

Universidade de São Paulo

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas – LEB

0111000 - Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Agrônômica

Caracterização hidráulica de tubos de polietileno para irrigação perfurados a laser

Verônica Gaspar Martins

Monografia apresentada à Escola Superior de Agricultura
“Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP como parte das
exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Agrônômica – Área de concentração: Irrigação
e Drenagem.

Piracicaba

2017

Verônica Gaspar Martins
Graduanda em Engenharia Agrônômica

Caracterização hidráulica de tubos de polietileno para irrigação perfurados a laser

Orientador:

Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE

Monografia apresentada à Escola Superior de Agricultura
“Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP como parte das
exigências para a obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Agrônômica – Área de concentração: Irrigação
e Drenagem.

Piracicaba

2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho,

Aos meus pais Eleuse Maria Gaspar Martins e Itamar Garcia Martins, por em grande parte, terem me tornado a pessoa que sou hoje.

Ao meu marido Leonardo Leite de Melo, por todo carinho, suporte e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

A meus avós Neusa Garcia e Osmar Garcia.

A memóra de meus avós Cristina Gaspar e Antônio Gaspar.

A minha segunda família, Maria tereza Souto Leite de Melo, Moacyr Leite de Melo e Andressa Leite de Melo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Antônio Frizzzone pela confiança depositada a mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser essencial em minha vida, pela força e saúde que Ele me proporcionou.

Ao professor Dr. José Antônio Frizzzone, meu orientador de IC, TCC e futuro orientador de Mestrado, pela confiança depositada a mim, aos ensinamentos dados, estes tanto no âmbito científico, pessoal e emocional.

A minha família: Leonardo, Itamar, Eleuse, Andessa, Maria Tereza, Nelsa e Moacyr pelo apoio em minhas escolhas.

Aos meus amigos e colegas do laboratório: Wagner, Rogério, Marcus, Luiz, Fabrício, Ana e em especial Antônio Pires de Camargo por todo apoio, suporte e ensinamentos durante a realização deste trabalho.

Ao meu amigo Alex Nunes por todo suporte durante e após a realização deste trabalho.

A professora Dra. Patrícia Marques, docente competente e dedicada ao desenvolvimento das competências e habilidades inerentes à elaboração deste trabalho. Aos amigos Maria, Asdrubal, Timóteo e Otávio, pelo apoio e companheirismo.

A Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, pela oportunidade de realização deste curso de graduação.

E por fim, a todos que, de alguma forma contribuíram para que eu pudesse desenvolver o presente trabalho, e que não foram explicitados neste momento, contudo, implicitamente fazem parte desta conquista.

EPÍGRAFE

“ O conhecimento é a base do desenvolvimento social e econômico de uma nação ”

José Antônio Frizzone

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVA.....	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1	DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA VAZÃO-PRESSÃO E DO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE FABRICAÇÃO (<i>CVf</i>).....	26
4.2	DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA	29
4.3	FATOR DE REDUÇÃO DE PERDA DE CARGA (<i>F</i>) NO TUBO COM MÚLTIPLAS SAÍDAS LATERAIS	32
4.4	COMPRIMENTO MÁXIMO DE LINHAS LATERAIS EM NÍVEL COM CRITÉRIO DE VARIAÇÃO MÁXIMA DE VAZÃO DOS EMISSORES	33
4.5	COMPRIMENTO MÁXIMO DE LINHA LATERAL EM NÍVEL ADMITIDO PARA OS TUBOS PERFURADOS COM CRITÉRIOS ESTABELECIDOS DE PERDA DE CARGA, PRESSÃO DE ENTRADA E LARGURA DA FAIXA MOLHADA. 38	
4.5.1	<i>Critério para dimensionamento do comprimento máximo de linhas laterais</i>	<i>38</i>
4.5.2	<i>Critério de dimensionamento do comprimento máximo baseado na variação admissível de largura da faixa molhada</i>	<i>38</i>
4.6	DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA VAZÃO-PRESSÃO DOS EMISSORES DO TUBO PERFURADO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DE VAZÃO POR EFEITOS DE FABRICAÇÃO (<i>CVf</i>)	42
5.2	PERFIL MÉDIO DA PRECIPITAÇÃO E UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO	45
5.3	EQUAÇÃO DE PERDA DE CARGA DO TUBO PERFURADO	47
5.4	PERDA DE CARGA EM FUNÇÃO DA VAZÃO E DO DIÂMETRO EQUIVALENTE.....	49
5.5	FATOR DE REDUÇÃO DE PERDA DE CARGA (<i>F</i>) NO TUBO COM MÚLTIPLAS SAÍDAS LATERAIS	54
5.6	COMPRIMENTO MÁXIMO DE LINHA LATERAL EM NÍVEL, CONSIDERANDO O CRITÉRIO DA VARIAÇÃO DE VAZÃO DOS EMISSORES	57
5.7	COMPRIMENTO MÁXIMO DA LINHA LATERAL COM CRITÉRIOS DE PERDA DE CARGA, PRESSÃO DE ENTRADA E RELAÇÃO VAZÃO-PRESSÃO LINEAR, PARA O MODELO SANTENO I.....	58
5.8	COMPRIMENTO MÁXIMO DA LINHA LATERAL COM CRITÉRIOS DE PERDA DE CARGA, RELAÇÃO VAZÃO-PRESSÃO LINEAR E LARGURA DA FAIXA MOLHADA PARA O MODELO SANTENO II.....	60
6	CONCLUSÕES	61
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	APÊNDICE.....	67

RESUMO

Caracterização hidráulica de tubos de polietileno para irrigação perfurados a laser

O uso de tubos de polietileno com orifícios de descarga perfurados a laser é comum na microirrigação, especialmente em cenários nos quais se buscam baixos custos fixos e operacionais. Esse material pode ser classificado como um sistema de aspersão que apresenta linhas laterais de polietileno em forma de fitas colapsáveis, com orifícios aptos a operar sob baixa pressão (até 100 kPa). Assim, como qualquer outro material de irrigação, é essencial que haja caracterização operacional dos tubos perfurados a laser para que se obtenham as informações requeridas no projeto e operação desses sistemas de irrigação. Esse trabalho tem como objetivo determinar as características hidráulicas dos tubos flexíveis perfurados a laser Santeno I e II® fabricados no Brasil. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/ESALQ), determinando-se a relação vazão-pressão, o coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação (CVFq), a uniformidade de distribuição, a perda de carga na tubulação em função da vazão e do diâmetro equivalente. Determinaram-se os comprimentos máximos de linha lateral em nível para os tubos perfurados de acordo com critérios estabelecidos de perda de carga, pressão de entrada, largura da faixa molhada e variação de vazão dos emissores. Também foi determinado o fator de redução de perda de carga (F) em função no número de saídas laterais (N).

Palavras-chave: aspersão, fita Santeno, perda de carga, relação vazão-pressão, coeficiente de variação de fabricação, comprimento máximo

ABSTRACT

Hydraulic characterization of polyethylene laser perforated tapes for irrigation

The use of polyethylene tapes with laser perforated discharge orifices is common in irrigation, especially in low-cost applications. This type of pipe consists of low cost laterals equipped with orifices able to operate under low pressure (up to 100 kPa). Just like other irrigation equipment, the polyethylene laser perforated tapes must be assessed to obtain its operational characteristics. Such information is required for design and operation of these irrigation systems. The purpose of this work was to determine the hydraulic characteristics of the polyethylene laser perforated tapes named as Santeno I e II®. Tests were carried out in the Laboratory of Tests of Irrigation Material (LEMI/ESALQ), determining the relation pressure-discharge, coefficient of variation of flow rate due to manufacturing effects (CV_f), distribution uniformity, the head loss in the pipe according to the discharge and equivalent diameter. The maximum lateral line lengths criteria of head loss, inlet pressure, wet strip width and emitter discharge variation. The head loss reduction factor (F) was also determined as a function of the number of lateral outputs (N).

Keywords: sprinkler, Santeno pipe, head loss, relation pressure-discharge, coefficient of variation of flow rate due to manufacturing effects, maximum lateral line

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema da estrutura utilizada nos ensaios para obtenção da equação vazão-pressão e CV_f (coeficiente de variação por efeitos de fabricação)..... 28
- Figura 2: Ilustração da estrutura do ensaio de perda de carga: (1) reservatório de água; (2) bomba; (3) registro agulha; (4) medidor eletromagnético de vazão; (5) e (6) sensores de pressão; (7a) e (7b) tomadas de pressão; (8) segmento de 40 m de tubo Santeno; (9) registro de gaveta..... 30
- Figura 3: Fluxograma do Programa de computador utilizado para calcular o fator de redução de perda de carga (F), em função do número de emissores (N), em que: Se : espaçamento entre emissores (m); K e x : coeficientes da equação experimental vazão-pressão; β e c : coeficientes da equação experimental de perda total de carga; H_0 : pressão de entrada na linha lateral (mca)..... 33
- Figura 4: Fluxograma do programa de computador utilizado para cálculo do comprimento máximo da linha lateral e uniformidade de emissão, sendo: Se : Espaçamento entre emissores em metros; k e x : coeficientes da equação experimental vazão-pressão, adimensional; K_2 : coeficiente da equação de perda de carga na tubulação com múltiplas saídas laterais, adimensional; c e d : coeficientes da equação do diâmetro em função de H_0 , adimensional; n : número de orifícios por ponto de emissão; H_0 : pressão na entrada da linha, mca; $qvar$: variação de vazão dos emissores, adimensional; $Hvar$: variação da carga de pressão, adimensional; $Hfadm$: perda de carga admissível, mca; H_m : carga média de pressão, mca; CV_f : coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação, adimensional; $L_{máx}$: comprimento máximo da linha lateral, m; e UE : uniformidade de emissão, adimensional..... 37
- Figura 5: Largura da faixa molhada em função da pressão para o modelo I (A) e modelo II (B) encontrados nesta pesquisa. 39
- Figura 6: Representação da estrutura utilizada para o ensaio de distribuição de precipitação, sendo: C - os coletores; F - cap rosquiável; M - tudo ensaiado; P - tomada de pressão para controle da mesma; U - união e R - registro de entrada..... 41
- Figura 7: Curvas vazão-pressão dos emissores ajustadas pelo modelo potencial: (A) Santeno I; (B) Santeno II..... 43
- Figura 8: Curvas vazão-pressão dos emissores ajustadas pelo modelo: (A) Santeno I; (B) Santeno II..... 44

Figura 9: Coeficientes de variação de vazão por efeitos de fabricação (CV_f) em cada pressão ensaiada no tubo perfurado Santeno I.	44
Figura 10: Coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação (CV_f) em cada carga de pressão ensaiada no tubo perfurado Santeno II	45
Figura 11: Perfis de distribuição da precipitação em função da distância em relação ao tubo em todas as pressões ensaiadas para o modelo I.	46
Figura 12: Perfis de distribuição da precipitação em função da distância em todas as pressões ensaiadas para o modelo II.	47
Figura 13: Perda de carga unitária ($m\ m^{-1}$) em função da vazão ($m^3\ s^{-1}$) para o modelo I.	48
Figura 14: Perda de carga unitária ($m\ m^{-1}$) em função da vazão ($m^3\ s^{-1}$) para o modelo II.	49
Figura 15: Gráfico perda de carga unitária em função da vazão e da pressão de operação para o modelo I (B) e modelo II (A).	50
Figura 16: Diâmetro interno médio equivalente em função da pressão de entrada, (A) modelo I e (B) modelo II.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vazão média ($L h^{-1}$) para emissores do tubo perfurado Santeno I, a diferentes cargas de pressão e respectivos coeficientes de variação.....	42
Tabela 2: Vazão média ($L h^{-1}$) para emissores do tubo perfurado Santeno II, a diferentes cargas de pressão e respectivos coeficientes de variação.....	42
Tabela 3: Equações de perda de carga unitária ($m m^{-1}$) em função da carga de pressão de operação (mca) para o tubo Santeno I.....	48
Tabela 4: Equações de perda de carga unitária ($m m^{-1}$) em função da pressão de operação (mca) para o tubo Santeno II	49
Tabela 5: Valores de diâmetro médio equivalente para a pressão de operação para o modelo I e II.....	52
Tabela 6: Valores de F para o tubo Santeno I, com emissores espaçados de 0,15 m, em função do número de pares de saídas (N)	55
Tabela 7: Valores de F para o tubo Santeno II, com emissores espaçados de 0,15 m, em função do número de pares saídas (N)	56
Tabela 8: Comprimento máximo de linhas laterais (m) em função da pressão de entrada (m) e da variação de vazão dos emissores para o tubo Santeno I.....	57
Tabela 9: Comprimento máximo de linhas laterais (m) em função da pressão de entrada (m) e da variação de vazão dos emissores para o tubo Santeno II	57

LISTA DE SÍMBOLOS

ε :	altura média das paredes do tubo (adimensional);
q_m :	média da vazão dos emissores a pressão de referência ($L\ h^{-1}$);
β :	coeficiente combinado de unidades e de rugosidade para um tubo particular (adimensional);
b :	coeficiente que expressa o efeito da pressão de entrada na variação do diâmetro interno do tubo;
r :	razão entre a distância da primeira saída ao início da tubulação (adimensional);
c :	coeficiente da equação do diâmetro em função de H_0 ;
d :	coeficiente da equação do diâmetro em função de H_0 ;
n :	número de orifícios por ponto de emissão;
CV_f :	coeficiente de variação de vazão por defeitos de fabricação (%);
D :	diâmetro interno do tubo (m);
f :	fator de atrito (adimensional);
F :	fator de redução de perda de carga (adimensional);
F_a :	Fator ajustado de redução de perda de carga (adimensional);
H :	carga de pressão (mca);
H_0 :	pressão na entrada da linha lateral (mca);
Hf_{adm} :	perda de carga admissível (mca);
Hf :	perda de carga em toda extensão da tubulação com múltiplas saídas (m);
HF :	perda de carga em toda extensão da tubulação sem múltiplas saídas (m);
Hf_{adm} :	perda de carga admissível na lateral (mca);
$H_{máx}$:	carga máxima de pressão de operação do emissor na lateral (mca);
H_m :	carga média de pressão na lateral (mca);
H_{min} :	carga mínima de pressão de operação do emissor na lateral (mca);
H_{var} :	variação da carga de pressão (adimensional);
H_i :	carga de pressão no início da lateral (mca);
H_u :	carga de pressão no final da lateral (mca).
i :	identificador que identifica cada seção, iniciando na seção mais distante ($i=1$) e aumentando até N na seção de montante;
J :	perda de carga unitária no tubo, ($m\ m^{-1}$);

K :	coeficiente de proporcionalidade característico do emissor, (adimensional);
K_1 :	constante de regressão que depende do tubo estudado (utilizado na equação de perda de carga sem múltiplas saídas) (adimensional);
K_2 :	constante de regressão que depende do tubo estudado (utilizado na equação de perda de carga com múltiplas saídas laterais (adimensional);
L :	comprimento da tubulação (m);
$L_{máx}$:	comprimento máximo da linha lateral (m);
m :	constante de regressão que depende do regime de fluxo (adimensional);
N :	número de saídas laterais ao longo da tubulação;
n :	número de orifícios por ponto de emissão (adimensional);
q :	vazão do emissor ($L\ h^{-1}$);
Q :	vazão que escoar na tubulação ($m^3\ h^{-1}$);
Q_i :	vazão que escoar na seção i (m^3h^{-1});
q :	vazão de um par de orifícios ($L\ h^{-1}$)
$q_{máx}$:	vazão do emissor que opera à carga de pressão máxima ($L\ h^{-1}$);
q_{min} :	vazão do emissor que opera à carga de pressão mínima ($L\ h^{-1}$);
$qvar$:	variação de vazão dos emissores definida como critério do projeto (adimensional);
Re :	número de Reynolds (adimensional);
s :	desvio padrão da vazão a uma pressão de referência (adimensional);
Se :	espaçamento entre saídas laterais (m);
V :	velocidade média de escoamento do fluido ($m\ s^{-1}$);
W_f :	Largura da faixa molhada para a pressão no início da linha (m);
W_i :	Largura da faixa molhada para a pressão no final da linha (m);
x :	expoente de fluxo (adimensional);
ν :	viscosidade cinemática da água ($m^2\ s^{-1}$);
$\rho(T)$:	massa específica da água para temperaturas entre 0 e 40°C;
T :	temperatura da água (°C);
UE :	uniformidade de emissão (adimensional);
ΔW_{adm} :	variação admissível de largura molhada (m);

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, de acordo com o Atlas Irrigação publicado pela Agência Nacional de Água (ANA, 2017), no Brasil existem aproximadamente 6,95 milhões de hectares equipados para irrigação, apresentando potencial de expansão da área irrigada de 76,2 milhões de hectares até o ano de 2030.

Os sistemas de irrigação exigem considerável quantia de energia e água para operação e com o aumento da área irrigada e dos custos fixos e variáveis da irrigação, surgiu a necessidade do desenvolvimento de sistemas de irrigação simples, de menor custo, que gastem menos energia e que possam ser comercializados individualmente (ANDRADE, 1990).

