

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada

Francisco Nogueira Vilaça

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação
e Drenagem**

**Piracicaba
2012**

Francisco Nogueira Vilaça
Engenheiro Agrônomo

Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador
Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação
e Drenagem**

**Piracicaba
2012**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Vilaça, Francisco Nogueira

Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada / Francisco Nogueira
Vilaça. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - -
Piracicaba, 2012.

65 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Conectores 2. Irrigação localizada - Dimensionamento 3. Perda de carga
4. Tubulações I. Título

CDD 631.7
V695p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*Aos meus pais, Laert e Maria Cleusa, fonte de inspiração,
dedico.*

*Aos meus irmãos, Frederico e Fabrícia, amigos de todas as horas e
aos meus avós, Zezé e Anair (in memoriam), exemplos de companheirismo e dedicação,
ofereço.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por não permitir que eu me esmorecesse nas horas difíceis.

À minha família, que acompanhou tudo desde a graduação.

Aos meus amigos, Camilinha e Guga. Aos colegas da ESALQ, em especial à Jú, Carlão, Pedro e Robson. Aos colegas da UFV, em especial, Marcelo Rossi, Caio Leite e Eugenio Teixeira. Enfim, às pessoas que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho, a todos o meu muito obrigado!

À ESALQ/USP e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biosistemas Agrícolas, pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas, Prof. Folegatti, Prof. Jarbas, Prof. Rubens, Prof. Sérgio, Prof. Tarlei, mas em especial ao meu orientador, Prof. Frizzone, que com sua paixão pela pesquisa e docência nos motiva.

Não poderia deixar de agradecer aos funcionários do Departamento, em especial à Davilmar, ao Sr. Antônio, Chicão, Gauchinho, Gilmar, Sr. Hélio, Luiz, Marinaldo, Osvaldo e Paula. O que seríamos de nós alunos sem eles...?!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo fomento desta pesquisa.

O autor agradece ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

À PLASNOVA, por disponibilizar parte dos materiais utilizados nos ensaios.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 Perda de carga.....	19
2.2 Perda continua de carga.....	19
2.3 Perda localizada de carga.....	23
2.4 Análise dimensional.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Instalações.....	29
3.2 Perda de carga na passagem direta.....	31
3.2.1 Determinação da perda distribuída de carga.....	31
3.2.2 Determinação da perda localizada de carga.....	32
3.3 Perda de carga na passagem lateral.....	35
3.3.1 Determinação da perda de carga distribuída na linha lateral.....	35
3.3.2 Determinação da perda localizada de carga.....	38
3.4 Aplicação da análise dimensional.....	40
3.4.1 Análise dimensional para a passagem direta.....	40
3.4.2 Análise dimensional para a passagem lateral.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Perda de carga na passagem direta.....	45
4.1.1 Perda continua de carga no tubo.....	45

4.1.2 Perda localizada de carga.....45

4.1.3 Aplicação da análise dimensional para a passagem direta.....50

4.2 Perda de carga na passagem lateral.....52

4.2.1 Perda contínua de carga no tubo.....52

4.2.2 Perda localizada de carga.....53

4.2.3 Aplicação da análise dimensional para a passagem lateral.....56

5 CONCLUSÃO.....61

REFERÊNCIAS.....63

RESUMO

Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada

Sistemas de irrigação geralmente são dimensionados negligenciando-se os cálculos das perdas localizadas de carga, o que muitas vezes causa desbalanço hidráulico deste sistema. A irrigação localizada possui muitas peças especiais para as quais, muitas vezes, não existem equações matemáticas que possibilitem o cálculo destas perdas. Este trabalho teve como objetivo o ajuste de equações que permitam o cálculo da perda localizada de carga para a passagem direta e outra para a passagem lateral, causada pela presença de conectores iniciais de linha. A perda de carga na passagem direta é causada pela área da protrusão do conector internamente à tubulação e a perda de carga na passagem lateral é causada pela mudança no perfil de escoamento da água ao passar pelo conector. Para as duas situações a perda localizada no conector foi obtida por diferença entre a perda distribuída de carga no tubo mais conector e a perda distribuída de carga no tubo sem conector. Foram utilizados 5 conectores em 5 diâmetros de tubulação de polietileno e 3 diâmetros de tubulação de PVC. Foi utilizada análise dimensional para o desenvolvimento das equações que para a passagem direta apresentou um coeficiente de determinação de 97,27% e para a passagem lateral o coeficiente de determinação foi de 96,26%. As duas equações desenvolvidas apresentaram um coeficiente ótimo de desempenho, sendo seu uso indicado para os limites testados neste trabalho.

Palavras-chave: Perda de carga; Conectores; Análise dimensional; Passagem lateral; Passagem direta

ABSTRACT

Local head loss on initial trickle irrigation connectors

Irrigation systems are generally dimensioned neglecting the calculation of the local head loss which often causes a hydraulic disbalance of this system. There are many special components on a trickle irrigation system to which there are not mathematical equations that allow the calculation of these head losses. This study aimed the adjustment of one equation for calculating the local head losses to the direct passage and one for the lateral passage, caused by the presence of initial connectors on the lateral line. The local head loss on the direct passage is caused by the protrusion area of the connector inside the pipe and the local head loss on the lateral passage is caused by the change in the flow cross-section, when water passes through the connector. For both situations the local head loss on the connector was obtained by the difference between the local head loss on the pipe plus the connectors and the local head loss on the pipe without the connectors. There were used 5 connectors in 5 diameters polyethylene pipes and 3 diameters PVC pipes. Dimensional analysis was used to develop the equations that for the direct passage presented a determination coefficient of 97,27% and for the lateral passage the determination coefficient was 96,26%. The two equations developed showed a good coefficient of performance, and its use is indicated for the limits tested in this study.

Keywords: Head loss; Connectors; Dimensional analysis; Lateral passage; Direct passage

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da turbulência causada pela inserção de conectores em tubulações.....	24
Figura 2 - Croqui da bancada de ensaios.....	29
Figura 3 - Medidores de vazão utilizados para ensaios dos tubos de PVC.....	32
Figura 4 - Esquema da medição da área da protrusão.....	33
Figura 5 - Conectores utilizados nos ensaios.....	34
Figura 6 - Anéis de vedação utilizados para cada conector.....	34
Figura 7 - Ferramentas para furação das tubulações.....	35
Figura 8 - Medidor ótico de perfil.....	36
Figura 9 - Medidor de vazão para ensaios com tubos de polietileno.....	37
Figura 10 - Tomadas de pressão para tubos de polietileno.....	37
Figura 11 - Esquema da conexão das tomadas de pressão e da linha lateral à tubulação de PVC.....	39
Figura 12 - Detalhe interno dos conectores 2 e 3.....	40
Figura 13 - Perda de carga na passagem direta.....	47
Figura 14 - Perda localizada de carga em conectores na passagem direta.....	49
Figura 15 - Comparação entre a perda localizada de carga estimada e observada, para a passagem direta.....	52
Figura 16 - Perda de carga na passagem lateral.....	53
Figura 17 - Perda localizada de carga em conectores na passagem lateral.....	56
Figura 18 - Comparação entre a perda de carga estimada e observada, para a passagem lateral.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Incerteza do tipo ‘a’ para os diversos instrumentos.....	30
Tabela 2 - Características dos tubos de PVC.....	31
Tabela 3 - Área da protrusão do conjunto conector-anel de vedação.....	33
Tabela 4 - Características das ferramentas de furação.....	35
Tabela 5 - Características dos tubos de polietileno.....	36
Tabela 6 - Combinação dos conectores com os tubos de polietileno e PVC.....	38
Tabela 7 - Características dos conectores utilizados no ensaio.....	39
Tabela 8 - Variáveis envolvidas na passagem direta.....	41
Tabela 9 - Termos PI para a passagem direta.....	41
Tabela 10 - Variáveis envolvidas na passagem lateral.....	42
Tabela 11 - Termos Pi para a passagem lateral.....	43
Tabela 12 - Critério de interpretação do coeficiente “c” de Camargo.....	44
Tabela 13 - Equações de perda contínua de carga, (m), nos tubos de PVC, em função da vazão ($m^3 s^{-1}$).....	45
Tabela 14 - Equações de perda de carga (m) nos tubos de PVC mais conectores função da vazão ($m^3 s^{-1}$).....	48
Tabela 15 - Equações de perda localizada de carga (m) no conector para a passagem direta em função da vazão ($m^3 s^{-1}$).....	48
Tabela 16 - Resultado da regressão linear múltipla para a perda localizada de carga na passagem direta.....	50
Tabela 17 - Índice “c” de Camargo para a equação ajustada para a perda localizada de carga na passagem direta.....	51
Tabela 18 - Equações de perda contínua de carga (m) nos tubos de polietileno em função da vazão ($m^3 s^{-1}$).....	52
Tabela 19 - Equações de perda de carga (m) no tubo de polietileno mais conector em função da vazão ($m^3 s^{-1}$).....	54
Tabela 20 - Equações de perda localizada de carga (m) no conector para a passagem lateral em função da vazão ($m^3 s^{-1}$).....	55

Tabela 21 - Resultado da regressão linear múltipla para a perda de carga localizada na passagem lateral.....	57
Tabela 22 - Índice “c” de Camargo para a equação ajustada para a perda localizada de carga na passagem lateral.....	58

1 INTRODUÇÃO

A irrigação possibilita aumento na produção de alimentos, permitindo que sejam utilizadas áreas inviáveis ao cultivo da maioria das culturas de interesse comercial e pode ainda ser vista como seguro contra veranicos. Existem vários métodos de irrigação, mas se destacam a irrigação convencional, por superfície e localizada.

Irrigação localizada é o sistema de irrigação no qual se aplica água em baixa intensidade e com elevada frequência, mantendo o solo com elevado teor de umidade, permitindo às plantas expressarem todo seu potencial genético. Os dois principais sistemas de irrigação localizada são o gotejamento e a microaspersão. Uma grande vantagem desse sistema, desde que bem manejado, é a economia de água, pois esta é aplicada próximo ao sistema radicular evitando perdas por evaporação e arraste assim como escoamento superficial.

O dimensionamento de qualquer sistema de irrigação, se não bem efetuado, pode levar o agricultor ao fracasso. Muitos projetistas optam por considerar as perdas localizadas como uma porcentagem fixa da perda de carga total do sistema, podendo desta forma estar super ou subestimando tais perdas, o que irá afetar diretamente a seleção de um conjunto motobomba e a eficiência do sistema no campo. A determinação da perda de carga em tubulações é um fator importante para os projetos de engenharia de irrigação, pois afeta o balanço hidráulico do sistema assim como seus custos. O diâmetro dos tubos normalmente é calculado de acordo com a perda de carga admissível para cada situação, cabendo ao projetista tal consideração. O aumento no diâmetro reduz a perda de carga reduzindo o custo operacional do sistema, porém eleva o custo inicial. Da mesma forma, a redução do diâmetro reduz o custo inicial, mas aumenta o custo operacional, pois a energia gasta no bombeamento é proporcional à perda de carga.

A classificação das tubulações em sistemas de irrigação pode variar de acordo com o sistema, dependendo da ramificação que ela sofre desde a captação até a emissão. Linhas laterais são aquelas onde estão instalados os emissores, que são as estruturas responsáveis por permitir a passagem da água com diferentes vazões. Em irrigação localizada, os emissores podem ser gotejadores ou microaspersores, e as linhas laterais geralmente são de polietileno de baixa densidade (PEBD). As pressões de serviço variam entre 200 kPa e 400 kPa e os diâmetros nominais estão entre 10 mm e 26 mm. O diâmetro interno apresenta grande variação entre os fabricantes, o que requer cuidado especial no dimensionamento.

Linhas de derivação ou linhas secundárias são aquelas que conduzem água para as linhas laterais e normalmente são utilizadas tubulações de PVC. A escolha das dimensões das linhas de derivação depende do cálculo hidráulico, e normalmente, a pressão de serviço é menor do que 400 kPa. As tubulações de PVC são apresentadas em barras de 6 m e os diâmetros mais usuais para linhas de derivação são DN 35, 50 e 75.

Em irrigação localizada, a conexão entre a linha lateral e a linha de derivação é feita pelo conector inicial de linha. As dimensões e a geometria deste conector variam entre os fabricantes e com isso varia a perda de carga causada pela sua inserção no tubo. Existem duas modalidades de perda de carga causada pela presença de conectores sobre uma tubulação. Perda de carga na passagem direta e perda de carga na passagem lateral. A passagem direta é o percurso percorrido pelo líquido ao longo da linha de derivação, sem mudança na direção e a passagem lateral é o percurso percorrido pelo líquido da linha de derivação para a linha lateral e, portanto, com mudança de direção.

A perda de carga na passagem direta é provocada pela inserção dos conectores sobre a tubulação. É função da vazão escoada, do diâmetro interno da tubulação, do espaçamento entre os conectores e da área da protrusão do conector, que corresponde à área transversal da inserção dentro da linha de derivação.

A perda de carga na passagem lateral é provocada pela redução da seção de escoamento na entrada da linha lateral. É função da vazão escoada, do diâmetro interno de entrada e comprimento do conector, do diâmetro interno da linha lateral.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que permita o cálculo da perda localizada de carga nas passagens direta e lateral, provocada pela inserção de conectores iniciais de linha, em irrigação localizada, utilizando análise dimensional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perda de carga

Perda de carga é a dissipação de energia de um fluido devido ao contato entre este e as paredes das tubulações, representada pela rugosidade assim como pelo atrito interno entre as moléculas deste mesmo fluido. Conforme o tamanho das rugosidades e a velocidade do fluido, tem-se vários graus de perda de carga, distinguindo-se o fluxo em regimes (AZEVEDO NETTO, 1991). O termo perda de carga pode também ser usado como sendo parte da energia potencial, de pressão e de velocidade que é transformada em outros tipos de energia, tal como calor, durante o processo de condução do fluido. Quanto maior a altura das asperezas ou rugosidade, maior será a turbulência do escoamento e logo, maior será a perda de carga (STREETER; WYLIE, 1980).

Perda de carga pode ser ocasionada simplesmente pelo movimento do fluido pela tubulação, sendo denominada perda contínua de carga ou ocasionada pela presença de peças especiais nesta tubulação, sendo neste caso denominada perda localizada de carga. A perda de carga total em uma tubulação é a soma das perdas contínua e localizada de carga.

2.2 Perda contínua de carga

Uma vez que a perda de carga depende da velocidade, do fluido escoado e das asperezas, pode-se inferir que ela depende do número de Reynolds (Re). Re é um número adimensional que relaciona a velocidade de escoamento, o diâmetro da tubulação e a viscosidade cinemática do fluido escoado (eq. 1):

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad (1)$$

onde V é a velocidade de escoamento; D o diâmetro da tubulação e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Uma vez que a viscosidade cinemática de um fluido depende da temperatura, Reddy (2002) propôs uma equação (eq. 2) que possibilita encontrar a viscosidade cinemática da água para qualquer temperatura, baseado em sua viscosidade a 20°C.

$$\nu_T = (0,98)^{T-20} \cdot \nu_{20} \quad (2)$$

sendo ν_T a viscosidade cinemática da água em uma temperatura T qualquer, em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; ν_{20} a viscosidade da água a 20°C ; ($1,003 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$); T a temperatura na qual se deseja encontrar a viscosidade, em $^\circ\text{C}$.

