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

Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores

Acácio Perboni

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

**Piracicaba
2012**

Acácio Perboni
Engenheiro Agrônomo

Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTONIO 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**

Perboni, Acácio

Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores / Acácio Perboni. - -
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba,
2012.

72 p. : il.

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

1. Análise dimensional 2. Irrigação por gotejamento 3. Modelos matemáticos
4. Perda de carga 5. Regressão linear 6. Tubos I. Título

CDD 631.7
P427m

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

AGRADECIMENTOS

A ESALQ/USP pelo ótimo curso de pós-graduação.

A CAPES pela bolsa de estudos.

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 financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

Ao PROJETO FAPESP número 2003/12863-1: Distúrbios de vazão em gotejadores na irrigação localizada no Estado de São Paulo.

Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzzone, pela orientação.

Ao Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, por permitir utilização da bancada experimental e de tubos emissores.

A NaanDanJain pelo doação de tubos emissores.

Aos Professores Dr. Olívio José Soccol e Mario Nestor Ullmann.

A todos os professores e funcionários do departamento de Engenharia de Biosistemas, pela formação, auxílios e dicas.

A todos os colegas de pós-graduação pelo convívio e bons momentos que passamos juntos.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Irrigação localizada no Brasil	19
2.2 Irrigação localizada.....	19
2.3 Irrigação por gotejamento.....	19
2.4 Termos e definições normatizados para tubos emissores.....	20
2.4.1 Segundo a norma ABNT NBR ISO 9261 de 2006.....	20
2.4.1.1 Emissor	20
2.4.1.2 Tubo emissor	20
2.4.1.3 Emissor/tubo emissor regulado.....	20
2.4.1.4 Emissor/tubo emissor não regulado.....	20
2.4.1.5 Pressão nominal de ensaio (p_n).....	21
2.4.1.6 Expoente de emissor/unidade emissora (m)	21
2.4.1.7 Uniformidade de vazão.....	21
2.4.1.8 Determinação do expoente de unidade de emissor/tubo emissor	21
2.4.2 Segundo a norma ABNT NBR 11795 de 2005	22
2.4.2.1 Diâmetro nominal (DN)	22
2.4.2.2 Diâmetro interno médio (d_{im})	23
2.4.2.3 Pressão nominal (PN)	23
2.4.2.4 Pressão de serviço (PS)	23
2.5 Perda de carga total.....	23

2.6 Perda contínua de carga	24
2.7 Perda contínua de carga em tubos elásticos	27
2.8 Perda localizada de carga	27
2.9 Perda de carga em tubos emissores	29
2.10 Análise Dimensional	29
2.11 Regressão linear múltipla	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores, usando regressão linear múltipla	33
3.2 Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores, usando análise dimensional	34
3.3 Validação do modelo	36
3.4 Instalações e equipamentos	37
3.5 Avaliação dos tubos emissores	38
3.6 Determinação da perda de carga no tubo com emissores (hf_{te})	39
3.7 Determinação da perda de carga no tubo (hf_t)	41
3.8 Determinação da perda de carga nos emissores (hf_e)	41
3.9 Características geométricas dos emissores	42
3.10 Determinação do modulo de elasticidade dos tubos	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Avaliações dos tubos emissores	45
4.1.1 Coeficientes característicos dos emissores	45
4.1.2 Variação do coeficiente de variação de vazão (CV_q) com a variação da pressão	45
4.1.3 Variação da vazão com a variação da pressão	47
4.2 Características geométricas dos tubos	49
4.3 Características geométricas dos emissores	50
4.4 Perda de carga unitária	51
4.5 Obtenção do modelo usando regressão linear múltipla	53

4.5.1 Validação do modelo	55
4.6 Obtenção do modelo usando Análise Dimensional	56
4.6.1 Hipóteses básicas da análise de regressão linear	59
4.6.2 Validação do modelo	61
4.7 Determinação da perda de carga utilizando os modelos propostos	61
4.8 Utilização dos modelos propostos no dimensionamento de linhas laterais	63
5 CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	69

RESUMO

Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores

A uniformidade de emissão ao longo de uma linha lateral de irrigação localizada em nível, está relacionada com a variação de pressão, ocasionada pela perda de carga durante o escoamento da água no tubo emissor e pela saída de água pelos emissores ao longo da linha lateral. Para calcular o comprimento máximo das linhas laterais, é necessário determinar de forma precisa essa variação de pressão para atender um critério pré-estabelecido de variação de vazão. O objetivo desse trabalho foi desenvolver metodologia para o cálculo da perda de carga em linhas laterais de gotejamento com emissores do tipo “bóbi”, para tal foram desenvolvidos dois modelos, um usando regressão linear múltipla e outro usando análise dimensional. Ambos tiveram como base equações de perdas de carga contínua no tubo e localizadas nos emissores disponíveis na literatura. As variáveis dessas equações ficaram definidas como variáveis de entrada para os modelos e foram determinadas em laboratório, usando 12 modelos de tubos emissores, com diferentes diâmetros, espaçamentos entre emissores e seções transversais médias dos emissores. Os dois modelos apresentaram ótimo ajuste aos dados observados, com coeficiente de determinação ajustado de 0,977 e 0,99 para os modelos obtidos a partir de regressão linear múltipla e a partir de análise dimensional, respectivamente. O modelo obtido a partir de análise dimensional considera a variação de diâmetro que o tubo sofre com a pressão da água. Ambos os modelos são de fácil uso.

Palavras-chave: Tubo emissor; Perda de carga; Regressão Linear Múltipla; Análise dimensional

ABSTRACT

Model for determining head losses in driplines

The uniformity of emission along a lateral line of drip irrigation, is related of the pressure variation caused by head losses during the flow in dripline and the water outlet by emitters along the lateral line. To calculate the maximum length of lateral lines, we need to accurately determine the variation of pressure to meet a pre-established criterion of flow variation. The objective of this work was to develop methodology for calculating the head loss in driplines with emitters type "bóbi". For this we developed two models, one using multiple linear regression and one using dimensional analysis. Both were based on equations of continuous head losses in the tube and located in the emitters available in the literature. The equations of these variables were defined as input variables for the models and were determined in the laboratory, using 12 models driplines with different diameters, spacing between emitters and emitters of medium cross sections. Both models showed good fit to the data observados with a determination coefficient of 0.977 for the model obtained from multiple linear regression and to 0.99 obtained from dimensional analysis. The model obtained from the dimensional analysis considers the change in diameter than the tube suffers the water pressure. Both models are easy to use.

Keywords: Dripline; Head losses; Multiple linear regression; Dimensional analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista do perfil de emissor não regulado integrado em tubo de polietileno	28
Figura 2 - Espaçamento entre emissores	29
Figura 3 - Croqui dos equipamentos utilizados no experimento	38
Figura 4 - Vedação dos emissores com massa epóxi e tira de borracha.....	39
Figura 5 - A: Perfuração dos tubos com haste aquecida; B: tubo perfurado; C: montagem da tomada de pressão sobre o furo utilizando arame como guia para o segmento de tubo de silicone; D: tomada de pressão conectada ao medidor diferencial de mercúrio	40
Figura 6 - Projetor óptico de perfil	41
Figura 7 - Emissores em corte	43
Figura 8 - Ensaio de tração	43
Figura 9 - Relação CVq versus pressão	47
Figura 10 - Relação vazão versus pressão	49
Figura 11 - Perda de carga unitária (J)	52
Figura 12 - hf_{se} estimada versus hf_{se} observada.....	55
Figura 13 - hf_{se} estimada versus hf_{se} observada.....	58
Figura 14 - Resíduos padronizados versus valor previsto	59
Figura 15 - Análise de “outliers”. LIA (limite inferior aceitável); LSA (limite superior aceitável).....	60
Figura 16 - Resíduos versus valor previsto	61
Figura 17 - Comparação da perda de carga observada com a calculada pelos modelos	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz dimensional.....	34
Tabela 2 – Termos adimensionais	35
Tabela 3 - Critério para interpretação do desempenho pelo índice c	37
Tabela 4 - Coeficientes de vazão dos emissores.....	45
Tabela 5 - Características geométricas dos tubos.....	49
Tabela 6 - Módulo de elasticidade dos tubos	50
Tabela 7 - Características geométricas dos emissores.....	50
Tabela 8 - Equações de perda de carga no tubo com emissores e no tubo.....	53
Tabela 9 - Análise estatística da regressão linear múltipla.....	54
Tabela 10 - Resultados da regressão linear múltipla	54
Tabela 11 - Matriz de correlação dos termos π_i	56
Tabela 12 - Análise estatística da regressão	57
Tabela 13 - Resultados da regressão múltipla utilizada para obter os expoentes dos termos π 's	57
Tabela 14 - Cálculo do comprimento máximo desconsiderando as perdas localizadas de carga	64
Tabela 15 - Cálculo do comprimento máximo usando o modelo de regressão linear múltipla.....	65
Tabela 16 - Cálculo do comprimento máximo usando o modelo de análise dimensional	65
Tabela 17 - Comprimento máximo da linha lateral em nível	66

1 INTRODUÇÃO

A uniformidade de emissão ao longo de uma linha lateral de irrigação localizada em nível está relacionada com a variação de pressão, ocasionada pela perda de carga durante o escoamento da água no tubo emissor e pela saída de água pelos emissores ao longo da linha lateral. Para calcular o comprimento máximo das linhas laterais, precisa-se determinar de forma precisa essa variação de pressão para atender um critério pré-estabelecido de variação de vazão.

Várias pesquisas mostram que as perdas localizadas de carga tem influência significativa na variação da pressão ao longo da linha lateral, portanto devem ser consideradas no dimensionamento das linhas laterais. Quando desconsideradas ocasionam um superdimensionamento do comprimento máximo da linha lateral. O desenvolvimento de modelo que considera as perdas localizadas inicia no entendimento das variáveis que causam a perda de carga e na melhor forma de estima-las. Iniciando a análise a partir de trabalhos realizados, consegue-se obter essas variáveis e construir o modelo, usando regressão linear múltipla ou o teorema de Vachy-Buckingham.

De posse dos modelos, é necessário fazer medições em laboratório, para obter coeficientes e ajustar os modelos aos dados reais. A vantagem do uso de modelos matemáticos, para determinar a perda de carga, é que pode-se extrapolar para tubos emissores que não foram ensaiados, desde que estes possuam características dentro dos limites estabelecidos pelo modelo.