A utilização da microirrigação vem crescendo em um ritmo acelerado em todo o mundo, destacando-se pela ocupação de áreas anteriormente irrigadas por sistemas de irrigação por superfície. O desenvolvimento tecnológico na área da microirrigação tem papel fundamental devido ao aumento da demanda produtiva, competitividade dos setores de produção, limitação de recursos hídricos e pela constante necessidade de minimizar impactos ambientais (FRIZZONE et al., 2012).

A microirrigação possui vantagens, como aumento da produtividade da água (kg m^{-3}), do rendimento (kg ha^{-1}), e da qualidade do produto, melhoria da gestão de nutrientes e diminuição de requerimentos energéticos (AYARS et al. 2007; SADEGHI e PETERS 2014a, b).

Contudo, o desempenho desses sistemas, depende de um projeto hidráulico em que o objetivo seja minimizar a variação de vazão dos emissores ao longo da linha lateral, e possibilitar o aumento da uniformidade de aplicação de água, com redução dos custos de operação do sistema e aumento da eficiência produtiva (CLARK et al. 2005).

De acordo com Scaloppi (1985), a quantidade de energia demandada para transportar água do local de captação até a área a ser irrigada é um fator variável nos sistemas de produção agrícola. O consumo total de energia depende da quantidade de água a ser aplicada, da energia hidráulica exigida pelo sistema de irrigação e da eficiência total do sistema de bombeamento. Ainda, de acordo com o autor, as maiores consequências advindas do avanço tecnológico aplicado aos sistemas de aspersão estão voltadas à redução da pressão de operação, no aumento da uniformidade de distribuição de água e na possibilidade de automação dos sistemas, existindo atualmente uma forte tendência para redução da pressão de operação dos aspersores, com a finalidade de redução do consumo de energia.

O estudo da eficiência no manejo da irrigação deve priorizar a redução de custos ao produtor e o retorno econômico ao irrigante. Para tal, é imprescindível a criteriosa seleção do sistema de irrigação e seu manejo, visando redução de gastos com energia, água e simplificação do sistema para se obter a máxima produção econômica, principalmente em regiões onde se tem a disponibilidade hídrica como fator limitante (PAZ et al., 1997).

O sucesso da produção agrícola em áreas irrigadas depende, entre outros fatores, do desempenho e funcionamento eficientes do sistema de irrigação escolhido. Deve-se focar na diminuição do consumo de energia e na redução dos custos ao produtor, o que justifica a existência de forte tendência de redução da pressão de operação dos sistemas para diminuir o consumo de energia. Dentro desse contexto, com o intuito de reduzir o investimento de capital no sistema de irrigação, a utilização de tubos perfurados confeccionados com polietileno flexível contribui para a redução do custo, simplificação do sistema e menores gastos com energia, pelo fato de que os emissores são os próprios orifícios perfurados na parede do tubo (ANDRADE, 1990).

No sistema de tubos perfurados, a água é aspergida através de orifícios na forma de pequenas gotas, formando uma faixa molhada retangular, sendo que o sistema é composto basicamente por linhas laterais de polietileno flexível, operando em um intervalo de baixa pressão (2 a 10 mca), podendo-se, em alguns casos, dispensar o uso de bombeamento, reduzindo, assim, os custos operacionais. O funcionamento hidráulico dos tubos de polietileno perfurados assemelha-se a gotejadores tipo orifício, porém com a particularidade de que sua seção de saída aumenta com a pressão hidráulica exercida em seu interior, em função da elasticidade da parede do tubo. Em pressões muito baixas os emissores podem gotejar, porém, em pressões da ordem de 2 a 10 m.c.a as gotas convertem-se em pequeno jato contínuo (RODRIGO LÓPEZ et al., 1992). Segundo Bonono (1998), os tubos perfurados apresentam boa durabilidade e custo reduzido, podendo ser utilizados em microirrigação e aspersão, de acordo com a pressão utilizada.

A empresa Santeno Irrigações do Nordeste Ltda, utilizando-se de tecnologia japonesa da Sumitomo Chemical desenvolveu uma mangueira de polietileno linear flexível de baixa densidade, com matéria prima virgem, que possui microfuros feitos a raio laser, permitindo a emissão da água em jatos bem finos com pressão de serviço até 100 kPa. Apesar do custo dos tubos de polietileno perfurados a laser ser atrativo, é fundamental que esse material seja avaliado tecnicamente a fim de que seja validada sua aptidão para uso em sistemas de irrigação (PINTO et al., 2014).

A empresa japonesa Sumitomo Chemical pioneira na tecnologia, desenvolveu uma técnica de perfuração de orifícios muito finos com diâmetros de 0,15 a 0,3 mm com alta densidade (2 furos/15 cm), usando uma máquina especial a laser com sistema óptico. Segundo a empresa, o principal desafio na fabricação é a variação da espessura dos orifícios provenientes do processo de fabricação.

Para possibilitar a aplicação uniforme de água, com quantidade adequada e no momento certo, de maneira a reduzir os custos do equipamento e de energia, é necessário o conhecimento das características hidráulicas, e da uniformidade de distribuição de água do sistema, considerando-se que estes dados são fundamentais aos projetistas, visando excelência em desempenho e redução de custos operacionais. Diante desses fatos, os objetivos desse trabalho são:

- a) Determinar as características hidráulicas do tubo perfurado a laser flexível de polietileno Santeno I e II® fabricado no Brasil, estabelecendo a relação vazão-pressão e o coeficiente de variação de fabricação dos orifícios.
- b) Estudar as relações entre perda de carga no tubo e vazão em diferentes pressões de operação, e a perda de carga em função da vazão e do diâmetro equivalente.
- c) Estudar o fator de redução de perda de carga (F) no tubo, com múltiplas saídas laterais, em função do número de saídas (N).
- d) Determinar os perfis de distribuição de água, e alcance dos jatos de água.
- e) Determinar os comprimentos máximos admitidos para os tubos perfurados de acordo com critérios estabelecidos de perda de carga, pressão de entrada, largura da faixa molhada e da variação de vazão dos emissores.

2 JUSTIFICATIVA

A utilização de tubos de polietileno com orifícios de descarga perfurados a laser é comum na irrigação, especialmente em cenários nos quais se busca baixo custo. Esse material pode ser classificado como um sistema de aspersão, que apresenta linhas laterais de baixo custo, com

orifícios aptos a operar sob baixa pressão (2 a 10 mca). Assim como em qualquer outro material de irrigação, é essencial a caracterização operacional dos tubos perfurados a laser para que se obtenham informações requeridas no projeto e operação desses sistemas de irrigação, possibilitando o suporte técnico e científico adequado ao uso desses materiais no projeto de irrigação de forma a reduzir custos fixos e operacionais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A relação vazão-pressão, a perda de carga ao longo da linha lateral, o coeficiente de variação de fabricação e a uniformidade de distribuição constituem as características hidráulicas que influenciam diretamente no desempenho do sistema. Em função do tipo de material utilizado na confecção, do diâmetro do tubo, da espessura da parede e da geometria do emissor, torna-se relevante o estudo das características hidráulicas do tubo, visando fornecer elementos para o dimensionamento do projeto, assim como para a operação do sistema de irrigação (FRIZZONE, et al., 1998).

Solomon (1979), destaca a importância em se considerar a variação de vazão dos emissores em função da variação na fabricação. Segundo Botrel (1984), variações na geometria dos orifícios de saída da água provocam diferenças na vazão, possuindo em alguns casos, maior importância que as variações de vazão decorrentes das diferenças de pressão ao longo da linha lateral.

Considerando-se que as variações de vazão ocorridas em decorrência do processo produtivo possuem distribuição normal, é possível utilizar conceitos de estatística clássica para análises quantitativas (FRIZZONE et al., 1998). Solomon (1979), estudando as variações de fabricação de vários tipos emissores tipo orifício, classificou e atribuiu uma interpretação estatística ao coeficiente de variação de fabricação (CVf), relacionando o desvio padrão da vazão dos emissores com a vazão média das amostras submetidas a testes com pressão constante (Eq. 1). O autor destaca que o CVf é um importante parâmetro que influencia a uniformidade de emissão de água assim como a eficiência de aplicação de água pelo sistema.

$$CVf = \frac{s}{q_m} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

em que:

CVf : coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação (%);

s : desvio padrão da vazão a uma pressão de referência (adimensional), e;

q_m : média da vazão dos emissores à pressão de referência ($L\ h^{-1}$).

A ASABE (2008), pela norma EP405.1, apresenta a seguinte classificação:

$CVf \leq 0,10$	Uniformidade boa
$0,10 < CVf \leq 0,20$	Uniformidade média
$CVf > 0,20$	Uniformidade marginal a inaceitável

Segundo Von Bernuth e Solomon (1986), Abreu et al. (1987) e Keller e Bliesner (1990), a vazão de um emissor, em função da carga hidráulica, é caracterizada por uma função potencial do tipo: $q = k H^x$. A constante k refere-se aos fatores relacionados à fabricação do emissor; já o expoente de fluxo x descreve como a vazão varia com a pressão, e seu valor se encontra normalmente entre 0 e 1, dependendo do regime de escoamento. Frizzzone et al. (2012), afirma que o coeficiente k inclui características dimensionais do caminho de fluxo do emissor, e o expoente x é uma característica do emissor e mede a concavidade da curva vazão-pressão, caracterizando, assim, o regime de fluxo. Quando x é igual ou muito próximo de 1, esta relação é linear e o emissor é considerado de fluxo laminar; $x = 0,5$ caracteriza regime de fluxo turbulento e os emissores compensados de pressão possuem x tendendo a zero.

Geralmente, os projetistas do sistema de irrigação utilizam as equações de perda de carga existentes na literatura, considerando-se os diâmetros internos das tubulações informados pelos fabricantes. Devido ao fato desses tubos serem produzidos com materiais plásticos flexíveis, seus diâmetros podem ser alterados em decorrência das variações na pressão de operação. Essa alteração do diâmetro pode influenciar na perda de carga real, resultando em alterações nas condições hidráulicas projetadas (VILELA et al., 2003).

Ao avaliar as características hidráulicas de um tubo perfurado de polietileno com espessura de parede de 200 μ m, Andrade (1990), verificou que para um acréscimo de pressão de 90% na faixa de operação recomendada pelo fabricante, ocorreu um aumento de 10,67% no diâmetro interno do tubo. O mesmo foi constatado por Frizzzone et al. (1998), porém trabalhando com o tubo gotejador Rain-Tape com paredes de 225 μ m de espessura.

Define-se perda de carga como a dissipação de energia da água em forma de calor ao longo das tubulações. Frizzzone et al. (2012), comenta que a perda de carga se deve à viscosidade do fluido e seus efeitos que representam uma resistência ao escoamento. No regime laminar, a resistência ao escoamento deve-se inteiramente a viscosidade; já no regime turbulento a resistência ao escoamento é o resultado do efeito combinado das forças devidas à viscosidade e à inércia, neste caso, a distribuição de velocidades na canalização depende da turbulência, maior ou menor, influenciada pelas condições das paredes.

Os regimes de escoamento dependem basicamente do número de Reynolds (Eq. 2), que é função da viscosidade cinemática do fluido, do diâmetro do tubo e da velocidade média do escoamento.

$$Re = \frac{V D}{\nu} \quad \text{Eq. 2}$$

em que:

Re : número de Reynolds (adimensional);

V : velocidade média de escoamento do fluido (m s^{-1});

D : diâmetro interno do tubo (m);

ν : viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

A resistência hidráulica ao escoamento, expressa por um fator de atrito (f), constitui informação básica necessária ao projetista. Desde as contribuições de Weisbach, em 1845, de Darcy, em 1857, de Boussinesq, em 1877, e de Reynolds em 1895, (ambos citados no trabalho de Yoo e Singh, 2005), a resistência ao escoamento tem sido objeto de muitas investigações científicas. Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito (f) é essencial para o cálculo da perda de carga em tubulações. Para escoamento laminar ($Re < 2000$), o cálculo do fator de atrito é feito pela equação de Hagen-Poiseulli ($f = 64/Re$), sendo apenas função do número de Reynolds. Para escoamento turbulento, permanente e uniforme, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois que f é uma função da rugosidade relativa das paredes do tubo (ε/D), sendo ε a altura média das rugosidades das paredes do tubo, e do número de Reynolds (ROMEO et al., 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para o escoamento turbulento hidraulicamente liso e $4000 \leq Re \leq 10^5$, o fator de atrito pode ser estimado pela equação de Blasius (von BERNUTH, 1990), que é função somente do número de Reynolds (Eq. 3).

$$f = 0,3164 Re^{-0,25} = 0,3164 \left(\frac{4 Q}{v \pi D} \right)^{-0,25} \quad \text{Eq. 3}$$

sendo Q a vazão que escoar na tubulação ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); D o diâmetro interno do tubo (m); v a viscosidade cinemática da água ($1,004 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ à 20°C) e $\pi = 3,1416$.

Inúmeros autores propuseram alternativas empíricas para solucionar o fator f para tubos de polietileno flexíveis, utilizando equações do tipo potência semelhantes a de Blasius (von BERNUTH; WILSON, 1989; BAGARELLO et al, 1995; CARDOSO et al., 2008), encontrando coeficientes muito próximos àqueles propostos por Blasius (Eq. 3).

Segundo von Bernuth (1990), a equação de Blasius é válida para tubos hidraulicamente lisos desde que Re não ultrapasse 100.000. Quando o Re é superior a 100.000, a precisão é reduzida, pois o fator de atrito se aproxima de zero, e quando Re é menor que 4000, em regimes laminares ou zonas de transição, a equação de Blasius superestima o fator de atrito.

Von Bernuth (1990), comenta que 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 e para $4000 \leq Re \leq 10^5$. O autor afirma ainda, que a combinação destas duas equações resulta em uma equação dimensionalmente homogênea (ambas possuem fundamentação teórica), exata para tubos plásticos quando $Re \leq 10^5$ e adequada para tubos de pequenos diâmetros.

Em tubulações com múltiplas saídas laterais, com comprimento L e diâmetro interno D , apresentando saídas laterais igualmente espaçadas, como ocorre com frequência em linhas laterais de irrigação por aspersão, microirrigação e em linhas de derivação fechadas no final, o escoamento de água é permanente e espacialmente variado. Neste caso a perda de carga (hf) é menor do que a perda de carga que ocorre em uma tubulação semelhante conduzindo vazão constante ao longo de todo seu comprimento (Hf). A perda de carga na tubulação com múltiplas saídas laterais (hf) pode ser expressa como uma fração (F) da perda total de carga Hf , (Eq. 4):

$$hf = F Hf \quad \text{Eq. 4}$$

Inúmeras equações empíricas podem ser utilizadas para estimar a perda de carga em escoamentos turbulentos uniformes em tubulações; entretanto, uma limitação significativa

dessas equações empíricas é que se assume um fator de atrito constante para todos os diâmetros e velocidades de escoamento. Em função desta limitação, a perda de carga calculada pelas equações empíricas pode diferir significativamente daquela calculada pela equação de Darcy-Weisbach (Eq. 5), que é uma das mais completas para o cálculo da perda de carga em tubulações (ZITTERELL, 2009):

$$Hf = 8,2652 \times 10^{-2} f L \frac{Q^2}{D^5} \quad \text{Eq. 5}$$

em que:

Hf : perda de carga em toda extensão da tubulação, (m);

f : fator de atrito, que depende do material e do regime de escoamento, (adimensional);

L : comprimento da tubulação, (m);

D : diâmetro interno do tubo, (m); e,

Q : vazão que escoar na tubulação ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)

De acordo com a Eq. 5, a perda de carga é inversamente proporcional à quinta potência do diâmetro da tubulação, e diretamente proporcional à segunda potência da vazão. Assim, os acréscimos de diâmetro ocasionados pelo aumento da pressão, observados por Andrade (1990), reduziram a perda de carga em até 60,24%, o que poderia alterar sensivelmente as condições hidráulicas de um projeto de irrigação (VILELA, 2003). Diante do exposto, é fundamental a determinação da perda de carga em tubulações, posto que afeta o custo total e o balanço hidráulico do sistema. O diâmetro dos tubos depende da magnitude da perda de carga admissível no sistema pelo projetista. O custo operacional é afetado inversamente pelo diâmetro do tubo, vale afirmar que, aumentando-se o diâmetro para uma dada vazão, a perda de carga por unidade de comprimento diminui, reduzindo a energia de bombeamento (CARDOSO et al., 2008).

Christiansen (1942), trabalhando com irrigação por aspersão, desenvolveu o conceito do fator de redução de perda de carga F que contabiliza o efeito da redução de vazão ao longo do comprimento de uma tubulação com múltiplas saídas laterais, igualmente espaçadas, descarregando vazão constante q , e com vazão nula em seu final (Eq. 6):

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \quad \text{Eq. 6}$$

sendo, neste caso, N igual ao número de saídas laterais e m o expoente da vazão ou da velocidade na equação de perda de carga.

