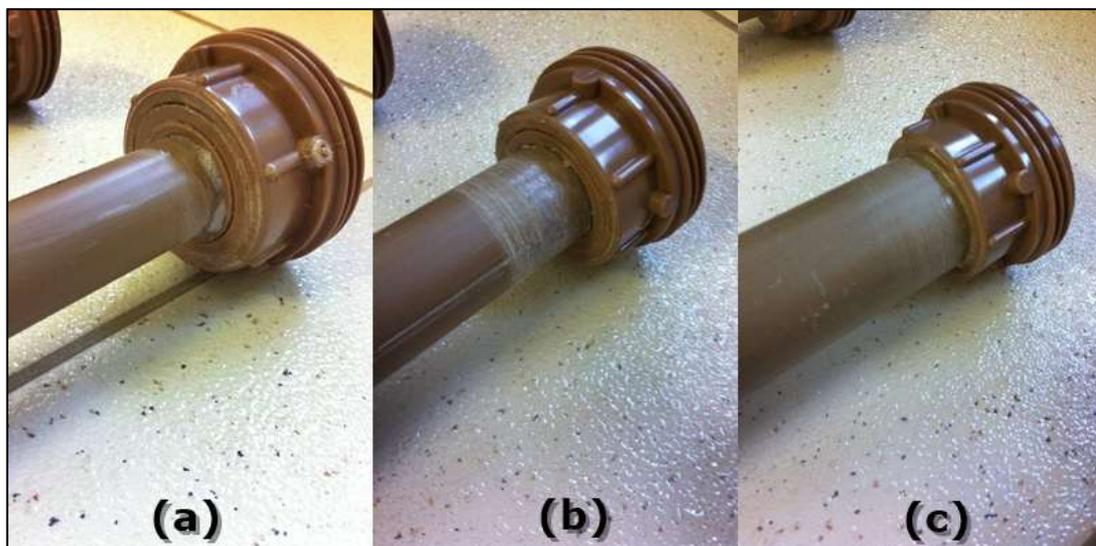


Fonte: Acervo próprio

Durante o lixamento para os encaixes, tomou-se o cuidado em não atingir a parede interna da tubulação (no caso das conexões do tipo curva de transposição), não interferindo assim na rugosidade interna da conexão. Posterior aos lixamentos fez-se os encaixes com uso de adesivo instantâneo.

Na Figura 19 podem ser observadas as configurações finais das extremidades prontas para encaixe na bancada experimental.

Figura 19 - Detalhe das extremidades dos trechos experimentais prontos para encaixe na bancada



Fonte: Elaboração própria

As buchas de redução foram inseridas nas uniões soldáveis quando necessárias, viabilizando a redução de diâmetro de 32 para 25mm e 32 para 20mm nas extremidades, uma vez que todo o sistema da bancada experimental é de diâmetro nominal 32mm.

Para a redução de diâmetro de 32 para 20mm, foram necessárias a utilização de duas buchas de redução em cada extremidade do trecho experimental, sendo uma de 32 para 25mm e nesta foi inserida a bucha de redução de 25 para 20mm, como visto na Figura 19(a).

Na redução de 32 para 25mm, utilizou-se a bucha com os respectivos diâmetros externo e interno, vide Figura 19(b). Para tubulação de diâmetro 32mm, o encaixe com a união soldável pode ser feita diretamente sem a necessidade de mais acessórios, como pode ser verificada na Figura 19(c).

Para a medição nos pontos de tomada de pressão nos trechos experimentais, foram utilizadas conexões pneumáticas de engate rápido tubo reto de 6 mm, permitindo agilidade e evitando possíveis vazamentos e fuga de pressão nos pontos, o que poderia interferir nas leituras junto ao manômetro analógico. A Figura 20 mostra a base de encaixe do dispositivo utilizado em detalhe.

Figura 20 - Base inferior do engate rápido pneumático para encaixe na tubulação



Fonte: Acervo próprio

Com o auxílio de furadeira e broca de diâmetro de 4 mm, fizeram-se as perfurações nos pontos requeridos nos trechos e inseridos os dispositivos de leitura de pressão. Adotou-se mesma distância entre pontos nos trechos retilíneos e nos que continham as conexões.

Na Figura 21, podem ser visualizados os procedimentos de implantação dos engates nos pontos dos trechos experimentais, sequencialmente.

Figura 21 - Implantação dos engates nos pontos de tomada de pressão dos trechos



Fonte: Elaboração própria

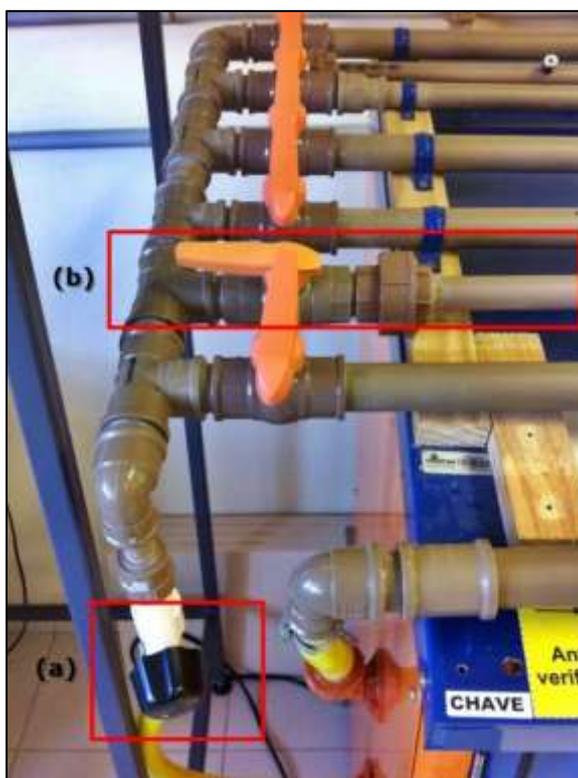
A Figura 21(a) mostra o detalhe do furo de 4mm, correspondente ao diâmetro do encaixe do engate mostrado na Figura 20. A Figura 21(b) esquematiza o engate já implantado em um ponto de tomada de pressão em um dos trechos experimentais.