O escoamento pode ser dividido em regime laminar, turbulento ou de transição, e Re indica limites para cada regime. Para regime laminar, $Re < 2000$; regime turbulento $Re > 4000$; e $2000 < Re < 4000$, diz-se que o regime é de transição. No regime laminar, a perda de carga é devida ao atrito do fluido com as paredes da tubulação, sendo assim, depende basicamente da rugosidade destas. No regime turbulento, a perda de carga dependerá da velocidade do escoamento, podendo a rugosidade ser desprezada ou negligenciada. Para $2000 < Re < 4000$, não fica claro se a perda de carga é provocada pela rugosidade ou velocidade, e por isso o regime é dito de transição (AZEVEDO NETTO, 1991).

O cálculo da perda de carga pode ser feito através de equações empíricas, como as de Hazen-Williams, Manning ou Scobey, que são equações relativamente simples. De acordo com Kamand (1988), o uso destas equações gera incertezas na estimativa da rugosidade das paredes, pois se considera um fator de rugosidade constante para todos os diâmetros e velocidades de escoamento. Já na equação de Darcy-Weisbach (eq. 3), o fator de atrito varia de acordo com o escoamento, devendo ser determinado através de equações matemáticas, que irão variar para cada regime, o que aumenta a precisão do cálculo da perda de carga.

$$hf = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad \text{ou} \quad J = \frac{f}{D} \times \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

sendo hf a perda de carga total no seguimento analisado; f o fator de atrito; L e D o comprimento e o diâmetro da tubulação respectivamente; V a velocidade de escoamento; g a aceleração da gravidade; J a perda de carga unitária.

De acordo com Romeo (2002) e Provenzano et al. (2004), em regimes laminares, o cálculo do fator de atrito (f) pode ser feito com o uso da equação de Hagen-Poiseuille (eq. 4), na qual o fator de atrito depende apenas de Re :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

No escoamento turbulento o fator de atrito depende, além de Re , da rugosidade relativa do tubo (ϵ/D) – ϵ é a altura média das rugosidades do tubo – o que pode dificultar razoavelmente sua determinação. Uma vez que o fator de atrito depende da rugosidade relativa, os condutos podem ser divididos em condutos hidraulicamente lisos e condutos

hidraulicamente rugosos. Conduitos lisos são aqueles nos quais as irregularidades são cobertas pela camada laminar, que é uma camada delgada de fluido, adjacente à parede do tubo, que reduz o atrito entre este e o líquido. Nos conduitos hidraulicamente rugosos, a rugosidade relativa influencia a velocidade de escoamento, e podem ser separados dois regimes, o turbulento de transição e o de turbulência plena. No regime turbulento de transição, apenas uma parte das asperezas atravessa a camada laminar, o que contribui para a turbulência. Para turbulência plena, as irregularidades perfuram totalmente a camada laminar, aumentando e mantendo significativamente a turbulência. De acordo com Porto (1998); Yoo e Singh (2005); Sonnad e Goudar (2006), para tubos hidraulicamente rugosos, f pode ser calculado utilizando-se a equação de Colebrook-White (eq. 5):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,52}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (5)$$

Para escoamento em tubos comerciais rugosos é a equação mais utilizada para calcular f , sendo válida para $2000 < Re < 10^8$ e $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,005$. Uma desvantagem desta equação é que ela é implícita em f , o que requer soluções por métodos numéricos iterativos como Newton-Raphson, mas que devido à computação, deixou de ser uma tarefa árdua, porém pode aumentar consideravelmente o trabalho em redes de tubulações intrincadas onde é necessário o cálculo de múltiplos fatores de atrito. Além disso, o valor inicial atribuído a f e o critério de convergência para as iterações deverão ser selecionados cuidadosamente. Devido a estas dificuldades, vários autores propuseram equações explícitas em f , o que as tornam bastante convenientes. (SWAMEE; JAIN, 1976; SERGHIDES, 1984; PORTO, 1998; ROMEO et al., 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Vale ressaltar que, de acordo com von Bernuth (1988), a equação de Colebrook-White é um arranjo inteiramente empírico, com coeficientes empiricamente determinados, que possui a única vantagem de ser operacional. É uma combinação entre a equação de Prandtl (eq. 6), para escoamento turbulento em tubos lisos, e a equação de Von Karman (eq. 7), para escoamento em tubos rugosos, sendo estas suas bases teóricas.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \frac{K}{3,71D} \quad (7)$$

onde K é o tamanho das asperezas ou rugosidade relativa

von Bernuth (1990), afirma que para escoamento em tubos hidraulicamente lisos, o tamanho das asperezas não tem influência sobre a turbulência, sendo assim, o fator de atrito não depende da rugosidade das paredes da tubulação. Em irrigação localizada, Re nas linhas laterais normalmente é inferior a 10^5 e f pode ser calculado com boa precisão pela equação proposta por Blasius (eq. 8), desde que $4000 \leq Re \leq 10^5$. O mesmo autor propõe que a equação de Blasius pode ser usada com precisão em qualquer diâmetro de tubulação, desde que $4000 \leq Re \leq 10^5$, e que com a inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach, obtêm-se três vantagens: 1- possui base teórica e é dimensionalmente homogênea; 2- apresenta boa exatidão para $4000 \leq Re \leq 10^5$; 3- é facilmente corrigida para variações na viscosidade da água; salienta ainda que a equação de Blasius superestima f quando $Re < 4000$.

$$f = \frac{c}{Re^m} \quad (8)$$

sendo $c = 0,316$ e $m = 0,25$

Cardoso et al. (2008), trabalhando com tubos de polietileno de pequenos diâmetros encontrou $c = 0,300$ e $m = 0,25$ e afirma que apesar da equação de Blasius superestimar f , ela pode ser usada juntamente com a equação de Colebrook-White em projetos de irrigação.

Swamee (1990), citado por Porto (1990) apresenta uma equação (eq. 9) explícita em f e para qualquer regime de escoamento, Re e rugosidade relativa:

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

Andrade (2001), verificou ser preciso ter cautela na utilização desta equação. O autor afirma que há um aumento no desvio de f quando se aumenta a rugosidade do tubo e uma redução de f quando se aumenta Re . Porém ele encontrou valores de f bastante próximos aos estimados pela equação de Colebrook-White em regime de transição e turbulência plena.

A maioria dos condutos utilizados em tubulações para condução de água apresentam rugosidades maiores que 0,05 mm, e os escoamentos, em sua maioria, ocorrem com maiores valores de Re , o que conduz a escoamentos turbulento de transição ou de turbulência plena, condições em que a equação de Swamee apresenta bons resultados (PORTO,1998).

Daniel Bernoulli propôs ser constante a soma da energia de posição, velocidade e pressão, ao longo de qualquer linha de corrente, para um líquido ideal, esta soma foi denominada por ele como carga total. A equação de Bernoulli (eq. 10) pode ser assim apresentada:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (10)$$

onde P_1 e P_2 é a pressão nos pontos 1 e 2 respectivamente, γ a peso específico do líquido, V_1 e V_2 as velocidades de escoamento, g é a aceleração da gravidade, Z_1 e Z_2 os potenciais de posição.

Por se tratar de um líquido ideal, na prática há a necessidade da inserção de um fator de perda de carga, então ela pode ser assim reescrita (eq. 11):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hf_{1 \rightarrow 2} \quad (11)$$

sendo $hf_{1 \rightarrow 2}$ a perda de carga total do ponto 1 ao 2.

Desta forma, é possível usá-la para o cálculo da perda de carga total em um trecho qualquer de uma tubulação (MELO; SILVA; FARIA, 2000; RETTORE NETO, 2008; ZITTERELL; FRIZZONE; RETTORE NETTO, 2009).

2.3 Perda localizada de carga

Variações da velocidade de fluxo causada por uma peça existente na tubulação é devido à perda de carga, e segundo Caixeta (1991), esta perda de carga é chamada singular, acidental ou localizada, pois ocupa apenas um pequeno comprimento em relação ao da tubulação.

A introdução de emissores ao longo da linha lateral modifica o curso das linhas de fluxo, causando turbulência local que resulta em perdas de carga adicionais às perdas distribuídas no tubo. A turbulência é consequência da presença de um elemento na parede interna do tubo que causa um grau de obstrução na seção de escoamento causando uma contração do local da inserção e diminuindo o diâmetro de escoamento. Esta turbulência depende das características geométricas do conector (AL-AMOUD, 1995; BAGARELLO et al., 1997; JUANA et al., 2002b; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

Segundo Azevedo Netto (1991), com a inserção de emissores, pode-se utilizar o teorema de Borda-Bélanger (eq. 12) para se estimar a perda de carga provocada pela protrusão, pois se caracteriza uma contração brusca da seção de escoamento com subsequente ampliação, ilustrado pelo esquema apresentado na figura 1, sendo $A_c = rA$, sendo r a razão de obstrução. A_c representa a área de passagem do fluido pela tubulação com emissor inserido e A representa a área de passagem do fluido pelo tubo sem emissor. Igualmente, V_c e V representam as velocidades em cada seção.

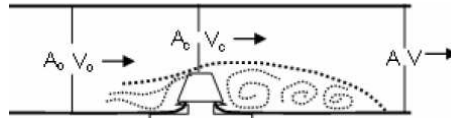


Figura 1 - Representação esquemática da turbulência causada pela inserção de conectores em tubulações

$$hf = \frac{(V_c - V)^2}{2g} \quad (12)$$

sendo V_c a velocidade do fluido na seção menor; V a velocidade média do fluido na seção maior.

A perda localizada de carga causada por este tipo de inserção pode ser representada por uma fração K_L da carga cinética, conhecido como o princípio da similaridade de Reynolds (eq. 13).

$$hf_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

sendo hf_L a perda localizada de carga, V a velocidade do escoamento, K_L o coeficiente de carga cinética e g a aceleração da gravidade.

Como há contração brusca com subsequente ampliação com a inserção do conector, K_L pode ser relacionado com a geometria da seção de escoamento, pela aplicação do teorema de Bélanger (eq. 14).

$$hf = \frac{(V_c - V)^2}{2g} = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 \frac{V^2}{2g} \quad (14)$$

sendo A a área de passagem do fluido no tubo sem emissor; A_c a área de passagem do fluido na tubulação com emissor.

O fator geométrico desta equação é denominado índice de obstrução (IO) (eq. 15).

$$IO = \left(\frac{A}{A_c} - 1\right)^2 = \left(\frac{1-r}{r}\right)^2 \quad (15)$$

sendo r a razão de obstrução ($r = A_c/A$)

Vale ressaltar que IO pode variar consideravelmente em tubos de polietileno, pois com a pressurização do sistema, este material sofre uma ligeira expansão de suas paredes e com isso, o diâmetro interno aumenta reduzindo IO (FRIZZONE, 1998; VILELA, 2003).

As características geométricas da inserção e Re influenciam K_L , sendo que este aumenta com o aumento de Re até certo limite, a partir do qual se mantém constante sendo que a viscosidade pode ser negligenciada, (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004; JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002a).

Bagarello et al. (1997), trabalhando com conectores “*on-line*” propuseram a seguinte equação para o cálculo de K_L (eq. 16).

$$K_L = 1,68 \left(\frac{1}{r} - 1\right)^{1,29} \quad (16)$$

A perda de carga existente na passagem lateral do conector de microtubo, pode ser corrigida por um coeficiente k - de carga cinética e relacionado ao comprimento do conector - igual a 50,2 e que para $Re > 5000$, k pode ser considerado constante em aplicações práticas. Cardoso (2007), relacionou k ao IO para vinte pares de combinações tubo-conector e $5000 < Re < 68000$ e encontrou $k = 1,23(IO)^{0,51}$ (ZITTERELL; FRIZZONE; RETTORE NETO, 2009).

As características geométricas da inserção e Re influenciam K_L , sendo que este aumenta com o aumento de Re até certo limite, a partir do qual se mantém constante podendo a viscosidade ser negligenciada, (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004; JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002a).

Rettone Netto (2009), em pesquisas com emissores não coaxiais e Cardoso (2008), em estudos com conexões de emissores, propuseram modelos matemáticos para a determinação da perda localizada de carga, levando em consideração o índice de obstrução. Gomes (2009), afirma que, para gotejadores coaxiais integrados, a perda de carga aumenta proporcionalmente à razão de obstrução e independe de Re quando $Re > 10000$, sugerindo que a perda localizada

de carga para estes gotejadores pode ser caracterizada por um valor médio de K . O autor propõe uma relação matemática para determinar K em função do IO .

Al-Amound (1995), sugere que o valor de perda da perda localizada de carga (hf_L) pode ser encontrado experimentalmente pela diferença de perda de carga na presença e ausência de conectores, assim: mede-se a perda de carga unitária em uma linha lateral sem emissor e, em seguida, faz-se a mesma medida de perda de carga na linha com emissores vedados, a diferença entre os valores deve ser multiplicada pelo comprimento da linha e dividida pelo número de emissores presentes. O resultado encontrado é a perda de carga causada por um emissor, e pode ser assim representado (eq. 17):

$$hf_L = \frac{J' - J}{N} L \quad (17)$$

onde J' é perda de carga unitária na linha com emissor; J é a perda de carga unitária na linha sem emissores vedados; N é o número de emissores e L o comprimento da linha.

Yildirim (2007), verificou haver aumento na perda de carga com o aumento no número de emissores conectados à linha lateral assim como no aumento do espaçamento entre emissores.

De acordo com Al-Amound (1995), a perda localizada de carga aumenta com a área da saliência dos conectores, podendo superar em até 32% a perda de carga no tubo sem a protrusão interna, para um espaçamento de 1m.

Em 2007, Demir, Yurdem e Degirmencioglu desenvolveram um modelo matemático para a determinação da perda de carga na linha de emissores, para espaçamentos variando de 0,2 a 1 m.

Uma análise semelhante pode ser feita pela inserção de conectores iniciais em linhas de derivação na irrigação localizada. Estes conectores ao serem inseridos causam turbulência ao fluxo pela protrusão interna, fato agravado pela necessidade do anel de vedação e pela necessidade de derivar uma maior vazão, o que exige dimensões maiores destas peças e com isso influenciam bastante a perda de carga.

2.4 Análise dimensional

Segundo Buckingham, foi Fourier quem primeiramente afirmou que toda equação física correta é dimensionalmente homogênea e que todos os termos desta equação devem ter as mesmas dimensões. Em uma equação completa, os coeficientes são números adimensionais e o produto deles será zero. Este princípio é conhecido como Teorema de Buckingham ou Teorema dos π (Pi) de Buckingham.

A análise dimensional pode ser utilizada como uma ferramenta de predição de resultados. Por exemplo, extrapolar o comportamento de um protótipo em miniatura para uma escala real ou prever o comportamento de um modelo físico ou matemático qualquer (VENNARD; STREET, 1978; GILES, 1970).