O fator F proposto por Christiansen, foi derivado, assumindo que a primeira saída lateral está localizada a uma distância do início da tubulação igual ao espaçamento das demais saídas, portanto, o comprimento total da tubulação com múltiplas saídas igualmente espaçadas pode ser determinado pela Eq. 7, e o comprimento total da tubulação pode ser dividido em N segmentos ($i=1....N$) de comprimento Se ; assim em cada segmento i a vazão que escoar Q_i pode ser calculada pela Eq. 8.

$$L = N Se \quad \text{Eq. 7}$$

em que:

L : comprimento da tubulação (m);

N : número de saídas laterais ao longo da tubulação;

Se : espaçamento entre saídas laterais (m).

$$Q_i = i q = i \frac{Q}{N} \quad \text{Eq. 8}$$

em que:

Q_i : vazão que escoar no segmento i ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

i : identificador de cada segmento, iniciando no segmento mais distante ($i=1$) e aumentando até N na seção de montante;

q : vazão média das saídas laterais ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

Q : vazão total de entrada na tubulação ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

Scaloppi (1988), desenvolveu um fator F ajustado para qualquer distância da primeira saída ao início da linha lateral, derivando a Eq. 9 para obter o fator F ajustado (Fa), sendo r a razão entre a distância da primeira saída ao início da tubulação e o espaçamento entre as saídas laterais e N o número de saídas laterais:

$$Fa = \frac{NF + r - 1}{N + r - 1} \quad \text{Eq. 9}$$

Para um grande número de saídas laterais, com pequeno espaçamento, o fator F ser satisfatoriamente estimado pela Eq. 10 (WU; GITLIN, 1975; SCALOPPI; ALLEN, 1993):

$$F = \frac{1}{m + 1} \quad \text{Eq. 10}$$

Estudando a hidráulica de linhas laterais para microirrigação, Oliveira (1978), Soares (1981), Faria (1981) e Botrel (1984), observaram que o valor F aumentou para um mesmo número de emissores, quando se diminuiu o espaçamento entre os mesmos. Andrade (1990) verificou que para um mesmo espaçamento entre saídas laterais, o valor F diminuiu quando se aumentou o número de emissores, e cresceu quando a pressão foi também aumentada. Frizzzone et al. (1998), estudando as características hidráulicas de um tubo gotejador Rain Bird flexível, verificaram que há influência da pressão sobre o diâmetro interno da tubulação, e o coeficiente de redução de perda de carga diminuiu com o aumento da pressão para um mesmo número de emissores.

Segundo Merriam e Keller (1978), o teste de uniformidade de distribuição de água no sistema de irrigação por aspersão, é um importante parâmetro a ser determinado para se obter a melhor eficiência de aplicação. O teste visa a determinação de espaçamentos ótimos entre os tubos perfurados quando estes forem utilizados para culturas em linhas.

Ao avaliar as características hidráulicas do tubo perfurado Santeno, Marinho et al. (1999) verificaram que os emissores operam em regime de escoamento turbulento, em que o expoente de fluxo x foi igual a 0,56, ajustando-se em um modelo potencial. O coeficiente de variação de fabricação dos emissores foi classificado como excelente e ocorreu aumento do diâmetro interno com o aumento na pressão de operação.

A pressão para ruptura da parede do tubo foi 169,30 kPa. Foi verificado também, que os alcances e alturas dos jatos de água variaram em função da pressão, constatando-se maiores alcances do jato para Santeno II e maior altura do jato para Santeno I.

Bonono et al. (1998), estudando as características hidráulicas do tubo de polietileno flexível perfurado, verificaram que a equação vazão-pressão dos emissores do tubo foi a seguinte: $q = 0,4748 H^{0,50}$, sendo H a pressão de entrada no emissor em kPa e, q a vazão por par de emissor emissores em L h⁻¹. Os coeficientes de variação de vazão encontrados foram

inferiores a 4,2% para a faixa de pressão entre 20 e 80 kPa, classificando-se os emissores como excelentes. Verificaram também que a faixa molhada variou de 3,0 a 4,8 m, para o intervalo de pressão de 20 a 80 kPa. Os valores de uniformidade de emissão indicaram boa adequação do sistema de irrigação para culturas perenes.

Ao avaliar as características hidráulicas do tubo gotejador Rain Bird, constituído de polietileno flexível, Frizzzone et al (1998), verificaram que os emissores apresentaram uniformidade de vazão excelente e regime de escoamento turbulento. Verificaram também que os valores da perda de carga determinados experimentalmente e ajustados por análise de regressão não diferiram significativamente, a 5 % de probabilidade, dos valores calculados pela equação de Darcy-Weisbach, com f determinado pela equação de Blasius e diâmetro do tubo corrigido em função da pressão. O coeficiente de redução de perda de carga diminui com o aumento da pressão para um mesmo número de emissores.

Vilella et al. (2003), estudando a alteração no diâmetro, e na perda de carga em tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões, com diferentes diâmetros nominais, verificou que a pressão de trabalho tem influência nos diâmetros internos dos tubos de polietileno de baixa densidade, empregados em sistemas de microirrigação. Os autores verificaram também, que alterações nos diâmetros internos, em virtude de variações na pressão de operação, podem ocasionar variações nas perdas de carga superiores a 20%.

Garcia (2009), estudando as características técnicas de tubos emissores para irrigação localizada, verificou que os coeficientes de variação de fabricação para todos os tubos emissores avaliados, foram inferiores a 0,07, recomendado pela norma ISO 9261:2004, e que os tubos emissores não autocompensantes apresentaram valores do expoente de fluxo entre 0,431 e 0,575, sendo classificados como de fluxo turbulento. Nos emissores autocompensantes, os valores dos expoentes foram próximos a zero.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP). Foram estudadas as características hidráulicas dos tubos SANTENO I e II® fabricados pela Santeno Soluções Irrigações do Nordeste Ltda. Refere-se a um tubo flexível de polietileno linear de baixa densidade, fabricado a partir de matéria prima virgem.

Avaliou-se dois modelos distintos de tubos: fitas Santeno I e II®. De acordo com o fabricante a fita Santeno I produz micros jatos de água direcionados para cima (85° em relação à superfície do solo), irrigando uma faixa de 2,5 m, possuindo as seguintes características técnicas: pressão de serviço de 20 a 100 kPa, distância entre pares de emissores de 0,15 m, diâmetro dos emissores 0,3 mm, diâmetro nominal do tubo 28 mm, espessura de parede 200 μ , altura dos micro jatos de 1,80 m e bobinas disponíveis nos comprimentos de 50 e 100 m.

O modelo II produz micro jatos de água direcionados lateralmente (45° em relação à superfície do solo), irrigando uma faixa de 2 m, possuindo as mesmas características técnicas do modelo I. Ambos os modelos operam com vazão variando de 7,8 a 28,8 L h⁻¹ por metro de tubo. Pode atingir comprimento máximo de 100 m para uma variação de vazão permitida de 20% entre o primeiro e o último emissor. O material pode ser classificado como um sistema de aspersão. Ambos os modelos podem ser usados em casas de vegetação e culturas de campos, sendo indicadas para olerícolas, frutíferas e culturas em linhas.

Foram realizados três tipos de ensaios com ambos os modelos de tubo perfurado:

- 1) Para obtenção da equação característica vazão-pressão, e do coeficiente de variação de fabricação (CV_f);
- 2) Para determinação da perda de carga no tubo flexível sem orifícios;
- 3) Para obtenção do perfil de distribuição da precipitação e alcance dos jatos.

4.1 Determinação da equação característica vazão-pressão e do coeficiente de variação de fabricação (CV_f)

Os objetivos do ensaio foram, a determinação de uma equação que relaciona a vazão com a pressão nos orifícios, e a avaliação das variações que ocorrem na vazão entre emissores devido a diferenças decorrentes do processo de fabricação dos tubos.

A estrutura de ensaios (Figura 1), dispõe de um reservatório de aproximadamente 30 m³ capaz de manter uma carga hidráulica constante de 15 mca para a realização dos testes. A água fornecida pelo reservatório foi conduzida até o início da linha de tubo perfurado. No início da linha, foi instalado um registro do tipo agulha para ajustar a pressão de ensaio e um manômetro digital para monitoramento da mesma. No final da linha, foi instalado um registro de gaveta, utilizado para remoção do ar na tubulação. Após a remoção do ar, esse registro permaneceu fechado para minimizar a perda de carga ao longo do trecho avaliado, e assegurar que a pressão de operação de todos os emissores fosse praticamente a mesma. A temperatura da água foi monitorada durante os ensaios por termômetro de mercúrio, e utilizada para corrigir a massa específica da água pela aplicação da Eq. 11 (TANAKA, 2001).

$$\rho(T) = a_5 \left[1 - \frac{(T + a_1)^2 (T + a_2)}{a_3 (T + a_4)} \right] \quad \text{Eq. 11}$$

em que:

$\rho(T)$: massa específica da água para temperaturas entre 0 e 40°C, à pressão atmosférica de 101,325 kPa (kg m⁻³);

T : temperatura da água (°C);

a_1 : -3,983035 °C;

a_2 : 301,797 °C;

a_3 : 522528,9 °C;

a_4 : 69,34881 °C;

a_5 : 999,974950 kg m⁻³.

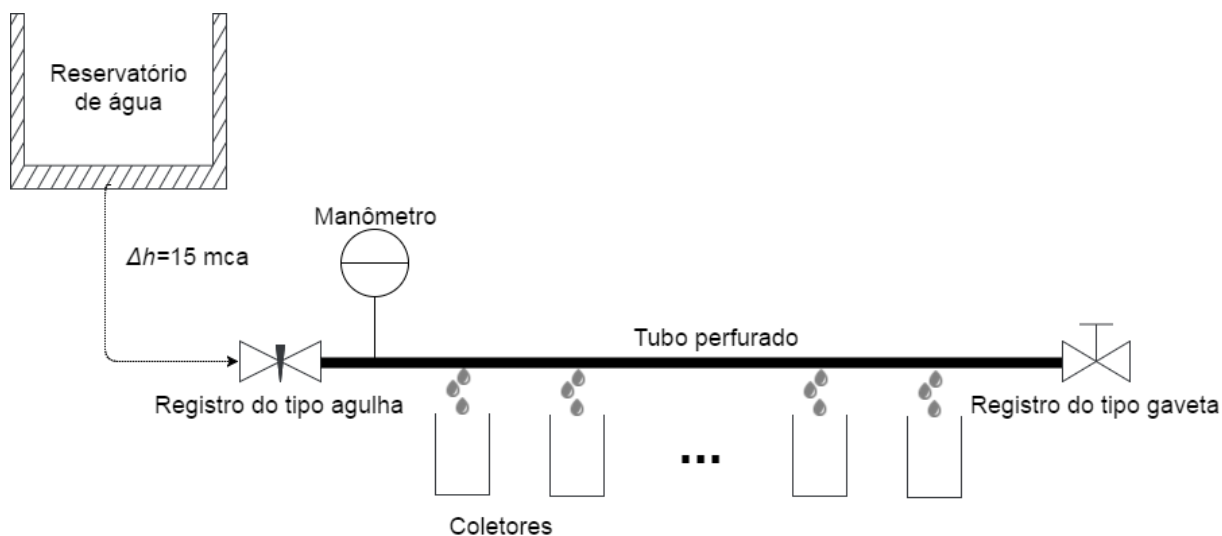


Figura 1: Esquema da estrutura utilizada nos ensaios para obtenção da equação vazão-pressão e CVf (coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação).

Uma vez que os tubos perfurados apresentam orifícios agrupados em pares e espaçados a cada 0,15 m, mediu-se sempre a vazão de um par de orifícios, e todos os resultados apresentados referem-se a um par de orifícios. Sob cada par de orifícios foram posicionados coletores com capacidade para armazenar 4 L, sendo que as determinações de vazão foram obtidas por medições de massa em dado intervalo de tempo, longo o suficiente para coletar volumes de água acima de 2 L. O tempo de coleta foi medido utilizando cronômetro digital. As massas foram determinadas utilizando balança digital com resolução de 0,1 g.

A amostra utilizada foi constituída de um segmento de tubo com 3 m de comprimento útil, a partir do qual se determinou a vazão de 20 pares de missores. As pressões de ensaio variaram de 10 a 100 kPa em incrementos de 10 kPa. Os tubos foram instalados em nível.

Para a determinação da vazão, o segmento de tubo foi conectado a linha de fornecimento de água e a pressão de ensaio foi estabelecida e mantida constante e, então, coletou-se a vazão de cada par de orifícios. A curva característica vazão-pressão foi determinada ajustando-se um modelo potencial aos dados experimentais (Eq. 12):

$$q = k H^x \quad \text{Eq.12}$$

ou um modelo linear do tipo da Eq. 13, uma vez que Andrade (1990), encontrou resultados que melhor se ajustaram a esse tipo de modelo para os tubos perfurados Santeno:

$$q = a H + b \quad \text{Eq.13}$$

em que:

- q : vazão de um par de orifícios (L h^{-1});
- k : coeficiente de proporcionalidade característico do emissor (adimensional);
- H : carga de pressão (mca);
- x : expoente de fluxo (adimensional);
- a e b : parâmetros da regressão linear.

Com os valores de vazão obtidos nos ensaios da relação vazão-pressão, calculou-se o CVf (Eq. 14). Este coeficiente de variação, calculado para a pressão de serviço declarada pelo fabricante, é um indicador da uniformidade de vazão dos emissores novos.

$$CVf = \frac{s}{q_m} 100 \quad \text{Eq. 14}$$

em que:

- CVf : coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação (%);
- s : desvio padrão das vazões dos pares de emissores, na pressão de referência (L h^{-1}); e,
- q_m : vazão média dos pares de emissores na pressão de referência (L h^{-1}).

4.2 Determinação da perda de carga

Os procedimentos experimentais para a determinação da perda de carga contínua, foram executados dentro do laboratório de hidráulica em piso nivelado, utilizando-se 40 m de tubo flexível sem orifícios. A estrutura consistiu de um circuito fechado, cuja alimentação de água para os testes foi realizada através de uma derivação de recalque de uma bomba hidráulica, utilizando-se um reservatório de nível constante. Durante os ensaios foram monitoradas a temperatura da água e a temperatura e umidade do ar.

O circuito hidráulico empregado nos testes constituiu-se de reservatório de água, bomba, registros, segmento do tubo estudado, tomadas de pressão, filtro, medidor de vazão eletromagnético (marca Krohne faixa de medição de 0 a $4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, incerteza de medição de 0,5%) e conexões hidráulicas diversas. Registros posicionados no início da linha e no final da tubulação de retorno permitiram controlar a vazão e pressão interna no tubo. Foi instalada uma

tomada de pressão no início da linha e outra no final, de forma que a queda de pressão proporcionada pelo escoamento através do tubo fosse quantificada com a utilização de um transdutor de pressão marca Freescale, faixa de medição de 0 a 100 kPa, incerteza de medição de 2%. Em uma mesma medição, o valor médio da diferença de pressão entre as extremidades do segmento de tubo foi obtido de um conjunto de registros de pressão tomados em intervalos de 1 s. O esquema desta montagem pode ser observado na Figura 2.

Foram obtidas equações de perda de carga para quatro pressões de entrada: 40, 60, 80 e 100 kPa. Para cada pressão de ensaio constante, obteve-se a perda de carga com vazões crescentes e decrescentes, em incrementos de $0,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Foram definidos 20 pares de valores vazão-pressão em cada ciclo de ensaio. Assim, as curvas relacionando vazão-perda de carga foram ajustadas com 40 pares de valores para cada pressão de entrada, monitorada por um manômetro digital.

Foram estudadas as relações entre vazão e perda de carga para os dois modelos de tubos, nas quatro pressões de entrada. Por análise de regressão ajustaram-se equações empíricas de perda de carga unitária em função da vazão, na forma potencial (Eq.15):

$$J = K_1 Q^m \quad \text{Eq. 15}$$

em que:

J : perda de carga unitária no tubo (m m^{-1});

Q : vazão média ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$);

K_1 : constante de regressão que depende do tubo estudado;

m : constante de regressão que depende do regime de fluxo.

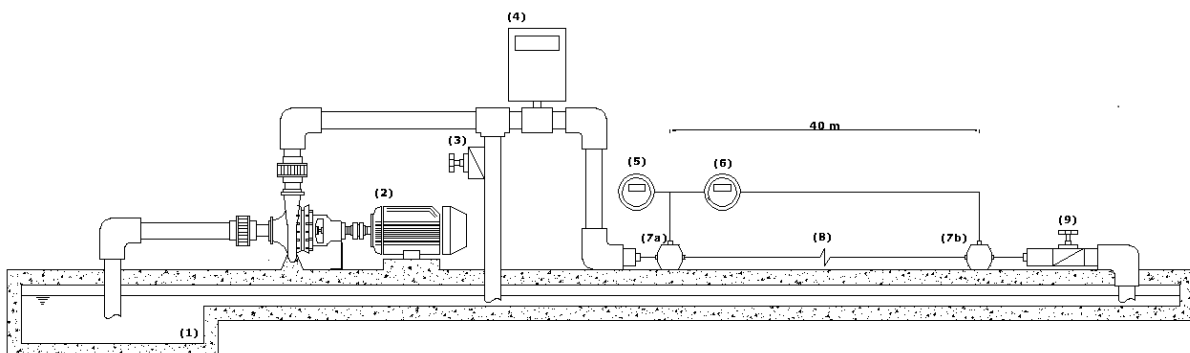


Figura 2: Ilustração da estrutura do ensaio de perda de carga: (1) reservatório de água; (2) bomba; (3) registro agulha; (4) medidor eletromagnético de vazão; (5) e (6) sensores de pressão; (7a) e (7b) tomadas de pressão; (8) segmento de 40 m de tubo Santeno; (9) registro de gaveta

Assumindo-se que o diâmetro do tubo aumenta com a pressão de entrada, e a perda de carga reduz-se com o aumento do diâmetro, para cada modelo ajustou-se a equação de perda de carga na forma da Eq. 16:

$$J = \beta Q^2 H_0^{-b} \quad \text{Eq. 16}$$

Sendo J a perda de carga unitária na tubulação (m m^{-1}), b um coeficiente que expressa o efeito da pressão de entrada na variação do diâmetro interno do tubo, H_0 a carga de pressão na entrada da tubulação (mca), Q a vazão que escoar na tubulação ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), β um coeficiente combinado de unidades e de rugosidade para um tubo particular.