O mesmo procedimento foi realizado para todos os pontos de leitura para todos os trechos a serem verificados.

3.2 Ligação dos trechos com Curva de Transposição ao sistema fechado

A Figura 22 mostra o detalhe de ligação entre os trechos de curva de transposição e bancada por meio de união soldável. O fluxo no trecho é controlado por meio de registro de gaveta, igualmente aos demais trechos da bancada.

Figura 22 - Detalhe do registro globo (a) e montante do percurso inserido na bancada dotado de registro gaveta (b)



Fonte: Elaboração própria

Feito o encaixe do trecho experimental na bancada e fechamento da união soldável em cada extremidade, os registros de gaveta dos demais trechos são

fechados totalmente e apenas o registro referente ao trecho em análise é aberto totalmente, a fim de garantir unicidade do escoamento.

Fez-se também em seguida a acoplagem dos manômetros nos pontos de tomada de pressão a serem verificados, como colocado na Figura 23, que segue.

Figura 23 - Manômetros acoplados à montante e jusante da conexão



Fonte: Acervo próprio

Para dar início ao fluxo no sistema, fez-se o acionamento do conjunto motor-bomba.

O mesmo procedimento é repetido para cada um dos sete trechos, a fim de verificar a perda de carga frente a uma mesma vazão.

3.3 Determinação da vazão experimental

Para tal determinação, fez-se a medição de tempo de escoamento para dados volumes observados juntamente ao hidrômetro (Figura 24).

Figura 24 - Hidrômetro da bancada de perda de carga



Fonte: Acervo próprio

Através da equação 30, determinou-se a vazão, Q , em metros cúbicos por segundo (m^3/s), para cada verificação de diferença de pressão.

$$Q = V/t \quad \dots(30)$$

onde:

V : volume observado no hidrômetro (m^3);

t : tempo (s).

O experimento foi realizado para diferentes vazões, a fim de verificar o comportamento da perda de carga em função da vazão. O controle da vazão se deu por meio de registro globo, o mesmo visto na Figura 22(a), para diferentes aberturas, e assim, aumentando ou reduzindo a vazão no sistema. Para cada medição de variação de pressão, foi obtida a vazão média no trecho.

3.4 Determinações de perda de carga experimental

A perda de carga experimental pode ser obtida aplicando a Equação de Bernoulli (equação 4) (página 21) entre os pontos à montante e à jusante da conexão verificada.

Como descrito no item 2.4, a perda de carga experimental na bancada é dada através da equação 25 (página 42). Para cada trecho ensaiado, foram feitas três verificações de diferença de pressão entre os pontos.

A medição nos pontos de pressão foi realizada com auxílio de um manômetro analógico (Figura 25), fazendo-se a acoplagem da mangueira do manômetro nos dispositivos de engate rápido (vide Figura 26) e verificando a indicação de pressão do manômetro durante a passagem do fluxo, como mostrado na Figura 26.

Figura 25 - Manômetro analógico



Fonte: Acervo próprio

Figura 26 - Detalhe de mangueira manométrica acoplada em engate para leitura de pressão



Fonte: Acervo próprio

Foram utilizados dois manômetros analógicos, um para cada ponto do trecho e posicionados em mesma cota para leitura de pressões. A pressão nos pontos verificados foi indicada em cada manômetro e registrada.

Foram determinadas as variações de pressão nos trechos que contém conexões (Figura 27) e nos trechos retilíneos (Figura 28).

Figura 27 - Leitura de variação de pressão em trecho com conexão



Fonte: Elaboração própria

Figura 28 - Leitura de variação de pressão em trecho retilíneo



Fonte: Elaboração própria

O procedimento de leitura de variação de pressão foi realizado para todos os trechos colocados na Tabela 7, nos diâmetros citados, para uma mesma vazão por

medição. Depois de verificados todos os trechos, variou-se a vazão junto ao registro globo do sistema e, assim, foram feitas novas verificações de variação de pressão nos trechos.

Para a conexão do tipo Joelho 90°, a perda carga experimental é determinada em etapas de cálculo. Como pode ser observado na Figura 15, no trecho que contém as conexões (Trecho 1), a perda de carga total verificada consiste no somatório das duas perdas: distribuída e localizada. No trecho retilíneo (Trecho 2) de mesmo diâmetro, a perda de carga total verificada experimentalmente consiste na própria perda de carga distribuída, tendo como nula a parcela localizada.

Com o dado referente à perda de carga retilínea no Trecho 2, é possível determinar a perda de carga unitária experimental, J (m/m), uma vez que vazão e diâmetro são iguais para os dois trechos. Com o valor de J calculado, determina-se a parcela referente à perda distribuída para o trecho com conexões, pode-se posteriormente determinar a perda de carga total localizada e a correspondente a cada uma das conexões de Joelho 90° presente.

Já a perda de carga experimental para as conexões verificadas do tipo Curva de Transposição é dada pela diferença entre variação de pressão verificada para o trecho com conexão (distribuída e localizada) e a perda no trecho retilíneo (distribuída), para vazão e diâmetro constantes. O resultado da diferença obtido consiste na perda de carga localizada para a conexão verificada.

3.5 Cálculo do parâmetro K e L_{eq} das conexões

A determinação da velocidade experimental é dada através a aplicação da Equação da Continuidade (equação 3), onde tem-se a vazão determinada experimentalmente e, através do diâmetro, determina-se área da seção transversal.

Com a velocidade calculada para o escoamento, aplica-se a equação geral para determinação da perda de carga localizada (equação 18), igualando à perda de carga obtida experimentalmente. Assim, pode-se determinar o coeficiente K .

Além do coeficiente K , calcula-se também o comprimento equivalente (L_{eq}) de tubulação.

Para a determinação do L_{eq} , faz-se utilização da perda de carga unitária (J) (equação 5), ou seja, perda de carga por metro linear, obtida experimentalmente do trecho retilíneo de mesmo diâmetro. Assim, conhecendo a perda de carga localizada

medida no experimento, divide-se esta pela perda de carga unitária (J), resultando assim no comprimento equivalente da peça analisada.