Para descrever um problema físico ou matemático, não existe restrição quanto ao número n de grandezas nem quanto ao número k de unidades envolvidas, porém tais grandezas devem ser definidas de modo a se evitar redundância. Para tal, é essencial que o problema em questão seja bem estudado e que as variáveis envolvidas sejam corretamente definidas. Por exemplo, caso esteja envolvida vazão (q) e velocidade (v), deve se utilizar a forma básica de vazão, que é o produto da velocidade pela área transversal de escoamento.

A análise dimensional é uma ferramenta interessante para problemas que não tem solução analítica e por isso, necessitam ser experimentalmente determinados. Através da formação de conjuntos adimensionais, este tipo de análise permite ao pesquisador efetuar um número reduzido de ensaios e ao mesmo tempo obter uma quantidade considerável de informação, pois estes conjuntos permitem a avaliação do efeito de cada uma das variáveis sobre o fenômeno estudado.

Em hidráulica a análise dimensional pode ser utilizada de várias maneiras, dentre elas a obtenção de modelos para o estudo da perda de carga. Duran-Ros et al. (2010), propôs uma equação matemática para o cálculo da perda de carga em filtros utilizados com água residuária.

Para tubos lisos, a perda de carga foi descrita através de uma equação adimensional, na qual se utilizou o Teorema dos Pi (FERRO,1997). Demir, Yurdem e Degirmencioglu (2007) determinaram a perda de carga em linhas laterais através de modelos matemáticos com o auxílio deste teorema. Zitterell (2011) determinou um modelo matemático para o cálculo da perda localizada de carga em conectores da microirrigação utilizando este mesmo princípio.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Instalações

O experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ-USP em Piracicaba-SP, sendo dividido em duas etapas e utilizada uma bancada de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.

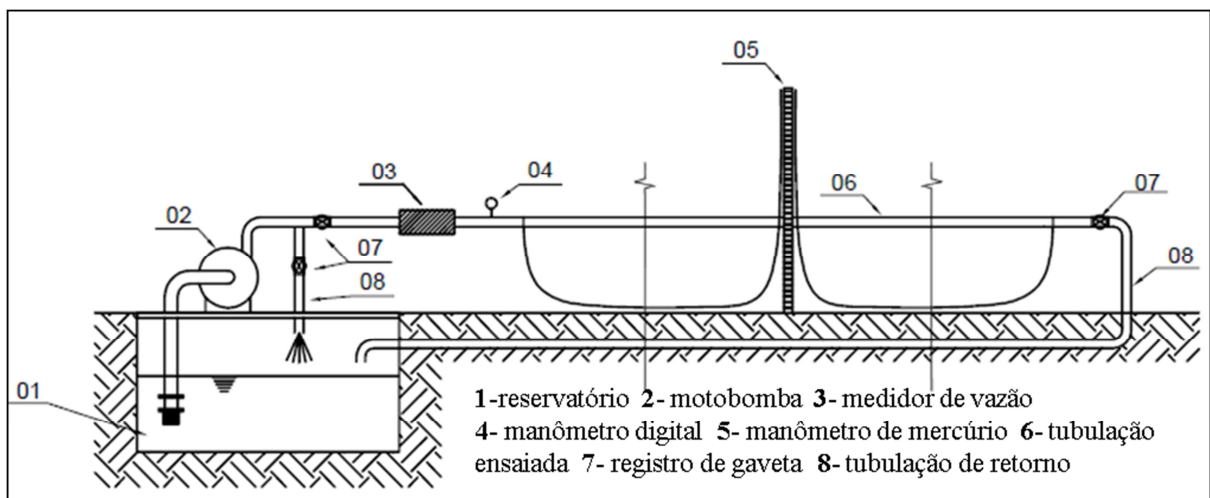


Figura 2 - Croqui da bancada de ensaios

Os ensaios foram conduzidos em um sistema fechado, no qual toda a água que circulava pela tubulação retornava ao reservatório. Na primeira etapa determinou-se a perda de carga na passagem direta e na segunda, a perda de carga na passagem lateral. Nos dois casos, primeiro foi determinada a perda de carga na tubulação sem os conectores e em seguida estes foram adicionados ao sistema. A variação da velocidade na tubulação foi medida através de manômetro diferencial tendo o mercúrio como líquido manométrico. Todos os ensaios foram realizados em quatro repetições e as equações geradas foram do tipo potência (eq. 18), ajustadas utilizando o *software* Table Curve[®].

$$hf = a \cdot Q^b \quad (18)$$

A perda de carga localizada referente aos conectores foi calculada pela diferença entre a perda de carga na tubulação com e sem conectores, respectivamente (eq. 19). Para a passagem direta, esta diferença foi ainda dividida por 15, que é o número de conectores inseridos sobre a tubulação.

$$hf_c = hf_{t+c} - hf_t \quad (19)$$

sendo hf_c a perda localizada de carga no conector, em m; hf_{t+c} a perda de carga na tubulação com conector, em m e hf_t a perda de carga na tubulação sem conectores, em m.

De acordo com Frizzone, Vieira e Paz (1998), a pressão de operação pode influenciar no diâmetro de tubos de polietileno. Com a finalidade de se evitar estas influências, durante os ensaios evitou-se variação na pressão, sendo esta mantida constante em 200 kPa (± 1 kPa), no início da tubulação, pela abertura e fechamento de registros de gaveta, e monitorada com manômetro digital com precisão de ± 1 kPa. Para eventual correção na viscosidade da água, a temperatura foi monitorada através de termômetro de mercúrio com precisão de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Durante os ensaios a temperatura manteve-se constante em $27^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

A vazão para cada ensaio respeitou o limite mínimo que permitisse Número de Reynolds sempre maior que 3000 e tendo como limite máximo, a velocidade de $3,0 \text{ m.s}^{-1}$.

A análise da incerteza em processos de medições (eq. 20) é utilizada para estimar o erro ou a incerteza envolvida nos diversos instrumentos utilizados em medições. Sendo assim, para cada um dos instrumentos utilizados nos ensaios, foram feitas trinta medições da mesma peça em questão, visando se obter a incerteza dessas medidas.

$$\text{Incerteza do tipo 'a'} = \text{Desvio padrão da média} \times 2 \quad (20)$$

Foram utilizados basicamente três instrumentos para obtenção de medidas: paquímetro digital, para obtenção do comprimento dos conectores; medidor ótico de perfil, para obtenção de diâmetro interno e balança digital para obtenção da massa de água. O *software* Autocad foi utilizado para obtenção da área da protrusão (PALAU-SALVADOR, 2006). A incerteza envolvida em cada um destes instrumentos é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Incerteza do tipo 'a' para os diversos instrumentos

Instrumento	Incerteza	Incerteza (%)
Autocad	0,343 (mm ²)	0,350
Paquímetro	0,027 (mm)	0,054
Medidor de perfil	0,006 (mm)	0,054
Balança digital	0,053 (g)	0,011
Diâmetro baseado em volume*	0,002 (mm)	0,005

*indica a incerteza após cálculo do diâmetro baseado no volume

Para testar a aderência dos dados à distribuição normal, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (eq. 21). A hipótese inicial é que as diferenças entre a distribuição de frequência acumulada de uma amostra de n observações e a distribuição de frequência acumulada teórica sejam pequenas e estejam dentro dos limites de erros aleatórios. A estatística do teste é baseada na maior diferença absoluta entre a função de distribuição normal acumulada, $\hat{F}(z_i)$ e a frequência relativa observada acumulada e ajustada, $F_{0,5}$.

$$D_{m\acute{a}x} = g_{m\acute{a}x} + \frac{1}{2n} , \quad (21)$$

onde $g_{m\acute{a}x}$: maior valor calculado de g ; n : tamanho da amostra ou número de parcelas.

sendo: $g = |\hat{F}(z_i) - F_{0,5}|$; sendo $F_{0,5} = \frac{(i-0,5)}{n}$,

onde $\hat{F}(z_i)$: função de distribuição normal acumulada; $F_{0,5}$: frequência relativa observada acumulada e ajustada; i : número da amostra; n : tamanho da amostra ou número de parcelas.

3.2 Perda de carga na passagem direta

3.2.1 Determinação da perda distribuída de carga

Cada unidade experimental consistiu de 16m de tubulação de PVC, mantida em nível. Foram utilizados três diâmetros nominais (DN), 35, 50 e 75 mm, listados na Tabela 2. O diâmetro interno foi obtido através do método volumétrico e utilizados segmentos de tubos de 0,5 m de comprimento para cada diâmetro em dez repetições. A água utilizada foi obtida por osmose reversa. Utilizou-se de balança digital com precisão de $\pm 0,01$ g e a massa foi corrigida para a temperatura de 25 °C.

Tabela 2 - Características dos tubos de PVC

DN	Dia. Interno (mm)	Des. Padrão (mm)	Coef. Variação (%)	Kolm.-Smirnov
35	35,716	0,106	0,003	0,295
50	47,564	0,126	0,003	0,132
75	72,054	0,045	0,0006	0,122

Para os diâmetros de 35 e 50 mm foi utilizado o medidor de vazão e conversor de sinal Krohne [Figura 3 – (1)] com capacidade de leitura de até $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e precisão de $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e para o diâmetro de 75 mm foi utilizado o medidor mais conversor de sinal da marca Conaut [Figura 3 – (2)] com capacidade de leitura de até $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e precisão de 0,1%.

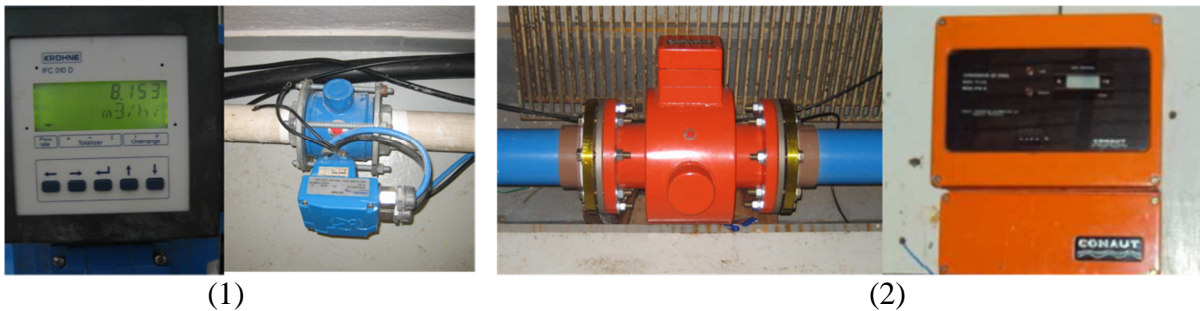


Figura 3 - Medidores de vazão utilizados para ensaios dos tubos de PVC

Todas as tomadas de pressão utilizadas nos tubos de PVC eram afixadas por peças especiais e nunca atarraxadas diretamente sobre a tubulação e a furação era devidamente limpa, para evitar arestas na parede interna.

As leituras no manômetro e no medidor de vazão eram feitas após estabilização do sistema, o que ocorria após cerca de cinco minutos. O intervalo da vazão foi dividido em 15 leituras, para uma boa representação matemática.

3.2.2 Determinação da perda localizada de carga

A perda localizada de carga na passagem direta é causada pela protrusão interna do conjunto conector-anel de vedação e para avaliar sua influência, foram inseridos sobre a tubulação, 15 conectores fechados e espaçados de 1 m. A área da protrusão dos conectores foi obtida através de fotografias trabalhadas no *software* Autocad[®] e são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Área da protrusão do conjunto conector-anel de vedação

DN	Conector	Área (m ²)	Des. Padrão (m)	Coef. Variação (%)	Kolm.-Smirnov
35	1	0,000103374	0,000005345	0,052	0,170
35	2	0,000153978	0,000006519	0,042	0,086
35	3	0,000158983	0,000006783	0,043	0,158
35	4	0,000218843	0,000008843	0,040	0,134
35	5	0,000354611	0,0000011462	0,032	0,150
50	1	0,000103374	0,000005345	0,052	0,170
50	2	0,000149591	0,000006411	0,043	0,115
50	3	0,000157166	0,000006474	0,041	0,159
50	4	0,000209839	0,000007005	0,033	0,081
50	5	0,000342923	0,0000017547	0,051	0,150
75	1	0,000105565	0,000008992	0,085	0,157
75	2	0,000141679	0,000005726	0,040	0,172
75	3	0,000153394	0,000005985	0,039	0,127
75	4	0,000202986	0,000007253	0,036	0,127
75	5	0,000338824	0,0000011236	0,033	0,086

Foram analisadas dez fotografias (Figura 4) de cada conector em cada um dos três diâmetros utilizados, totalizando-se trinta fotos de cada conjunto conector-anel de vedação. Foi utilizado como parâmetro de escala, paquímetro digital com precisão de $\pm 0,01$ mm, aberto em 12,34 mm, e esta medida era usada no Autocad[®] como escala de referência. As fotos eram feitas de maneira a propiciar uma visão o mais perpendicular possível da protrusão, reduzindo-se os erros no cálculo de sua área.

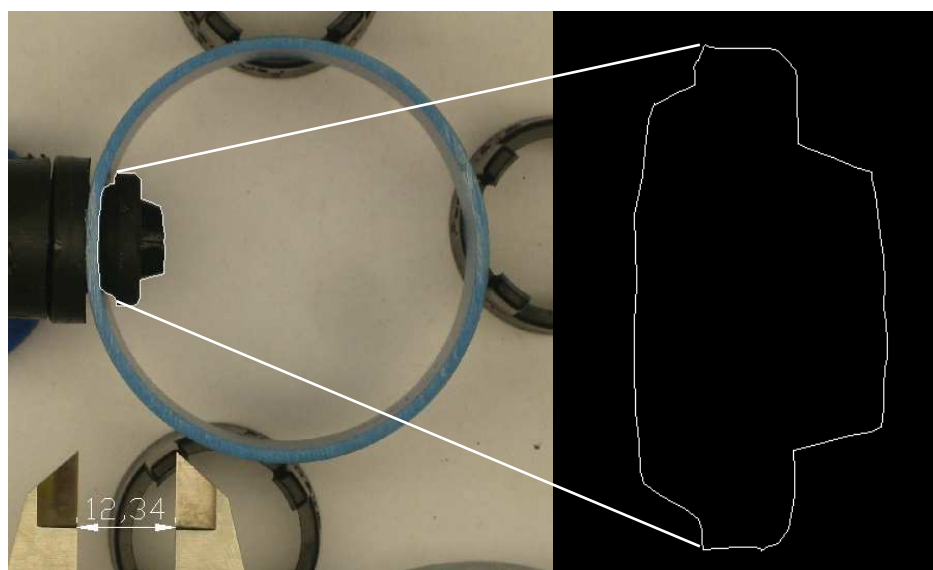


Figura 4 - Esquema da medição da área da protrusão

Cada conector possui seu anel de vedação recomendado pelo fabricante. As dimensões e geometria destes anéis variam após a inserção destes na tubulação e por isso não foram citadas aqui suas características construtivas, uma vez que apenas sua área da protrusão é importante ao ensaio. Os conectores utilizados nos ensaios assim como seus anéis de vedação são apresentados na Figura 5 e Figura 6 respectivamente.