Comparando a equação experimental de perda de carga (Eq. 16), com a equação de Darcy-Weisbach, com f expresso pela equação de Blasius (Eqs. 3 e 5), obtém-se:

$$7,793 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} = \beta Q^2 H_0^{-b} \quad \text{Eq. 17}$$

A partir da Eq. 17 estimou-se um diâmetro médio equivalente do tubo em função da carga de pressão na entrada da tubulação para vazões conhecidas, e ajustou-se a relação D (m) em função de H_0 (mca) de acordo com o modelo expresso pela Eq. 18:

$$D = c H_0^d \quad \text{Eq. 18}$$

para $4 \leq H_0 \leq 10 \text{ mca}$

Utilizando-se a equação de Darcy-Weisbach com f definido pela equação de Blasius e o diâmetro expresso em função da pressão de entrada, uma equação geral de perda de carga contínua no tubo Santeno foi proposta na seguinte forma (Eq. 19):

$$J = 7,793 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{(c H_0^d)^{4,75}} \quad \text{Eq. 19}$$

para $4000 \leq Re \leq 10^5$ e $4 \leq H_0 \leq 10 \text{ mca}$.

4.3 Fator de redução de perda de carga (F) no tubo com múltiplas saídas laterais

A estimativa da perda de carga feita por métodos que permitam calcular a carga de pressão em pontos definidos ao longo da tubulação, bem como a metodologia proposta por Frizzone et al (2012), método trecho a trecho, torna-se mais adequada quando comparada às metodologias tradicionais, que não consideram a variação do diâmetro em função da pressão.

O fator de redução de perda de carga (F), em função do número de saídas laterais (N), foi calculado utilizando-se o método trecho a trecho, aplicando-se a equação ajustada para a relação vazão-pressão (Eq. 12), em cada seção com um par de saídas laterais e a equação de perda de carga ajustada (Eq. 19), no trecho considerado. Calculou-se o fator F pela razão entre a perda de carga acumulada, calculada trecho a trecho com vazão variável nos trechos (perda de carga acumulada real, hf), e a perda de carga contínua calculada com vazão constante ao longo de todo o comprimento (Hf).

Desenvolveu-se um código computacional em linguagem Java (ver Apêndice) para o cálculo de F , cujo fluxograma é mostrado na Figura 3. O cálculo seguiu os seguintes passos gerais:

- a) Partindo-se do início da linha lateral, com um emissor e pressão de operação definida, calculou-se para este emissor e para o primeiro trecho a vazão que escoar e a correspondente perda de carga pela equação experimental.
- b) Acrescentou-se outro emissor, agora com dois trechos na lateral, fixou-se a pressão do último emissor e calculou-se a vazão em cada trecho, sendo que no último trecho a vazão que escoar é igual à vazão do último emissor. A vazão de entrada na lateral é igual à soma das vazões em cada trecho e a perda de carga também é igual à soma das perdas de carga em cada trecho.
- c) Acrescentou-se sucessivamente um emissor na lateral e repetiram os cálculos até 667 emissores, quando considerou-se estável o valor de F .
- d) Para um dado número de emissores na lateral, calculou-se o fator F pela razão entre a perda de carga real acumulada e a perda de carga uniforme.

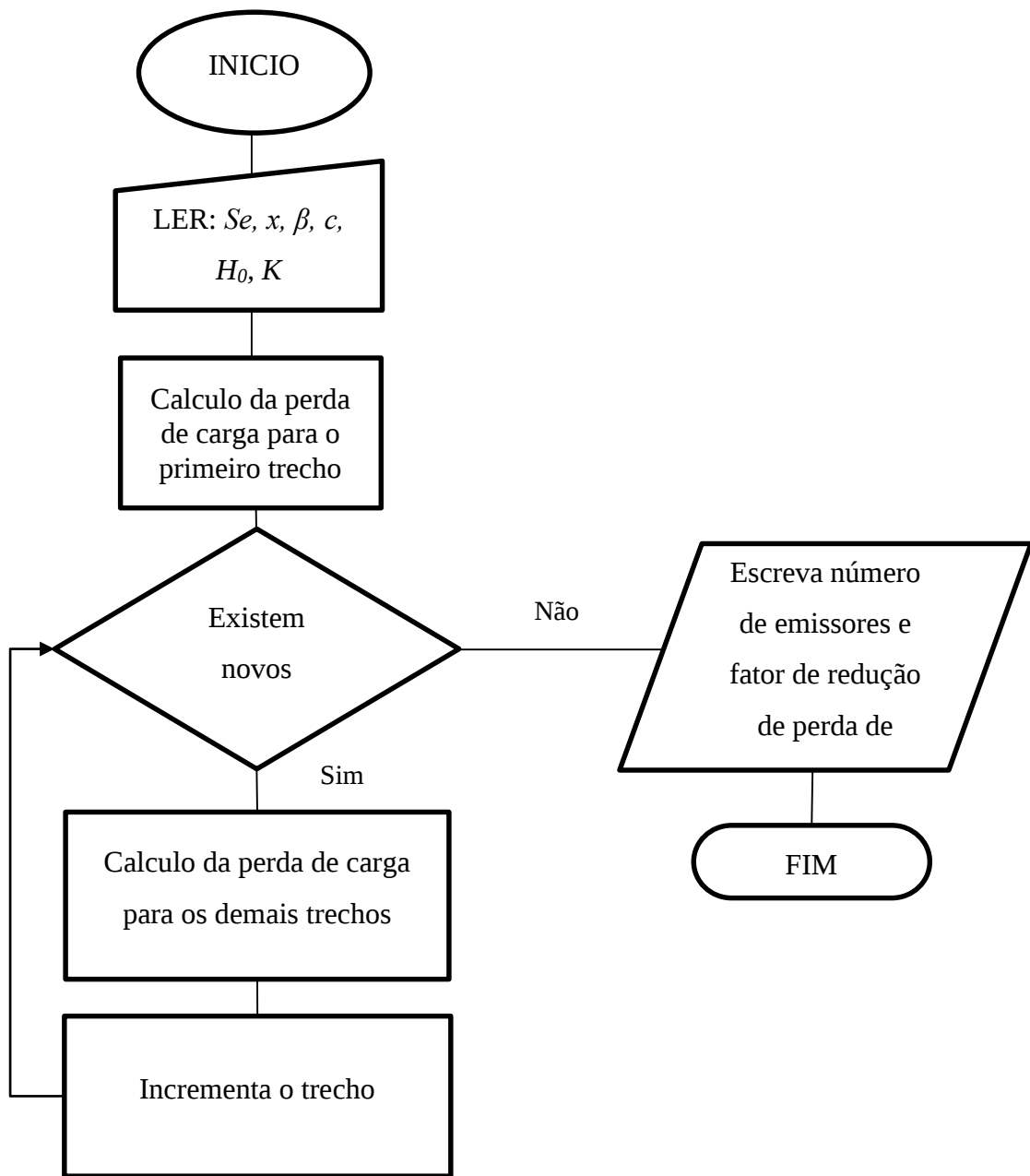


Figura 3: Fluxograma do Programa de computador utilizado para calcular o fator de redução de perda de carga (F) em função do número de emissores (N), em que: Se : espaçamento entre emissores (m); K e x : constantes da equação experimental vazão-pressão; β e c : coeficientes da equação experimental de perda total de carga; H_0 : pressão de entrada na linha lateral (mca).

4.4 Comprimento máximo de linhas laterais em nível com critério de variação máxima de vazão dos emissores

Para cálculo do comprimento máximo da linha lateral foi utilizado o critério de uniformidade de vazão que corresponde a determinada variação máxima de carga de pressão.

É comum utilizar variações máximas de vazão na lateral da ordem de 10%, 8%, 6% e 4%, isto é, $q_{m\acute{a}x}/q_{m\acute{i}n} = 1,1$ a $1,04$ (FRIZZONE et al., 2012).

O cálculo da variação de pressão a partir de um valor de variação de vazão é feito pela seguinte relação: (Eq.20)

$$\frac{H_{m\acute{a}x}}{H_{m\acute{i}n}} = \left(\frac{q_{m\acute{a}x}}{q_{m\acute{i}n}} \right)^{1/x} \quad \text{Eq. 20}$$

em que:

$q_{m\acute{a}x}$: vazão do emissor à carga de pressão máxima ($H_{m\acute{a}x}$) na linha lateral, L h⁻¹;

$q_{m\acute{i}n}$: vazão do emissor à carga de pressão mínima ($H_{m\acute{i}n}$) na linha lateral, L h⁻¹.

Uma simples amplitude de variação entre as vazões máxima e mínima é também utilizada como critério de uniformidade para projeto de uma linha lateral (Yildirim, 2007). A variação máxima de vazão admitida em uma linha lateral corresponde a uma variação máxima de carga de pressão (Eq. 21, 22, 23 e 24):

$$q_{var} = \frac{q_{m\acute{a}x} - q_{m\acute{i}n}}{q_{m\acute{a}x}} \quad \text{Eq. 21}$$

$$H_{var} = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{H_{m\acute{a}x}} \quad \text{Eq. 22}$$

Para um modelo pontecial da relação vazão-pressão tem-se:

$$H_{var} = 1 - (1 - q_{var})^{1/x} \quad \text{Eq. 23}$$

Para um modelo linear da relação vazão-pressão tem-se:

$$H_{var} = \frac{q_{var}(a H_{m\acute{a}x} + b)}{a H_{m\acute{a}x}} \quad \text{Eq. 24}$$

em que:

x : expoente de fluxo, (adimensional);

q_{var} : variação de vazão dos emissores, definida como critério de projeto, (adimensional);

H_{var} : variação da carga de pressão, (adimensional);

$H_{máx}$: carga máxima de pressão de operação do emissor na lateral (mca);

$H_{mín}$: carga mínima de pressão de operação do emissor na lateral (mca);

a e b: parâmetro da relação linear vazão-pressão.

Para linha lateral em nível, a carga máxima de pressão ocorre no início da linha lateral e a carga mínima ocorre no final, portanto, a perda de carga máxima permitida nessa linha é dada pela Eq. 25:

$$hf = H_{máx} - H_{mín} \quad \text{Eq. 25}$$

Assim, substituindo hf na equação de H_{var} e $H_{máx}$ por H_o (pressão na entrada da linha) e realizando ajustes algébricos obtém-se a equação de perda de carga admissível na lateral (Eq. 26):

$$Hf_{adm} = H_{var} H_o \quad \text{Eq. 26}$$

A carga média de pressão (H_m) na linha lateral em nível será (Eq. 27):

$$H_m = H_o - \left(\frac{m+1}{m+2} \right) hf_{adm} \quad \text{Eq. 27}$$

sendo m o expoente da vazão na equação de perda de carga. Utilizou-se $m = 1,75$ por se tratar de um regime de escoamento turbulento, hidraulicamente em tubo liso (Equação de Darcy-Weisbach, com f de Blasius).

Com a carga média de pressão, calcula-se a vazão média dos emissores pela equação característica vazão-pressão do emissor: (Eq. 28)

$$q_m = k H_m^x \quad \text{Eq.28}$$

O comprimento máximo da linha lateral em nível ($L_{m\acute{a}x}$) é calculado pela Eq. 29 (GILLESPIE et al., 1979):

$$L_{m\acute{a}x} = \frac{H_o H_{var}}{K_2 L^m} \quad \text{Eq. 29}$$

em que, para uma tubulação com múltiplas saídas laterais, e utilizando a Eq. 19 para cálculo da perda de carga, K_2 é expresso pela Eq. 30:

$$K_2 = 7,793 \times 10^{-4} F \frac{q_m^{1,75}}{Se^{1,75} (c H_0^d)^{4,75}} \quad \text{Eq. 30}$$

A perda total de carga na tubulação com múltiplas saídas laterais, utilizando-se a equação experimental de perda total de carga (Eq. 19), para Santeno I e II, pode ser expressa pela Eq. (31):

$$Hf = K_2 L^{m+1} \quad \text{Eq. 31}$$

Após o cálculo do comprimento máximo foi obtida a uniformidade de emissão (UE), calculada pela Eq. (32) (FRIZZONE et al. 2012):

$$UE = \left(1 - \frac{1,27 CV_f}{\sqrt{n}}\right) \frac{q_{mín}}{q_m} \quad \text{Eq. 32}$$

sendo n o número de orifícios por ponto de emissão ($n = 2$).

Foi elaborado um código computacional para o cálculo do comprimento máximo da linha lateral em nível, cujo fluxograma é apresentado na Figura 4 e uma versão em linguagem Java pode ser visto no apêndice.

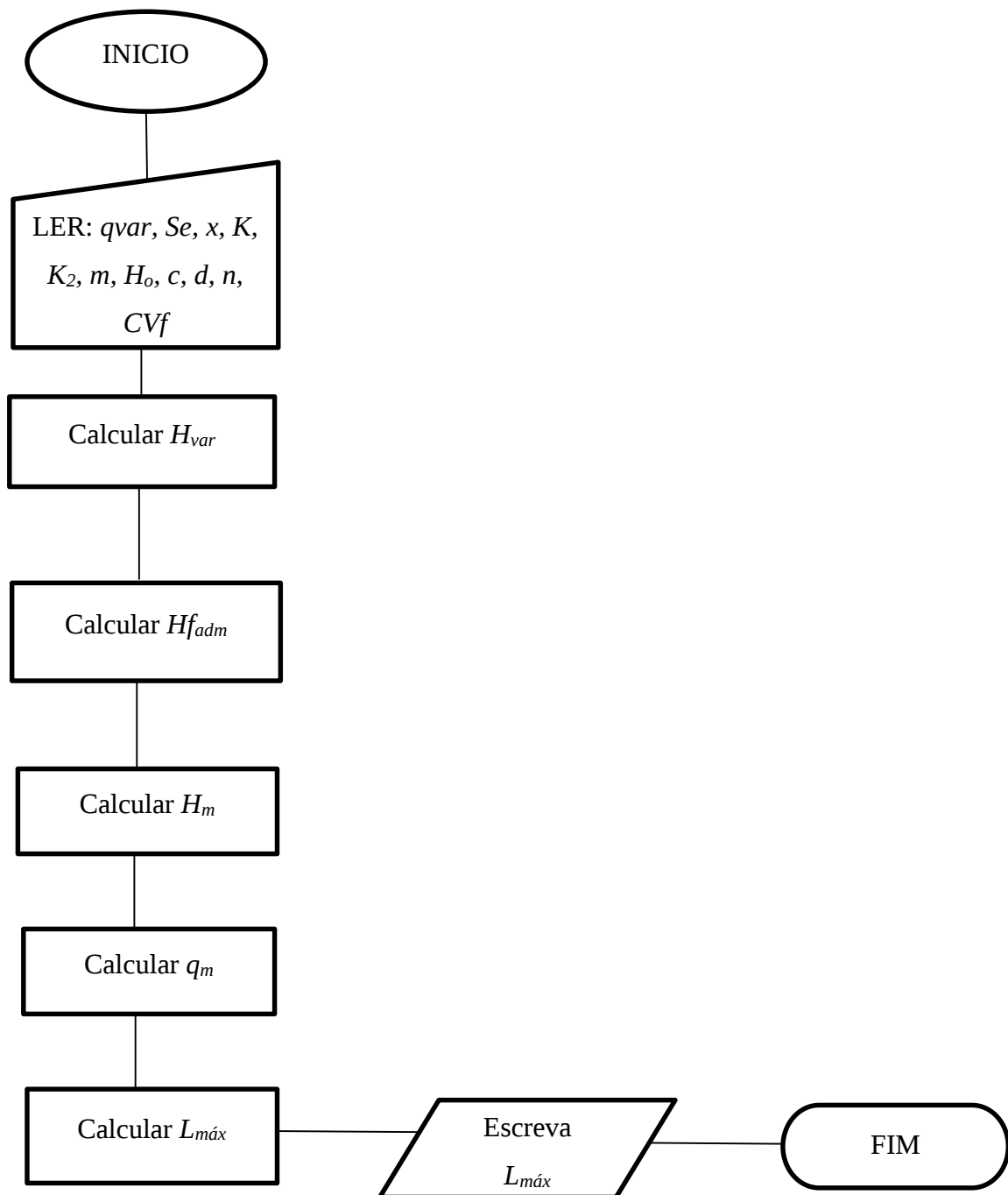


Figura 4: Fluxograma do programa de computador utilizado para cálculo do comprimento máximo da linha lateral e uniformidade de emissão, sendo: Se : Espaçamento entre emissores em metros; k e x : coeficientes da equação experimental vazão-pressão, adimensional; K_2 : constante da equação de perda de carga na tubulação com múltiplas saídas laterais, adimensional; c e d : coeficientes da equação do diâmetro em função de H_o , adimensional; n : número de orifícios por ponto de emissão; H_o : Pressão na entrada da linha, mca; $qvar$: variação de vazão dos emissores, adimensional; $Hvar$: variação da carga de pressão, adimensional; Hf_{adm} : perda de carga admissível, mca; H_m : carga média de pressão, mca; CVf : coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação, adimensional; $L_{máx}$: comprimento máximo da linha lateral, m; e UE : uniformidade de emissão, adimensional.