3.6 Comparação dos dados observados com os obtidos com base nas bibliografias

Por fim, determinados os parâmetros (K e L_{eq}) das conexões, os resultados foram expressos em forma de gráficos, tabelas e discussões.

Fez-se, também, a análise das perdas distribuídas e comparados os resultados obtidos em laboratório às equações usuais de estimativa de perda de carga.

Os valores obtidos para os parâmetros experimentais foram comparados a valores vistos na bibliografia, como a norma ABNT NBR 5626:1998, catálogos técnicos, estudos de caso ou em bibliografias consagradas.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão colocados os resultados dos procedimentos descritos, obtidos através da metodologia descrita anteriormente.

4.1 Joelho 90°

As diferenças de pressão verificadas para os trechos referentes ao diâmetro de 32mm, para análise da conexão Joelho 90°, estão colocados nas tabelas que seguem. As vazões experimentais médias para cada verificação foram obtidas conforme o descrito no item 3.3.

Faz-se necessário fluxo de vazão constante nos trechos de mesmo diâmetro para fins de correlação entre perda de carga distribuída e perda de carga na conexão.

A Tabela 7 apresenta os resultados de verificações referentes ao trecho retilíneo de bancada experimental (Trecho TRJ32).

Tabela 7 – Perda de carga distribuída para o trecho TRJ32

Medição	DI(mm)	L (mm)	Área (m ²)	Q (l/s)	P1 (mca)	P2 (mca)	J (m/m)
1	27	910	0,000573	0,774975	5,78	5,60	0,197802
2				0,78138	5,60	5,40	0,21978
3				0,825204	6,77	6,55	0,241758
4				0,78138	5,60	5,40	0,21978
5				0,725357	5,18	5,00	0,197802
6				0,87368	7,70	7,50	0,21978
7				0,8217	6,80	6,60	0,21978
8				0,862859	7,19	7,00	0,208791

Fonte: Elaboração própria

Para o trecho da bancada que contém as quatro conexões (Trecho JO32), as medições verificadas estão colocadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Perda de carga total para o trecho JO32

Medição	DI (mm)	L (mm)	Q(l/s)	P1 (mca)	P2 (mca)	Δh_{total} (mca)
1	27	1130	0,77497	5,78	5,18	0,60
2			0,78138	5,80	5,15	0,65
3			0,82520	6,95	6,39	0,56
4			0,78138	5,80	5,19	0,61
5			0,72536	5,00	4,61	0,39
6			0,87368	7,70	6,90	0,80
7			0,82170	7,00	6,30	0,70
8			0,86286	7,40	6,80	0,60

Fonte: Elaboração própria

Os dados de perda de carga apresentados na Tabela 8 referem-se à perda total no trecho com conexões. Contudo, o trecho apresentam também comprimentos retilíneos de tubulação. Assim, as perdas apresentadas na Tabela 7 referem-se à perda localizada (para quatro joelhos 90°) e perda distribuída (trechos retilíneos).

Com os dados da Tabela 7, determina-se a perda de carga unitária observada e, através do J calculado, determina-se a perda distribuída no trecho com conexões.

Como descrito no item 3.5, a perda localizada para os quatro Joelhos 90° é dada pela diferença entre a perda de carga total observada no trecho e a perda distribuída. Os valores estão colocados na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros obtidos experimentalmente para Joelho 90°

Medição	Δh distribuída	Δh localizada	Δh joelhos	Δh joelho	L_{eq}	K	Vel (m/s)	Rey	f_{atrito}
1	0,2235	0,3765	1,903	0,0941	0,475	1,007	1,353	36545	0,05719
2	0,2483	0,4016	1,827	0,1004	0,456	1,057	1,364	36847	0,06251
3	0,2731	0,2868	1,186	0,0717	0,296	0,677	1,441	38914	0,06165
4	0,2483	0,3616	1,645	0,0904	0,411	0,951	1,364	36847	0,06251
5	0,2235	0,1665	0,841	0,0416	0,210	0,508	1,266	34205	0,06528
6	0,2483	0,5516	2,510	0,1379	0,627	1,161	1,525	41200	0,05000
7	0,2483	0,4516	2,055	0,1129	0,513	1,074	1,435	38748	0,05652
8	0,2359	0,3641	1,743	0,0910	0,435	0,785	1,507	40689	0,04870
Média					0,429	0,907			
Desvio Padrão					0,128	0,224			

Fonte: Elaboração própria

Para a conexão verificada, foi obtido um valor médio de comprimento equivalente igual a 0,429m e coeficiente adimensional K experimental igual a 0,907. Os dados observados não apresentaram grande variação.

Verificou-se que o valor médio de K experimental apresenta valor semelhante ao verificado na bibliografia, correspondente ao valor de 0,9 para coeficiente de perda de carga K para Joelho 90° (Tabela 4).

Para o valor médio de comprimento equivalente observado, o valor disponível na normativa (NBR 5626:1998) referente ao L_{eq} da conexão avaliada apresenta valor superior ao experimental para o diâmetro verificado, atendendo assim a estimativa de perda de carga localizada para essa conexão com segurança.

Verificou-se por meio dos valores de número de Reynolds para os experimentos a ocorrência de escoamento turbulento de transição, conforme já esperado inicialmente com base na bibliografia.

Para a conexão, fez-se também a análise das perdas distribuídas através utilização de parâmetros disponíveis na bibliografia. A estimativa de perda de carga foi realizada para três métodos de cálculo. As estimativas foram calculadas pelos métodos de Darcy-Weisbach (Tabela 10), Fair-Whipple-Hsiao (Tabela 11) e Hazen-Williams (Tabela 12).