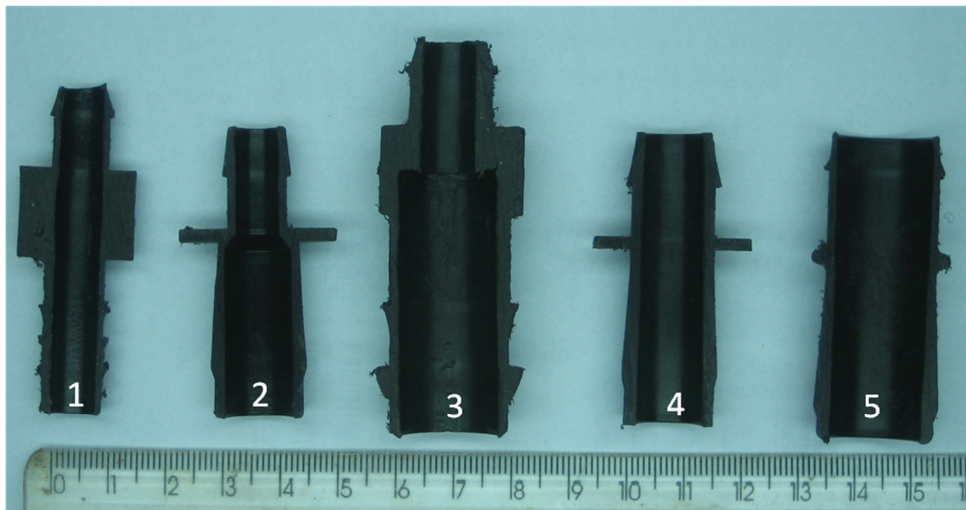


Figura 5 - Conectores utilizados nos ensaios

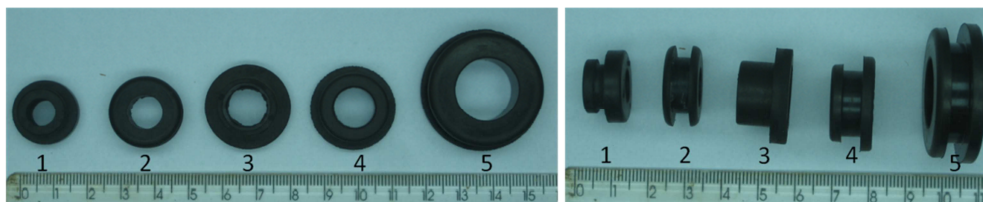


Figura 6 - Anéis de vedação utilizados para cada conector

A ordem de utilização dos conectores nos ensaios respeitou o diâmetro do furo necessário para sua instalação na tubulação, partindo-se do menor para o maior. Para o conector 1 foi utilizada broca comum [Figura 7 – (2)], pois não existe no mercado serra copo com a medida necessária, e para os demais foram utilizadas serra copo, [Figura 7 – (1)]. O tamanho da broca e serras copo utilizadas foram as que se adaptaram aos três diâmetros de PVC utilizados, sem causar vazamento, indesejável para os ensaios. Por não existir no mercado uma serra copo na medida ideal para a confecção do furo para o conector 5, houve a necessidade de se colar uma lixa para metal na parede externa da serra copo de 22 mm.

Tabela 4 - Características das ferramentas de furação

Conector	Ferramenta para furação:
1	broca 7/16"
2	serra copo 9/16"
3	serra copo 5/8"
4	serra copo 11/16"
5	serra copo 22 mm

Devido o uso de serras copo em sequência, houve a necessidade de se construir um gabarito para as furações, pois não era mais possível utilizar a broca guia das mesmas. O gabarito consiste em uma luva de PVC cortada ao meio e furada com a correspondente serra copo, de maneira que possibilitava a furação sem que a serra copo deslocasse.



Figura 7 - Ferramentas para furação das tubulações

Após a furação, as paredes dos tubos eram cuidadosamente limpas, para se retirar todo o resíduo proveniente do processo de furação. Rebarbas são indesejadas, pois contribuem para o aumento da turbulência e conseqüentemente da perda de carga. Antes da obtenção dos dados dos ensaios, as conexões eram cuidadosamente verificadas, procurando-se identificar vazamentos, o que afetaria o resultado final dos testes.

3.3 Perda de carga na passagem lateral

3.3.1 Determinação da perda de carga distribuída na linha lateral

Foram utilizados tubos de polietileno em cinco diâmetros e cada unidade experimental consistiu de 17 m para a tubulação DN 10 e 21 m para os demais. A necessidade de utilização

de comprimentos diferentes é pelo fato de o conjunto motobomba utilizado nos ensaios trabalhar com pressão nominal de 200 kPa, que é menor que a perda de carga existente na tubulação de DN 10 conduzindo água a 3 m.s^{-1} em tubulação mais longa. O diâmetro interno dos tubos foi obtido com medidor ótico de perfil da marca Starret (Figura 8), com precisão de $\pm 0,001 \text{ mm}$ e medido após os ensaios, com a finalidade de evitar erros devido a uma provável deformação das paredes após pressurização.

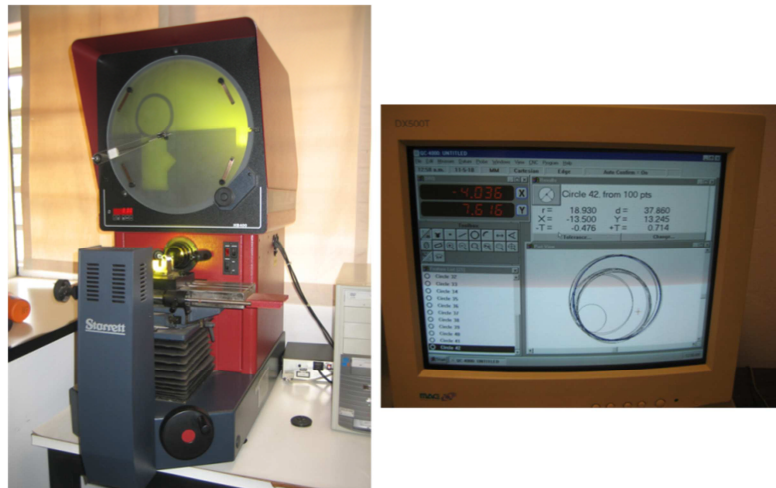


Figura 8 – Medidor ótico de perfil

Foram utilizadas três amostras, retiradas a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento útil, de cada repetição e de cada diâmetro de tubulação utilizada, totalizando doze amostras de cada diâmetro. O diâmetro interno é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos tubos de polietileno

DN	DI (mm)	Des. Padrão (mm)	Coef. Variação (%)	Kolm. - Smirnov
10	10,331	0,072	0,64	0,098
13	13,269	0,084	0,69	0,178
16	15,916	0,049	0,26	0,094
20	20,921	0,07	0,4	0,086
26	26,918	0,093	0,42	0,143

DN = diâmetro nominal; DI = diâmetro interno

A vazão foi obtida com medidor e conversor de sinal magnético da marca Krohne (Figura 9) com capacidade de leitura de até $8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e precisão de $\pm 0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.



Figura 9 - Medidor de vazão para ensaios com tubos de polietileno

As tomadas de pressão, conectadas ao manômetro diferencial, eram instaladas a 1m de quaisquer outras peças presentes na tubulação, procurando-se evitar efeitos de turbulência. A conexão era feita através de peças especiais de PVC [Figura 10 – (1)]. Tomou-se o cuidado de evitar que as tomadas de pressão, de metal [Figura 10 – (2)], não ultrapassassem certa distância da borda inferior das peças de PVC, evitando assim que tocassem no tubo, o que exerceria barreira à passagem da água e afetaria a leitura do manômetro diferencial.

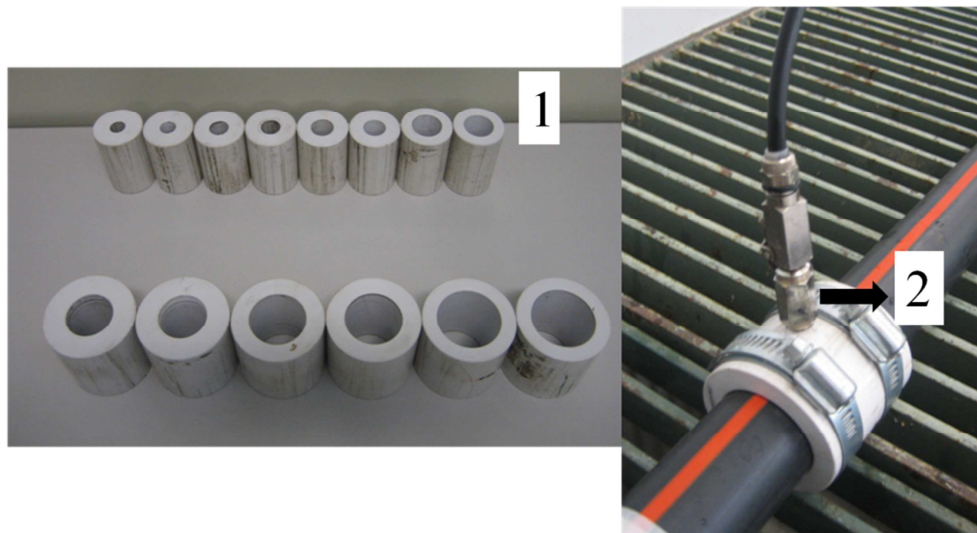


Figura 10 - Tomadas de pressão para tubos de polietileno

Os tubos de polietileno eram perfurados utilizando-se uma haste de metal [Figura 7 – (3)], previamente aquecida, que era inserida e retirada girando-a em seu próprio eixo, de maneira que o material derretido se acumulasse na mesma, evitando protuberâncias internas no tubo.

3.3.2 Determinação da perda localizada de carga

Nesta etapa os tubos de polietileno eram cortados exatamente onde se encontrava a primeira tomada de pressão, referente ao início da tubulação, para que os conectores iniciais de linha pudessem ser inseridos. Então, perdeu-se em média 1,5 cm de cada segmento da tubulação, o que pode ser considerado desprezível se comparado ao comprimento total. Após união ao tubo de polietileno, os conectores eram inseridos na tubulação de PVC (Figura 10). Foram utilizados dois diâmetros de tubos de polietileno para cada conector e três diâmetros de tubos de PVC, 35; 50 e 75 mm nos quais os conectores foram inseridos (Tabela 6).

Tabela 6 - Combinação dos conectores com os tubos de polietileno e PVC

Conector	Polietileno	PVC
1	DN 10	35
	DN 13	50
		75
2	DN 13	35
	DN 16	50
		75
3	DN 20	35
	DN 26	50
		75
4	DN 13	35
	DN 16	50
		75
5	DN 20	35
	DN 26	50
		75

A instalação das tomadas de pressão sobre a tubulação de PVC seguiu o método descrito anteriormente.

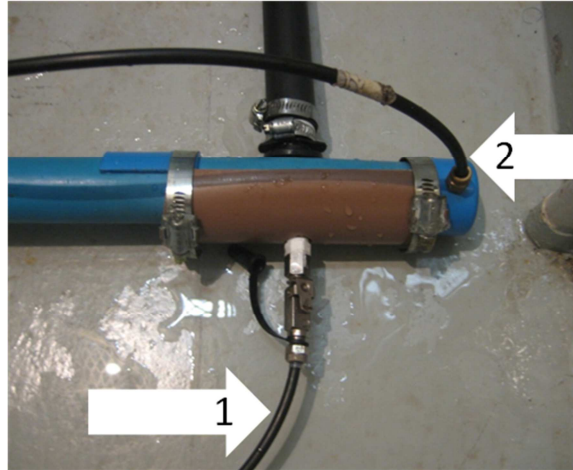


Figura 11 - Esquema da conexão das tomadas de pressão e da linha lateral à tubulação de PVC

A tomada de pressão [Figura 11 – (1)] utilizada com o manômetro diferencial foi instalada do lado oposto ao conjunto conector-polietileno e a tomada de pressão [Figura 11 – (2)] para monitoramento na entrada, foi instalada a 10 cm da inserção do conector.

O diâmetro interno dos conectores foi medido utilizando-se o medidor de perfil mencionado anteriormente e o comprimento obtido com paquímetro digital com precisão de $\pm 0,01\text{mm}$, as medidas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características dos conectores utilizados no ensaio

Conector		Des. Padrão (mm)	Coef. Variação (%)	Kolm.-Smirnov
1	D_e	7,001	0,107	0,210
	D_s	7,765	0,048	0,217
	L_c	58,072	0,637	0,089
2	D_e	7,086	0,026	0,206
	D_s	11,29	0,031	0,070
	L_c	49,546	0,212	0,078
3	D_e	8,676	0,028	0,096
	D_s	16,741	0,041	0,096
	L_c	66,440	0,058	0,150
4	D_e	9,833	0,053	0,092
	D_s	11,255	0,106	0,216
	L_c	50,226	0,234	0,128
5	D_e	16,051	0,945	0,207
	D_s	15,400	0,044	0,165
	L_c	52,315	0,106	0,111

D_e = diâmetro interno de entrada (mm); D_s = diâmetro interno de saída (mm); L_c = comprimento (mm)

A variação do diâmetro interno dos conectores 1, 4 e 5 ocorre gradativamente ao longo do seu comprimento, em uma forma ligeiramente cônica, chamando a atenção ao conector 5, que tem diâmetro interno de entrada maior que o diâmetro interno de saída. Os conectores 2 e

3 apresentam mudança brusca de diâmetro e devido a isso, foram obtidas quatro medidas de diâmetro interno para estes conectores. Mediu-se os diâmetros nas extremidades da seção menor [Figura 12 – (A e B)] e da seção maior [Figura 12 – (C e D)]. Utilizando o Teste de Tukey a 0,01% de probabilidade pôde-se afirmar que o diâmetro da seção menor e da seção maior é constante, porém diferentes entre si.