4.5 Comprimento máximo de linha lateral em nível admitido para os tubos perfurados com critérios estabelecidos de perda de carga, pressão de entrada e largura da faixa molhada.

4.5.1 Critério para dimensionamento do comprimento máximo de linhas laterais

Admitiu-se 10% de variação máxima de vazão ($q_{var} \leq 0,1$) para a linha lateral, sendo H_{var} calculado pela Eq. 22. Para linhas laterais em nível, a vazão máxima ($q_{máx}$) ocorre no primeiro par de emissores da lateral, e a vazão mínima ($q_{mín}$) no último. Resultados obtidos por Andrade (1990), indicam que, para os tubos Santeno, a relação vazão-pressão pode ser razoavelmente representada por um modelo linear dentro de limites especificados de carga de pressão (Eq. 13). Substituindo a Eq. 13 na Eq. 22 obtém-se a Eq. 33:

$$q_{var} = \frac{a (H_{máx} - H_{mín})}{a H_{máx} + b} \quad \text{Eq. 33}$$

para $H_{máx}$ igual a carga de pressão na entrada da linha (H_0). A carga de pressão esperada no último emissor é dada pela Eq. 34:

$$H_{mín} = H_{máx} - \frac{q_{var}(a H_{máx} + b)}{a} \quad \text{Eq. 34}$$

E portanto, a perda total de carga admissível (Hf_{adm}) na linha lateral é (Eq. 35):

$$hf_{adm} = \frac{q_{var} (a H_{máx} + b)}{a} \quad \text{Eq. 35}$$

4.5.2 Critério de dimensionamento do comprimento máximo baseado na variação admissível de largura da faixa molhada

Dados apresentados por Andrade (1990), e desta pesquisa, indicam que a largura da faixa molhada ao longo da lateral é fortemente influenciada pela pressão, conforme observado na Figura 5 para o modelo I e II. Isso indica que, além do critério de dimensionamento já discutido,

é necessário considerar também uma variação admissível na largura da faixa molhada, a fim de que a água atinja o alvo nas posições mais próximas do final da lateral.

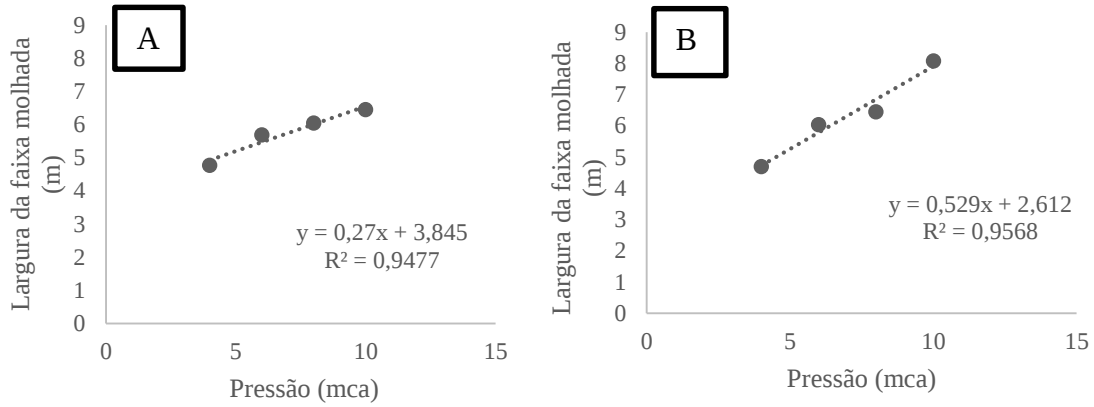


Figura 5: Largura da faixa molhada em função da presssão para o modelo I (A), e modelo II (B) encontrados nesta pesquisa.

Para o intervalo de pressões de operação do tubo (4 a 10) mca, é valido considerar que um modelo linear representa adequadamente o efeito da pressão na largura da faixa molhada. Supôs-se, assim, que a variação admissível da largura molhada (Δw_{adm}), pode ser representada pela Eq. 36.

$$\Delta w_{adm} = w_i - w_f \quad \text{Eq. 36}$$

em que:

w_i : Largura da faixa molhada para a pressão no início da linha (m);

w_f : Largura da faixa molhada para a pressão no final da linha (m).

E, para uma dada seção da linha lateral, a largura da faixa é dada pelo seguinte modelo linear (Eq. 37):

$$w = a_0 + a_1 H \quad \text{Eq. 37}$$

Daí obtém-se:

$$\Delta w = (a_0 + a_1 H_i) - (a_0 + a_1 H_u) \quad \text{Eq. 38}$$

$$\Delta w = a1(Hi - Hu) \quad \text{Eq. 39}$$

sendo:

Hi : carga de pressão no início da lateral, mca;

Hu : carga de pressão no final da lateral, mca.

A perda de carga admissível na lateral em nível é igual a diferença entre a pressão inicial (Hi) e final (Hu), portanto:

$$\Delta w_{adm} = a1 Hf_{adm} \quad \text{Eq. 40}$$

A variação admissível de largura molhada é uma variável cujo valor é arbitrário. Isolando-se a perda de carga na equação 40, obtém-se um segundo critério para estimativa da perda de carga admissível em linhas laterais em função de uma variação admissível na largura molhada. (Eq. 41)

$$Hf_{adm} = \frac{\Delta w_{adm}}{a1} \quad \text{Eq. 41}$$

4.6 Determinação do perfil de distribuição da precipitação

A determinação do perfil médio de distribuição indica o alcance médio da precipitação, de acordo com as pressões estudadas.

A alimentação de água para os testes foi realizada através da derivação de recalque de uma das bombas utilizando o reservatório de nível constante. Durante os ensaios foram monitorados dados de temperatura da água, temperatura e umidade do ambiente.

Para avaliação da uniformidade de distribuição, foram montados em nível de solo, dois segmentos de tubo com Santeno I e Santeno II, ambos com 2 metros de comprimento, instalados entre 5 colunas de coletores com, 16 coletores de cada lado da mangueira (totalizando 32 coletores por linha). Os coletores tinham 8 cm de diâmetro e 8 cm de altura, espaçados uniformemente a cada 25 cm, dispostos de forma retangular na faixa de abrangência da precipitação, conforme ilustrado na Figura 6. O tubo foi suspenso a 8 cm do solo, de forma a estar no mesmo nível dos coletores.

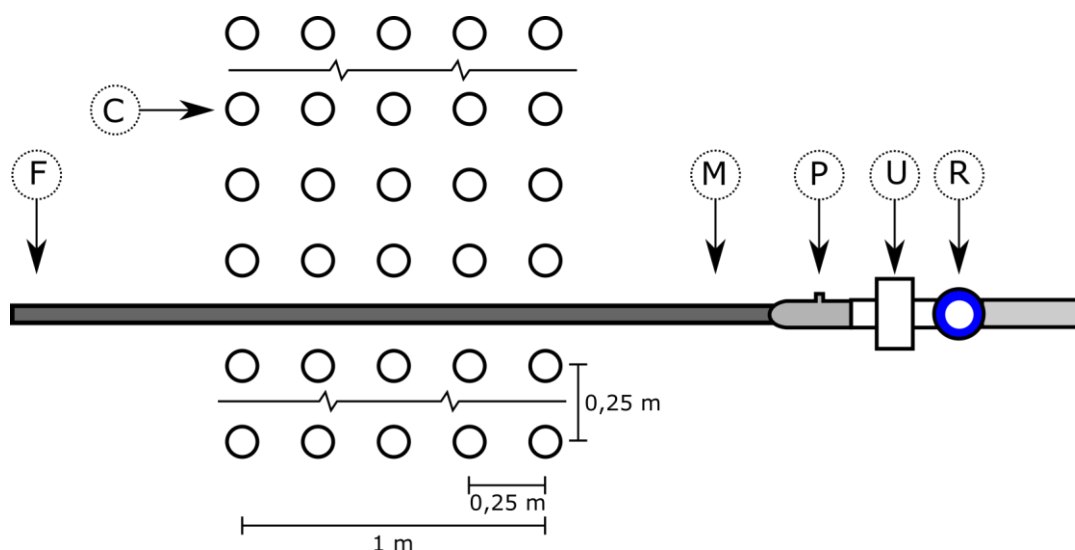


Figura 6: Representação da estrutura utilizada para o ensaio de distribuição de precipitação, sendo: C - os coletores; F - cap rosquiável; M - tubo ensaiado; P - tomada de pressão para controle da mesma; U - união e R - registro de entrada.

O tempo de execução de cada ensaio foi de 1 hora. As pressões utilizadas foram 4, 6, 8 e 10 mca conforme recomendação do fabricante, e estas foram reguladas por registro de agulha e lidas por um manômetro digital. Para cada pressão estudada, os coletores foram pesados em balança com divisão em gramas e posteriormente transformados em altura de precipitação (mm h^{-1}). A partir dos dados experimentais de precipitação e de valores de distância dos coletores em relação ao tubo, foram traçadas curvas que mostram o perfil de distribuição para cada pressão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Equação característica vazão-pressão dos emissores do tubo perfurado e coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação CVf

Nas Tabelas 1 e 2 apresentam-se, respectivamente, a média de vazão de 20 emissores ensaiados a cada pressão, e os coeficientes de variação de fabricação, para os modelos I e II.

Tabela 1: Vazão média ($L\ h^{-1}$), para emissores do tubo perfurado Santeno I, a diferentes cargas de pressão e respectivos coeficientes de variação

	Carga de pressão (mca)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vazão média	1,79	2,62	3,28	3,82	4,43	4,81	5,71	6,34	6,94	7,43
CVf (%)	12,52	12,28	12,36	11,92	12,2	11,38	12,72	12,31	12,59	10,4

* vazão para um emissor (conjunto de 2 orifícios).

Tabela 2: Vazão média ($L\ h^{-1}$) para emissores do tubo perfurado Santeno II, a diferentes cargas de pressão e respectivos coeficientes de variação

	Pressão (mca)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vazão média	1,11	1,62	2,07	2,44	2,76	3,07	3,56	4,09	4,63	4,76
CVf (%)	21,72	22,45	22,4	21,04	19,1	25,33	22,96	23,74	25,06	23,21

*vazão para um emissor (conjunto de 2 orifícios).

Por meio de análise de regressão dos dados experimentais, de vazão versus pressão, foram obtidas as seguintes equações caracterísicas do emissor, utilizando o modelo potencial, Eq. 42 para o modelo I e Eq. 43 para o modelo II:

$$q = 1,701H^{0,618} \quad R^2 = 0,991 \quad \text{Eq. 42}$$

$$q = 1,043H^{0,641} \quad R^2 = 0,988 \quad \text{Eq. 43}$$

em que:

q : vazão do emissor, em $L\ h^{-1}$ para um conjunto de 2 orifícios;

H : carga de pressão na entrada do emissor, em mca.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,991$), para o tubo Santeno I, indica bom ajuste do modelo potencial para descrever a relação vazão-pressão, isto é, 99,1 % das variações são explicadas pela regressão. Para o modelo II, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,988$) também indica bom ajuste ao modelo potencial, explicando 98,8 % das variações. De acordo com o expoente de fluxo (α) os emissores operam em regime turbulento (próximo de 0,5).

As representações gráficas das Eq. 42 e 43, podem ser observadas na Figura 7. Andrade (1990), trabalhando com unidade de pressão em m.c.a, Bonono et al. (1998), na unidade em kPa e Marinho et al. (1999), também em kPa, encontraram valores de K iguais a 1,6085; 0,4748 e 0,4300 e de x iguais a 0,55; 0,50 e 0,56, respectivamente, para tubos perfurados de polietileno flexível, indicando, também, regime de escoamento turbulento. Esses valores se aproximam dos obtidos neste trabalho, e para o tubo gotejador Rain-Tape TPC, Frizzzone et al. (1998) obtiveram $x = 0,4563$ caracterizando o tubo gotejador como de escoamento turbulento.

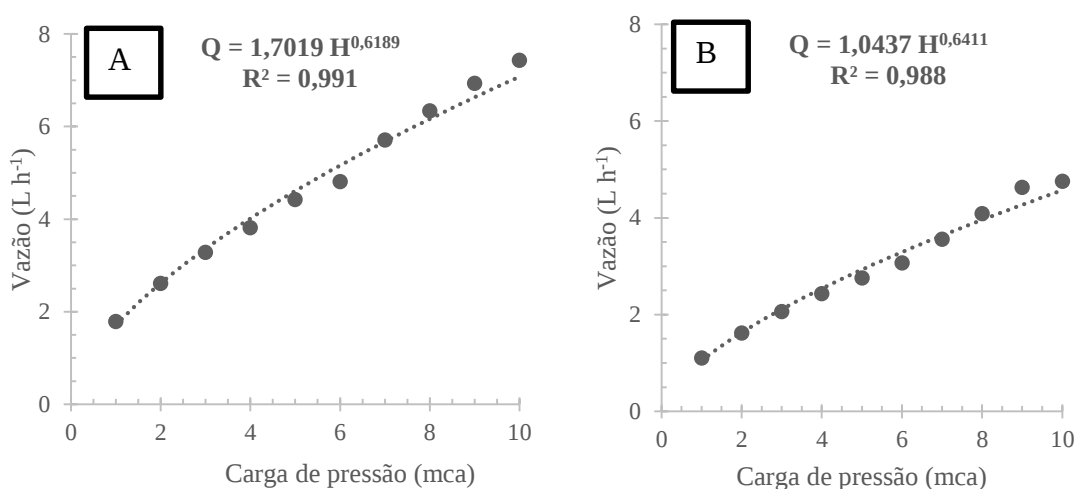


Figura 7: Curvas vazão-pressão dos emissores ajustadas pelo modelo potencial: (A) Santeno I; (B) Santeno II

As relações vazão-pressão também foram ajustadas ao modelo linear, conforme mostrado na Figura 8. Verificou-se um bom ajuste para um modelo linear, dentro do domínio carga de pressão utilizado.

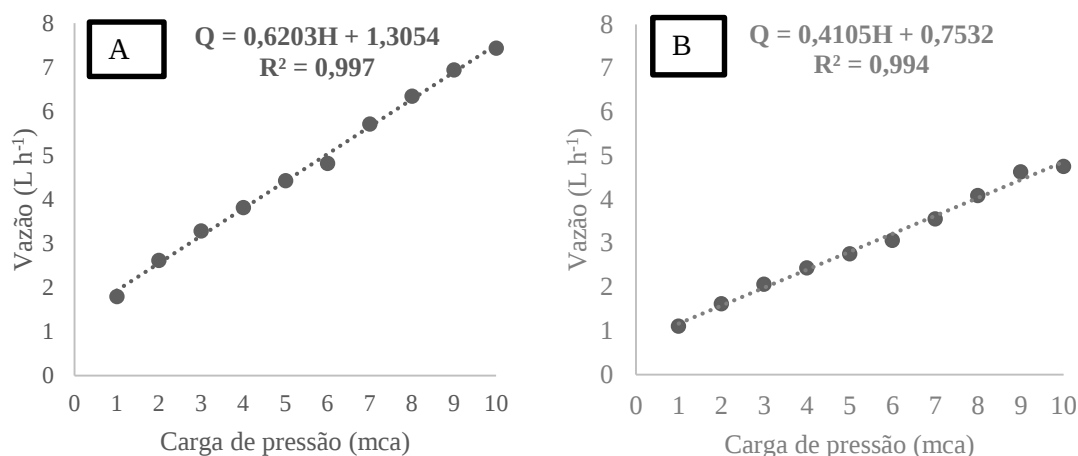


Figura 8: Curvas vazão-pressão dos emissores ajustadas pelo modelo linear: (A) Santeno I; (B) Santeno II.

Os coeficientes de variação de fabricação variaram de 10,4 a 12,72 % para as cargas de pressão de 1 a 10 mca para o modelo Santeno I (Figura 9). Utilizando a classificação da ASABE 2008, pela norma EP405.1, os emissores do tubo perfurado são classificados como médio em termos de uniformidade de fabricação.