O valor referente ao comprimento equivalente para Joelho 90° em diâmetro nominal 32mm foi verificado junto à normativa NBR 5626:1998, para material PVC soldável. O valor de rugosidade adotado consistiu no fornecido pelo fabricante, correspondente a 0,06mm para cálculo do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

Tabela 10 - Perda de carga obtida pela fórmula de Darcy-Weisbach

J (m/m)	L_e (m)	$L_{virtual}$ (m)	$\Delta h_{(total)}$ (mca)	$\Delta h_{(joelho)}$ (mca)
0,09753	6	7,13	0,6954	0,1463
0,09906			0,7063	0,1486
0,10982			0,7830	0,1647
0,09906			0,7063	0,1486
0,08609			0,6138	0,1291
0,12236			0,8724	0,1835
0,10894			0,7767	0,1634
0,11950			0,8520	0,1792

Fonte: Elaboração própria

Tabela 11 – Perda de carga obtida pela fórmula de Fair-Whipple-Hsiao

J (m/m)	L_e	$L_{virtual}$	Δh_{total}	Δh_{joelho}
0,0874	6	7,13	0,6228	0,1310
0,0886			0,6319	0,1329
0,0975			0,6952	0,1462
0,0886			0,6319	0,1329
0,0778			0,5547	0,1167
0,1077			0,7682	0,1616
0,0968			0,6900	0,1452
0,1054			0,7516	0,1581

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 - Perda de carga obtida pela fórmula de Hazen-Williams

J (m/m)	L_{eq}	$L_{virtual}$	$\Delta h_{(total)}$	$\Delta h_{(joelho)}$
0,08731	6	7,13	0,6225	0,1310
0,08865			0,6320	0,1330
0,09806			0,6992	0,1471
0,08865			0,6320	0,1330
0,07725			0,5508	0,1159
0,10898			0,7771	0,1635
0,09729			0,6937	0,1459
0,10650			0,7593	0,1598

Fonte: Elaboração própria

Para os resultados obtidos para os parâmetros calculados e aplicando as equações de estimativa de perda de carga, fez-se um comparativo mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 - Comparativo entre valores de perda de carga observados em laboratório aos calculados pelas equações usuais

	L_{eq} (m)	Δh_{joelho} (mca)
Média – Dados Experimentais	0,4285	0,0925
Desvio padrão – Dados observados	0,1283	0,0282
Valor usual indicado por norma	1,5	-
Perda de Carga calculada pela Eq. de Darcy-Weisbach utilizando o L_{eq} da norma	-	0,1579
Perda de Carga calculada pela Eq. de Hazen-Williams utilizando o L_e da norma	-	0,1411
Perda de Carga calculada pela Eq. de Fair-Whipple-Hsiao utilizando o L_{eq} da norma	-	0,1406

Fonte: Elaboração própria

O comprimento equivalente verificado experimentalmente para a conexão do tipo Joelho 90° apresentou valores inferiores ao da normativa, resultando na

majoração das perdas nas conexões calculadas pelas equações fazendo utilização do L_{eq} proposto pela norma.

Por meio dos valores de número de Reynolds, vistos na Tabela 11, que para os procedimentos verificou-se a ocorrência de escoamento turbulento de transição. Através destes, não foi possível a observação da estabilização do coeficiente K que, segundo Azevedo Netto (1998), ocorre para Reynolds superiores a 50000.

As perdas verificadas para as equações de Darcy-Weisbach e Fair-Whipple-Hsiao obtiveram resultados semelhantes, sendo a de Darcy-Weisbach a que obteve maiores estimativas de perda de carga.

4.2 Curva de Transposição

4.2.1 Trechos experimentais de DN 20mm

As verificações de diferença de pressão para os trechos referentes ao diâmetro de 20mm estão colocados nas Tabelas 14 e 15. As vazões experimentais foram obtidas conforme o descrito no item 3.3.

Idem ao item 4.1, o fluxo de vazão constante nos trechos de mesmo diâmetro é necessário para a correlação entre perda de carga distribuída e perda de carga na conexão.

Tabela 14 – Perdas de carga distribuídas experimentais para trecho retilíneo com DN 20mm (Trecho TR20)

Medição	L (mm)	DI (mm)	Ai (m ²)	P1 (mca)	P2 (mca)	P1-P2	Q (l/s)	Vel (m/s)
1	1000	17	0,00023	1,45	1,00	0,45	0,3846	1,6945
2				1,50	1,00	0,50	0,4115	1,8130
3				1,60	1,10	0,50	0,4098	1,8056
4				2,60	2,05	0,55	0,4914	2,1649
5				2,70	2,00	0,70	0,4926	2,1703
6				2,65	2,00	0,65	0,5085	2,2402
7				2,70	2,00	0,70	0,5192	2,2875
8				2,70	2,10	0,60	0,5277	2,3249
9				2,60	2,10	0,50	0,5222	2,3006
10				2,70	2,00	0,70	0,5420	2,3879
11				2,70	2,10	0,60	0,5382	2,3712
12				2,60	2,10	0,50	0,5425	2,3901

Fonte: Elaboração própria

Fazendo-se uso dos mesmos dados de vazões obtidos nos trechos retilíneos, foi possível determinar as perdas de carga localizadas na conexão de DN 20mm para cada verificação experimental (Tabela 15).

Tabela 15 - Perda de carga experimental para trecho com conexão do tipo curva de transposição com DN 20mm (Trecho CT20)

Medição	L (mm)	DI (mm)	Ai (m ²)	P ₁ (mca)	P ₂ (mca)	P ₁ -P ₂	$\Delta h_{peça}$ (mca)	Rey	f _{atrito}
1	1000	17	0,00023	1,80	1,00	0,80	0,35	28806	0,05227
2				1,76	1,00	0,76	0,26	30821	0,05073
3				1,80	1,05	0,75	0,25	30695	0,05115
4				3,00	2,00	1,00	0,30	40594	0,03914
5				3,00	2,05	0,95	0,35	40310	0,04957
6				2,90	2,00	0,90	0,40	40630	0,04320
7				2,90	1,98	0,92	0,22	38887	0,04095
8				2,90	2,05	0,85	0,25	39523	0,03559
9				3,10	2,05	1,05	0,55	39110	0,02919
10				3,00	2,00	1,00	0,30	40594	0,04462
11				3,00	2,05	0,95	0,35	40310	0,03702
12				2,90	2,00	0,90	0,40	40630	0,03151

Fonte: Elaboração própria

Verificados os valores de perda de carga para a conexão de DN 20mm, utilizando a perda de carga unitária (J) calculada no trecho experimental retilíneo, os valores de L_{eq} para as medições puderam ser determinados. Os resultados obtidos estão colocados na Tabela 16.