Um modelo que considere todas as perdas de carga que ocorrem nos tubos emissores aumenta a precisão dos cálculos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação localizada no Brasil

No censo agropecuário realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006), 6,3% dos estabelecimentos declararam utilizar alguma técnica de irrigação, acusando um aumento de 39% no número de estabelecimentos agropecuários praticantes e um aumento de 1,3 milhões de hectares (42%) em relação ao Censo anterior (1995/1996). A área irrigada em 2005/2006 compreendia 4,45 milhões de ha, sendo 7,3% com métodos localizados, o que equivale a 324.850 ha.

2.2 Irrigação localizada

É um sistema composto por uma rede de tubos, que formam parcelas de irrigação, cada parcela é composta por uma linha de derivação, onde são inseridas várias linhas laterais. Nas linhas laterais estão localizados os emissores.

Segundo Bernardo et al. (2008), a irrigação localizada compreende os sistemas de irrigação nos quais a água é aplicada ao solo diretamente sobre a região radicular, em pequenas intensidades (1 a 160 litros por hora), porém com alta frequência (turno de rega de um a quatro dias), de modo que mantenha a umidade do solo na zona radicular próxima a “capacidade de campo”. Para isso, a aplicação é feita por meio de tubos perfurados com orifícios de diâmetros reduzidos ou por meio de emissores e microaspersores, dos mais diferentes tipos, modelos e características.

Emissores são peças que têm a função de permitir a passagem de água da linha lateral para o meio externo, de uma forma controlada. São os principais componentes de um sistema de irrigação localizada. Existem dois tipos de emissores: os emissores que trabalham com uma faixa de vazão de 2 a 20 L/h e os emissores com vazões variando de 20 a 140 L/h (BERNARDO et al. 2008).

2.3 Irrigação por gotejamento

Para que os sistemas de irrigação por gotejamento atinjam alta eficiência, devem ser observados os fatores que afetam a uniformidade de emissão, como a variação de vazão dos emissores ao longo da lateral, causadas pela perda de carga e pelo desnível geométrico, a variabilidade dos emissores devido ao processo de fabricação, a obstrução de emissores e as

variações de temperatura da água ao longo da lateral (PROVENZANO; PUMO, 2004; GOMES et al., 2010).

Segundo Zitterell et al. (2009), alta uniformidade de distribuição de água permite a otimização do uso da água, da energia e de nutrientes. Para garantir alta uniformidade, é indispensável dimensionamento hidráulico adequado, exigindo que características hidráulicas dos seus componentes sejam conhecidas.

2.4 Termos e definições normatizados para tubos emissores

2.4.1 Segundo a norma ABNT NBR ISO 9261 de 2006

Esta norma estabelece os requisitos mecânicos e funcionais para emissores e tubos emissores para irrigação agrícola.

2.4.1.1 Emissor

Dispositivo instalado numa lateral de irrigação e projetado para descarregar água na forma de gotas ou fluxo contínuo, à vazão que não exceda 24 L/h exceto durante o processo de lavagem.

2.4.1.2 Tubo emissor

Tubo contínuo ou microtubo, incluindo tubo colapsável ("fita") com perfurações ou outros dispositivos hidráulicos modelados ou integrados no tubo, tubo colapsável ou microtubo durante a produção, e projetados para descarregar água na forma de gotas ou fluxo contínuo, a vazões que não excedem 24 L/h, exceto durante processo de limpeza.

2.4.1.3 Emissor/tubo emissor regulado

Emissor/tubo emissor compensador de pressão, emissor/tubo emissor que mantém uma vazão relativamente constante a pressões variadas de água na entrada do emissor/tubo emissor dentro dos limites especificados pelo fabricante

2.4.1.4 Emissor/tubo emissor não regulado

Emissor/tubo emissor não compensador de pressão, emissor/tubo emissor cuja vazão varia com pressão de água de entrada.

2.4.1.5 Pressão nominal de ensaio (p_n)

Pressão de referência, a ser usada para fins de ensaio, 100 kPa, na entrada de um emissor/unidade emissora não regulado(a), ou qualquer outra pressão, como designado nas publicações do fabricante.

2.4.1.6 Expoente de emissor/unidade emissora (m)

Valor numérico que define a relação exponencial entre a vazão e a pressão.

NOTA: $q \approx k \times p^m$, para um expoente igual a 0, a vazão não varia com a pressão; para um expoente igual a 1 a vazão varia linearmente com a pressão.

2.4.1.7 Uniformidade de vazão

Medir a vazão das unidades de emissores/tubos emissores quando a pressão de água nas entradas das unidades de emissores/tubos emissores se igualar à pressão nominal de ensaio. Registrar a vazão medida de cada unidade de emissores/tubos emissores separadamente. Para tubos emissores regulados, antes do ensaio deve-se realizar o procedimento de condicionamento descrito na norma.

Calcule o coeficiente de variação de fabricação, CV_f , com a seguinte equação:

$$CV_f = \frac{S_q}{\bar{q}} \quad (1)$$

em que:

S_q é o desvio padrão da vazão da amostra, em litros por hora e $\bar{q}$ é a vazão média da amostra, em litros por hora.

O coeficiente de variação, CV_f , da vazão da amostra não deve exceder 7%.

2.4.1.8 Determinação do expoente de unidade de emissor/tubo emissor

A relação entre a vazão, q , em litros por hora, e a pressão de entrada em uma unidade de emissor/tubo emissor, p , em KPa, é determinada pela equação

$$q \cong K \times p^m \quad (2)$$

em que:

k é uma constante e m é o expoente do emissor.

Usando todos os valores de q e de p obtidos, calcular o expoente, m , com a seguinte equação:

$$m = \frac{\sum (\log p_i)(\log \bar{q}_i) - \frac{1}{n} (\sum \log p_i)(\sum \log \bar{q}_i)}{\sum (\log p_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \log p_i)^2} \quad (3)$$

em que:

i é 1,2,3... n ; n é o número de valores de pressão usados; $\bar{q}$ é a vazão média, em litros por hora e p é a pressão de entrada, em KPa.

Para emissores/tubos emissores regulados, o valor do expoente, m , não deve exceder 0,2.

A constante da unidade de emissor/tubo emissor, k , também pode ser calculada pela seguinte equação:

$$K = \exp \left[\left(\frac{\sum \ln q_i}{n} \right) - \frac{m \times \sum \ln p_i}{n} \right] \quad (4)$$

em que:

i é 1,2,3... n ; n é o número de valores de pressão usados em; q_i é a vazão média, em $l\ h^{-1}$; p_i é a pressão de entrada, em KPa e m é o expoente da unidade de emissor/tubo emissor.

2.4.2 Segundo a norma ABNT NBR 11795 de 2005

Esta norma especifica os requisitos para tubos de polietileno (PE) empregados em sistemas de irrigação localizada, enterrados ou não, sob pressão de serviço a 20°C de 0,3 MPa para os tubos PN 30 ou de 0,4 MPa para os tubos PN 40.

2.4.2.1 Diâmetro nominal (DN)

Simple número que serve como designação para projeto de tubulações e para classificar, em dimensões, os elementos de tubulação (tubos, conexões, dispositivos e acessórios) e que corresponde, aproximadamente, ao diâmetro interno dos tubos, em milímetros.

NOTA: o diâmetro nominal (DN) não deve ser objeto de medição nem ser utilizado para fins de cálculos.

2.4.2.2 Diâmetro interno médio (d_{im})

Relação entre o perímetro interno do tubo e o número 3,142, com aproximação para o décimo de milímetro mais próximo.

2.4.2.3 Pressão nominal (PN)

Simples número, que serve para designar a máxima pressão interna, em metros de coluna de água, que inclui a variação dinâmica à qual o sistema pode ficar submetido, em serviço contínuo a 20°C.

A pressão nominal é calculada através da seguinte fórmula:

$$PN = \frac{2 \times \sigma_d \times e}{d_{im} + e} \quad (5)$$

Em que: PN é a pressão nominal, em megapascals; σ_d é a tensão circunferencial de dimensionamento dos tubos, igual a 3,2 MPa; e é a espessura mínima de parede, em milímetros; d_{im} é o diâmetro interno médio, em milímetros.

2.4.2.4 Pressão de serviço (PS)

Máxima pressão (incluindo as variações dinâmicas) que os tubos podem suportar em serviço contínuo, conduzindo água numa determinada temperatura, sendo proporcional à pressão nominal através de fator de redução de pressão (Cs), conforme a expressão a seguir:

$$PS = PN \times Cs \quad (6)$$

2.5 Perda de carga total

Segundo Rettore Neto et al. (2009), a perda de carga total é estimada pela soma da perda de carga contínua, ao longo das seções uniformes de tubo entre os emissores consecutivos, com a perda de carga localizada nos emissores “in line” ou nas conexões dos emissores “on-line”. As perdas localizadas, provocadas pelos emissores dentro da tubulação, muitas vezes, são desprezadas (AL-AMOUD, 1995; GOMES et al., 2010). Entretanto, elas são significativas e de grande importância para se dimensionar o comprimento máximo das

linhas laterais (KELLER; KARMELI, 1974; BAGARELLO et al., 1997; RETTORE NETO et al., 2009; GOMES et al., 2010).

2.6 Perda contínua de carga

Segundo Azevedo Netto et al. (1998), quando um líquido flui de um ponto para outro em uma canalização, parte da energia inicial se dissipa sob a forma de calor. A soma das três cargas do teorema de Bernoulli no final do trecho não se iguala a carga inicial. A diferença hf , que se denomina perda de carga, é de grande importância nos problemas de engenharia e por isso tem sido objeto de muitas investigações. Existem várias fórmulas para o cálculo da perda contínua de carga em tubulações. Vários autores apontam a fórmula universal, também conhecida como fórmula de Darcy-Weisbach, como a mais adequada, pois apresenta fundamentos teóricos rígidos, tendo sido deduzida através da aplicação da análise dimensional. Esse tipo de análise permite estabelecer a relação entre as diferentes grandezas que afetam a perda de carga. Para conduto circular a fórmula universal se expressa da seguinte forma:

$$hf = f \frac{L}{D_t} \frac{V_t^2}{2g} \quad (7)$$

em que: hf - perda de carga (m); f - fator de atrito (adimensional); L - comprimento do tubo (m); g - aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); V_t - velocidade de escoamento da água no tubo ($m\ s^{-1}$). O fator de atrito (f) é um número adimensional, sendo estimado em função do número de Reynolds (R_e) e da rugosidade relativa (ϵ/D_t) do conduto, que é a razão entre a altura média das asperezas (ϵ) da parede do conduto e o diâmetro interno do conduto (D_t).