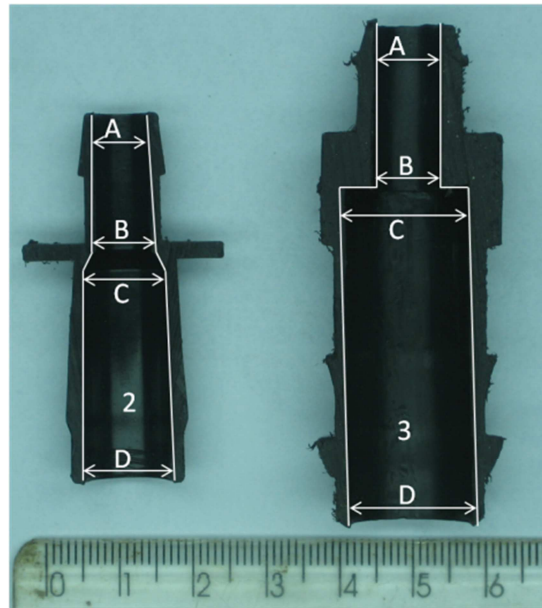


Figura 12 - Detalhe interno dos conectores 2 e 3

3.4 Aplicação da análise dimensional

3.4.1 Análise dimensional para a passagem direta

Para a passagem direta, a perda de carga causada pela inserção de conectores sobre a tubulação, pode ser representada pelas variáveis apresentadas na Tabela 8 e ser assim expressa (eq. 22):

$$hf_D = \text{Ø}(D_T, A_p, V_T, S, g, \nu) \quad (22)$$

sendo hf_D a perda localizada de carga no conector na passagem direta, em m; D_T o diâmetro interno do tubo de PVC, em m; A_p a área da protrusão, em m^2 ; V_T a velocidade da água no tubo, em m s^{-1} ; S o espaçamento entre conectores, em m; g a aceleração da gravidade, em m s^{-2} ; ν a viscosidade cinemática da água, em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Tabela 8 - Variáveis envolvidas na passagem direta

Tipo de variável	Símbolo	Variável	Dimensão	Unidade
Dependente	hf_D	Perda localizada de carga passagem direta	L	m
	D_T	Diâmetro interno do tubo de PVC	L	m
	A_p	Área da protrusão	L ²	m ²
Independente	V_T	Velocidade da água no tubo	LT ⁻¹	m s ⁻¹
	S	Espaçamento entre conectores	L	m
	g	Aceleração da gravidade	LT ⁻²	m s ⁻²
	ν	Viscosidade cinemática da água	L ² T ⁻¹	m ² s ⁻¹

Os grupos adimensionais, mostrados na Tabela 9, foram calculados para a obtenção da equação matemática que descreve a perda localizada de carga causada pela inserção de conectores sobre uma tubulação de PVC, aqui chamada perda localizada de carga na passagem direta.

Tabela 9 - Termos PI para a passagem direta

Grupos adimensionais		Significância
Termos Pi	Função	
Π_1	$\frac{hf_D}{D_T}$	Perda localizada de carga na passagem direta
Π_2	$\frac{A_p}{D_T^2}$	Relação entre a área da protrusão e o diâmetro interno do tubo de PVC
Π_3	$\frac{g \cdot D_T^3}{\nu}$	Relação entre a aceleração da gravidade, o diâmetro interno do tubo de PVC e viscosidade cinemática da água
Π_4	$\frac{D_T \cdot V_T}{\nu}$	Número de Reynolds
Π_5	$\frac{S}{D_T}$	Relação entre o espaçamento dos conectores e o diâmetro interno do tubo

Desta forma a equação que descreve a perda localizada de carga na passagem direta pode ser representada como (eq. 23):

$$\frac{hf_D}{D_T} = \Phi \left(\frac{A_p}{D_T^2}, \left(\frac{g \cdot D_T^3}{\nu} \right), \left(\frac{D_T \cdot V_T}{\nu} \right), \frac{S}{D_T} \right) \quad (23)$$

3.4.2 Análise dimensional para a passagem lateral

Para a passagem lateral, a perda localizada de carga causada pela presença de conectores em uma tubulação de polietileno, pode ser representada pelas variáveis apresentadas na Tabela 10 e ser assim expressa (eq. 24):

$$hf_L = \Phi(D_T, D_t, L_c, D_e, D_s, V_e, V_s, V_t, g, \nu) \quad (24)$$

sendo hf_L a perda localizada de carga no conector na passagem lateral, em m; D_T o diâmetro interno do tubo de PVC, em m; D_t o diâmetro interno do tubo de polietileno, em m; L_c o comprimento do conector, em m; D_e o diâmetro interno de entrada do conector, em m; D_s o diâmetro interno de saída do conector, em m; V_e a velocidade da água na entrada do conector, em m s^{-1} ; V_s a velocidade da água na saída do conector, em m s^{-1} ; V_t a velocidade da água na entrada do tubo de polietileno, em m s^{-1} ; g a aceleração da gravidade, em m s^{-2} ; ν a viscosidade cinemática da água, em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Tabela 10 - Variáveis envolvidas na passagem lateral

Tipo de variável	Símbolo	Variável	Dimensão	Unidade
Dependente	hf_L	Perda localizada de carga na passagem lateral	L	m
Independente	D_T	Diâmetro interno do tubo de PVC	L	m
	D_t	Diâmetro interno do tubo de polietileno	L	m
	L_c	Comprimento do conector	L	m
	D_e	Diâmetro de entrada do conector	L	m
	D_s	Diâmetro de saída do conector	L	m
	V_e	Velocidade na entrada do conector	LT^{-1}	m s^{-1}
	V_s	Velocidade na saída do conector	LT^{-1}	m s^{-1}
	V_t	Velocidade no tubo de polietileno	LT^{-1}	m s^{-1}
	g	Aceleração da gravidade	LT^{-2}	m s^{-2}
	ν	Viscosidade cinemática da água	L^2T^{-1}	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

Seguiu-se o mesmo procedimento descrito anteriormente para a passagem direta e os grupos adimensionais são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Termos Pi para a passagem lateral

Grupos adimensionais		Significância
Termos Pi	Função	
Π1	$\frac{hf_L \cdot V_e}{v}$	Perda de carga na passagem lateral
Π2	$\frac{D_s \cdot V_e}{v}$	Relação entre o diâmetro de saída, a velocidade na entrada e a viscosidade cinemática da água
Π3	$\frac{L_c \cdot V_e}{v}$	Relação entre o comprimento do conector, a velocidade na entrada e a viscosidade cinemática da água
Π4	$\frac{V_t}{V_e}$	Relação entre a velocidade no tubo de polietileno e a velocidade na entrada do conector
Π5	$\frac{v \cdot g}{V_e^3}$	Relação entre a viscosidade cinemática da água, aceleração da gravidade e a velocidade na entrada
Π6	$\frac{D_t \cdot V_e}{v}$	Relação entre o diâmetro do tubo de polietileno, velocidade na entrada do conector e a viscosidade cinemática da água
Π7	$\frac{D_e \cdot V_e}{v}$	Relação entre o diâmetro de entrada, a velocidade na entrada e a viscosidade cinemática da água
Π8	$\frac{D_T \cdot V_e}{v}$	Relação entre o diâmetro do tubo de PVC, a velocidade na entrada do conector e a viscosidade cinemática da água
Π9	$\frac{V_s}{V_e}$	Relação entre a velocidade na saída do conector e a velocidade na entrada do conector

Desta forma, a equação que descreve a perda localizada de carga na passagem lateral pode ser representada como (eq. 25):

$$\frac{hf_L \cdot V_e}{v} = \Phi \left(\left(\frac{D_s \cdot V_e}{v} \right), \left(\frac{L_c \cdot V_e}{v} \right), \left(\frac{V_t}{V_e} \right), \left(\frac{v \cdot g}{V_e^3} \right), \left(\frac{D_t \cdot V_e}{v} \right), \left(\frac{D_e \cdot V_e}{v} \right), \left(\frac{D_T \cdot V_e}{v} \right), \left(\frac{V_s}{V_e} \right) \right) \quad (25)$$

Os valores estimados e os observados foram correlacionados utilizando-se os índices estatísticos: “r”- coeficiente de correlação (eq. 26), que indica a precisão ou o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à media; “d”- índice de Willmott (eq. 27), que indica exatidão ou o afastamento dos valores estimados em relação aos observados; “c”- coeficiente de Camargo (eq. 28), que indica confiança ou desempenho.

$$r = \frac{n(\sum_{j=1}^n S_j O_j) - (\sum_{j=1}^n S_j)(\sum_{j=1}^n O_j)}{\sqrt{[n \sum_{j=1}^n (S_j)^2 - (\sum_{j=1}^n S_j)^2][n \sum_{j=1}^n (O_j)^2 - (\sum_{j=1}^n O_j)^2]}} \quad (26)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (S_j - O_j)^2}{\sum (|S_j - \bar{O}| + |O_j - \bar{O}|)^2} \right] \quad (27)$$

$$C = d \cdot r \quad (28)$$

A interpretação do índice “c” de Camargo é apresentado na tabela 12.

Tabela 12 - Critério de interpretação do coeficiente “c” de Camargo

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,5	Mau

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perda de carga na passagem direta

4.1.1 Perda contínua de carga no tubo

A Tabela 13 apresenta as equações referentes à perda de carga distribuída na tubulação de PVC.

Tabela 13 - Equações de perda contínua de carga, (m), nos tubos de PVC, em função da vazão (m^3s^{-1})

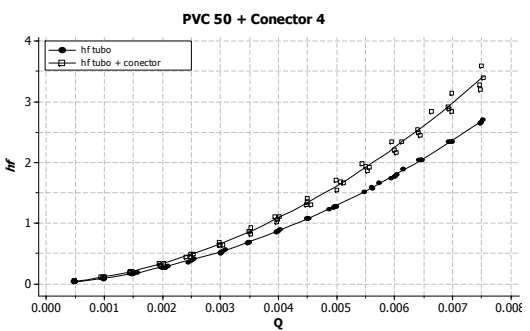
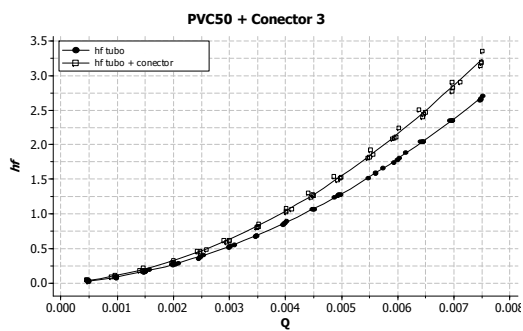
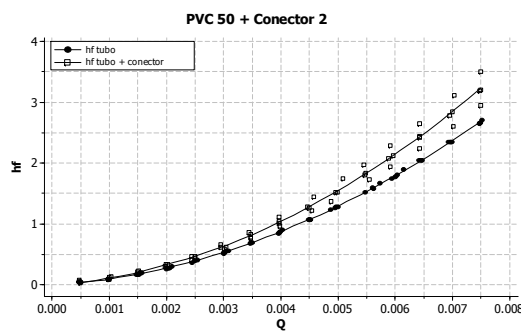
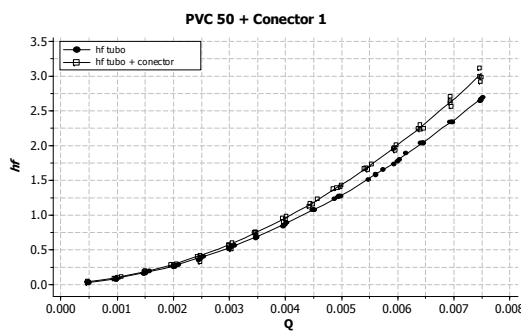
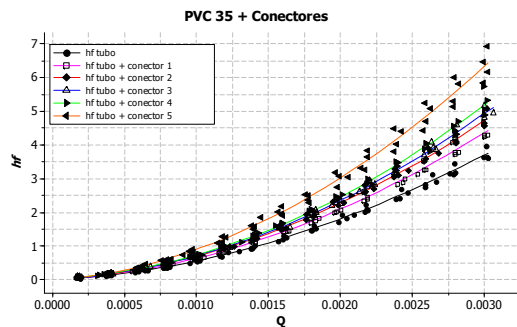
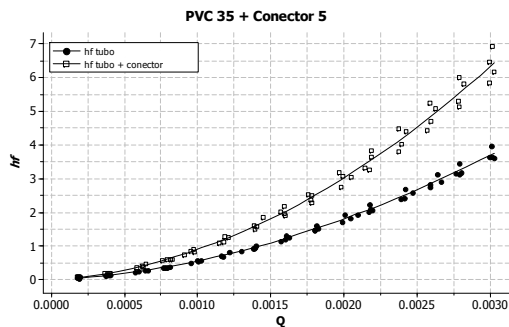
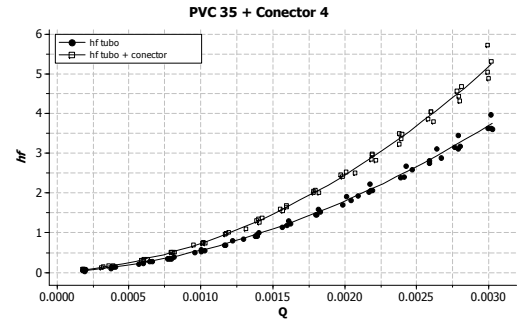
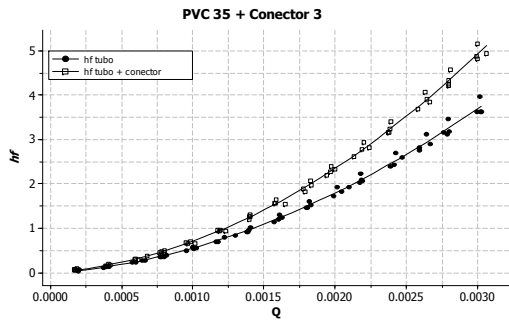
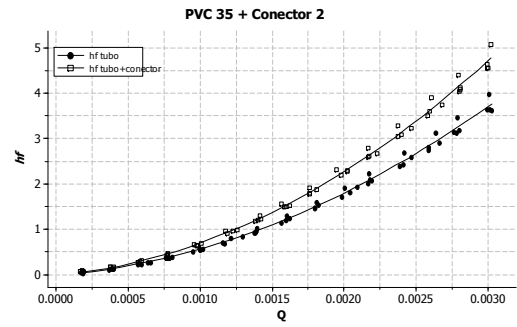
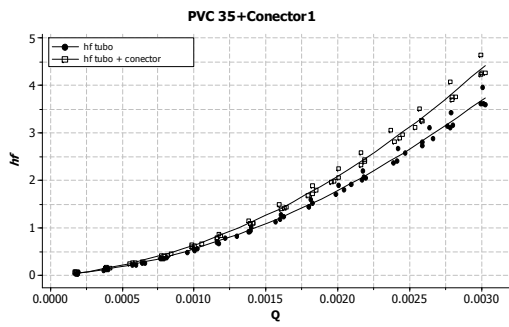
DN	Equação	r^2
35	$hf_T = 98780,6526 \cdot Q^{1,75533901}$	0,9959
50	$hf_T = 29089,1936 \cdot Q^{1,7806301}$	0,9998
75	$hf_T = 4543,9903 \cdot Q^{1,8113782}$	0,9979

Os expoentes estão dentro do intervalo descrito por Streeter e Wylie (1982) e Caixeta (1991), que é de 1,7 a 2,0 da velocidade média e 1,75 para a equação de Darcy-Weisbach com f calculado pela equação de Blasius.

4.1.2 Perda localizada de carga

Os gráficos (Figura 13) apresentam a perda distribuída de carga na tubulação de PVC e a perda de carga causada pela inserção dos conectores sobre esta mesma tubulação, sendo hf a perda de carga, em m e Q , a vazão, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. A diferença entre os dois gráficos é a perda localizada de carga causada pelos conectores.

Seria esperado que um dado conjunto conector-anel de vedação, ao ser inserido em uma tubulação de menor diâmetro, sofresse variação em sua área de protrusão, devido à maior deformação do anel de vedação. Esta hipótese foi negada pelo Teste de Tukey a 0,01% de probabilidade, o qual verificou não haver variação na área da protrusão com a mudança no diâmetro da tubulação na qual o conector é inserido.