Tabela 16 - Coeficientes de perda de carga localizada e comprimentos equivalentes experimentais para conexão do tipo curva de transposição com DN 20mm (Trecho CT20)

Medição	$\Delta h_{peça}$ (mca)	J (m/m)	K	L_{eq} (m)
1	0,350	0,450	2,3892	0,7778
2	0,260	0,500	1,5503	0,5200
3	0,250	0,500	1,5030	0,5000
4	0,350	0,550	1,4636	0,6364
5	0,200	0,700	0,8322	0,2857
6	0,100	0,650	0,3906	0,1538
7	0,220	0,700	0,8241	0,3143
8	0,250	0,600	0,9065	0,4167
9	0,550	0,500	2,0367	1,1000
10	0,300	0,700	1,0312	0,4286
11	0,350	0,600	1,2201	0,5833
12	0,400	0,500	1,3725	0,8000
Média			1,2933	0,5430
Desvio Padrão			0,5535	0,2599

Fonte: Elaboração própria

Na verificação da conexão de diâmetro nominal de 20mm, para a situação de escoamento observado, verificou-se faixa de Reynolds entre 28000 e 41000, indicando ocorrência de escoamento turbulento de transição, como esperado inicialmente com base na bibliografia.

Os resultados obtidos para perda de carga apresentaram variação maior para vazões mais elevadas, comparado aos valores obtidos para baixas vazões. Ressalta-se que valores que apresentaram maior dispersão em relação aos demais verificados para baixas velocidades podem ser oriundos de erro na leitura do manômetro durante o procedimento experimental.

Contudo, através dos valores médios de coeficiente de perda de carga localizada K e comprimento equivalente L_{eq} para curva de transposição de DN 20mm se mostraram significativos, apresentando valores semelhantes aos de conexões especiais em mesmo diâmetro, tais como Joelho 90° e Tê de passagem direta, como podem ser observados na Tabela 4.

4.2.2 Trechos experimentais de DN 25mm

As verificações de diferença de pressão para os trechos referentes ao diâmetro de 25mm estão colocadas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Perdas de carga distribuídas experimentais para trecho retilíneo com DN 25mm (Trecho TR25)

Medição	L(mm)	DI (mm)	Ai (m ²)	P ₁ (mca)	P ₂ (mca)	P ₁ -P ₂	Q (l/s)	Vel (m/s)
1	1000	21,6	0,00037	1,55	1,10	0,45	0,3846	1,0496
2				1,50	1,05	0,45	0,4115	1,1230
3				1,50	1,10	0,40	0,4098	1,1184
4				2,65	2,10	0,55	0,4914	1,3410
5				2,50	2,10	0,40	0,4926	1,3443
6				2,65	2,15	0,50	0,5085	1,3876
7				2,78	2,30	0,48	0,5192	1,4169
8				2,70	2,20	0,50	0,5277	1,4401
9				2,70	2,10	0,60	0,5222	1,4251
10				2,70	2,20	0,50	0,5420	1,4791
11				2,60	2,19	0,41	0,5382	1,4688
12				2,60	2,25	0,35	0,5425	1,4805

Fonte: Elaboração própria

Para os mesmos dados de vazões nos trechos retilíneos foram determinadas as perdas de carga nas conexões de DN 25mm (Tabela 18).

Tabela 18 – Perda de carga experimental para trecho com conexão do tipo curva de transposição com DN 25mm (Trecho CT25)

Medição	L (mm)	DI (mm)	Ai (m ²)	P ₁ (mca)	P ₂ (mca)	P ₁ -P ₂	$\Delta h_{pe\grave{c}a}$ (mca)	Rey	f _{atrito}
1	1000	21,6	0,00037	1,60	1,10	0,50	0,05	22672	0,173104
2				1,55	1,00	0,55	0,10	24258	0,151207
3				1,50	1,00	0,50	0,10	24158	0,135515
4				2,80	2,10	0,70	0,15	28966	0,129610
5				2,60	2,10	0,50	0,10	29038	0,093799
6				2,70	2,15	0,55	0,05	29973	0,110047
7				2,70	2,10	0,60	0,12	30606	0,096852
8				2,78	2,10	0,68	0,18	31106	0,080542
9				2,70	2,00	0,70	0,10	30781	0,067674
10				2,80	2,25	0,55	0,05	31949	0,101321
11				2,70	2,20	0,50	0,09	31726	0,102173
12				2,65	2,20	0,45	0,10	31978	0,125209

Fonte: Elaboração própria

Para os valores de perda de carga experimental da conexão verificada, fizeram-se os cálculos dos parâmetros K e L_{eq} experimentais, que estão colocados na Tabela 19.

Tabela 19 - Coeficientes de perda de carga localizada e comprimentos equivalentes experimentais para conexão do tipo curva de transposição com DN 25mm (Trecho CT25)

Medição	$\Delta h_{peça}$ (mca)	J (m/m)	K	L_{eq} (m)
1	0,05	0,45	0,8895	0,1111
2	0,10	0,45	1,5540	0,2222
3	0,10	0,40	1,5669	0,2500
4	0,15	0,55	1,6348	0,2727
5	0,10	0,40	1,0845	0,2500
6	0,05	0,50	0,5090	0,1000
7	0,12	0,48	1,1715	0,2500
8	0,18	0,50	1,7011	0,3600
9	0,10	0,60	0,9651	0,1667
10	0,05	0,50	0,4479	0,1000
11	0,09	0,41	0,8177	0,2195
12	0,10	0,35	0,8942	0,2857
Média			1,1030	0,2157
Desvio Padrão			0,4302	0,0813

Fonte: Elaboração própria

Feitas as verificações da conexão de diâmetro nominal de 25mm, para a situação de escoamento observado, verificou-se ocorrência de escoamento turbulento de transição, com faixa de Reynolds entre 22000 e 32000, ou seja, apresentou menor turbulência comparado ao diâmetro de 20mm verificado no item 4.1.