Azevedo Netto et al. (1998), descreve que Osborne Reynolds em 1883, procurou observar o comportamento dos líquidos em escoamento, usando tubo transparente, corante e variando a vazão pela abertura gradual de uma válvula. Primeiramente observou a formação de um filamento colorido retilíneo, com esse tipo de movimento, as partículas fluídas apresentam trajetórias bem definidas, que não se cruzam, é o regime definido como laminar. Abrindo mais a válvula, o filamento colorido mistura-se a massa de líquido devido ao movimento desordenado das partículas, tal movimento é denominado turbulento. Reynolds trabalhando com diferentes diâmetros de tubos e temperaturas da água, 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 considera também a viscosidade do líquido, representada pela eq. (8):

$$R_e = \frac{V_t D_t}{\nu} \quad (8)$$

em que: R_e - número de Reynolds (adimensional); V_t - velocidade de escoamento da água no tubo (m s^{-1}); D_t - diâmetro interno do tubo (m); ν - viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Azevedo Netto et al. (1998), citam que para $R_e < 2000$, o regime de escoamento é laminar e para $R_e > 4000$, o regime é turbulento. Entre esses limites, podem ocorrer tanto regime laminar quanto turbulento, mas de uma maneira instável, uma vez que qualquer perturbação é capaz de mudar o regime. O fator de atrito (f) da equação universal pode ser calculado por fórmulas específicas que variam de acordo com o regime de escoamento. Para o regime laminar o cálculo do fator de atrito pode ser feito pela equação de Hagen-Poiseuille (eq. 9), que é independente da rugosidade relativa do conduto (ϵ/D_t), sendo função unicamente do número de Reynolds (R_e):

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (9)$$

Já o regime turbulento é válido para $R_e > 4000$. Neste caso, além do número de Reynolds, a estimativa do valor f depende de outros fatores mais complexos, como a rugosidade relativa das paredes do tubo (ϵ/D_t). No escoamento turbulento uniforme em tubos rugosos, f pode ser calculado pela equação de Colebrook-White (eq. 10). Esta é uma combinação das equações de Prandtl e de von Karman sendo válida para $0 \leq \epsilon/D_t \leq 0,05$ e $2000 < R_e < 10^8$ (ROMEO et al., 2002; YOO; SINGH, 2005; PORTO, 2006; SONNAD; GOUDAR, 2006; CARDOSO, 2007).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D_t}{3,71} + \frac{2,52}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

Esta equação é válida também para o caso limite de tubos lisos ($\epsilon = 0$) e escoamento completamente turbulento. Todavia, a exatidão do método de Colebrook-White é questionada por muitos pesquisadores. von Bernuth (1990), cita que este método é ineficiente para cálculo de perda de carga em tubos plásticos de pequenos diâmetros. No escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, o coeficiente f independe da rugosidade do conduto, já que o tamanho das asperezas não influi na turbulência do escoamento. Neste caso, a equação de von Karman [eq. (11)] pode ser utilizada para R_e entre 4000 e $3,4 \times 10^6$ (PORTO, 2006):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log(R_e\sqrt{f}) - 0,8 \quad (11)$$

Para tubos lisos e $4000 \leq R_e \leq 10^5$ o fator de atrito pode ser estimado por uma equação simples, proposta por Blasius (von BERNUTH, 1990; GOMES 2009). A equação de Blasius é uma função somente do número de Reynolds, sendo representada pela eq. (12):

$$f = \frac{c}{R_e^m} \quad (12)$$

onde c e m são constantes encontradas por Blasius, 0,316 e 0,25 respectivamente.

A inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach resulta em uma equação combinada com as seguintes vantagens: (i) é teoricamente perfeita e dimensionalmente homogênea, pois tanto a equação de Darcy-Weisbach quanto a de Blasius têm bases teóricas; (ii) tem bom grau de exatidão para tubos lisos quando $4000 \leq R_e \leq 100000$, sendo que o número de Reynolds limite não é restritivo para sistemas de irrigação que usam tubos com diâmetros inferiores a 80 mm, e (iii) pode ser facilmente corrigida para variações na viscosidade da água (BERNUTH, 1990; RETTORE NETO et al., 2009).

Segundo Zitterell (2011), muitos autores encontraram alternativas empíricas para solucionar o fator f. Estes deduziram equações do tipo potência semelhantes a de Blasius encontrando resultados satisfatórios. Utilizando diâmetros nominais de 16, 20 e 25 mm e números de Reynolds entre 3037 a 31373, Bagarello et al. (1997), propuseram uma aproximação semiteórica para estimar os fatores c [eq. (13)] e m [eq. (14)] da equação de Blasius:

$$c = \frac{6,152}{R_e^{0,183}} \quad (13)$$

$$m = \frac{2}{\left(8 - \frac{12,4}{R_e^{0,157}}\right)} \quad (14)$$

De acordo com von Bernuth, 1990 apud Zitterell (2009), a equação de Blasius é válida para tubos hidráulicamente lisos desde que R_e não ultrapasse 100000. Quando o número de Reynolds é muito elevado (acima de 100000), a precisão é reduzida, pois o fator de atrito se

aproxima de zero, já que de fato, é um valor positivo. Quando Re é menor que 4000, em regimes laminares ou zonas críticas, a equação de Blasius superestima o fator de atrito.

Para Juana et al. (2002 apud ZITTERELL, 2009), a introdução do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach, promove uma estimativa precisa das perdas de carga em regimes turbulentos com baixa rugosidade para $3000 \leq Re \leq 10^5$. von Bernuth (1990) comenta que a combinação destas duas equações resulta em uma equação dimensionalmente homogênea (ambas possuem bases teóricas), exata para tubos plásticos quando $Re \leq 10^5$ e adequada para tubos de pequenos diâmetros já que Re , neste intervalo, não é restritivo em sistemas com diâmetros inferiores a 80 mm. Além disso, salienta que as mudanças de viscosidade podem ser facilmente corrigidas através de fatores disponíveis em tabelas.

2.7 Perda contínua de carga em tubos elásticos

Em sua tese Rettore Neto (2011), explica que as equações para perda contínua de carga foram desenvolvidas para tubos rígidos, que não sofrem alteração de diâmetro devido pressão interna e propôs modificação da equação universal, para considerar o aumento de diâmetro que os tubos de polietileno sofrem devido ao aumento da pressão interna, diminuindo assim a perda contínua de carga ao longo das linhas laterais. Os cálculos devem seguir o procedimento trecho a trecho (máximo 1 m), utilizando a eq. (15):

$$hf = f \frac{L}{D_t} \frac{V_t^2}{2g} \frac{1}{\left(1 - \frac{P D_t}{e E}\right)} \quad (15)$$

em que: hf - perda de carga (m); f - fator de atrito (adimensional); L - comprimento do tubo (m); D_t é o diâmetro interno do tubo (m); V_t - velocidade de escoamento da água no tubo ($m s^{-1}$); g - aceleração da gravidade ($m s^{-2}$); P é a pressão em MPa; e é a espessura da parede em m; E é o modulo de elasticidade do tubo em MPa.

2.8 Perda localizada de carga

Azevedo Netto et al. (1998), dizem que as perdas localizadas ou acidentais são provocadas pelas peças especiais e demais singularidades. As perdas localizadas podem ser calculadas pela equação geral de perda localizada de carga, eq. (16).

$$hf_L = K \frac{V_o^2}{2g} \quad (16)$$

em que: hf_L – perda localizada de carga (m), g - aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); V_o - velocidade de aproximação da água ($m\ s^{-1}$) e K - coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil (adimensional).

Figura 1 – Vista do perfil de emissor não regulado integrado em tubo de polietileno

Em emissores integrados a tubos de polietileno Figura 1, K pode ser relacionado com a geometria da seção de escoamento através da aplicação da equação de Borda-Carnot a um alargamento brusco de (A_e) para (A_t), resultando na eq. (10).

$$hf_L = \frac{(V_e^2 - V_t^2)}{2g} = \left(1 - \frac{A_e}{A_t}\right)^2 \frac{V_t^2}{2g} \quad (17)$$

em que: hf_L – perda localizada de carga (m), g - aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); V_e - velocidade de escoamento da água na seção do emissor ($m\ s^{-1}$); V_t - velocidade de escoamento da água no tubo; A_{e_m} – área média do emissor (m^2); A_t – área do tubo sem o emissor inserido (m^2).

Al-Amound (1995), propõe que os valores de perda de carga para emissores “on line” possam ser encontrados experimentalmente da seguinte forma: mede-se a perda unitária de carga em uma linha lateral sem emissor (J) e, em seguida, faz-se a mesma medida de perda de carga na linha com emissores vedados (J'). As diferenças entre os valores de perdas de carga devem ser multiplicadas pelo comprimento da linha (L) e divididas pelo número de emissores (N) conectados a ela. O resultado é a perda de carga provocada por um emissor. Esse processo pode ser representado pela eq. (18):

$$hf_e = \left(\frac{J - J'}{N}\right) L \quad (18)$$

2.9 Perda de carga em tubos emissores

Demir et al. (2007), utilizaram o termo perda de carga por espaçamento entre emissores (hf_{Se}^{-1}). Em experimentos com vários espaçamentos entre emissores, torna fácil a análise dos dados e sua utilização em modelos matemáticos. Nesse trabalho será proposto o termo hf_{Se} , que é a perda de carga que ocorre em um comprimento de tubo igual ao espaçamento entre emissores. No trecho de linha lateral da Figura 2, observa-se que esse comprimento inicia na metade do comprimento do emissor e termina na metade do comprimento do próximo emissor. Nesse comprimento (Se) ocorrem as perdas de carga contínua no tubo e localizada no emissor.

Figura 2 – Espaçamento entre emissores

2.10 Análise Dimensional

Segundo PORTO (2006), o teorema fundamental da Análise Dimensional, conhecido como teorema de Vaschy-Buckingham ou teorema dos Π , é o instrumento básico de grande utilidade na hidráulica experimental, e é enunciado da seguinte forma:

“Todo fenômeno físico representado por uma relação dimensionalmente homogênea de n grandezas físicas, na forma: $F(G_1, G_2, \dots, G_k, \dots, G_n) = 0$, pode ser descrito por uma relação de $n - r$ grupos adimensionais independentes, $\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-r}) = 0$, em que r é o número de grandezas básicas ou fundamentais necessárias para expressar dimensionalmente as variáveis G_i ”.