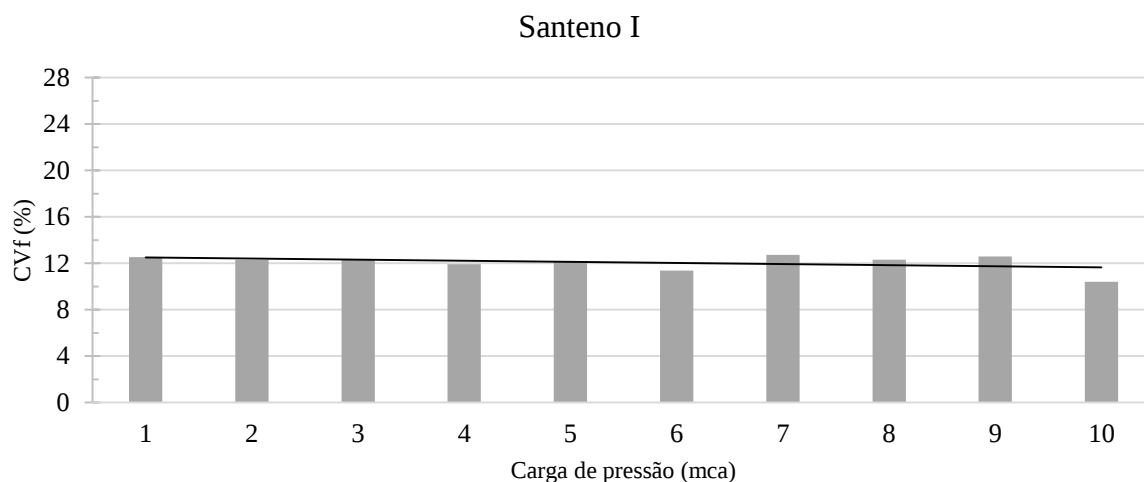


Figura 9: Coeficientes de variação de vazão por efeitos de fabricação (CV_f), em cada pressão ensaiada no tubo perfurado Santeno I.

Para o modelo Santeno II, os coeficientes de variação de fabricação variaram de 19,1 a 25,33% para as cargas de pressões de 1 a 10 mca (Figura 10). Utilizando a mesma referência normativa, os emissores do tubo perfurado são classificados como marginal a inaceitável em termos de uniformidade de fabricação, questionando-se assim, o controle de qualidade do processo de fabricação. Andrade (1990), Bonono et al. (1998), e Marinho et al. (1999)

estudando as características hidráulicas de um tubo perfurado flexível, observaram coeficientes médios de variação de 1,95; 3,31 e 4,10% respectivamente, classificando os emissores como excelentes. Esses valores divergem dos obtidos neste trabalho, e as possíveis causas podem ser atribuídas a alterações no processo produtivo do material, bem como a aspectos relacionados à manutenção, calibração e avaliação das máquinas e equipamentos utilizados na fabricação dos tubos.

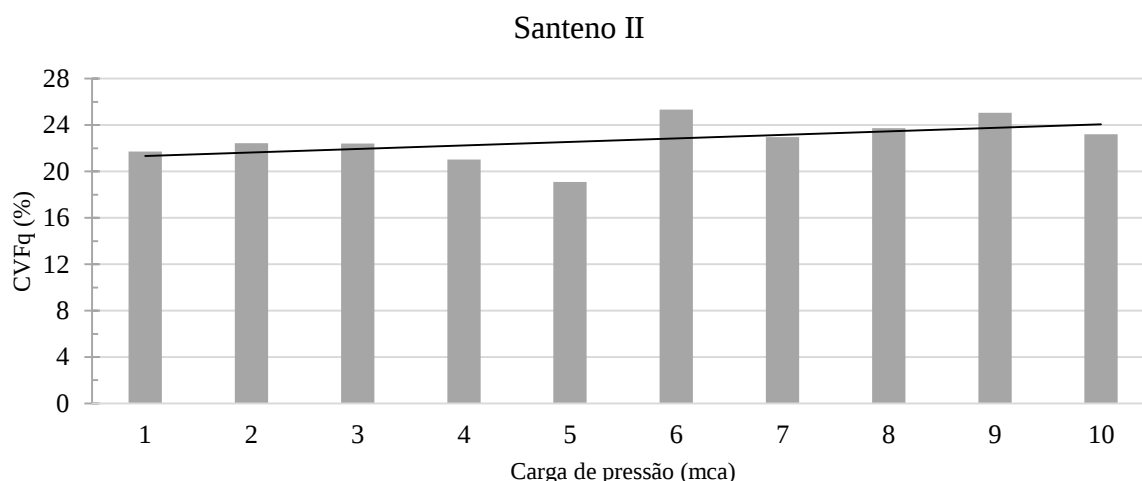


Figura 10: Coeficiente de variação de vazão por efeitos de fabricação (CV_f), em cada carga de pressão ensaiada no tubo perfurado Santeno II.

5.2 Perfil médio da precipitação e uniformidade de distribuição

A análise da uniformidade de distribuição de água foi realizada para as pressões de 4, 6, 8 e 10 mca, conforme recomendação do fabricante. A partir dos dados experimentais de precipitação e de valores de distância dos coletores em relação ao tubo, foram traçadas curvas que mostram o perfil de distribuição para cada carga de pressão referentes ao modelo I (Figura 11) e modelo II (Figura 12).

Os perfis de distribuição obtidos indicam uma precipitação crescente a partir do início do tubo até aproximadamente a metade da distância de alcance, evidenciando uma concentração de água nessa região, com decréscimo até o final da faixa molhada. Tendência semelhante foi verificada por Andrade (1990).

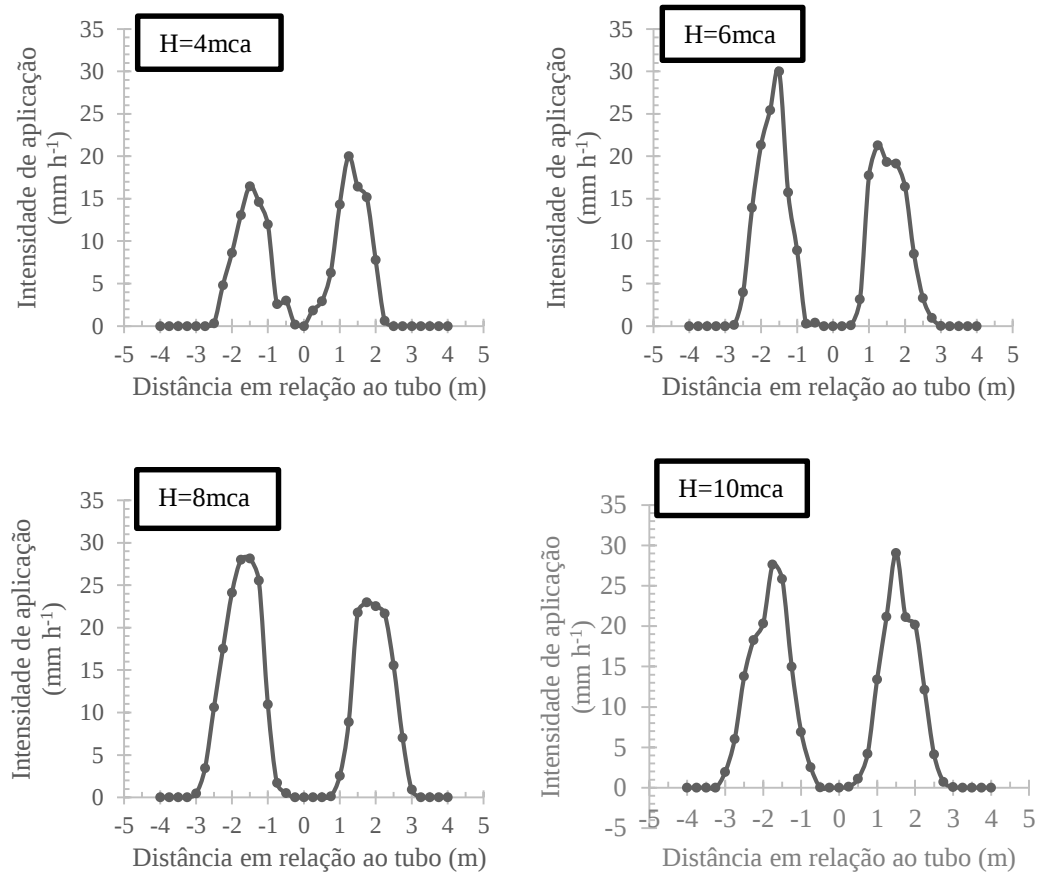


Figura 11: Perfis de distribuição da precipitação em função da distância em relação ao tubo em todas as pressões ensaiadas para o modelo I.

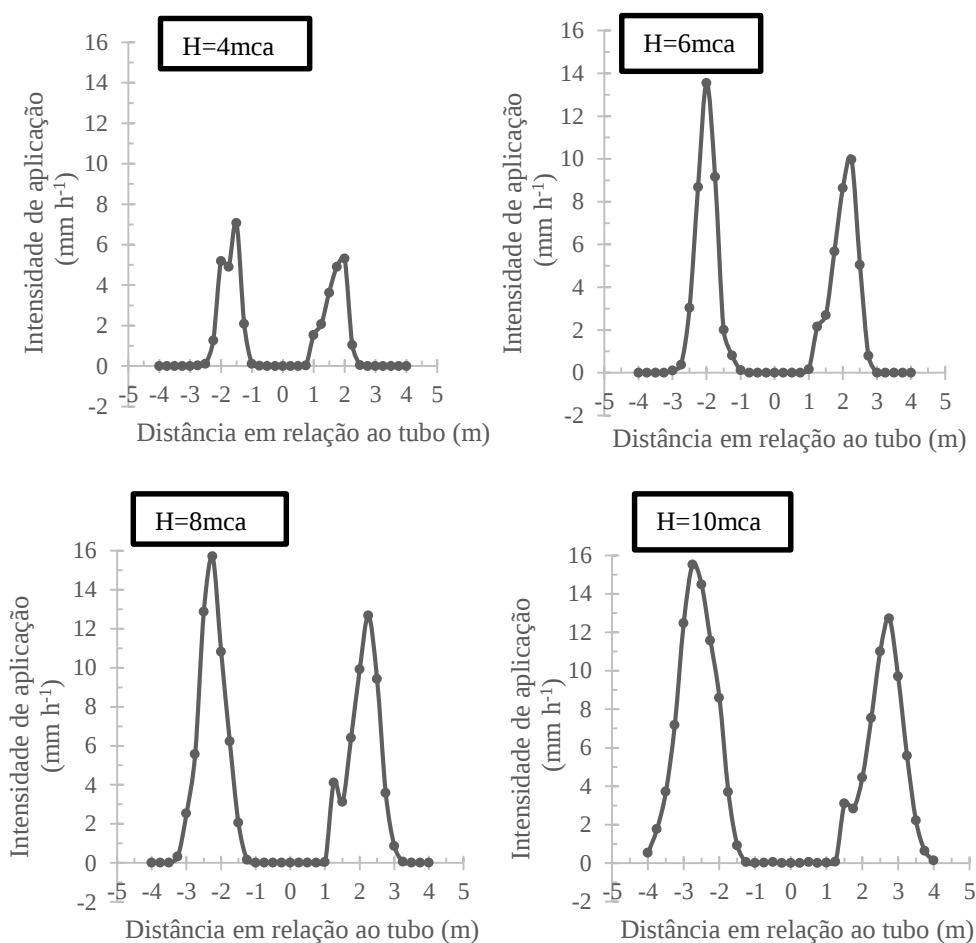


Figura 12: Perfis de distribuição da precipitação em função da distância em todas as pressões ensaiadas para o modelo II.

5.3 Equação de perda de carga do tubo perfurado

Para todos os cálculos, as vazões volumétricas foram padronizadas à temperatura de 23 °C, conforme metodologia descrita por TANAKA 2001. Analisando a perda de carga na linha teste, sem orifícios, para as cargas de pressão de ensaio de 4, 6, 8 e 10 mca e utilizando os dados experimentais de vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), e carga de pressão diferencial (mca), foram obtidas as equações que permitem calcular a perda de carga unitária no tubo (J , m m^{-1}), conforme mostrado na Tabela 3 referente ao modelo I e Tabela 4 ao modelo II.

Tabela 3: Equações de perda de carga unitária (m m^{-1}), em função vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), para o tubo Santeno I.

Pressão (mca)	Equação de perda de carga unitária(m/m)	R^2
4	$J = 224500 Q^{1,8061}$	0,999
6	$J = 133008 Q^{2,047}$	0,996
8	$J = 88956 Q^{2,0092}$	0,998
10	$J = 32914 Q^{1,887}$	0,997

As equações foram ajustadas segundo uma relação potencial, estando representadas graficamente na Figura 13, referente ao modelo I e Figura 14, referente ao modelo II.

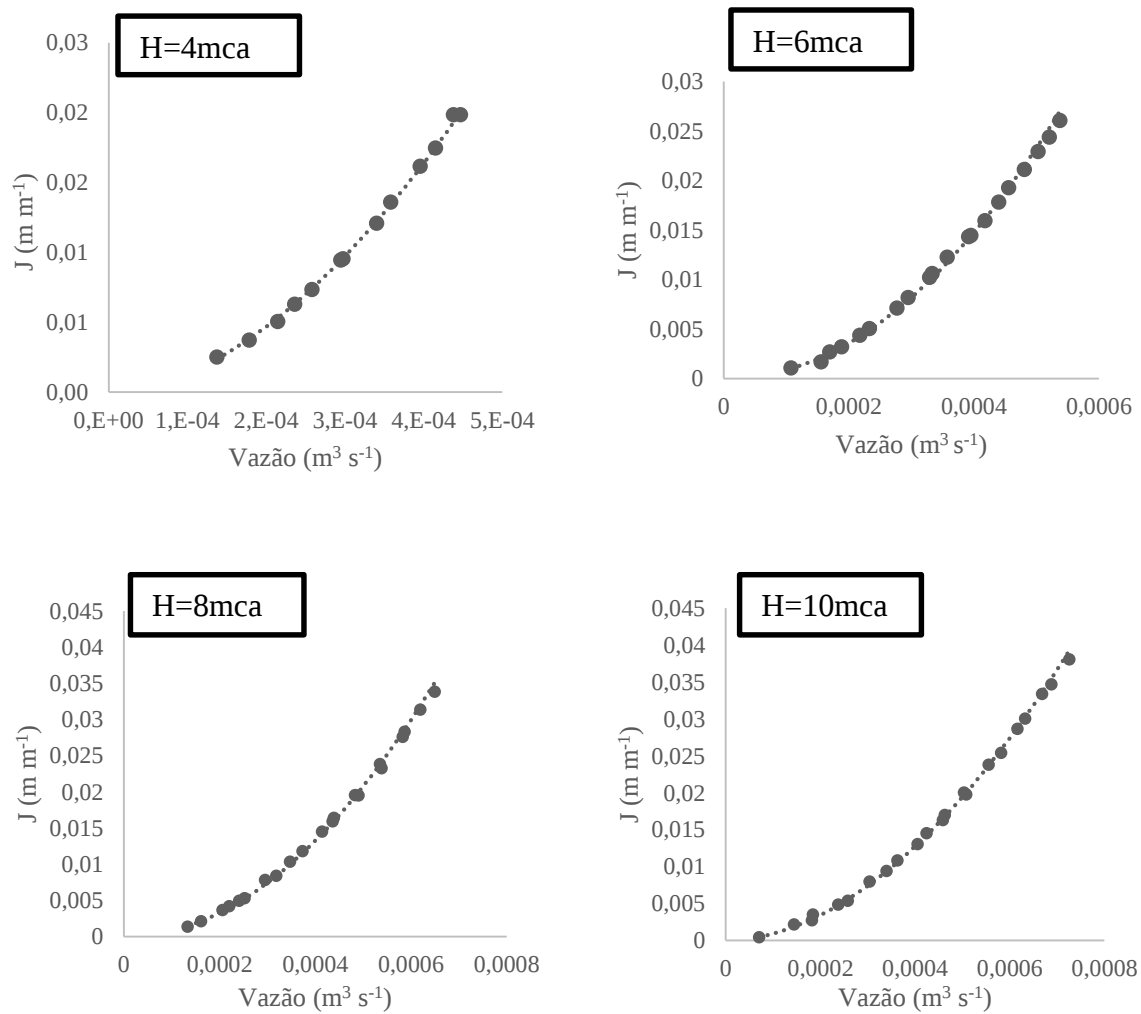
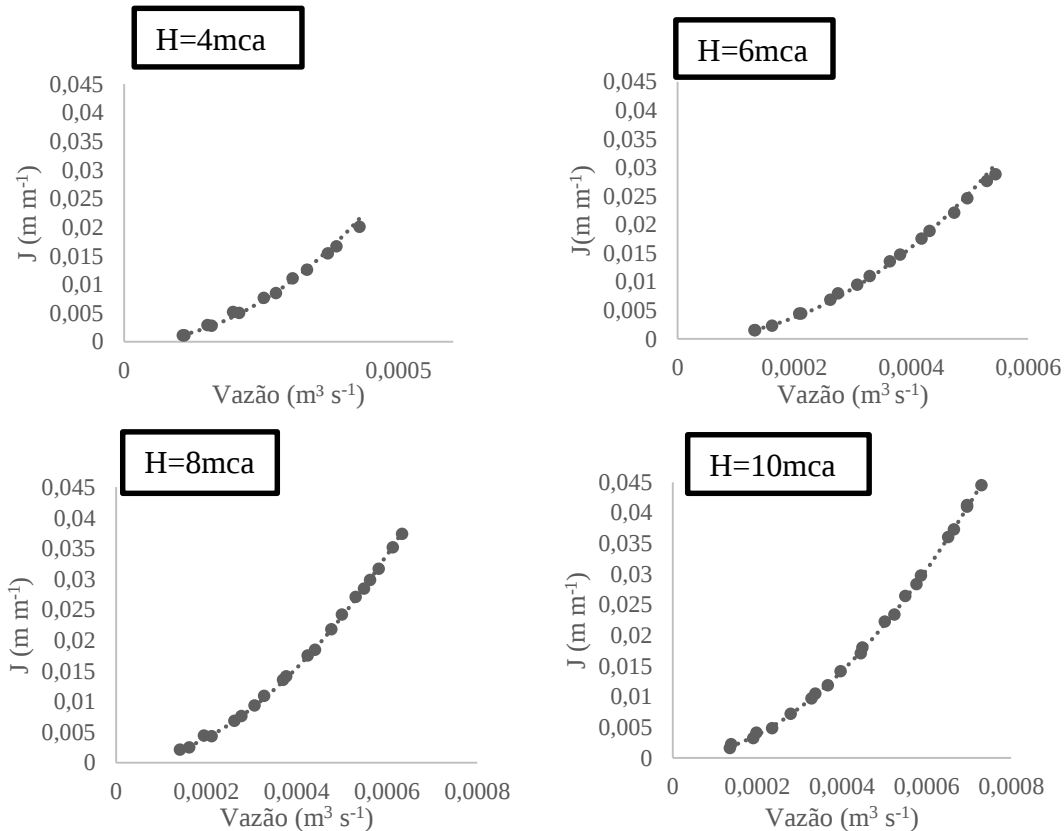
Figura 13: Perda de carga unitária (m m^{-1}), em função da vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), para o modelo I.