Os resultados obtidos para perda de carga, idem a verificação feita para o diâmetro imediatamente inferior, também apresentaram variação maior para maiores vazões comparado aos valores obtidos para baixas vazões.

Os valores de coeficiente de perda de carga localizada K se mostraram maiores para menores velocidades e os comprimentos equivalentes L_{eq} obtidos para curva de transposição de DN 25mm se mostraram mais constantes sem variações consideráveis, apresentando ainda valores para perda de carga consideráveis, podendo ser comparada à conexões do tipo Curva 45° de mesmo diâmetro e material, baseando-se nas informações verificadas na ABNT NBR 5626:1998.

4.2.3 Trechos experimentais de DN 32mm

Idem aos itens 4.1 e 4.2, as verificações para os trechos de diâmetro nominal 32mm foram realizadas através dos mesmos procedimentos e estão colocadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Perdas de carga distribuídas experimentais para trecho retilíneo com DN 32mm (Trecho TR32)

Medição	L (mm)	DI (mm)	DI (m)	Ai (m ²)	P ₁ (mca)	P ₂ (mca)	P ₁ -P ₂	Q (l/s)	Vel (m/s)
1	1000	27,8	0,0278	0,00061	1,3	1,1	0,2	0,3846	0,6336
2					1,35	1,15	0,2	0,4115	0,6779
3					1,4	1,1	0,3	0,4098	0,6751
4					2,6	2,25	0,35	0,4914	0,8095
5					2,5	2,1	0,4	0,4926	0,8115
6					2,45	2,2	0,25	0,5084	0,8377
7					2,7	2,25	0,45	0,5192	0,8553
8					2,6	2,2	0,4	0,5277	0,8693
9					2,65	2,25	0,4	0,5222	0,8603
10					2,65	2,2	0,45	0,5420	0,8929
11					2,6	2,25	0,35	0,5382	0,8867
12					2,6	2,3	0,3	0,5425	0,8937

Fonte: Elaboração própria

Através do valor de perda de carga unitária determinado a partir dos dados do trecho experimental retilíneo da Tabela 20, fez-se a verificação da perda de carga para a conexão de 32mm. Os resultados estão dispostos na Tabela 21.

Tabela 21 - Perda de carga experimental para trecho com conexão do tipo curva de transposição com DN 32mm (Trecho CT32)

Medição	L (mm)	DI (mm)	A_i (m ²)	P_1 (mca)	P_2 (mca)	P_1-P_2	$\Delta h_{peça}$ (mca)	Rey	f_{atrito}
1	1000	27,8	0,00061	1,60	1,20	0,40	0,20	17615	0,27169
2				1,45	1,20	0,25	0,05	18848	0,23733
3				1,50	1,10	0,40	0,10	18770	0,35892
4				2,65	2,15	0,50	0,15	22506	0,29127
5				2,75	2,30	0,45	0,05	22562	0,33125
6				2,70	2,20	0,50	0,25	23288	0,19431
7				2,60	2,05	0,55	0,10	23780	0,30783
8				2,58	2,10	0,48	0,08	24169	0,24281
9				2,60	2,00	0,60	0,20	23916	0,20485
10				2,65	2,05	0,60	0,15	24824	0,33545
11				2,60	2,10	0,50	0,15	24650	0,28866
12				2,60	2,15	0,45	0,15	24846	0,29478

Fonte: Elaboração própria

Obtidas as perdas de carga localizada para as conexões de 32mm, fazendo utilização dos valores de perda de carga unitária determinados com os valores experimentais para o trecho retilíneo, foram calculados os valores de K e L_{eq} para cada medição da curva de transposição em diâmetro 32mm (Tabela 22).

Tabela 22 - Coeficientes de perda de carga localizada e comprimentos equivalentes experimentais para conexão do tipo curva de transposição com DN 32mm (Trecho CT32)

Medição	$\Delta h_{pe\tilde{c}a}$ (mca)	J (m/m)	K	L_{eq} (m)
1	0,20	0,20	9,7632	1,0000
2	0,05	0,20	2,1321	0,2500
3	0,10	0,30	4,2993	0,3333
4	0,15	0,35	4,4858	0,4286
5	0,05	0,40	1,4879	0,1250
6	0,25	0,25	6,9826	1,0000
7	0,10	0,45	2,6787	0,2222
8	0,08	0,40	2,0745	0,2000
9	0,20	0,40	5,2964	0,5000
10	0,15	0,45	3,6872	0,3333
11	0,15	0,35	3,7394	0,4286
12	0,15	0,30	3,6806	0,5000
Média			4,1923	0,4434
Desvio Padrão			2,3197	0,2857

Fonte: Elaboração própria

Para a conexão de diâmetro nominal de 32mm, verificou-se ocorrência de escoamento turbulento de transição para o experimento, com faixa de Reynolds entre 17000 e 25000, ou seja, menos turbulento quando comparado aos diâmetros de 20 e 25mm verificados anteriormente, para as mesmas condições de vazão.

Os resultados obtidos para perda de carga também apresentaram variação maior para maiores vazões comparado aos valores obtidos para baixas vazões.

Ademais, para baixas vazões, observou-se elevados valores de coeficiente K.