No caso particular da hidráulica, o valor r é, no máximo, 3, ou seja, existem no máximo 3 grandezas básicas necessárias para representar dimensionalmente cada variável do fenômeno. Em geral, tais grandezas são: massa (força), comprimento e tempo. Escolhendo como variáveis básicas (sistema pró-básico) as grandezas G_k , G_l e G_m , cada grupo adimensional independente é da forma (eq. (19)):

$$\Pi_i = A_i G_k^{\alpha_1} G_l^{\alpha_2} G_m^{\alpha_3} G_i \quad (19)$$

em que: A_i é um número puro; G_i uma grandeza do fenômeno diferente das variáveis básicas e os α_i são expoentes a determinar, pela imposição de homogeneidade dimensional na relação anterior, uma vez que Π_i é um número puro. Para melhor consistência física da metodologia, o sistema pró-básico deve ser constituído por uma grandeza cinemática (velocidade ou vazão), uma grandeza dinâmica e uma grandeza geométrica característica qualquer.

2.11 Regressão linear múltipla

Segundo Naguettini e Pinto (2007), na regressão múltipla estuda-se o comportamento de uma variável dependente Y em função de duas ou mais variáveis independentes X_i . Se a variável Y variar linearmente com as variáveis X_i , pode-se adotar um modelo geral como o apresentado na eq. (20).

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k + \varepsilon \quad (20)$$

em que: Y é a variável dependente; b_0 é o intercepto (valor da variável dependente quando todas as variáveis independentes são iguais a zero); b_1 é a inclinação de Y em relação a variável X_1 , mantendo constante as variáveis $X_2, X_3, \dots, X_k$; b_2 é a inclinação de Y em relação a variável X_2 , mantendo constante as variáveis $X_1, X_3, \dots, X_k$; b_k é a inclinação de Y em relação a variável X_k , mantendo constante as variáveis $X_1, X_2, \dots, X_{k-1}$; ε é o erro aleatório em Y .

Modelos de regressão múltipla não lineares podem ser transformados em lineares através de anamorfose logarítmica. Naguettini e Pinto (2007), fazem alguns comentários sobre verificações que devem ser realizadas a fim de evitar erros na escolha das variáveis que vão compor o modelo, além da relação de cada variável independente com o modelo, devemos ficar atentos a relação entre as variáveis explicativas. Em situações onde as variáveis explicativas são fortemente correlacionadas podem ocorrer problemas na regressão múltipla. Variáveis colineares não fornecem novas informações, dificultando a interpretação dos coeficientes obtidos na regressão, pois em alguns casos o sinal do coeficiente de regressão pode ser o oposto do esperado. Por isso é fortemente recomendável a montagem de uma matriz de coeficientes de correlação simples entre as variáveis explicativas para verificar a existência de uma possível colinearidade entre essas variáveis. Um modo expedito de evitar a colinearidade é a eliminação de uma, entre cada conjunto de duas variáveis explicativas que apresentarem coeficientes de correlação superiores a 0,85.

Desse modo, espera-se que as variáveis mantidas no modelo de regressão contribuam significativamente para explicar a variabilidade de Y . O número de observações disponíveis para a análise de regressão deve ser no mínimo 3 a 4 vezes maior que o número de coeficientes da equação de regressão que serão estimados. Esta regra procura evitar um falso ajuste causado pelas oscilações que podem ocorrer nas variáveis independentes e que são de difícil detecção nas amostras muito pequenas.

Os testes F total, F parcial e o teste t dos coeficientes da regressão devem ser aplicados para avaliar a significância de cada preditor e do modelo. O sinal do coeficiente de correlação entre uma variável explicativa (X_i) e a variável dependente (Y) deve ser o mesmo do coeficiente da regressão associado a essa variável independente. Os resíduos devem ser examinados através de gráficos com as variáveis independentes e dependentes, para identificar deficiências na equação de regressão e conferir as hipóteses da regressão. E finalmente, comparar os valores previstos com a equação de regressão e dados observados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores, usando regressão linear múltipla

Existem diversos trabalhos sobre perda de carga em tubos emissores na literatura. Vários autores apontam a equação universal como a mais adequada para o cálculo da perda de carga continua em tubos, pois a mesma apresenta base teórica enquanto as outras são empíricas. Os tubos emissores são considerados lisos, o fator de atrito não depende da rugosidade das paredes do tubo e pode ser resumido a uma equação que depende somente do numero de Reynolds, conhecida como equação de Blasius. A equação de Blasius combinada com a equação universal é forma precisa de calcular perda de carga continua nos tubos emissores. Para o cálculo da perda de carga localizada nos emissores é indicado uso do teorema de Borda-Carnot. Substituindo o comprimento de tubo da equação universal pelo espaçamento entre emissores e somando ao teorema de Borda-Carnot, chega-se a eq. (21).

$$hf_{Se} = \left(f \frac{Se}{D_t} \frac{V_t^2}{2g} \right) + \left(\left(1 - \frac{Ae_m}{A_t} \right)^2 \frac{V_t^2}{2g} \right) \quad (21)$$

Substituindo o fator de atrito pela equação de Blasius, chega-se a eq. (22).

$$\underbrace{hf_{Se}}_Y = \underbrace{\left(\frac{0,316}{Re^{0,25}} \frac{Se}{D_t} \frac{V_t^2}{2g} \right)}_{X_1} + \underbrace{\left(\left(1 - \frac{Ae_m}{A_t} \right)^2 \frac{V_t^2}{2g} \right)}_{X_2} \quad (22)$$

em que: hf_{Se} é a perda de carga em um comprimento de tubo igual a um espaçamento entre emissores, em m; Re é o número de Reynolds, adimensional; Se é o espaçamento entre emissores, em m; D_t é o diâmetro interno do tubo, em m; V_t é a velocidade de escoamento da água no tubo, em $m\ s^{-1}$; g é aceleração da gravidade em $m\ s^{-2}$; A_t é a área interna do tubo em m^2 e Ae_m é a área média do emissor, em m^2 .

Chamando o primeiro termo do lado direito da eq. (22) de X_1 (hf contínua) e o segundo de X_2 (hf localizada), é necessário fazer ensaios para obter as variáveis de entrada do modelo (hf_{Se} , Re , Se , D_t , V_t , A_t e Ae_m) e posteriormente, com regressão múltipla ajustar os termos X_1 e X_2 em hf_{Se} (Y).

3.2 Modelo para determinar perda de carga em tubos emissores, usando análise dimensional

O dimensionamento de uma linha lateral em nível, composta por um tubo com emissores vedados, tem por base a queda de pressão, entre o início e o final da mesma, ocasionada pela perda de carga contínua e as perdas de carga localizadas. Usando as eq. (8), (12), (15), (17), obtêm as variáveis envolvidas. Transformando a perda de carga total (contínua + localizadas), para um comprimento de tubo emissor, equivalente ao espaçamento entre emissores (Se), obtêm-se a eq. (23).

$$hf_{Se} = \left[\underbrace{0,316 \left(\frac{V_t D_t}{\nu} \right)^{-0,25}}_{\text{eq. (8) e (12)}} \underbrace{\frac{Se}{D_t} \frac{V_t^2}{2g}}_{\underbrace{\left(1 - \frac{P D_t}{e E} \right)}_{\text{eq. (15)}}} + \underbrace{\left(1 - \frac{Ae_m}{A_t} \right)^2 \frac{V_t^2}{2g}}_{\text{eq. (17)}} \right] \quad (23)$$

em que: hf_{Se} é a perda de carga em comprimento de tubo igual a um espaçamento entre emissores, em m; Se é o espaçamento entre emissores, em m; ν é a viscosidade cinemática da água, em $m^2 s^{-1}$; D_t é o diâmetro interno do tubo em m; V_t é a velocidade de escoamento da água no tubo, em $m s^{-1}$; g é aceleração da gravidade, em $m s^{-2}$; A_t é a área interna do tubo, em m^2 ; Ae_m é a área média do emissor, em m^2 ; P é a pressão, em MPa; e é a espessura da parede, em m; E é o módulo de elasticidade do tubo, em MPa.

Observando a eq. (23), pode-se escrever a relação expressa pela eq. (24).

$$hf_{Se} = \emptyset(V_t, D_t, \nu, Se, g, P, e, E, Ae_m, A_t) \quad (24)$$

Reescrevendo a eq. (24), na forma de matriz dimensional, apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Matriz dimensional

	hf_{Se}	V_t	D_t	ν	Se	P	e	E	g	A_t	Ae_m
M	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
L	1	1	1	2	1	1	-1	-1	1	2	2
T	0	-1	0	-1	0	-2	0	-2	-2	0	0

A análise dimensional da perda de carga será realizada pelo método dos Π 's de Vaschy-Buckingham. Observando a Tabela 1, o número de variáveis, n , são 11, sendo uma

dependente (hf_{se}), e 10 independentes. Como são três dimensões, i , envolvidas (M , L e T), têm-se K grupos adimensionais ou termos Π , traduzindo-se em $K = n - i$, $K = 11 - 3$, $K = 8$ termos Π . As variáveis básicas escolhidas foram: V_t , D_t e P , pois são dimensionalmente independentes. A análise dimensional reduz as quantidades físicas pertinentes a um sistema de grupos adimensionais, chamados termos “pi” (LANGHAAR, 1987 apud DEMIR et al., 2007). Após aplicação do teorema de Vaschy-Buckingham, obtêm-se os termos π_i , que estão demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Termos adimensionais

Termo π_i	Função	Significância
Π_1	$\frac{hf_{se}}{D_t}$	Relação entre perda de carga e diâmetro do tubo
Π_2	$\frac{v}{V_t D_t}$	Inverso do número de Reynolds
Π_3	$\frac{Se}{D_t}$	Relação entre espaçamento entre emissores e diâmetro do tubo
Π_4	$\frac{g D_t}{V_t^2}$	Inverso do número de Froude
Π_5	$\frac{A_t}{D_t^2}$	Relação entre área do tubo e quadrado do diâmetro do tubo
Π_6	$\frac{Ae_m}{D_t^2}$	Relação entre área do emissor e quadrado do diâmetro do tubo
Π_7	$\frac{e}{D_t}$	Relação entre espessura da parede e diâmetro do tubo
Π_8	$\frac{E}{P}$	Relação entre módulo de elasticidade do tubo e pressão da água

Exemplificando a obtenção do primeiro termo Π :

Para obter o primeiro grupo adimensional começamos combinando a variável hf_{se} com as três variáveis básicas, obtendo a eq. (25):

$$\Pi_1 = hf_{se} P^{\alpha_1} V_t^{\alpha_2} D_t^{\alpha_3} \quad (25)$$

reescrevendo a eq. (25) na forma dimensional, chega-se a eq. (26):

$$(MLT)^0 = L^1 (M^1 L^{-1} T^{-2})^{\alpha_1} (L^1 T^{-1})^{\alpha_2} (L^1)^{\alpha_3} \quad (26)$$

determinando os expoentes α da eq. (25), para cada dimensão:

para M $0 = \alpha_1$

para L $0 = 1 - \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$

para T $0 = -2\alpha_1 - \alpha_2$

Resolvendo o sistema encontra-se: $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0$ e $\alpha_3=-1$

Substituindo os expoentes α na eq. (25) chega-se ao primeiro termo adimensional, expresso na eq. (27):

$$\Pi_1 = hf_{se} D_t^{-1} \quad (27)$$

no segundo termo Π combina-se a v com as variáveis básicas e assim sucessivamente, até obter todos os termos.