Tabela 4: Equações de perda de carga unitária (m m^{-1}), em função vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), para o tubo Santeno II.

Pressão (mca)	Equação de perda de carga unitária (m/m)	R^2
4	$J = 205847 Q^{2,0731}$	0,993
6	$J = 201906 Q^{2,0894}$	0,998
8	$J = 59802 Q^{1,9387}$	0,998
10	$J = 43713 Q^{1,9097}$	0,997

Figura 14: Perda de carga unitária (m m^{-1}), em função da vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), para o modelo II.

5.4 Perda de carga em função da vazão e do diâmetro equivalente

Ajustou-se com auxílio da ferramenta Solver® do Microsoft Excel, os dados obtidos experimentalmente de vazão (Q) em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e perda de carga unitária (J) em m m^{-1} para as pressões de ensaio de 4, 6, 8 e 10 mca (Figura 15), de forma a obter as seguintes equações de perda de carga unitária em função da vazão, e da carga de pressão de entrada da lateral, tendo em vista que o diâmetro varia com a pressão, Eq. 44 para o modelo I e Eq. 45 para o modelo II:

$$J = 172952,76 Q^2 Ho^{-0,3608} \quad \text{Eq. 44}$$

$$J = 172400 Q^2 H_o^{-0,302} \quad \text{Eq. 45}$$

em que:

Q : vazão, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

H_o : carga pressão de operação, em mca.

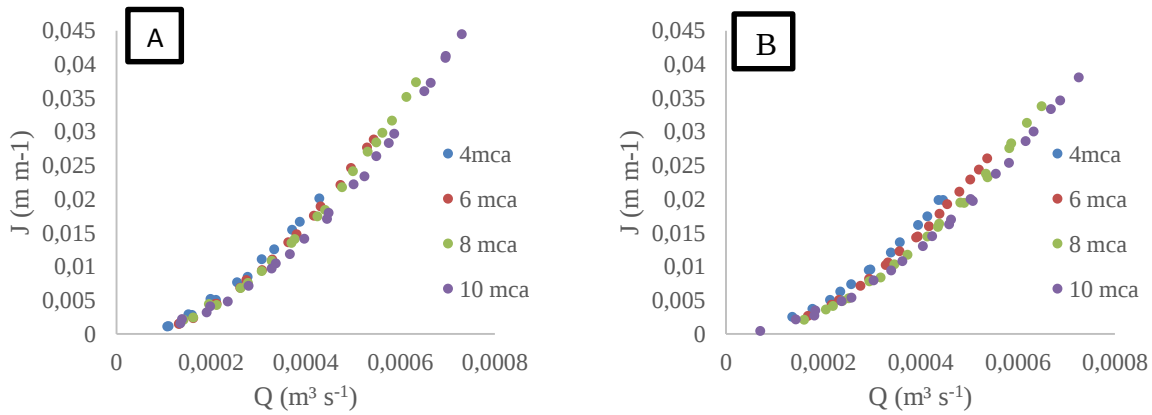


Figura 15: Gráfico perda de carga unitária em função da vazão e da pressão de operação para o modelo I (B) e modelo II (A).

Pela análise dos gráficos, pode-se observar que há efeito da pressão no diâmetro interno do tubo de polietileno, pois, com o aumento da pressão ocorreu redução na perda de carga para mesma vazão, indicando existir aumento do diâmetro interno do tubo. Por isso, buscou-se encontrar uma equação de perda de carga que considere a alteração no diâmetro interno da tubulação em função da pressão no início da tubulação.

Utilizou-se a equação de Darcy-Weisbach, com introdução do fator de atrito de Blasius para igualar com a equação experimental de perda de carga, com o objetivo de obter uma equação que relacione o diâmetro da tubulação em função da pressão de entrada, desenvolvendo-se para isso a seguinte sequência de cálculos:

Equação de Darcy-Weisbach:

$$J = 8,2652 \times 10^{-2} f \frac{Q^2}{D^5} \quad \text{Eq. 46}$$

em que:

Q : vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

D : diâmetro interno do tubo, (m).

Equação de Blasius para cálculo do fator de atrito f (Eq. 47):

$$f = 0,3164 \left(\frac{4 Q}{v \pi D} \right)^{-0,25} \quad \text{Eq. 47}$$

Introduzindo o fator de atrito de Blasius na Equação de Darcy-Weisbach, obtém-se a seguinte equação (Eq. 48):

$$J = 7,793 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad \text{Eq. 48}$$

em que:

Q : vazão da tubulação ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

D : diâmetro da tubulação (m).

Comparando a equação obtida através da introdução do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach (Eq. 48), com a equação experimental de perda de carga unitária (Eq. 44 e 45), obtém-se as seguintes equações para o modelo I (Eq. 49), e para o modelo II (Eq. 50), que determinam o diâmetro da tubulação (D), em função da carga pressão de entrada (Ho) e da vazão (Q):

$$7,793 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} = 172952,76 Q^2 Ho^{-0,3608}$$

$$D = (4,5056 \times 10^{-9} Q^{-0,25} Ho^{-0,3608})^{\frac{1}{4,75}} \quad \text{Eq. 49}$$

$$7,793 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} = 172400 Q^2 Ho^{-0,302}$$

$$D = (4,5203 \times 10^{-9} Q^{-0,25} H_0^{-0,302})^{\frac{1}{4,75}} \quad \text{Eq. 50}$$

Utilizando-se a equação que determina o diâmetro em função da pressão de entrada e vazão (Eq. 49 e 50), foi calculado o diâmetro interno da tubulação em função das pressões de entrada para diferentes vazões, e, em seguida calculou-se a média dos valores de diâmetro obtidos para cada valor de carga de pressão, de forma a obter um diâmetro médio equivalente em milímetros, conforme mostrado na Tabela 5 para ambos os modelos de tubos estudados. Em seguida, foi realizada uma análise de regressão com os valores dos diâmetros médios equivalentes obtidos através das Eq. 49 e 50 em função da pressão de entrada, conforme demonstrado na Figura 16, obtendo-se a equação que descreve a relação diâmetro médio equivalente em função da pressão de entrada, ajustada pelo modelo potencial com coeficiente de determinação $R^2=0,9937$ para o modelo I e $R^2=0,9904$ para o modelo II.

Tabela 5: Valores de diâmetro médio equivalente para a pressão de operação para o modelo I e II

$H_0(\text{m})$	Diâmetro médio equivalente (mm) Santeno I	Diâmetro médio equivalente (mm) Santeno II
4	30,06	29,58
6	30,64	30,01
8	31,1	30,35
10	31,46	30,62

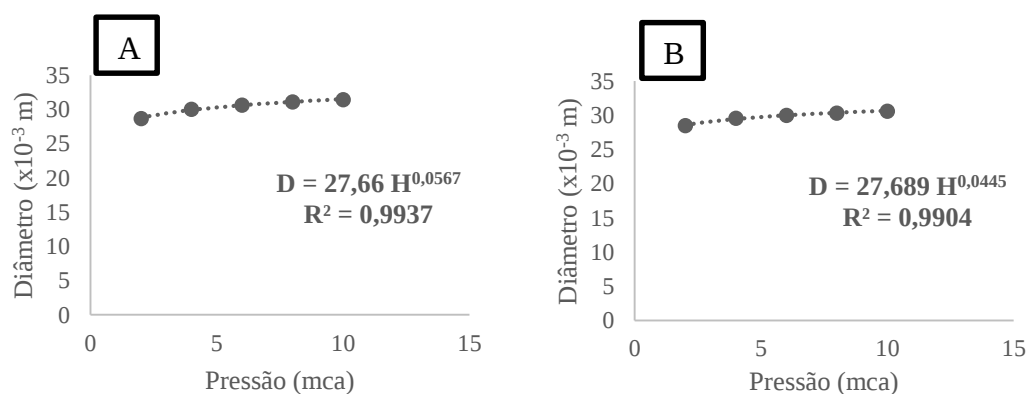


Figura 16: Diâmetro interno médio equivalente em função da pressão de entrada, (A) modelo I e (B) modelo II.

Pode-se notar, entretanto, pelas análises dos gráficos que ocorrem, aumentos nos diâmetros internos da tubulação com o acréscimo de pressão, seguindo uma relação potencial, conforme verificado também por Vilela et al. (2003), ao avaliar a alteração no diâmetro e na

perda de carga em tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. O mesmo foi constatado por Andrade (1990), estudando as características hidráulicas de um tubo perfurado de polietileno e por Frizzone et al. (1998), porém, trabalhando com o tubo gotejador Rain-Tape.

Para pressão de entrada em mca, em função do diâmetro interno médio equivalente em mm obtém-se o seguinte modelo (Eq. 51), para o tubo Santeno I e o modelo (Eq. 52), para o tubo Santeno II, com Ho em mca e D em m:

$$D = 27,66 \times 10^{-3} Ho^{0,0567} \quad \text{Eq. 51}$$

$$D = 27,69 \times 10^{-3} Ho^{0,0445} \quad \text{Eq. 52}$$

Inserindo as Eq. 51 e 52 nas equações experimentais de perda de carga unitária (Eq. 44 e 45), a perda de carga para o tubo, pode ser expressa pela equação de Darcy-Weisbach com fator de atrito de Blasius e diâmetro ajustado em função da pressão de entrada (Eq. 53 e 54, para santeno I e II respectivamente):

$$J = 19629,72 Q^{1,75} Ho^{-0,269} \quad \text{Eq. 53}$$

$$J = 19531,93 Q^{1,75} Ho^{-0,2114} \quad \text{Eq. 54}$$

Foram obtidas também, outras equações de perda de carga em função do diâmetro médio equivalente, da vazão e da pressão de entrada para regime de escoamento laminar ($Re \leq 2000$) e, pressão de entrada maior ou igual a 4 mca e, menor ou igual a 10 mca, seguindo a seguinte sequência de cálculos:

Equação do fator de atrito de Hagen-Poiseuille para regime de escoamento laminar, sendo D em m e Q em m^3s^{-1} :

$$f = \frac{64}{Re} = 16 \frac{v\pi D}{Q} \quad \text{Eq. 55}$$

Introduzindo o fator de atrito para regime laminar (Eq. 55), na Equação de Darcy-Weisbach, obtém-se a Eq. 56:

$$J = 4,1712 \times 10^{-6} \frac{Q}{D^4} \quad \text{Eq. 56}$$

Inserindo as Eq. 51 e 52, que determinam o diâmetro médio equivalente em função da pressão de entrada, na Eq. 56, a perda de carga no escoamento em regime laminar, pode ser expressa pela equação de Darcy-Weisbach com f , calculado pela fórmula de Hagen-Poiseuille e, diâmetro ajustado em função da pressão de entrada, pelas Eq. 57 e 58, referentes aos modelos Santeno I e II, respectivamente:

$$J = 7,13 Q Ho^{-0,227} \quad \text{Eq. 57}$$

$$J = 7,1 Q Ho^{-0,178} \quad \text{Eq. 58}$$

5.5 Fator de redução de perda de carga (F), no tubo com múltiplas saídas laterais

Utilizando-se um programa de computador, cujo fluxograma foi apresentado na Figura 3, determinaram-se os valores do fator de redução de perda de carga (F) para os tubos perfurados em estudo, em função do número de emissores (N) para o espaçamento de 0,15 m entre emissores existentes na mangueira flexível.

Para esses cálculos, utilizou-se a equação ajustada para a relação vazão-pressão obtida experimentalmente com Q em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e Ho em m, e as equações experimentais de perda de carga (Eq. 53 e 54). A Tabela 6 mostra os valores de F calculados em função do número de emissores (N) para o modelo I e a Tabela 7 referente ao modelo II.

Tabela 6: Valores de F para o tubo Santeno I, com emissores espaçados de 0,15 m, em função do número de pares de saídas (N)

N	F	N	F
1	1	26-27	0,344
2	0,583	28	0,343
3	0,491	29-30	0,342
4	0,447	31-32	0,341
5	0,422	33-35	0,340
6	0,405	36-38	0,339
7	0,394	39-41	0,338
8	0,385	46-50	0,336
9	0,378	51-56	0,335
10	0,373	57-65	0,334
11	0,369	66-76	0,333
12	0,365	77-93	0,332
13	0,362	94-117	0,331
14	0,359	118-157	0,330
15	0,357	158-226	0,329
16	0,355	227-334	0,328
17	0,354	335-445	0,327
18	0,352	446-536	0,326
19	0,351	537-610	0,325
20	0,349	611-667	0,324
21	0,348		
22	0,347		
23-24	0,346		
25	0,345		

Tabela 7: Valores de F para o tubo Santeno II, com emissores espaçados de 0,15 m, em função do número de pares saídas (N)

N	F	N	F
1	1	25	0,384
2	0,649	26	0,383
3	0,546	27-28	0,382
4	0,498	29	0,381
5	0,469	30-31	0,380
6	0,451	32-33	0,379
7	0,438	34-36	0,378
8	0,428	37-39	0,377
9	0,421	40-42	0,376
10	0,415	43-46	0,375
11	0,410	47-50	0,374
12	0,406	51-56	0,373
13	0,403	57-63	0,372
14	0,400	64-73	0,371
15	0,398	74-85	0,370
16	0,395	86-102	0,369
17	0,394	103-128	0,368
18	0,392	129-170	0,367
19	0,390	171-243	0,366
20	0,389	244-354	0,365
21	0,388	355-469	0,364
22	0,387	470-562	0,363
23	0,386	563-637	0,362
24	0,385	638-667	0,361

Verificou-se, também, que para um mesmo espaçamento entre emissores, os valores de F decrescem quando se aumenta o número de orifícios. Para o tubo Santeno I o valor de F estabilizou em 0,324, a partir de 611 emissores. Para o modelo II o valor de F estabilizou em 0,361, a partir de 638 emissores. Ao realizar a caracterização hidráulica do tubo gotejador Rain Bird, Frizzzone et al, (1998), verificaram que os valores de F diminuíram com o aumento do número de emissores, entretanto, para um mesmo número de emissores os valores de F diminuíram com o aumento da pressão; segundo os autores essa diminuição pode estar associada ao crescimento do diâmetro interno da tubulação, decorrente da elevação da pressão. Andrade (1990), verificou que para um mesmo espaçamento entre emissores os valores de F decrescem quando se aumenta o número de emissores e aumentam quando a pressão é incrementada a partir de um determinado número de emissores. Botrel (1984), estudando a hidráulica de linhas laterais para irrigação localizada, observou que o valor de F aumentou para um mesmo número de emissores quando se diminuiu o espaçamento entre eles.

5.6 Comprimento máximo de linha lateral em nível, considerando o critério da variação de vazão dos emissores

Utilizando um programa computacional, cujo fluxograma foi apresentado na figura 4, determinaram-se os comprimentos máximos da linha lateral em nível para variações máximas de vazão dos emissores, de 10, 8, 6 e 4% para as pressões de entrada (H_0) de 6, 8 e 10 m. A Tabela 8 mostra os valores do comprimento máximo da linha lateral em função da variação máxima de vazão dos emissores, e da pressão na entrada da linha (H_0) para o modelo I e a Tabela 9 para o modelo II. Foram utilizadas as Eq. 29 e 30 com $c = 27,66 \times 10^{-3}$; $d = 0,0567$ e $F = 0,324$ para o tubo Santeno I, e $c = 27,69 \times 10^{-3}$; $d = 0,0445$ e $F = 0,361$ para o tubo Santeno II.