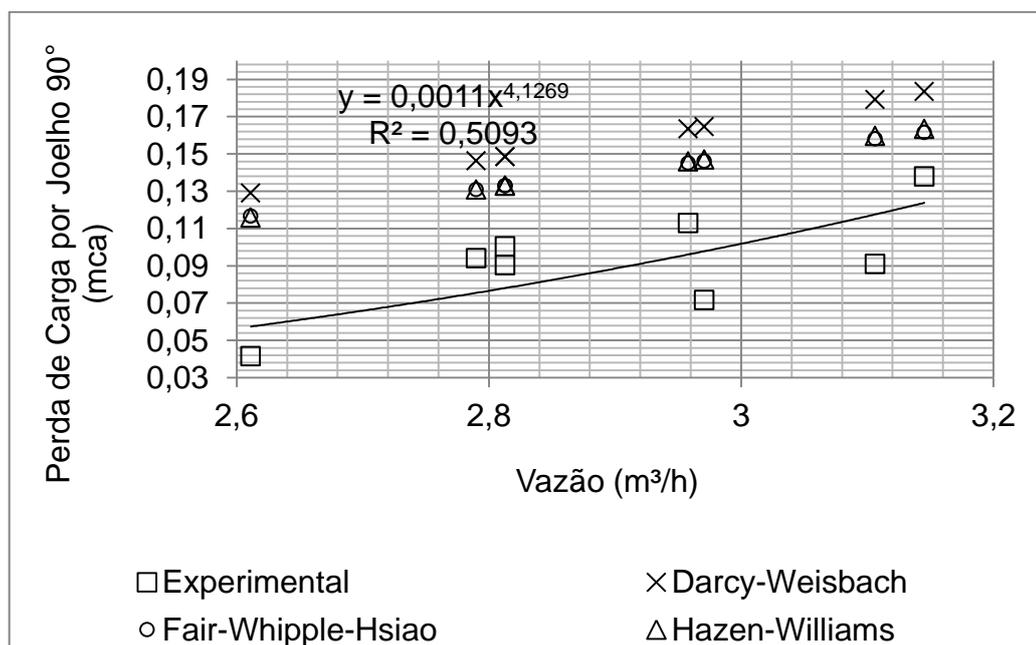
Os valores obtidos de comprimento equivalente L_{eq} para a curva de transposição de DN 32 mm mostraram-se variantes, apresentando também magnitude semelhante às conexões do tipo Joelho 45° para mesmo diâmetro e material, como pode ser verificado na normativa ABNT NBR 5626:1998.

4.3 Análises Gráficas

4.3.1 Joelho 90°

Através dos resultados experimentais e dos obtidos pelas equações, fez-se o gráfico de Perda de Carga x Vazão (Gráfico 1) correspondente a uma conexão do tipo Joelho 90°. Para a curva experimental, foi traçada a linha de tendência.

Gráfico 1 - Perda de Carga x Vazão correspondente à conexão do tipo Joelho 90°



Fonte: Elaboração própria

Por meio dos valores de número de Reynolds para os experimentos, o escoamento foi caracterizado como turbulento de transição.

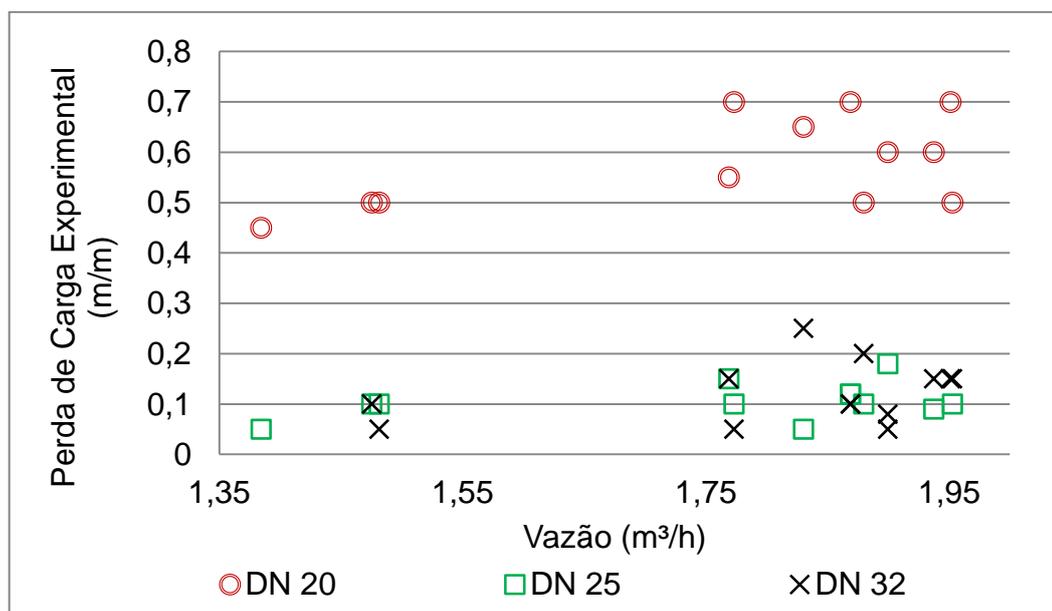
As perdas distribuídas verificadas para as equações de Hazen-Williams e Fair-Whipple-Hsiao obtiveram resultados semelhantes. A perda de carga obtida pela equação de Darcy Weisbach apresentou melhor desempenho com relação ao de Fair-Whipple-Hsiao, mas para a perda localizada, Fair-Whipple-Hsiao melhor se aproximou dos dados experimentais, apresentando melhores resultados.

O comprimento equivalente verificado experimentalmente para a conexão do tipo Joelho 90° apresentou valores inferiores ao da normativa, resultando na majoração das perdas nas conexões calculadas pelas equações fazendo utilização do L_{eq} proposto pela norma.

4.3.2 Curva de Transposição

Com os resultados obtidos para perda de carga nos três diâmetros nominais verificados para a conexão do tipo Curva de Transposição, fez-se a análise gráfica dos valores de perda de carga em função da vazão do experimento. Os dados foram plotados no gráfico demonstrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Perda de carga experimental vs. Vazão para Curva de Transposição



Fonte: Elaboração própria

Observando graficamente os resultados experimentais para os diâmetros verificados, pode-se observar que a perda de carga é acentuada para menores diâmetros, como esperado inicialmente.

Na Tabela 16 estão colocados os valores médios obtidos experimentalmente para os parâmetros L_{eq} e K .