Como $\Pi_1 = \emptyset$ ($\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8$), rearranjando e fazendo algumas simplificações, que não afetam os termos adimensionais, chega-se a função final (28). Onde cada termo pi é adimensional e está relacionado com a perda de carga.

$$\frac{hf_{se}}{D_t} = \emptyset \left(\frac{V_t D_t}{v}, \frac{Se}{D_t}, \frac{V_t^2}{g D_t}, \frac{Ae_m}{At}, \frac{e}{D_t}, \frac{E}{P} \right) \quad (28)$$

É necessário fazer medições com vários tipos de marcas e modelos de linhas laterais, que possuam emissores, tipo “bóbi” para obter as variáveis envolvidas, substitui-las nos termos adimensionais e relacionar cada termo com a perda de carga que ocorre em um comprimento de tubo igual ao espaçamento entre emissores. Ao final será obtida a equação que descreve a perda de carga. Os materiais e métodos utilizados para obter as variáveis de entrada do modelo ($V_t, D_t, v, Se, g, P, e, E, Ae_m, A_t$) serão descritos abaixo.

3.3 Validação do modelo

Camargo e Sentelhas (1997), avaliaram o desempenho de 20 métodos de estimativa de evapotranspiração, ao correlacionar valores estimados com os medidos por regressão linear, foram considerados os seguintes indicadores estatísticos: precisão – coeficiente de correlação (r); exatidão - índice de concordância de Willmott (d). Além disso propuseram um novo índice, de confiança ou desempenho (c), calculado pela eq. (29).

$$c = r \cdot d \quad (29)$$

em que: c é o índice de confiança ou desempenho; r é a precisão dada pelo coeficiente de correlação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação a média, ou seja, o erro aleatório; d é a exatidão que está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Para interpretar o índice c , observa-se a Tabela 3.

Tabela 3 – Critério para interpretação do desempenho pelo índice c

Valor 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 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

Fonte: Adaptado de Camargo e Sentelhas (1997).

3.4 Instalações e equipamentos

Os ensaios para obter as variáveis de entrada do modelo foram conduzidos no laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba – SP. Para realização dos ensaios foram utilizados, uma motobomba para impulsionar a água do reservatório, tubulação de recalque, três registros, sendo um na motobomba, um na entrada da linha e um no final da tubulação de retorno ao reservatório, com o objetivo de manter a pressão na entrada do tubo com emissores a ser testado em 196 KPa e variar a vazão, medida por um medidor eletromagnético, com capacidade de 0 a 1500 L h⁻¹ e precisão de 1 L h⁻¹. A pressão foi observada por um manômetro digital com escala de 0 a 1470 KPa e precisão de 0,98 KPa. No croqui (Figura 3), é apresentado o esquema dos equipamentos utilizados.

Figura 3 – Croqui dos equipamentos utilizados no experimento

3.5 Avaliação dos tubos emissores

Com objetivo de testar uniformidade e características de emissão foram realizados testes na bancada experimental.

Para cada modelo de tubo emissor foram selecionados 20 emissores ao longo de duas linhas laterais em paralelo, a posição do emissor selecionado variou de acordo com o espaçamento entre emissores. Após ligar o sistema, esperavam-se alguns minutos para a pressão estabilizar, em tubos emissores regulados foi feito um condicionamento de uma hora, conforme norma ABNT NBR ISO 9261 de 2006. Coletava-se volume durante 6 minutos para cada pressão de ensaio, primeiramente em pressões crescentes, de 5 em 5 m.c.a, iniciando em 5 m.c.a até 40 m.c.a, após em pressões decrescentes de 40 m.c.a até 5 m.c.a, com intervalo entre pressões de 5 m.c.a. O volume coletado foi pesado em balança com precisão de 0,01 g, para transformação do peso em volume, foi medida a temperatura com termômetro digital com precisão de 0,01 °C e utilizada tabela de densidade em função da temperatura. Os coeficientes característicos K e m, a relação vazão x pressão e CV_f x pressão são valores da média dos ensaios em pressões crescentes e decrescentes. Os coeficientes característicos K e m foram obtidos pelas equações (4) e (3) respectivamente e o CV_f pela eq. (1).

3.6 Determinação da perda de carga no tubo com emissores (hf_{te})

Na determinação da perda de carga total, do tubo com emissores foi utilizado um medidor diferencial de coluna de mercúrio, com escala 1000 - 0 - 1000 mm, conectado no início e no final da linha lateral, composta por um segmento de tubo com emissores vedados para todos os modelos e as 4 repetições. Para instalação das tomadas de pressão foram feitos furos com uma haste metálica aquecida, com movimento circular para evitar rebarbas no interior do tubo, os detalhes da vedação dos emissores, dos componentes e montagem das tomadas de pressão do manômetro diferencial de mercúrio são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura 4 – Vedação dos emissores com massa epóxi e tira de borracha

Figura 5 – A: Perfuração dos tubos com haste aquecida; B: tubo perfurado; C: montagem da tomada de pressão sobre o furo utilizando arame como guia para o segmento de tubo de silicone; D: tomada de pressão conectada ao medidor diferencial de mercúrio

Pelo controle dos registros, variou-se a vazão de 160 L h^{-1} a 1420 L h^{-1} , com intervalos entre vazões de 80 L h^{-1} , foi obtida a equação da perda de carga total, do tipo potencial (eq. 30). A variação da temperatura da água durante os ensaios foi medida com um termômetro digital, para posterior correção da viscosidade cinemática.

$$hf_{te} = aQ^b \quad (30)$$

em que: hf_{te} - perda de carga no tubo com emissores (m); Q - vazão em L h^{-1} ; a e b - parâmetros da equação.

3.7 Determinação da perda de carga no tubo (hf_t)

Foi utilizada a equação de Darcy-Weissbach [eq. (07)] e o fator de atrito (f) obtido pela equação de Blasius [eq. (12)]. Os diâmetros internos dos tubos, necessários ao cálculo da perda de carga, foram determinados a partir de 8 anéis para cada tubo, no projetor óptico de perfil marca Starrett modelo HB 400, Figura 6. O comprimento do segmento de tubo (L) foi medido durante o ensaio, utilizando trena. A viscosidade cinemática necessária no cálculo do fator de atrito, foi determinada indiretamente a partir da medição da temperatura da água com termômetro digital, e conversão utilizando tabela.

Figura 6 – Projetor óptico de perfil

3.8 Determinação da perda de carga nos emissores (hf_e)

Também conhecida como perda localizada de carga nos emissores, devido estes causarem uma obstrução no tubo, modificando as linhas de fluxo da corrente fluída e aumentando a perda de carga em relação ao tubo sem emissores. A perda localizada de carga nos emissores foi determinada pela diferença entre a perda de carga do tubo com os emissores (hf_{te}) e a perda de carga no tubo (hf_t). Dividindo-se pelo número de emissores (N), obtém a perda localizada em um emissor, conforme eq. (31).

$$hf_e = \frac{Hf_{te} - hf_t}{N} \quad (31)$$

em que: hf_e - perda de carga em um emissor (m); Q - vazão em $L\ h^{-1}$; a e b - parâmetros da equação.

3.9 Características geométricas dos emissores

A perda localizada de carga nos emissores em uma linha lateral, é função do número de emissores (N), ou razão entre comprimento da linha lateral e espaçamento entre emissores (Se). Pensando em um emissor a perda localizada é função da área do emissor, neste trabalho foi proposto o termo área do emissor média (Ae_m), já que ao longo do comprimento do emissor (le), temos diferentes áreas, em emissores regulados, isso é devido ao mecanismo de regulação de pressão que forma um ressalto, em emissores não regulados a área é praticamente constante ao longo do comprimento do emissor, sendo modificada apenas na entrada e saída, que tem formato chanfrado. Os emissores utilizados podem ser observados em corte na Figura 7.

A Ae_m foi determinada de forma indireta, a partir do volume de água destilada necessário para preencher o cilindro interno do emissor. Para cada modelo de tubo emissor, foram utilizados 8 emissores, um lado do emissor foi vedado com fita, e após pesado em balança digital com precisão de 0,01 g, assim obteve-se a tara, em seguida completou-se o emissor com água destilada e novamente foi pesado, obtendo o peso de água destilada. Como a temperatura da água foi medida com termômetro digital com precisão de 0,01 °C, podemos converter peso em volume, dividindo pelo peso específico. O volume de água destilada dividido pelo comprimento do emissor, que foi medido com paquímetro digital com precisão de 0,01 mm nos fornece a Ae_m .

Figura 7 – Emissores em corte

3.10 Determinação do módulo de elasticidade dos tubos

Utilizando procedimentos descritos por Rettore neto (2011), o módulo de elasticidade foi determinado a partir da deformação que os tubos de polietileno sofreram ao ser aplicada força axial na máquina de ensaios de tração universal. Foram utilizados três repetições para cada modelo de tubo emissor, o comprimento das amostras utilizado foi de 25 cm, sendo 5 cm para prender em cada uma das garras e ficando 15 cm como comprimento inicial. A máquina foi programada para deslocar a uma velocidade de 10 mm/min. A Figura 8 ilustra a máquina durante o ensaio.

Figura 8 - Ensaio de tração

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliações dos tubos emissores

4.1.1 Coeficientes característicos dos emissores

A Tabela 4 apresenta os coeficientes característicos de vazão dos emissores obtidos a partir da média de vazão coletada em pressões crescentes e decrescentes em 20 emissores ao longo de duas linhas laterais em paralelo, para cada modelo de tubo emissor.

Tabela 4 - Coeficientes de vazão dos emissores

Tubo emissor	K	Expoente (m)	Intervalo de validade da equação	
			Inferior (KPa)	Superior (KPa)
1	2,048	0,064	49,05	392,4
2	2,592	-0,027	98,1	392,4
3	3,994	0,001	98,1	392,4
4	1,518	0,092	98,1	392,4
5*	0,045	0,625	49,05	392,4
6	2,722	-0,017	98,1	392,4
7	1,659	0,046	98,1	392,4
8	3,380	-0,043	98,1	392,4
9*	0,106	0,500	49,05	392,4
10*	0,132	0,520	49,05	392,4
11	1,650	0,038	49,05	392,4
12	0,644	0,072	98,1	392,4

* = emissores não regulados.