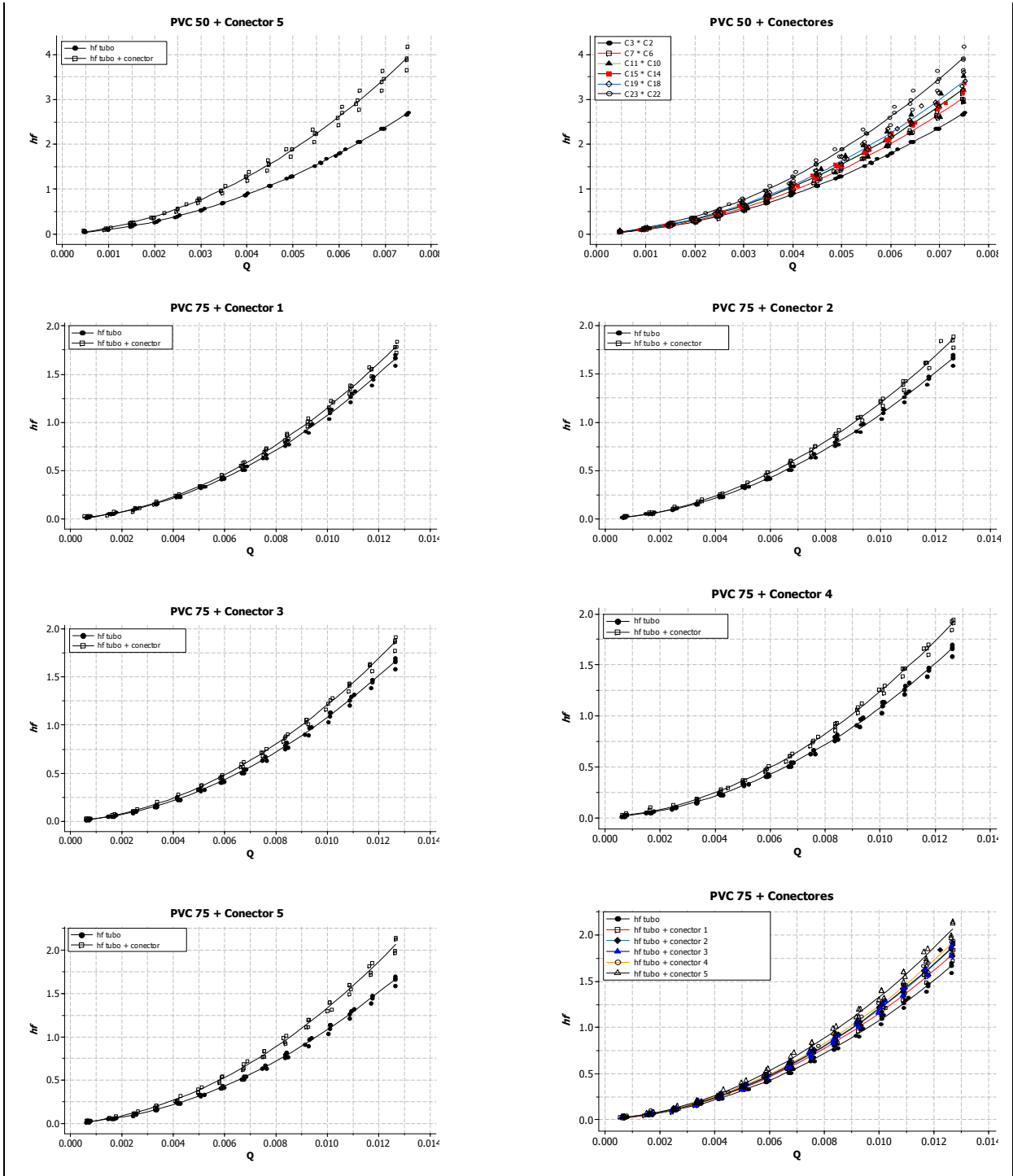


Figura 13 – Perda de carga na passagem direta

A Tabela 14 apresenta as equações da perda de carga no tubo mais o conjunto conector-anel de vedação:

Tabela 14 - Equações de perda de carga (m) nos tubos de PVC mais conectores em função da vazão ($m^3 s^{-1}$)

Conector	PVC	Equação	r^2
1	35	$hf_{T+C} = 136071,4155 \cdot Q^{1,7820248}$	0,9951
1	50	$hf_{T+C} = 42145,8428 \cdot Q^{1,8280781}$	0,9986
1	75	$hf_{T+C} = 4769,2229 \cdot Q^{1,8064866}$	0,9983
2	35	$hf_{T+C} = 141049,7721 \cdot Q^{1,7750716}$	0,9961
2	50	$hf_{T+C} = 36858,7026 \cdot Q^{1,790665}$	0,9904
2	75	$hf_{T+C} = 5299,2173 \cdot Q^{1,8214691}$	0,9976
3	35	$hf_{T+C} = 168306,3383 \cdot Q^{1,7975805}$	0,9975
3	50	$hf_{T+C} = 36820,3938 \cdot Q^{1,7903961}$	0,9986
3	75	$hf_{T+C} = 5106,8797 \cdot Q^{1,812093}$	0,9982
4	35	$hf_{T+C} = 193250,5167 \cdot Q^{1,8128417}$	0,9952
4	50	$hf_{T+C} = 41035,5693 \cdot Q^{1,7973114}$	0,9960
4	75	$hf_{T+C} = 5140,861 \cdot Q^{1,8080921}$	0,9983
5	35	$hf_{T+C} = 226719,2662 \cdot Q^{1,8056221}$	0,9907
5	50	$hf_{T+C} = 46500,0653 \cdot Q^{1,7977259}$	0,9941
5	75	$hf_{T+C} = 5801,5069 \cdot Q^{1,8185942}$	0,9966

A equação da perda localizada de carga (Tabela 15) para cada conector em cada tubo foi obtida por diferença (eq. 18), por este motivo o coeficiente de ajuste é igual a 1.

Tabela 15 - Equações de perda localizada de carga (m) no conector para a passagem direta em função da vazão ($m^3 s^{-1}$)

Conector	PVC	Equação
1	35	$hf_{Cd} = 3479,2774 \cdot Q^{1,9405641}$
1	50	$hf_{Cd} = 3033,4891 \cdot Q^{2,2547782}$
1	75	$hf_{Cd} = 16,1566 \cdot Q^{1,7409896}$
2	35	$hf_{Cd} = 1637,0475 \cdot Q^{1,7729145}$
2	50	$hf_{Cd} = 539,3602 \cdot Q^{1,8414684}$
2	75	$hf_{Cd} = 54,5759 \cdot Q^{1,9117012}$
3	35	$hf_{Cd} = 3470,376 \cdot Q^{1,8823027}$
3	50	$hf_{Cd} = 535,5483 \cdot Q^{1,8396972}$
3	75	$hf_{Cd} = 37,629 \cdot Q^{1,8180313}$
4	35	$hf_{Cd} = 6421,9832 \cdot Q^{1,9306643}$
4	50	$hf_{Cd} = 780,7502 \cdot Q^{1,8632364}$
4	75	$hf_{Cd} = 40,1505 \cdot Q^{1,7861207}$
5	35	$hf_{Cd} = 7793,6826 \cdot Q^{1,8545492}$
5	50	$hf_{Cd} = 1193,6813 \cdot Q^{1,8355558}$
5	75	$hf_{Cd} = 84,9323 \cdot Q^{1,8494402}$

Os valores dos expoentes estão dentro do intervalo descrito por Melo, Silva e Faria (2000), que é de 1,63 a 2,26 da velocidade média, para a passagem direta em linhas de derivação.

Os gráficos (Figura 14) apresentam a perda localizada de carga nos conectores para a passagem direta em cada um dos tubos de PVC utilizados.

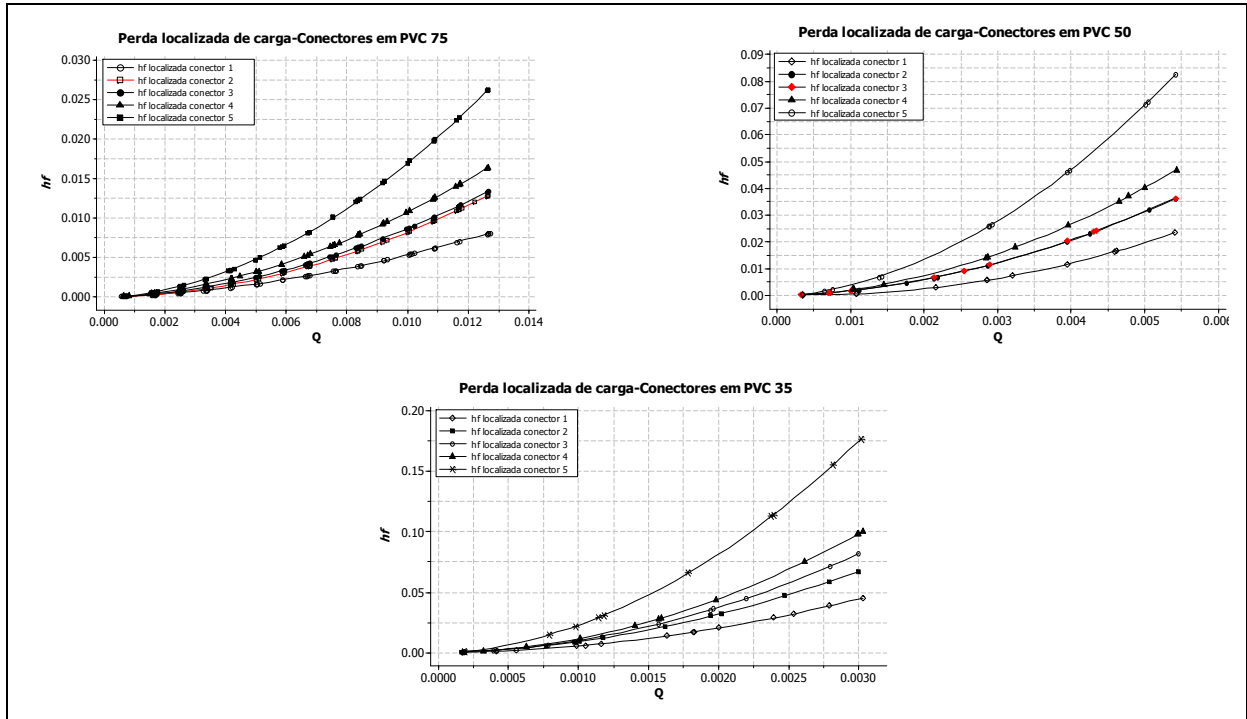


Figura 14 - Perda localizada de carga em conectores na passagem direta

Fica evidente a variação da perda localizada de carga entre os conectores e destes com a variação do diâmetro da tubulação. A perda localizada de carga é proporcional à uma potência da área da protrusão e inversamente proporcional a uma potência do diâmetro interno do tubo de PVC. Al-Amound (1995), encontrou a mesma relação trabalhando com gotejadores “*on line*” em tubos de polietileno de cinco diâmetros diferentes.

De acordo com a Figura 14, podemos inferir que a perda localizada de carga para os conectores 2 e 3, inseridos nos tubos de DN 75 e DN 50, são iguais. Para verificar esta hipótese, foi utilizado o Teste de Tukey a 1% de probabilidade, sendo constatado não haver diferença significativa entre a área da protrusão destes conectores inseridos nas tubulações mencionadas. Uma vez comprovado não haver diferença entre a área da protrusão e sabendo que esta é a única variável em questão, pode-se afirmar que os conectores 2 e 3 possuem a mesma perda localizada de carga para a passagem direta, para os tubos de DN 75 e DN 50.

4.1.3 Aplicação da análise dimensional para a passagem direta

Os grupos adimensionais foram transformados com aplicação de função logarítmica e levados ao *software* SAS[®] para ajuste de uma regressão linear múltipla, utilizando o procedimento *stepwise*. O resultado da regressão é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultado da regressão linear múltipla para a perda localizada de carga na passagem direta

Termos Pi	Expoente	Desvio padrão	teste F	Pr>F
Constante	-5,55098	0,0486	13582,7	<,0001
$\frac{A_p}{D_T^2}$	1,10881	0,01807	3923,95	<,0001
$\frac{g \cdot D_T^3}{\nu}$	-1,0357	0,01536	4467,77	<,0001
$\frac{D_T \cdot V_T}{\nu}$	1,89682	0,00959	40062,2	<,0001
$\frac{S}{D_T}$	-	-	-	-

A equação geral para a perda localizada de carga para conectores na passagem direta apresentou um coeficiente de ajuste (R^2) = 97,27% e pode ser assim representada (eq. 29):

$$\left(\frac{hf_D}{D_T}\right)^{-5,55098} = \left(\frac{A_p}{D_T^2}\right)^{1,10881} \cdot \left(\frac{g \cdot D_T^3}{\nu}\right)^{-1,0357} \cdot \left(\frac{D_T \cdot V_T}{\nu}\right)^{1,89682} \quad (29)$$

Com a simplificação da equação (29) e utilizando-se aceleração da gravidade igual a 9,81 m.s² temos (eq. 30):

$$hf_D = 2,67 \times 10^{-7} \cdot V_T^{1,9} \cdot D_T^{-2,43} \cdot A_p^{1,11} \cdot \nu^{-0,86} \quad (30)$$

sendo hf_D a perda localizada de carga no conector na passagem direta, em m; V_T a velocidade de escoamento da água no tubo de PVC, em m s⁻¹; D_T o diâmetro interno do tubo de PVC, em m; A_p a área da protrusão, em m² e ν a viscosidade cinemática da água, em m² s⁻¹.

A equação proposta é válida para conectores iniciais dentro dos seguintes limites:

$$0,1330 \leq V_T \leq 3,0 \text{ m s}^{-1}$$

$$0,035716 \leq D_T \leq 0,072054 \text{ m}$$

$$0,000103 \leq A_p \leq 0,000355 \text{ m}^2$$

sendo V_T a velocidade de escoamento na tubulação de PVC, em m.s^{-1} , D_T o diâmetro interno da tubulação, em m e A_p a área da protrusão do conector, em m^2 .

Segundo análise realizada com o *software* SAS[®], o espaçamento entre conectores não exerce influência sobre a perda localizada de carga para a passagem direta. Os ensaios foram realizados com espaçamento fixo de 1 m entre conectores e por isso pode não ter sido possível avaliar sua influência sobre a perda de carga. Juana, Rodrigues-Sinobas e Losada, (2002b) trabalhando com emissores em tubulações de polietileno, não encontraram efeito do espaçamento entre estes emissores sobre a perda localizada de carga, o que seria esperado segundo Demir, Yurdem e Degirmencioglu (2007).

A perda localizada de carga para a passagem lateral é proporcional a aproximadamente $Re^{1,9}$. Bagarello et al. (1995) estudando perda de carga em emissores *on-line* em tubulações de polietileno, encontraram K_L independente de Re , sugerindo que a perda localizada de carga neste tipo de conexão seja independente do Número de Reynolds quando este for superior a 10.000.