Tabela 16 – Valores médios dos parâmetros para Curva de Transposição

Valores Médios	DN 20	DN 25	DN 32
L_{eq} (m)	0,5430	0,2157	0,4434
K	1,2933	1,1030	4,1923

Fonte: Elaboração própria

Não foram encontrados valores dos parâmetros citados para a conexão do tipo Curva de Transposição em normativas ou em bibliografias consagradas como referência.

Experimentalmente, observou-se que o valor médio de comprimento equivalente obtido para o menor diâmetro foi o maior para os três diâmetros nominais.

O comportamento dos resultados obtidos referentes à perda de carga para os diâmetros de 25mm (DN 25) e 32mm (DN 32) não ficaram graficamente definidos, contudo, em teoria, espera-se que a perda verificada seja maior para diâmetro menor, como evidentemente é visualizado para DN 20 no Gráfico 2.

Os resultados verificados para DN 25 não compatíveis com o esperado inicialmente podem ser oriundos de erro no manômetro analógico de baixa precisão ou devido à variação de diâmetro entre bancada de perda de carga e trecho experimental, interferindo na leitura de pressão no ponto de medição do trecho.

Nos procedimentos experimentais realizados no presente trabalho, não foram detectados pontos de fuga de pressão ou vazamentos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Para as verificações referentes à conexão do tipo Joelho 90°:

Os valores obtidos para parâmetros de dimensionamento, nas condições de escoamento observadas, apresentaram valores coerentes aos inicialmente esperados com base nas referências consagradas utilizadas. Com os resultados obtidos nesta investigação, verificou-se que a utilização de valores de L_{eq} da normativa atendem dimensionamentos hidráulicos com segurança.

Na análise da perda distribuída, fazendo-se utilização de L_{eq} proposto em normativa, verificou-se que para a perda localizada no Joelho 90° a equação que mais se aproximou dos resultados experimentais consistiu na equação de Fair-Whipple-Hsiao.

A equação teórica de Darcy-Weisbach apresentou maiores estimativas de perda distribuída, sendo esta equação preferencialmente aplicável a todas as faixas de escoamento e diâmetro de tubulação.

As equações empíricas de Fair-Whipple-Hsiao e Hazen-Williams apresentaram desempenho semelhante. Contudo, Fair-Whipple-Hsiao é aplicável para situação de pequenos diâmetros (situação do estudo), contrariamente à equação de Hazen-Williams, indicada para grandes diâmetros (superiores à 100mm), como já abordado na revisão bibliográfica.

Assim, observa-se então que o desempenho das equações de estimativa de perda de carga é dependente de sua validade de aplicação e utilização de comprimentos equivalentes adequados.

Para as verificações experimentais feitas referentes à conexão do tipo Curva de Transposição:

Verifica-se a importância da sua consideração no cálculo de perda de carga ocasionada, pois, experimentalmente, apresentou valores significativos de magnitude semelhante ao de conexões corriqueiramente utilizadas em dimensionamentos.

Ressalta-se também a importância da utilização de equipamentos de boa precisão nos procedimentos experimentais realizados neste trabalho, a fim de minimizar erros de medição e leitura.

Vale salientar que os valores adotados para as conexões mais usuais na normativa NBR 5626:1998 são oriundos de diversas verificações experimentais e baseadas em conhecimentos práticos, também adotando uma margem de segurança, atentando-se então para a necessidade de investigação da conexão do tipo Curva de Transposição para possível constatação de valores que sirvam de base para estimativas de perda de carga, para vários diâmetros, através do uso de fórmulas de estimativa de perda de carga, na ausência de dados experimentais.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base no estudo realizado, abaixo estão algumas sugestões para trabalhos investigativos futuros:

- Aplicar a metodologia utilizada para diferentes diâmetros de conexões a fim de analisar os parâmetros verificados neste trabalho;
- Realizar para a conexão do tipo curva de transposição a verificação de valores experimentais de rugosidade do material para fator de atrito observado;
- Aplicar a metodologia utilizada neste trabalho para mais verificações experimentais e realizar análise estatística dos dados observados;
- Analisar os parâmetros verificados neste trabalho para conexões sem quantificação de parâmetros de fácil acesso (Exemplo: luva de redução).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

BRANCO, A. M. **Estudo da perda de carga localizada em buchas de redução em PVC**. 2005. 28 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2005.

BAPTISTA, M. B. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3 ed. Ver. E ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

CRUZ, O. C.; BARRETO A. C.; COUTO, R. G. C.; SILVA, F. J. Definição do fator “K” correspondendo ao tê de polietileno de compressão com fluxo de sentido reto. In: WORK SHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO, 4., 2012, Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Fortaleza: INOVAGRI, 2012. Disponível em < <http://www.inovagri.org.br/meeting2012/wp-content/uploads/2012/06/Protocolo408.pdf>> Acesso em 06 de novembro 2015.

DELFORNO, E. J. **Determinação experimental da perda de carga localizada em curvas de transposição em PVC rígido**. 2006. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2006.

FACCIO, Ian. **Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte**. 2003. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FREITAS, M. F. B. **Desenvolvimento de Ferramenta de Cálculo para Dimensionamento de Redes Aerúlicas**. 2011. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Braga, 2011.

TELES, G. C. **Aferição dos valores dos comprimentos equivalentes, utilizados na determinação da perda de carga localizada**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 3. Ed. São Carlos: EESC-USP, 2004.

SCHNEIDER Motobombas. **Tabela 7 – Perda de carga em acessórios.** Manual técnico. Disponível em: <http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/Perdas_de_carga_em_acessorios.pdf> Acesso em: 23 de novembro 2015.

SOUZA, A. P. **Dimensionamento do sistema hidráulico para uma desensiladeira.** 2012. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Horizontina, Horizontina, 2012.

TRONOLONE, E. S. **Hidrodinâmica.** Anotações de aula. Escola de Engenharia/ Mackenzie. 2011.

VILANOVA, L. C. **Sistemas térmicos: Curso Superior de Tecnologia em fabricação mecânica.** Anotações de aula. Engenharia Mecânica/ UFRGS. 2015.