Segundo a ABNT NBR ISO 9261 (2006), para emissores/tubos emissores regulados, o valor do expoente, m , não deve exceder 0,2, todos os emissores estão de acordo com a norma.

4.1.2 Variação do coeficiente de variação de vazão (CV_q) com a variação da pressão

Na Figura 9 são apresentados os gráficos que demonstram a influência da variação de pressão no CV_q dos emissores.

Figura 9 - Relação CV_q versus pressão

O CV_q varia com a pressão. Para a maioria dos tubos emissores ensaios o CV_q tende a estabilizar a partir de 98,1 KPa.

4.1.3 Variação da vazão com a variação da pressão

Na Figura 10 é apresentado o comportamento da vazão dos emissores, quando se altera a pressão.

Figura 10 – Relação vazão versus pressão

Nos emissores 5, 9 e 10 que são não regulados, a vazão cresce com o aumento da pressão, já nos demais que possuem mecanismo de compensação de pressão, a vazão tende a ser praticamente constante, mesmo que se altere a pressão. Observa-se que para a maioria dos emissores regulados a faixa de regulagem de pressão inicia a partir de 98,1 KPa.

4.2 Características geométricas dos tubos

As características geométricas necessárias para o cálculo da perda de carga no tubo, foram medidas e são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características geométricas dos tubos

Tubo emissor	L (m)	Diâmetro interno (mm)		Espessura da parede (mm)	
		Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	9,80	13,60	0,15	1,18	0,06
2	10,14	13,91	0,22	1,12	0,03
3	9,90	13,75	0,07	1,11	0,06
4	10,40	13,57	0,16	1,30	0,05
5	10,50	13,65	0,23	1,16	0,03
6	10,36	13,49	0,18	0,81	0,03
7	10,27	15,01	0,17	1,14	0,07
8	10,36	15,22	0,17	1,06	0,05
9	10,40	17,12	0,24	1,22	0,04
10	10,20	15,67	0,37	1,00	0,05
11	10,40	14,28	0,30	1,15	0,08
12	10,50	17,30	0,39	1,20	0,13

L – comprimento do tubo.

No modelo que considera a dilatação dos tubos com a pressão, além das características geométricas é necessário determinar o módulo de elasticidade dos tubos, usando a lei de Hooke, as características necessárias e o resultado dos cálculos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Módulo de elasticidade dos tubos

Tubo emissor	D_i (mm)	D_e (mm)	e (mm)	E (MPa)
1	13,60	15,97	1,18	102,86
2	13,91	16,15	1,12	125,68
3	13,75	15,97	1,11	114,88
4	13,57	16,17	1,30	95,43
5	13,65	15,97	1,16	104,47
6	13,49	15,10	0,81	137,93
7	15,01	17,30	1,14	104,29
8	15,22	17,35	1,06	103,94
9	17,12	19,57	1,22	98,67
10	15,67	17,67	1,00	124,37
11	14,28	16,58	1,15	113,48
12	17,30	19,70	1,20	115,43

D_i – diâmetro interno do tubo; D_e – diâmetro externo do tubo; e – espessura da parede do tubo; E – módulo de elasticidade do tubo.

4.3 Características geométricas dos emissores

Para o cálculo da perda localizada de carga nos emissores, foram determinadas as características apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características geométricas dos emissores

Tubo emissor	N	Se (m)	le (mm)		Ae _m (mm ²)	
			$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
1	10	0,98	34,34	0,05	108,74	2,13
2	13	0,78	35,94	0,07	105,10	1,91
3	11	0,90	50,04	0,14	109,35	2,06
4	20	0,52	34,22	0,07	107,45	2,04
5	21	0,50	68,15	0,04	110,01	1,45
6	14	0,74	35,86	0,07	105,76	2,14
7	13	0,79	37,39	0,08	135,97	2,47
8	14	0,74	36,03	0,09	137,03	1,90

9	52	0,20	39,59	0,07	197,97	1,64
10	17	0,60	32,06	0,05	191,46	1,76
11	26	0,40	48,87	0,09	187,94	1,57
12	35	0,30	48,84	0,10	189,96	1,64

N – número de emissores na linha lateral; Se - espaçamento entre emissores; le - comprimento do emissor;
 Ae_m - Seção transversal média do emissor; $\bar{x}$ - média; σ - desvio padrão.

4.4 Perda de carga unitária

O resultado da perda de carga medida na linha lateral, foi dividido pelo comprimento da linha para obter a perda de carga unitária (J). Na Figura 11, são apresentados os resultados das 4 repetições na forma de gráfico, a curva superior representa o aumento da perda de carga unitária no tubo com emissores (J_{te}) ao aumentar a vazão, a curva inferior é a perda de carga unitária no tubo (J_t).

Figura 11 – Perda de carga unitária (J)

Para todos os tubos emissores ensaiados observa-se pequenos desvios entre os dados medidos nas 4 repetições, isso é devido a precisão dos equipamentos utilizados nas medições. As equações ajustadas aos dados medidos, são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Equações de perda de carga no tubo com emissores e no tubo

Tubo	$J_{te} (m.m^{-1})$		$J_t (m.m^{-1})$	
emissor	Equação	R^2	Equação	R^2
1	$= 0,5455Q^{1,8057}$	0,9994	$= 0,3243Q^{1,7426}$	0,9997
2	$= 0,4752Q^{1,7675}$	0,9998	$= 0,2915Q^{1,7453}$	0,9998
3	$= 0,6076Q^{1,8476}$	0,9999	$= 0,3081Q^{1,7468}$	1
4	$= 0,7737Q^{1,8417}$	0,9999	$= 0,3308Q^{1,7472}$	1
5	$= 0,4532Q^{1,7791}$	0,9999	$= 0,3230Q^{1,7475}$	1
6	$= 0,4940Q^{1,7926}$	1	$= 0,3388Q^{1,7473}$	1
7	$= 0,2850Q^{1,7990}$	0,9997	$= 0,2020Q^{1,7481}$	1
8	$= 0,3295Q^{1,8519}$	0,9996	$= 0,1897Q^{1,7482}$	1
9	$= 0,1832Q^{1,8849}$	0,9989	$= 0,1089Q^{1,7471}$	1
10	$= 0,1792Q^{1,7954}$	0,9996	$= 0,1661Q^{1,7483}$	1
11	$= 0,2645Q^{1,8566}$	0,9997	$= 0,2554Q^{1,7468}$	1
12	$= 0,2579Q^{1,9185}$	0,9995	$= 0,1032Q^{1,7585}$	0,9963

Os dados medidos se ajustaram de forma precisa a equações do tipo potencial. Nas equações de perda de carga unitária no tubo, os expoentes são próximos a 1,75, isso é devido a utilização da equação Universal combinada com a fator de atrito calculado por Blasius.

4.5 Obtenção do modelo usando regressão linear múltipla

Substituindo os dados observados no experimento na eq. (22) e aplicando logaritmo, obtêm-se o modelo que descreve a hf_{se} , usando regressão linear múltipla. Na Tabela 9, é apresentada a análise estatística da regressão.

Tabela 9 - Análise estatística da regressão linear múltipla

Estatística da regressão						
R múltiplo		R^2 ajustado		Erro padrão		Observações
0,9889		0,9779		0,091		816
ANOVA						
Fonte de variação	gl	SQ	QM	F	F _{tabelado} (1%)	F _{significação}
Regressão	2	296,619	148,310	17993,941	4,63	0
Resíduo	813	6,701	0,008			
Total	815	303,320				

$F_{\text{significação}}$ = nível de significância com o qual se aceita a hipótese de não existir regressão.

O fator F calculado foi maior que o tabelado, aceitando-se a hipótese de existência de regressão. Os regressores foram submetidos ao teste t, e todos foram diferentes de zero ao nível de significância de 1%, conforme pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados da regressão linear múltipla

Termo	Regressores	Desvio Padrão	Teste t	Valor P	Intervalo de confiança (95%)		R^2 parcial
					Inferior	Superior	
constante	0,297	0,008	36,227	<0,0001	0,280	0,313	-
X1	0,942	0,007	138,957	<0,0001	0,929	0,955	0,968
X2	0,068	0,003	19,564	<0,0001	0,061	0,075	0,0104

$t_{\text{tabelado}} (1\%) = 2,58$; Valor P = nível de significância no qual se aceita a hipótese do regressor ser zero.

Para chegar ao modelo final, precisa-se aplicar antilogaritmo, para voltar a forma não linearizada. Substituindo os regressores a fazendo as transformações, chega-se a eq. (31).

$$Y = 1,979 X1^{0,942} X2^{0,068} \quad (31)$$

Como as variáveis Y, X1 e X2 são termos da eq. (22), pode-se substituir para obter a eq. (32).

$$hf_{Se} = 1,979 \left(\frac{0,316}{Re^{0,25}} \frac{Se}{D_t} \frac{V_t^2}{2g} \right)^{0,942} \left(\left(1 - \frac{Ae_m}{At} \right)^2 \frac{V_t^2}{2g} \right)^{0,068} \quad (32)$$

em que: hf_{Se} é a perda de carga em um comprimento de tubo igual a um espaçamento entre emissores, em m; Re é o número de Reynolds, adimensional; Se é o espaçamento entre

emissores, em m; D_t é o diâmetro interno do tubo, em m; V_t é a velocidade de escoamento da água no tubo, em $m\ s^{-1}$; g é aceleração da gravidade, em $m\ s^{-2}$; A_t é a área interna do tubo, em m^2 e A_{em} é a área média do emissor, em m^2 .

Essa equação não leva em consideração a dilatação que os tubos de polietileno sofrem com o aumento da pressão. Na Figura 12 é apresentado um gráfico para comparar as perdas de cargas observadas no experimento, com as estimadas pelo modelo proposto.

Figura 12 – hf_{se} estimada versus hf_{se} observada

Na Figura 12, observa-se que os maiores desvios entre hf_{se} observada e estimada, ocorreram para os tubos emissores 3 e 4. Para os 12 tubos emissores ensaiados houve um aumento do desvio entre hf_{se} observada e estimada, com o aumento da perda de carga, ou da velocidade de escoamento da água, que está relacionada.

4.5.1 Validação do modelo

Utilizando a eq.(29) e a Tabela 3 para interpretação, propostas por Camargo e Sentelhas (1997), obteve-se o valor de 98,17, classificado como ótimo.

4.6 Obtenção do modelo usando Análise Dimensional

Nesse modelo cada termo π da eq. (31) será considerado como variável X, totalizando 6 variáveis, o que facilita a ocorrência de colinearidade. Para evitar problemas no modelo, serão seguidas as recomendações de Naguettini e Pinto (2007). O primeiro passo será observar a correlação entre os termos π , observando a Tabela 11.