O índice “c” de Camargo para cada conjunto de dados é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Índice “c” de Camargo para a equação ajustada para a perda localizada de carga na passagem direta

PVC	Conector	r	d	C
35	1	1,0000	0,9999	0,9999
35	2	1,0000	0,9999	0,9999
35	3	1,0000	0,9889	0,9889
35	4	0,9999	0,9985	0,9984
35	5	1,0000	0,9997	0,9996
50	1	0,9983	0,9988	0,9971
50	2	0,9999	0,9964	0,9963
50	3	0,9999	0,9995	0,9995
50	4	0,9916	0,9988	0,9905
50	5	0,9999	0,9998	0,9997
75	1	0,9995	0,9999	0,9994
75	2	1,0000	0,9997	0,9997
75	3	0,9999	0,9999	0,9998
75	4	0,9997	0,9993	0,9990
75	5	1,0000	0,9870	0,9870
Conjunto		0,9978	0,9979	0,9957

A Figura 15 apresenta a comparação entre a perda de carga observada e aquela calculada pela equação proposta. Pode se verificar a boa aderência dos dados e uma ligeira subestimação para valores mais elevados de vazão. A comparação apresentada é proveniente de dados reais, ou seja, a equação foi obtida de uma serie de dados diferente daquela com a qual foi comparada.

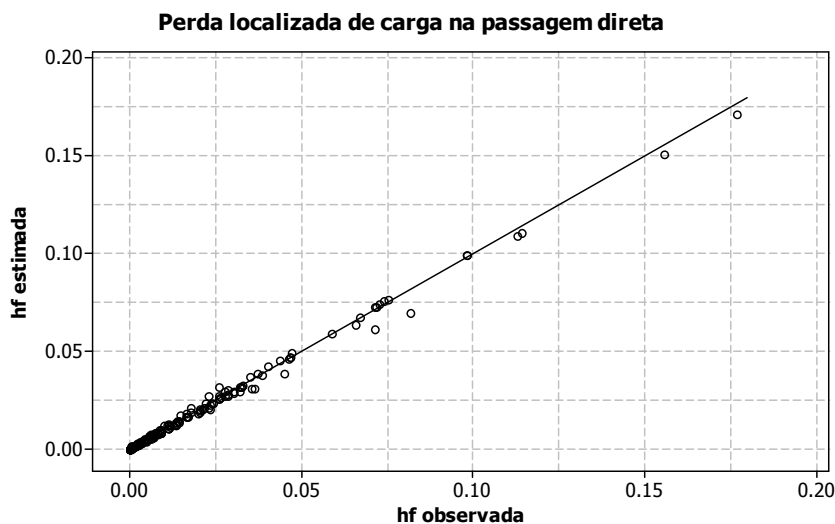


Figura 15 - Comparação entre a perda localizada de carga estimada e observada, para a passagem direta

4.2 Perda de carga na passagem lateral

4.2.1 Perda contínua de carga no tubo

A Tabela 18 apresenta as equações de perda de carga distribuída na tubulação de polietileno.

Tabela 18 - Equações de perda contínua de carga (m) nos tubos de polietileno em função da vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

DN	Equação	r^2
10	$hf_t = 385539639,68 \cdot Q^{1,7688976}$	0,9998
13	$hf_t = 12096091,42 \cdot Q^{1,7509336}$	0,9997
16	$hf_t = 5235531,56 \cdot Q^{1,7543425}$	0,9997
20	$hf_t = 1728106,89 \cdot Q^{1,7800608}$	0,9993
26	$hf_t = 482107,6 \cdot Q^{1,77196}$	0,9990

Novamente os expoentes estão dentro do intervalo descrito por Streeter e Wylie (1980) e Caixeta (1991), que é de 1,7 a 2,0 da velocidade média e 1,75 para a equação de Darcy-Weisbach com f calculado pela equação de Blasius.

4.2.2 Perda localizada de carga

Os gráficos abaixo (Figura 16) apresentam a perda distribuída de carga na tubulação de polietileno e a perda de carga causada pela presença dos conectores nesta mesma tubulação, sendo hf a perda de carga; em m e Q a vazão; em $m^3 s^{-1}$. A diferença entre os dois gráficos é a perda de carga causada pelos conectores.

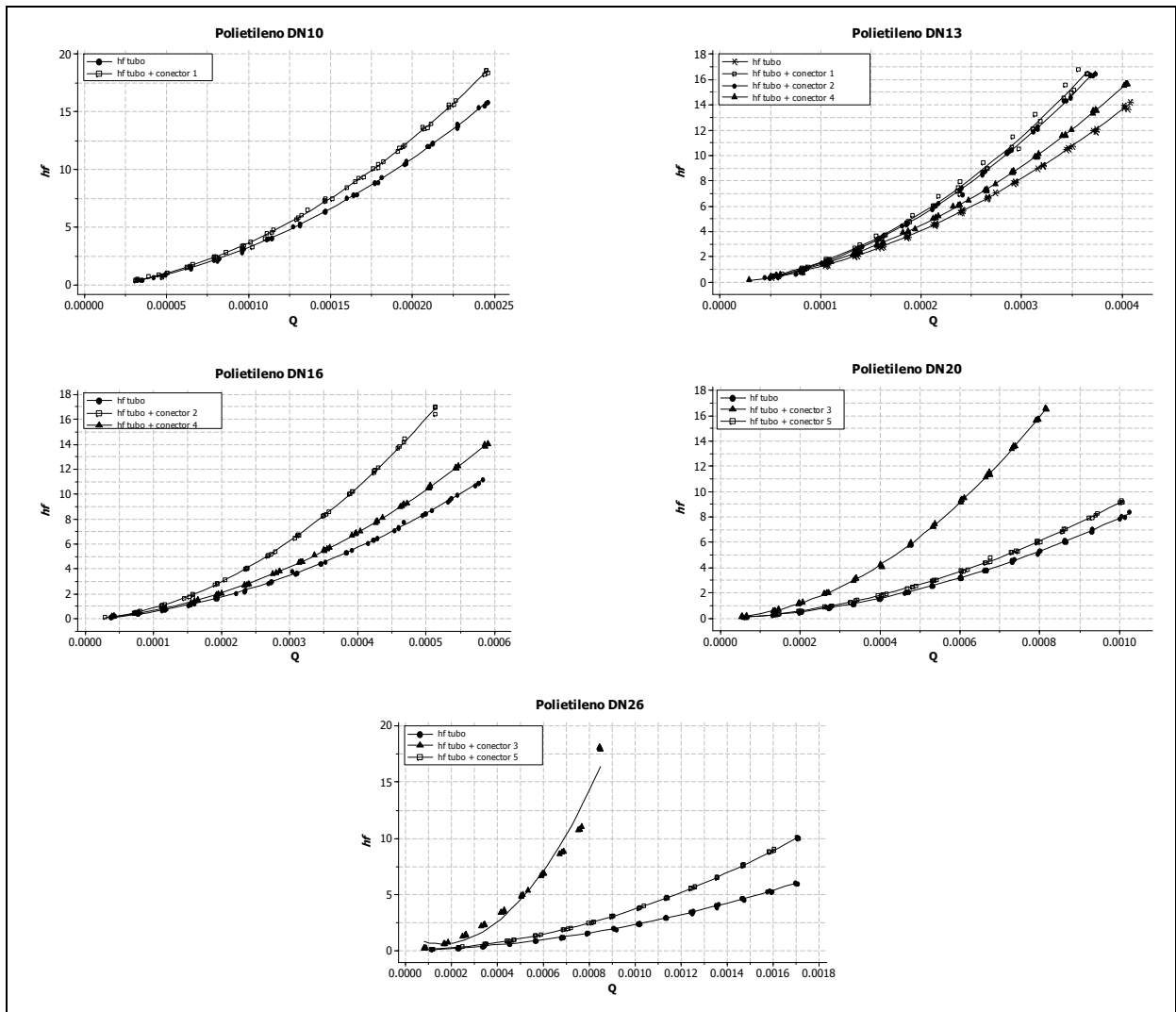


Figura 16 - Perda de carga na passagem lateral

A Tabela 19 apresenta as equações de perda de carga nos conjuntos conector-tubulação de polietileno.

Tabela 19 - Equações de perda de carga (m) no tubo de polietileno mais conector em função da vazão ($m^3 s^{-1}$)

Conector	Polietileno	PVC	Equação	r^2
1	10	35	$hf_{t+c} = 62101929,13 \cdot Q^{1,8068314}$	0,9994
1	13	35	$hf_{t+c} = 38264181,45 \cdot Q^{1,8515104}$	0,9979
1	10	50	$hf_{t+c} = 68181684,06 \cdot Q^{1,8163527}$	0,9995
1	13	50	$hf_{t+c} = 36392065,19 \cdot Q^{1,8431966}$	0,9882
1	10	75	$hf_{t+c} = 71092795,17 \cdot Q^{1,8237708}$	0,9995
1	13	75	$hf_{t+c} = 40695588,96 \cdot Q^{1,8588111}$	0,9963
2	13	35	$hf_{t+c} = 36297671,71 \cdot Q^{1,8500891}$	0,9992
2	16	35	$hf_{t+c} = 24453717,72 \cdot Q^{1,8728631}$	0,9999
2	13	50	$hf_{t+c} = 33096725,33 \cdot Q^{1,837758}$	0,9995
2	16	50	$hf_{t+c} = 23950220,74 \cdot Q^{1,869123}$	0,9999
2	13	75	$hf_{t+c} = 36324548,7 \cdot Q^{1,8493835}$	0,9993
2	16	75	$hf_{t+c} = 21260174,58 \cdot Q^{1,8547087}$	0,9997
3	20	35	$hf_{t+c} = 14803404,43 \cdot Q^{1,9230137}$	0,9998
3	26	35	$hf_{t+c} = 663819658 \cdot Q^{2,4708187}$	0,9786
3	20	50	$hf_{t+c} = 13649772,74 \cdot Q^{1,9167012}$	0,9995
3	26	50	$hf_{t+c} = 11583,834 \cdot Q^{2,4847235}$	0,9768
3	20	75	$hf_{t+c} = 15232202,3 \cdot Q^{1,930873}$	0,9998
3	26	75	$hf_{t+c} = 1267746563 \cdot Q^{2,5645859}$	0,9736
4	13	35	$hf_{t+c} = 17212922,19 \cdot Q^{1,7808192}$	0,9997
4	16	35	$hf_{t+c} = 9802801,122 \cdot Q^{1,8102147}$	0,9996
4	13	50	$hf_{t+c} = 19004308,75 \cdot Q^{1,7934282}$	0,9993
4	16	50	$hf_{t+c} = 9444363,584 \cdot Q^{1,8043592}$	0,9998
4	13	75	$hf_{t+c} = 16967460,87 \cdot Q^{1,7790003}$	0,9997
4	16	75	$hf_{t+c} = 9240321,12 \cdot Q^{1,8024845}$	0,9999
5	20	35	$hf_{t+c} = 2325007,521 \cdot Q^{1,7996706}$	0,9996
5	26	35	$hf_{t+c} = 1417144,971 \cdot Q^{1,8549106}$	0,9994
5	20	50	$hf_{t+c} = 12129123,206 \cdot Q^{1,7893535}$	0,9993
5	26	50	$hf_{t+c} = 1366961,08 \cdot Q^{1,8550046}$	0,9999
5	20	75	$hf_{t+c} = 2027165,98 \cdot Q^{1,7825416}$	0,9996
5	26	75	$hf_{t+c} = 1422387,985 \cdot Q^{1,8611237}$	0,9998

Como descrito para a perda localizada de carga na passagem direta, a obtenção das equações para a perda localizada de carga para a passagem lateral (Tabela 20) foi feita por diferença (eq. 18).

Tabela 20 - Equações de perda localizada de carga (m) no conector para a passagem lateral em função da vazão ($m^3 s^{-1}$)

Conector	Polietileno	PVC	Equação
1	10	35	$hf_{Cl} = 68312685,61 \cdot Q^{2,0467927}$
1	13	35	$hf_{Cl} = 109420092,7 \cdot Q^{2,1357426}$
1	10	50	$hf_{Cl} = 112142546,6 \cdot Q^{2,0952938}$
1	13	50	$hf_{Cl} = 76681394,37 \cdot Q^{2,0892651}$
1	10	75	$hf_{Cl} = 238002875,1 \cdot Q^{2,2012753}$
1	13	75	$hf_{Cl} = 134850797,1 \cdot Q^{2,1605229}$
2	13	35	$hf_{Cl} = 132852079,6 \cdot Q^{2,1785256}$
2	16	35	$hf_{Cl} = 36578813,51 \cdot Q^{2,0239889}$
2	13	50	$hf_{Cl} = 83668338,39 \cdot Q^{2,1177319}$
2	16	50	$hf_{Cl} = 34150617,48 \cdot Q^{2,0128528}$
2	13	75	$hf_{Cl} = 124725341 \cdot Q^{2,1676365}$
2	16	75	$hf_{Cl} = 226568929,1 \cdot Q^{1,9824964}$
3	20	35	$hf_{Cl} = 18638839,62 \cdot Q^{2,009588}$
3	26	35	$hf_{Cl} = 1469993223 \cdot Q^{2,5971775}$
3	20	50	$hf_{Cl} = 1012208,08 \cdot Q^{1,6300699}$
3	26	50	$hf_{Cl} = 1388912222 \cdot Q^{2,5957364}$
3	20	75	$hf_{Cl} = 120092160,58 \cdot Q^{2,0258222}$
3	26	75	$hf_{Cl} = 2685330720 \cdot Q^{2,6861409}$
4	13	35	$hf_{Cl} = 6864022,219 \cdot Q^{1,7484564}$
4	16	35	$hf_{Cl} = 13667132,17 \cdot Q^{2,0773158}$
4	13	50	$hf_{Cl} = 14346926,26 \cdot Q^{1,8173666}$
4	16	50	$hf_{Cl} = 10102090,05 \cdot Q^{2,0323756}$
4	13	75	$hf_{Cl} = 11938212,12 \cdot Q^{1,7939783}$
4	16	75	$hf_{Cl} = 9599920,165 \cdot Q^{2,0310334}$
5	20	35	$hf_{Cl} = 782699,3813 \cdot Q^{1,9176881}$
5	26	35	$hf_{Cl} = 1592391,737 \cdot Q^{1,9969891}$
5	20	50	$hf_{Cl} = 429565,1564 \cdot Q^{1,8480531}$
5	26	50	$hf_{Cl} = 1294075,027 \cdot Q^{1,9895526}$
5	20	75	$hf_{Cl} = 481268,9697 \cdot Q^{1,8654692}$
5	26	75	$hf_{Cl} = 1441295,283 \cdot Q^{2,0061466}$

Os gráficos (Figura 17) apresentam a perda localizada de carga nos conectores para a passagem lateral em cada um dos tubos de polietileno utilizados.