Tabela 11 – Matriz de correlação dos termos π

	$\frac{hf_{se}}{D_t}$	$\frac{E}{P}$	$\frac{e}{D_t}$	$\frac{V_t^2}{D_t g}$	$\frac{V_t D_t}{\nu}$	$\frac{Ae_m}{A_t}$	$\frac{Se}{D_t}$
$\frac{hf_{se}}{D_t}$	1,0000						
$\frac{E}{P}$	-0,3541	1,0000					
$\frac{e}{D_t}$	0,2747	0,4776	1,0000				
$\frac{V_t^2}{D_t g}$	0,8845	-0,4249	0,1987	1,0000			
$\frac{V_t D_t}{\nu}$	0,7564	-0,3837	0,0734	0,9167	1,0000		
$\frac{Ae_m}{A_t}$	-0,3443	-0,0510	-0,1734	-0,1251	-0,0283	1,0000	
$\frac{Se}{D_t}$	0,5034	-0,2890	0,1958	0,2581	0,1229	-0,4901	1,0000

Observa-se uma forte correlação entre os números de Froude e de Reynolds, 0,9167 é maior que o limite máximo de 0,85, ocasionando problema de colinearidade no modelo. Para evitar esse problema devemos excluir um dos termos π . O número de Froude apresenta uma maior correlação com o termo dependente ($hf_{se} D_t^{-1}$), então exclui-se o número de Reynolds. Aplicando logaritmo nos termos e fazendo regressão, na análise estatística, encontra-se um R^2 parcial de 0,000373, confirmando que a exclusão não afeta o modelo. Fazendo uma nova regressão sem o número de Reynolds, o termo ($E P^{-1}$) que era significativo a 1% de probabilidade na análise anterior, passou a ser significativo a um nível de significância de 30,1%, confirmando que a colinearidade afeta o modelo negativamente. Essa variável será excluída do modelo, seu R^2 parcial é 0,000157. Fazendo uma nova regressão sem os dois termos excluídos, encontram-se os resultados apresentados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Análise estatística da regressão

Estatística da regressão						
R múltiplo		R^2 ajustado	Erro padrão		Observações	
0,995		0,99	0,0629		816	
ANOVA						
Fonte de variação	gl	SQ	QM	F	F _{tabelado} (1%)	F significação
Regressão	4	320,013	80,003	20235,058	2,82	0
Resíduo	811	3,206	0,004			
Total	815	323,219				

$F_{\text{significação}}$ = nível de significância no qual se aceita a hipótese de não existir regressão.

O fator F calculado foi maior que o tabelado, aceitando-se a hipótese de existência de regressão. Os regressores foram submetidos ao teste t, e todos foram diferentes de zero ao nível de significância de 1%, conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados da regressão múltipla utilizada para obter os expoentes dos termos π 's

Termo	Regressores	Desvio Padrão	Teste t	Valor P	Intervalo de confiança (95%)		R^2 parcial
					Inferior	Superior	
constante	-0,874	0,051	-17,229	<0,0001	-0,973	-0,774	-
$\frac{E}{P}$	-	-	-1,034	0,301	-	-	0,000157
$\frac{e}{D_t}$	0,471	0,041	11,576	<0,0001	0,391	0,551	0,00164
$\frac{V_t^2}{D_t g}$	0,910	0,004	227,476	0	0,902	0,917	0,851
$\frac{V_t D_t}{v}$	-	-	-	-	-	-	0,000373
$\frac{Ae_m}{A_t}$	-1,465	0,040	-37,091	<0,0001	-1,543	-1,388	0,0184
$\frac{Se}{D_t}$	0,789	0,011	69,997	0	0,766	0,811	0,119

$t_{\text{tabelado}} (1\%) = 2,58$; Valor P = nível de significância no qual se aceita a hipótese do regressor ser zero.

A baixa significância que o termo $(E P^{-1})$ apresenta é devido ao modulo de elasticidade ser característica do material, do diâmetro interno dos tubos e dos tubos serem fabricados

seguindo a norma ABNT NBR 11795, na qual a pressão nominal depende da espessura da parede e do diâmetro interno do tubo, conforme eq. (5), essas variáveis estão presentes nos outros termos e explicam variação do termo dependente. O R^2 parcial, representa o quanto da variação da perda de carga cada termo adimensional explica. O número de Reynolds tem um baixo valor de R^2 ajustado parcial, isso pode ter ocorrido devido aos ensaios terem sido realizados com água limpa e com uma temperatura variando de 23,4 a 34,5 °C, que provocou pequena variação na viscosidade cinemática.

Aplicando antilogaritmo nos regressores da Tabela 13 e substituindo na eq. (28), chega-se a eq. (33).

$$\frac{hf_{Se}}{D_t} = 0,13375 \left(\frac{V_t D_t}{\nu} \right)^0 \left(\frac{Se}{D_t} \right)^{0,789} \left(\frac{V_t^2}{g D_t} \right)^{0,91} \left(\frac{Ae_m}{At} \right)^{-1,465} \left(\frac{e}{D_t} \right)^{0,471} \left(\frac{E}{P} \right)^0 \quad (33)$$

fazendo-se transformações matemáticas e simplificações, chega-se a eq. (34).

$$hf_{Se} = 0,012 \frac{Se^{0,789}}{D_t^{-1,76}} \frac{V_t^{1,82}}{Ae_m^{1,465}} e^{0,471} \quad (34)$$

Na Figura 13 é apresentado um gráfico para comparar as perdas de carga observadas no experimento, com as estimadas pelo modelo proposto.

Figura 13 - hf_{Se} estimada versus hf_{Se} observada

Na Figura 13, observa-se que para os 12 tubos emissores ensaiados houve um aumento do desvio entre hf_{se} observada e estimada, com o aumento da perda de carga, ou da velocidade de escoamento da água, que está relacionada.

4.6.1 Hipóteses básicas da análise de regressão linear

Além da análise estatística Naguettini e Pinto (2007), descrevem a verificação de hipóteses básicas de regressão. As principais hipóteses da análise de regressão linear são a linearidade, a normalidade e a homoscedasticidade dos resíduos. A hipótese de linearidade define que a relação entre as variáveis analisadas deve ser linear, enquanto que o pressuposto de normalidade estabelece que os valores de Y são normalmente distribuídos para cada valor de X. A hipótese de homoscedasticidade estabelece que os resíduos ou erros, são realizações de uma variável aleatória independente e normalmente distribuída, com média zero e variância constante.

A hipótese de linearidade foi atendida, aplicando anamorfose logarítmica nos termos π . Para verificar a normalidade dos erros, foi construído o gráfico dos resíduos padronizados versus valor previsto da variável dependente, apresentado na Figura 14. Segundo a ABNT NBR 14653-2 (2004) um gráfico de resíduos padronizados, apresentando 95% dos pontos no intervalo $(-1,96; +1,96)$ é um indicador favorável a verificação da hipótese. Se admitirmos que os resíduos se distribuem normalmente com média zero e variância constante, então, Y também se distribui normalmente com média e variância constante. Isso ocorre porque toda função linear de variáveis distribuídas normalmente, também se distribuem normalmente.

Figura 14 – Resíduos padronizados versus valor previsto

Fazendo a contagem no número de pontos no intervalo $(-1,96; +1,96)$, encontrou-se que 95,71% dos pontos se encontram dentro do intervalo atendendo a hipótese de normalidade dos resíduos. Observando o gráfico da Figura 14, alguns pontos estão distantes do conjunto de dados, para descobrir quais são esses pontos foi feita a análise de “outliers” seguindo a metodologia proposta por Libardi (2006), o resultado está apresentado no gráfico da Figura 15.

Figura 15 – Análise de “outliers”. LIA (limite inferior aceitável); LSA (limite superior aceitável)

O desvio desses quatro pontos (4 repetições) é devido a pequena perda de carga que ocorre na vazão de aproximadamente $0,16 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, para o tubo emissor 9 que possui diâmetro interno de 17,12 mm e é não regulado. Como os valores encontrados foram bem próximos nas 4 repetições, indicando que não são erros de medição, não serão excluídos. O tubo emissor 12 que possui diâmetro interno 17,3 mm apresentou os valores de perda de carga das 4 repetições na vazão de aproximadamente $0,16 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ em cima da linha LIA (limite inferior aceitável).

Para a hipótese de homoscedasticidade dos resíduos foi construído o gráfico dos resíduos versus valor previsto da variável dependente, apresentado na Figura 16. Um gráfico apresentando pontos distribuídos aleatoriamente em torno de uma reta que passa na origem sem nenhum padrão definido, é um indicador favorável a verificação da hipótese.

Figura 16 - Resíduos versus valor previsto

Observando o gráfico da Figura 16 aceitamos a hipótese que o modelo é homocedástico, ou seja, os pontos apresentam dispersão totalmente aleatória em torno de uma reta horizontal que passa pela origem e sem nenhum padrão definido.

4.6.2 Validação do modelo

Utilizando a eq. (29) e a Tabela 3 para interpretação, propostas por Camargo e Sentelhas (1997), encontrou-se o valor de 99,25, classificado como ótimo.

4.7 Determinação da perda de carga utilizando os modelos propostos

Na Figura 17, são apresentados os gráficos, que comparam a perda de carga por espaçamento determinada pelos modelos propostos com a perda de carga observada no experimento.

Figura 17 – Comparação da perda de carga observada com a calculada pelos modelos

Quanto menor a vazão ou velocidade de escoamento, menor é o desvio entre valores estimados e medidos. Para os tubos emissores 3, 4 e 5 são observadas as maiores diferenças, entre valores estimados pelos dois modelos e observados nos ensaios. Esses desvios, estão relacionados com uma vazão que ocasiona velocidades de escoamento acima de $2,6 \text{ m s}^{-1}$ para os três tubos emissores, se diminuirmos a vazão até a velocidade aproximar de 2 m s^{-1} , o desvio diminui para um valor máximo de aproximadamente 10 cm por espaçamento entre emissores, para o tubo emissor 4. O modelo de regressão múltipla, apresentou um desvio acentuado no tubo emissor 11, o que não foi verificado com o modelo do teorema dos pi. No tubo emissor 12 apesar de visualizar desvio grande, as linhas horizontais do gráfico são distanciadas em 5 cm.

4.8 Utilização dos modelos propostos no dimensionamento de linhas laterais

Os dois modelos propostos consideram o cálculo da perda em um espaçamento entre emissores com a linha lateral em nível e com os emissores vedados. Ambos os modelos são válidos para tubos emissores, com emissores integrados do tipo “bóbi” dentro dos seguintes limites:

$$3796 \leq R_e \leq 50993;$$

$$0,2 \leq S_e \leq 0,98 \text{ m};$$

$$13,49 \leq D_t \leq 17,30 \text{ mm};$$

$$0,18 \leq V_t \leq 2,8 \text{ m s}^{-1};$$

$$105 \leq A_{e_m} \leq 198 \text{ mm}^2;$$

A única variável necessária para a utilização dos modelos, que não está disponível nos catálogos dos fabricantes é a A_{e_m} , que pode ser facilmente determinada, utilizando a

metodologia proposta neste trabalho. Abaixo está apresentado um exemplo de dimensionamento de linha lateral usando os modelos desenvolvidos.

O critério utilizado nos cálculos, será a variação de vazão máxima de 5% na linha lateral. Para emissores não regulados será adotada a pressão na entrada da linha lateral ($P_{\text{máx}}$) de 120 KPa, para emissores regulados 200 KPa. Outro critério adotado será que a velocidade de escoamento não ultrapasse $1,5 \text{ m s}^{-1}$ e para emissores regulados será considerada uma perda de carga admissível (hf_{adm}) de 100 KPa. Abaixo serão apresentados exemplos de cálculos para linhas laterais em nível.

Exemplo de cálculo para o tubo emissor 10 (não regulado):

Na tabela 4 obtém-se a equação do emissor: $q = 0,132 P^{0,520}$;

$$\frac{q_{\text{máx}}}{q_{\text{min}}} = 1,05 \quad \frac{P_{\text{máx}}}{P_{\text{min}}} = (1,05)^{\frac{1}{0,52}} \quad \frac{120}{P_{\text{min}}} = (1,05)^{\frac{1}{0,52}} \quad P_{\text{min}} = 109,25 \text{ KPa}$$

A hf_{adm} na linha lateral é igual a variação de pressão (ΔP), expressa por:

$$hf_{\text{adm}} = \Delta P = P_{\text{máx}} - P_{\text{min}} = 120 - 109,25 \text{ KPa} \quad hf_{\text{adm}} = 10,75 \text{ KPa}$$

P_{min} será a pressão no último emissor, substituindo as pressões máxima e mínima, na equação do emissor encontram-se as vazões do primeiro e último emissor da linha lateral, como segue:

$$\begin{aligned} q_{\text{máx}} &= 0,132 \cdot (120)^{0,520} & q_{\text{máx}} &= 1,591 \text{ l h}^{-1} \\ q_{\text{min}} &= 0,132 \cdot (109,25)^{0,520} & q_{\text{min}} &= 1,516 \text{ l h}^{-1} \end{aligned}$$

O comprimento máximo da lateral será calculado pela metodologia trecho a trecho, começando no último emissor. Cada trecho é um espaçamento entre emissores (S_e). Na Tabela 7 observa-se que para o tubo emissor 10, $S_e = 0,6 \text{ m}$. A perda de carga no trecho (hf_{se}) será calculada pela equação Universal [eq. (7)], o fator de atrito pela eq. (9) quando $Re \leq 3000$ e pela eq. (12) quando $Re \geq 3000$. Na Tabela 14, são apresentados os resultados, da equação que não considera a perda localizada de carga. O critério de parada, é atingir a pressão máxima de 120 KPa, ou a hf_{se} acumulada = $hf_{\text{adm}} = 10,75 \text{ KPa} = 1,096 \text{ m}$.

Tabela 14 - Cálculo do comprimento máximo desconsiderando as perdas localizadas de carga

Trecho	P (Kpa)	q (l h ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	Re	f	hf _{se} (m)	hf _{se} acumulada
1	109,253	1,516	0,002	33,867	1,890	0,0000176	0,0000176
2	109,253	3,031	0,004	67,734	0,945	0,0000351	0,0000527
3	109,253	4,547	0,007	101,601	0,630	0,0000527	0,0001054
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
211	119,699	323,798	0,466	7235,875	0,034	0,0145440	1,0793860
212	119,842	325,388	0,469	7271,411	0,034	0,0146692	1,0940552
213	119,985	326,979	0,471	7306,969	0,034	0,0147950	1,1088502

O comprimento máximo ($L_{\text{máx}}$) é o número de trechos multiplicados pelo espaçamento (S_e) = $213.0,6 = 128$ m.

Para utilizar os modelos desenvolvidos por regressão linear múltipla [eq.(32)] e análise dimensional [eq.(34)] respectivamente, precisa-se respeitar os limites, um deles a velocidade mínima de $0,18 \text{ m s}^{-1}$, nos trechos em que a velocidade ficar abaixo desse valor, serão realizados os cálculos da forma apresentada acima, a partir desse valor serão utilizadas as equações desenvolvidas. Na Tabela 15 são apresentados, os resultados dos cálculos utilizando o modelo de regressão linear múltipla e na Tabela 16 o modelo de análise dimensional.

Tabela 15 – Cálculo do comprimento máximo usando o modelo de regressão linear múltipla

Trecho	P (Kpa)	q (l h ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	Re	hf _{se} (m)	hf _{se} acumulada
1	109,253	1,516	0,002	33,867	0,00001757	0,0000176
2	109,253	3,031	0,004	67,734	0,00003515	0,0000527
3	109,253	4,547	0,007	101,601	0,00005272	0,0001054
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
214	119,624	328,423	0,473	7339,241	0,01420846	1,0714471
215	119,764	330,013	0,475	7374,765	0,01433142	1,0857785
216	119,904	331,604	0,478	7410,311	0,01445491	1,1002334

$L_{\text{máx}} = 216.0,6 = 130$ m.

Tabela 16 - Cálculo do comprimento máximo usando o modelo de análise dimensional

Trecho	P (Kpa)	q (l h ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	Re	hf _{se} (m)	hf _{se} acumulada
1	109,253	1,516	0,002	33,867	0,00001757	0,0000176
2	109,253	3,031	0,004	67,734	0,00003515	0,0000527
3	109,253	4,547	0,007	101,601	0,00005272	0,0001054
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
212	119,625	325,321	0,469	7269,924	0,01452257	1,0718539
213	119,768	326,911	0,471	7305,449	0,01465198	1,0865059
214	119,911	328,502	0,473	7340,995	0,01478199	1,1012879

$L_{\text{máx}} = 214.0,6 = 128$ m.

Os valores de $L_{\text{máx}}$ calculados pelas equações desenvolvidas e pela equação que não considera as perdas localizadas de carga, apresentaram valores próximos. Isso é devido ao diâmetro interno do tubo ser 15,67 e pela baixa vazão dos emissores. Na figura 11, observa-se que a perda de carga unitária no tubo e no tubo com emissores para a vazão de 330 l h^{-1} , não apresentam diferença.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados dos cálculos para todos os 12 tubos emissores.

Tabela 17 - Comprimento máximo da linha lateral em nível

Tubo	a		b		c	
emissor	hf_{adm} (m)	$L_{m\acute{a}x}$ (m)	$L_{m\acute{a}x}$ (m)	$\Delta L_{m\acute{a}x}$ (b-a)	$L_{m\acute{a}x}$ (m)	$\Delta L_{m\acute{a}x}$ (c-a)
1	10,2	208	180	-28	179	-29
2	10,2	211	175	-36	179	-32
3	10,2	158	136	-22	136	-22
4	10,2	154	124	-30	130	-24
5	0,92	122	105	-17	106	-16
6	10,2	183	164	-19	156	-27
7	10,2	260	226	-34	224	-36
8	10,2	212	183	-29	181	-31
9	1,14	91	76	-15	79	-12
10	1,1	128	130	2	128	0
11	10,2	159	162	3	136	-23
12	10,2	303	248	-55	257	-46

$L_{m\acute{a}x}$ =comprimento máximo da linha lateral; hf_{adm} = perda de carga admissível; a=cálculo sem considerar a perda localizada de carga; b=cálculo usando análise dimensional; c=cálculo usando regressão linear múltipla.

5 CONCLUSÕES

Os dois modelos desenvolvidos apresentaram ótimo ajuste aos dados observados em laboratório, de acordo com a metodologia proposta por Camargo e Sentelhas (1997) e podem ser utilizados para o cálculo do comprimento máximo de linhas laterais, para tubos emissores com características, dentro dos limites indicados. Ambos são de fácil uso. O modelo determinado a partir da análise dimensional, além das perdas de carga, considera a dilatação que o tubo emissor sofre com a pressão.

REFERÊNCIAS

AL-AMOUD, A.I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of Agriculture Engineering Research**, Silsoe, v. 60, n. 1, p. 1-5, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14653-2**: avaliação de bens - parte 2 - imóveis urbanos. Rio de Janeiro, 2004. 34 p.

_____. **NBR 11795**: tubos de polietileno para sistemas de irrigação localizada. Rio de Janeiro, 2005. 7 p.

_____. **NBR ISO 9261**: equipamentos de irrigação agrícola - emissores e tubos emissores - especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 17 p.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNADEZ Y FERNADEZ, M.; ARAUJO, R. de; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 670 p.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 1, p. 1-7, 1997.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625 p.

CAMARGO, A.P; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARDOSO, G.G.G. **Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros**. 2007. 64 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

DEMIR, V.; YURDEM, H.; DEGIRMENCIOGLU, A. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals. **Biosystems Engineering**, Silsoe, v. 96, n. 4, p. 617-631, 2007.

GOMES, A. W.A. **Perda de carga localizada em emissores integrados em tubos de polietileno**. 2009. 61 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GOMES, A. W.A.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; MIRANDA, J.H. Perda de carga localizada em emissores integrados em tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 435-446, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

- KELLER, J.; KARMEI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, ST. Joseph, v. 17, n. 4, p. 878-880, 1974.
- LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 1-12, 1996.
- NAGUETTINI, M.; PINTO, E. J de. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 600 p.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: USP, EESC, 2006. 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.
- RETTORE NETO, O. **Modelo para determinação da perda de carga em tubos elásticos**. 2011. 95 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, A.J.; 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.
- ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 86, n. 3, p. 369-374, 2002.
- SONNAD, J. R.; GOUDAR, C. T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. **Journal of Hydraulics Engineering**, New York, v. 132, n. 8, p. 863-867, 2006.
- 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.
- YOO, H. H.; SINGH, V. P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. **Journal of Hydraulics Engineering**, New York, v. 131, n. 8, p. 694-704, 2005.
- ZITTERELL, D.B. **Perda de carga localizada em conectores utilizados em microirrigação**. 2011. 65 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- ZITTERELL, D.B.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; ULLMANN, M.N. Perda de carga em microtubos e conectores utilizados em microaspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 591-604, 2009.