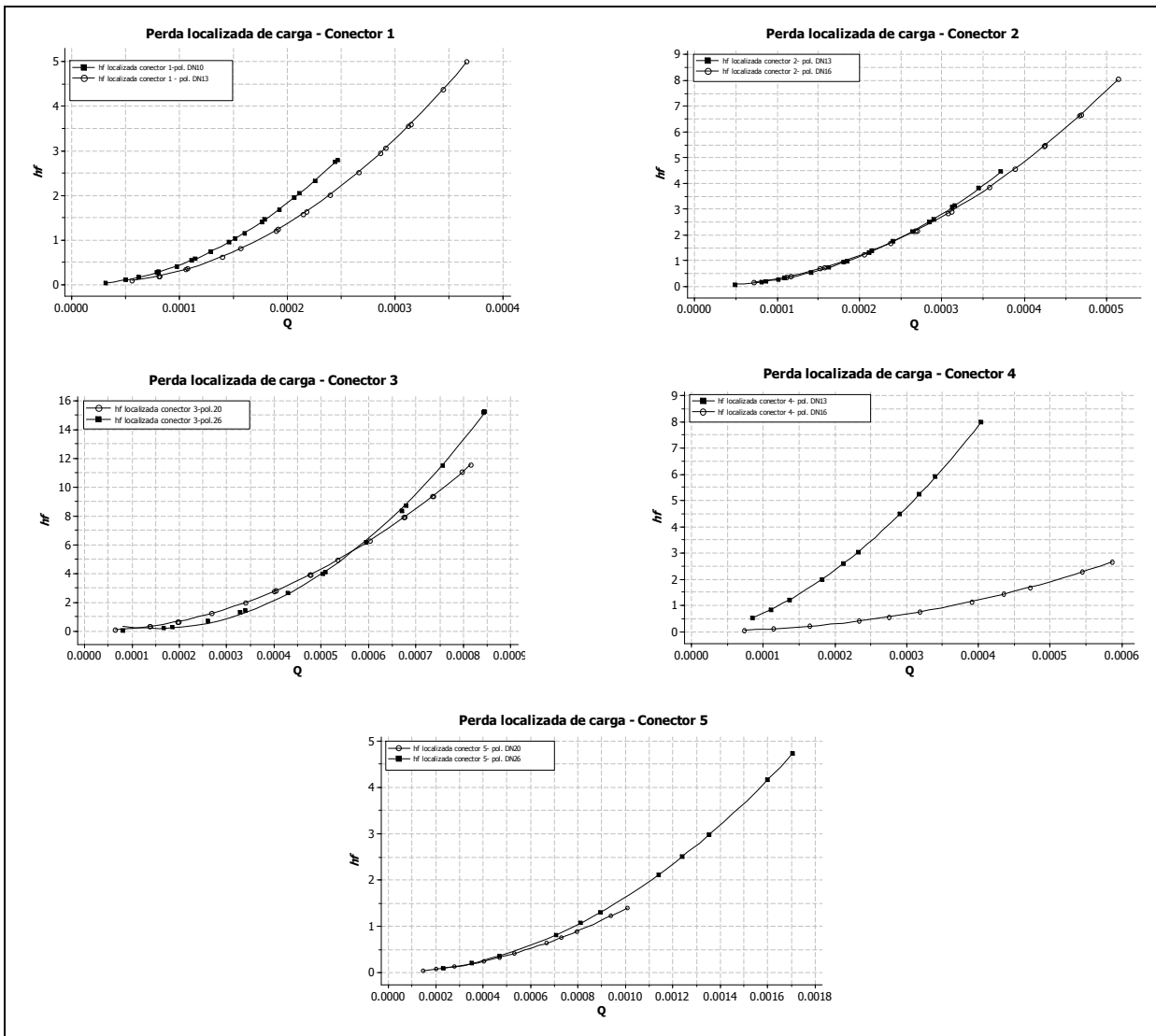


Figura 17 – Perda localizada de carga em conectores na passagem lateral

Como pode ser visto na Figura 17, a perda localizada de carga nos conectores para a passagem lateral tem comportamento diferente para diferentes tubos de polietileno conectados a ele, fato também descrito por Zitterell (2011).

4.2.3 Aplicação da análise dimensional para a passagem lateral

Foi seguido o mesmo procedimento de regressão linear múltipla descrito para a perda de carga na passagem direta e os dados para a perda de carga na passagem lateral são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resultado da regressão linear múltipla para a perda de carga localizada na passagem lateral

Termos Pi	Expoente	Desvio padrão	teste F	Pr > F
Constante	-3,99028	0,22243	321,84	<,0001
$\frac{D_s \cdot V_e}{\nu}$	0,10576	0,02326	20,67	<,0001
$\frac{L_c \cdot V_e}{\nu}$	1,05693	0,07054	224,52	<,0001
$\frac{V_t}{V_e}$	0,3855	0,01674	530,31	<,0001
$\frac{\nu \cdot g}{V_e^3}$	-0,66293	0,02463	724,64	<,0001
$\frac{D_T \cdot V_e}{\nu}$	-	-	-	-
$\frac{D_t \cdot V_e}{\nu}$	-	-	-	-
$\frac{D_e \cdot V_e}{\nu}$	-	-	-	-
$\frac{V_s}{V_e}$	-	-	-	-

A equação geral para a perda localizada de carga para conectores na passagem lateral apresentou um coeficiente de ajuste (R^2) = 96,26% e pode ser assim representada (eq. 31):

$$\left(\frac{hf_L \cdot V_e}{\nu}\right)^{-3,99028} = \left(\frac{D_s \cdot V_e}{\nu}\right)^{0,10576} \cdot \left(\frac{L_c \cdot V_e}{\nu}\right)^{1,05693} \cdot \left(\frac{V_t}{V_e}\right)^{0,3855} \cdot \left(\frac{\nu \cdot g}{V_e^3}\right)^{-0,66293} \quad (31)$$

Com a simplificação da equação (31) e utilizando-se aceleração da gravidade igual a 9,81 m.s² temos (eq. 32):

$$hf_L = 2,25 \times 10^{-5} \cdot D_s^{0,11} \cdot L_c^{1,06} \cdot V_e^{1,77} \cdot V_t^{0,39} \cdot \nu^{-0,83} \quad (32)$$

sendo hf_L a perda localizada de carga no conector na passagem lateral, em m; D_s o diâmetro de saída do conector, em m; L_c o comprimento do conector, em m; V_e a velocidade de escoamento da água na entrada do conector, em m s⁻¹; V_t a velocidade de escoamento da água na entrada do tubo de polietileno, em m s⁻¹ e ν a viscosidade cinemática da água, em m² s⁻¹.

A equação proposta é válida para o cálculo da perda localizada de carga em conectores iniciais dentro dos seguintes limites:

$$0,007765 \leq D_s \leq 0,016741\text{m}$$

$$0,049546 \leq L_c \leq 0,06644 \text{ m}$$

$$0,267 \leq V_e \leq 14,378 \text{ m.s}^{-1}$$

$$0,1317 \leq V_t \leq 3,00 \text{ m s}^{-1}$$

sendo D_s o diâmetro de saída do conector, em mm; L_c o comprimento do conector, em mm; V_e a velocidade na entrada do conector, em m s^{-1} e V_t a velocidade na entrada da tubulação de polietileno, em m s^{-1} .

Como esperado, a perda localizada de carga na passagem lateral independe do diâmetro do tubo de PVC no qual o conector está inserido. A tubulação onde os conectores são inseridos pode ser vista como um reservatório, e por isso não interfere na perda localizada de carga.

Segundo análise realizada com o uso do SAS[®], a perda localizada de carga independe da velocidade da água na saída do conector, mas depende de seu diâmetro interno de saída. Os diâmetros interno de saída e de entrada do conector, estão relacionados à velocidade de escoamento em cada uma destas seções, uma vez que a velocidade é uma relação entre a área da seção transversal de escoamento e a vazão escoada.

A perda localizada de carga é diretamente proporcional ao comprimento do conector, fato também observado por Zitterell (2010) em pesquisa com conectores utilizados na microirrigação.

O índice “c” de Camargo para cada conjunto de dados é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Índice “c” de Camargo para a equação ajustada para a perda localizada de carga na passagem lateral

Conector	Polietileno (DN)	r	d	C
1	10	0,9951	0,9943	0,9895
1	13	0,9990	0,9996	0,9986
2	13	0,9997	0,9999	0,9996
2	16	0,9995	0,9990	0,9984
3	20	0,9989	0,9987	0,9976
3	26	0,9968	0,9744	0,9713
4	13	0,9995	0,9994	0,9990
4	16	0,9993	0,9746	0,9739
5	20	0,9948	0,9827	0,9776
5	26	0,9972	0,9987	0,9959
Conjunto		0,9815	0,9890	0,9707

A Figura 18 apresenta a comparação entre os valores de perda de carga observados e aqueles calculados pela equação proposta. Nota-se uma boa aderência dos dados e assim como para a passagem direta, a equação proposta subestima ligeiramente a perda de carga em valores mais elevados de vazão. A comparação apresentada é proveniente de dados reais, ou seja, a equação foi obtida de uma serie de dados diferente daquela com a qual foi comparada.

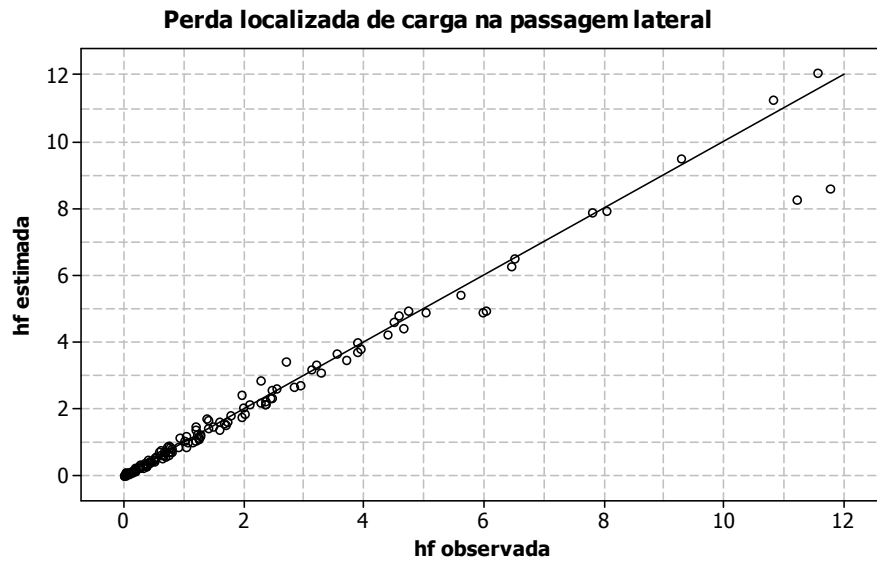


Figura 18 - Comparação entre a perda de carga estimada e observada, para a passagem lateral

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram ajustadas equações que permitem o cálculo da perda localizada de carga para as passagens direta e lateral em conectores iniciais de linha, com o auxílio da análise dimensional.

Para a passagem direta a perda localizada de carga é diretamente proporcional a uma potência da velocidade de escoamento da água e da área da protrusão do conector e inversamente proporcional a uma potência do diâmetro interno da tubulação.

Para a passagem lateral a perda localizada de carga é diretamente proporcional a uma potência do diâmetro de saída e comprimento do conector, da velocidade de escoamento na entrada do conector e do tubo de polietileno.

As equações propostas apresentam uma boa margem de confiança, acima de 95%. Desde que respeitados os limites utilizados neste trabalho, podem ser utilizadas para o cálculo da perda localizada de carga em conectores iniciais de linha.

REFERÊNCIAS

- AL-AMOUND, A.I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 60, n. 1, p. 1-5, 1995.
- ANDRADE, L.; CARVALHO, J.A. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 554-557, 2001.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G.A. **Manual de hidráulica**. 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1991. 335 p.
- BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow resistance Law for small-diameter plastics types. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, 1995.
- _____. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 1, p. 1-7, 1997.
- BERNUTH, R.D. von. Discussion of “Hydraulic friction factors for pipe flow”. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 115, n. 5, p. 916-918, 1988.
- CAIXETA, A.V. **Perda de carga em tubos e conexões de PVC utilizados em sistemas portáteis de irrigação por aspersão**. 1991. 115 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, A.J.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, 2008.
- DEMIR, V.; YURDEM, H.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integraed in-line and ond-line emitters using dimensional analysis. **Biosystems Engineering**, Silsoe, v. 96, n. 4, p. 617-631, 2007.
- DURAN-ROS, M.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F.; PUIG-BARGUÉS, J. Assessment of head loss equation developed with dimensional analysis for micro irrigation filters using effluents. **Biosystems Engineering**, Silsoe, v. 106, n. 4 p. 521-526, 2010.
- FRIZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, 1998.
- GILES, R.V. **Mecânica dos fluidos e hidráulica**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill do Brasil, 1970. 401 p.

GOMES, A.W.A. **Perda de carga em gotejadores integrados em tubos de polietileno.**

2009. 62 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

JUANA, L.; RODRIGUES-SINOBAS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 6, p. 376-384, 2002a.

_____. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. II: Experimental study and validation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 6, p. 385-396, 2002b.

KAMAND, F. Hydraulic factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 114, n. 2, p. 311-323, 1988.

MELO, L.J.V.; SILVA, E.L.; FARIA, M.A. Perda de carga em conectores utilizados em sistemas de irrigação localizada. **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 24, p. 205-214, dez. 2000. Edição especial.

PALAU-SALVADOR, G.; SANCHIS, L.H.; GONZÁLES-ALTOZANO, P.; ARVIZAVALVERDE, J. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 132, n. 6, p. 522-530, 2006.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica.** São Carlos: USP, EESC, 1998. 540 p.

PROVENZANO, G.; PUMO D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 4, p. 318-324, 2004.

PROVENZANO, G.; PUMO D.; DI DIO, P. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation lateral. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 6, p. 525-532, 2005.

RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 28-39, 2009.

REDDY, K.Y. Evaluation of on-line trickle irrigation emitter barb losses. **The Journal of the Institution of Engineers**, London, v. 84, p. 42-46, 2002.

ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 369-374, 2002.

SERGHIDES, T.K. Estimate friction factor accurately. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 91, n. 5, p. 63-64, 1984.

SONNAD, J.R.; GOUDAR, C.T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. **Journal of the Hydraulics Division ASCE**, New York, v. 132, n. 8, p. 863-867, 2006.

STREETER, V.L.; WYLIE, E.B. **Mecânica dos fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1980. 585 p.

SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe-flow problems. **Journal of the Hydraulics Division ASCE**, New York, v. 102, n. 5, p. 627-664, 1976.

VERNNARD, J.; STREET, R. **Elementos de mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 687 p.

VILELA, L.A.A.; SOCCOL, O.J.; GERVASIO, E.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Alteração no diâmetro e na perda de carga em tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 182-185, 2003.

von BERNUTH, R.D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 116, n. 2, p. 294-298, 1990.

YILDIRIM, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 56, n. 4, p. 399-421, 2007.

YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. **Journal of the Hydraulics Division ASCE**, New York, v. 131, n. 8, p. 694-704, 2005.

ZITTERELL, D.B.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O. Perda de carga em microtubos e conectores utilizados em microaspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 591-604, out./dez. 2009.