Tabela 8: Comprimento máximo de linhas laterais (m) em função da pressão de entrada (m) e, da variação de vazão dos emissores para o tubo Santeno I

H_0 (m)	q_{var}			
	0,10	0,08	0,06	0,04
6	102,1 (0,87)	93,4 (0,87)	83,5 (0,88)	71,5 (0,88)
8	104,1 (0,86)	95,3 (0,87)	85,2 (0,87)	73,0 (0,74)
10	105,7 (0,87)	96,7 (0,88)	86,5 (0,90)	74,1 (0,65)

() Os valores entre parênteses correspondem à uniformidade de emissão.

Tabela 9: Comprimento máximo de linhas laterais (m) em função da pressão de entrada (m) e, da variação de vazão dos emissores para o tubo Santeno II

H_0 (m)	q_{var}			
	0,10	0,08	0,06	0,04
6	96,4 (0,75)	88,2 (0,75)	78,8 (0,76)	67,5 (0,76)
8	97,3 (0,76)	89,0 (0,77)	79,6 (0,78)	68,2 (0,78)
10	98,0 (0,76)	89,7 (0,79)	80,2 (0,78)	68,7 (0,78)

() Os valores entre parênteses correspondem à uniformidade de emissão.

Observa-se para ambos os modelos e, para a tubulação em nível que o comprimento máximo sempre cresceu com o aumento da pressão de entrada até 10 m e, com o aumento da variação de vazão dos emissores. Ao realizar a caracterização hidráulica do tubo gotejador Rain Bird, Frizzzone et al, (1998), verificaram que, para a tubulação em nível, o comprimento máximo aumentou com o acréscimo da pressão de entrada até 98 kPa. Andrade (1990,) observou que na pressão de operação ótima dos tubos (8 mca), os comprimentos máximos estão coerentes com o preconizado pelo fabricante, com o critério de se permitir 20% de variação de vazão (40% na pressão). Ainda segundo o autor devido a grande sensibilidade da vazão à variação de pressão,

este tipo de linha de irrigação perfurada deve ser utilizada preferencialmente em terrenos uniformes, dando preferência para a sua alocação em nível.

5.7 Comprimento máximo da linha lateral com critérios de perda de carga, pressão de entrada e relação vazão-pressão linear, para o modelo Santeno I

Para ilustrar este procedimento de cálculo do comprimento máximo da linha lateral é desenvolvido a seguir um exemplo de aplicação, sendo dados:

- Linha em nível
- Diâmetro interno do tubo Santeno I: 30 mm
- Viscosidade cinemática da água na temperatura de 20°C: $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Critério de dimensionamento de comprimento máximo:
 - Critério: $q_{var} = 0,10$
- Equação de vazão-pressão do par de orifícios: $q(L \text{ h}^{-1}) = 0,6203 H(m) + 1,3054$
- Equação da largura molhada em função da pressão: $w(m) = 3,845 + 0,27 H(m)$
- Pressão na entrada da lateral (H_0): 8 mca
- Espaçamento entre pares de orifícios (S_e): 0,15 m

Para o dimensionamento da lateral com base na perda de carga máxima admissível (Hf_{adm}), usando o critério de variação de vazão, seguem os passos:

- 1) Cálculo da perda de carga máxima admissível pelo critério de variação de vazão admissível:

$$Hf_{adm} = \frac{q_{var} (a H_{m\acute{a}x} + b)}{a}$$

$$Hf_{adm} = \frac{0,1(0,6203 \times 8 + 1,3054)}{0,6203} = 1,010 \text{ m}$$

- 2) Cálculo da perda de carga máxima admissível pelo critério de variação de largura molhada admissível:

$$Hf_{adm} = \frac{\Delta w_{adm}}{a1}$$

$$Hf_{adm} = \frac{1}{0,27} = 3,703 \text{ m}$$

- 3) Cálculo da pressão média na linha lateral (H_m):

$$H_m = H_{m\acute{a}x} - \frac{m+1}{m+2} Hf_{adm}$$

$$H_m = 8 - \frac{1,75+1}{1,75+2} \times 1,010 = 7,259 \text{ m}$$

- 4) Cálculo da vazão média na linha lateral (q_m):

$$q_m = a H_m + b$$

$$q_m = 0,6203 \times 7,259 + 1,3054 = 5,808 \text{ L h}^{-1}$$

- 5) Cálculo do comprimento máximo da linha lateral em nível:

$$L_{m\acute{a}x} = \left(\frac{Hf_{adm} D^{4,75} Se^{1,75}}{0,0089385 v^{0,25} q_m^{-1,75}} \right)^{\frac{1}{2,75}}$$

$$L_{m\acute{a}x} = \left(\frac{1,010 \times 0,03^{4,75} \times 0,15^{1,75}}{0,0089385 (1,01 \times 10^{-6})^{0,25} \left(\frac{5,808}{3600000} \right)^{1,75}} \right)^{1/2,75} = 66,5 \text{ m}$$

5.8 Comprimento máximo da linha lateral com critérios de perda de carga, relação vazão-pressão linear e, largura da faixa molhada para o modelo Santeno II

Para o dimensionamento da linha lateral, com base na variação máxima admissível da largura da faixa molhada fez-se uma aplicação ilustrativa para o tubo Santeno II, considerando os seguintes dados:

- Linha em nível;
- Diâmetro interno do tubo Santeno II: 30 mm;
- Viscosidade cinemática da água na temperatura de 20°C: $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;
- Critério de dimensionamento de comprimento máximo:
 - Critério 1: $q_{var} = 0,10$
 - $\Delta w_{adm} = 0,52 \text{ m}$
- Equação de vazão-pressão do par de orifícios: $q(L \text{ h}^{-1}) = 0,4105 H(m) + 0,7532$;
- Equação da largura molhada em função da pressão: $w(m) = 2,612 + 0,529 H(m)$;
- Pressão na entrada da lateral (H_0): 8 mca;
- Espaçamento entre pares de orifícios (S_e): 0,15 m.

Para o dimensionamento da lateral, com base no critério de variação máxima da faixa molhada, seguem os passos:

- 1) Cálculo da perda de carga máxima admissível pelo critério de variação de largura da faixa molhada admissível:

$$Hf_{adm} = \frac{\Delta w_{adm}}{a_1}$$

$$Hf_{adm} = \frac{0,52}{0,529} = 0,983$$

- 2) Estimativa da carga média de pressão na linha lateral:

$$H_m = H_{m\acute{a}x} - \frac{m + 1}{m + 2} Hf_{adm}$$

$$H_m = 8 - \frac{1,75 + 1}{1,75 + 2} \times 0,983 = 7,279 \text{ m}$$

3) Estimativa da vazão média na linha lateral na lateral:

$$q_m = a H_m + b$$

$$q_m = (0,4105 \times 7,279) + 0,7532 = 3,741 \text{ L h}^{-1}$$

4) Estimativa do comprimento máximo da linha lateral em nível:

$$L_{m\acute{a}x} = \left(\frac{Hf_{adm} D^{4,75} Se^{1,75}}{0,0089385 v^{0,25} q_m^{1,75}} \right)^{\frac{1}{2,75}}$$

$$L_{m\acute{a}x} = \left(\frac{0,983 \times 0,03^{4,75} \times 0,15^{1,75}}{0,0089385 (1,01 \times 10^{-6})^{0,25} \left(\frac{3,741}{3600000} \right)^{1,75}} \right)^{\frac{1}{2,75}} = 87,1 \text{ m}$$

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e, na metodologia aplicada no desenvolvimento do presente trabalho, chegaram-se às seguintes conclusões:

a) A equação vazão-pressão encontrada para os emissores do tubo perfurado a laser fabricados pela indústria Santeno®, modelos I e II, foram as seguintes:

$$\text{Santeno I: } q(L \text{ h}^{-1}) = 1,701 H(m)^{0,618}$$

$$\text{Santeno II: } q(L \text{ h}^{-1}) = 1,043 H(m)^{0,641}$$

- b) Os emissores do modelo Santeno® I apresentaram CVf variando entre 10,40 e 12,72% para as cargas de pressão entre 1 e 10 mca. Esses emissores são classificados como de uniformidade média de vazão, em termos de qualidade de fabricação, de acordo com a classificação da ASABE (2008), pela norma EP405.1. O expoente da equação vazão pressão foi de 0,6411 indicando regime de escoamento turbulento.
- c) Os emissores do modelo Santeno® II apresentaram CVf variando entre 19,10 a 25,33% para as cargas de pressão entre 1 e 10 mca. Utilizando a mesma referência normativa, esses emissores são classificados como de uniformidade marginal a inaceitável, em termos de qualidade de fabricação. O expoente da equação vazão pressão foi de 0,6189 indicando regime de escoamento turbulento.
- d) As equações experimentais de perda de carga para regime de escoamento turbulento liso em função da vazão e da pressão de entrada na linha, ajustadas em função da variação de diâmetro interno causada pela pressão no início da linha, para os tubos Santeno® I e II, foram as seguintes:

$$\text{Santeno I: } J = 19629,72 Q^{1,75} H_0^{-0,2690}$$

$$\text{Santeno II: } J = 19531,93 Q^{1,75} H_0^{-0,2114}$$

- e) Verificou-se que para um mesmo espaçamento entre emissores, os valores de F decrescem quando se aumenta o número de orifícios em ambos os modelos de tubo estudados. Para o tubo Santeno® I F estabilizou-se em 0,324 a partir de 611 emissores, e para o tubo Santeno® II F estabilizou-se em 0,361 a partir de 638 emissores.
- f) Os alcances dos jatos encontrados em cada pressão de operação para os modelos I e II foram os seguintes:

Pressão (mca)	Alcance (Santeno I)	Alcance (Santeno II)
4	4,9 m	4,7 m
6	5,5 m	5,8 m
8	6,0 m	6,8 m
10	6,6 m	7,9 m

- g) O comprimento máximo da linha lateral em nível baseado na variação admissível de largura da faixa molhada foi 66,5 e 87,1 metros para os modelos I e II respectivamente. Com relação ao comprimento máximo da linha lateral em nível em função da pressão de entrada e da variação de vazão dos emissores, nota-se que o comprimento máximo sempre cresceu com o aumento da carga de pressão de entrada até 10 mca e com o aumento da variação admissível de vazão dos emissores.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J.M.H.; LOPES, J.R.; REGALADO, A.P.; HERNANDEZ, J.F.G. **El riego localizado**. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987. 317p.

AGÊNCIA NACIONAL DA ÁGUA – ANA. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada/Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017. Disponível em <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrigacaoUsodaAguanaAgriculturaIrigada.pdf>. Acesso em 19/10/2017

ANDRADE, D. V. **Avaliação hidráulica de tubos flexíveis de polietileno perfurados a laser, utilizados na irrigação**. 1990. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. **Design and Installation of Microirrigation Systems**. ASABE STANDARDS 2008, EP405.1 APR1988(R2008). St. Joseph: ASABE, 2008.

AYARS, J. E., Bucks, D. A., Lamm, F. R., and Nakayama, F. S. (2007). Introduction. Chapter 1, Microirrigation for crop production - Design, operation and management, F. R. Lamm, J. E. Ayars, and F. S. Nakayama, eds., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 1–26.

BACA GARCIA, Carlos Jesus. Avaliação técnica de tubos emissores para irrigação localizada. 2006.

BONOMO, R.; GOMES FILHO, R.R.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M. Caracterização hidráulica de tubos perfurados flexíveis de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.17, n.3, p.60-69, 1998

BOTREL, T.A. **Hidráulica de microaspersores e linhas laterais para irrigação localizada**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1984. 78p. Dissertação Mestrado

CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 30, n.3, p. 299-305, 2008.

CHARACTERIZATION, H.; DRIP, O. F. Caracterização Hidráulica De Um Tubo Gotejador Hydraulic Characterization of Drip Tape. , , n. 19, p. 278–283, 1998.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station. 1942. (Bulletin, 670).

CLARK, G. A.; HAMAN, D. Z.; PROCHASKA, J. F.; YITAYEW, M. General system design principles. In: LAMM, F. R; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production: Design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 2006, p. 161-220.

FARIA, M.A. **Características hidráulicas do microgotejador IRTEC e da linha lateral de irrigação**. Viçosa: UFV, 1981. 72p. Dissertação mestrado

FRIZZONE, J. A. et al. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. **Maringá: Eduem**, 2012.

FRIZZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P.; BOTREL, T.A. . Caracterização Hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. n.3, p. 278–283, 1998.

GARCIA. C.J.B. Avaliação técnica de tubos emissores para irrigação localizada. Tese **Doutorado.**; Unesp Botucatu.; 2009.

GILLESPIE, V.A.; PHILLIPS, A.L.; WU, I-P. Drip irrigation design equations. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.3, p.247-256, 1979.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. Sprinkle and trickle irrigation. New York: van Nodtrand Reinhold, 1990. 652p.

MERRIAM, J.L. & KELLER, J. Farm irrigation system evaluation; a guide for management. Logan, Utah State University, 1978. 271p

MARINHO, A. B.; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C. A. V.; AZEVEDO, H. M. Evaluation of hydraulic characteristics of the Santape perforated tube. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 316-321, 1999.

OLIVEIRA, C.A. da S. **Hidráulica de gotejadores e de linhas laterais para irrigação por gotejamento**. Viçosa: UFV, 1978. 72p. Dissertação Mestrado

PAZ, V.P.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; FOLEGATTI, M.V. Redução na receita líquida por déficit ou excesso de água na cultura do citros. **Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.9, p.869-875, 1997.

PINTO, M. F.; CAMARGO, A. P.; RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J. A. Caracterização hidráulica de tubos porosos oriundos de pneus reciclados utilizados em irrigação subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 11, p. 1095-1101, 2014.

RODRIGO LÒPEZ, J., HERNÁNDEZ ABREU, J.M., PÈREZ REGALADO A., GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, J.F. *Riego localizado*. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. 405p.

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

SCALOPPI, E. J. Exigências de energia para irrigação. **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v.12, n.2, p13-7, 1985.

SCALOPPI, J.E.; ALLEN, R.G. Hydraulics of irrigation laterals: Comparative analysis. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New Yor, v.119, n.1, p.91-115, 1993.

SCALOPPI, E.J. Adjusted F factor for multiple-outlet pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.114, n.1, p.169-174, 1988.

SOARES, A. **Características hidráulicas de microtubos Cipla e de linhas laterais para irrigação por gotejamento**. Viçosa:UFV 1981, 78p. Dissertação Mestrado

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, n. 5, p.1038-8. 1979.

TANAKA, M.; GIRARD, G.; DAVIS, R.; PEUTO, A.; BIGNELL, N. Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports. **Metrologia**, v. 38, p. 301-309, 2001.

VILELA, L. A. A.; SOCCOL, O. J.; GERVÁSIO, 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**, 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.

von BERNUTH, R.D.; WILSON, T. Friction factors for small diameter plastic pipes. **Journal of Hydraulics Engineering**, New York, v.115, n.2, p.183-192, 1989.

von BERNUTH, R.; SOLOMON, K.H. Emitter construction. In: Nakayama, F.S.; Bucks, D.A **Trickle irrigation for crop production**. Phoenix: Elsevier 1986. cap. 2, p. 27-52.

YILDIRIM, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. **Irrigation and Drainage**, 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 Hydraulics Engineering**, New York, v.131, n.8, p.694-704, 2005

WU, I-P.; GITLIN, H.M. Energy gradient line for drip irrigation laterals. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.101, n.4, p.323-326, 1975.

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

APÊNDICE

Versão do programa utilizado para calcular o fator de redução de perda de carga (F), da tubulação perfurada a laser em função do número de saídas (N) em linguagem Java.

```

1  import java.io.BufferedWriter;
2  import java.io.File;
3  import java.io.FileNotFoundException;
4  import java.io.FileOutputStream;
5  import java.io.IOException;
6  import java.io.OutputStream;
7  import java.io.OutputStreamWriter;
8  import java.io.UnsupportedEncodingException;
9  import java.text.DateFormat;
10 import java.text.SimpleDateFormat;
11 import java.util.Calendar;
12
13 public class PerdaDeCarga {
14
15     private double nEmissor;
16     private double k;
17     private double x;
18     private double a;
19     private double b;
20     private double c;
21     private double hIni;
22     private double se = 0;
23     private double L;
24     private static double v = 1.0;
25     private static double pi = 3.1416;
26
27     private BufferedWriter bw;
28
29     private File f;
30
31     public PerdaDeCarga(double nEmissor, double k, double x, double a,
32 double b, double c, double hIni, double se,
33 double L, String fileName) throws IOException {
34         this.nEmissor = nEmissor;
35         this.k = k;
36         this.x = x;
37         this.a = a;
38         this.b = b;
39         this.c = c;
40         this.hIni = hIni;
41         this.se = se;
42         this.L = L;
43
44         DateFormat df = new SimpleDateFormat("MM-dd-yyyy-HH:mm:ss");
45         f = new File(System.getProperty("user.dir") + "\\\" + fileName +
46 "-" + nEmissor
47 + df.format(Calendar.getInstance().getTime()) +
48 ".csv");
49
50         OutputStream os;
51

```

```

52         os = (OutputStream) new FileOutputStream(f);
53         String encoding = "UTF8";
54         OutputStreamWriter osw = new OutputStreamWriter(os, encoding);
55         bw = new BufferedWriter(osw);
56
57         bw.write("NUmero Emissores; F \n");
58
59     }
60
61     public void santeno() throws IOException {
62         double lIni = 0;
63         double hEmissor = 0;
64         double qEmissor;
65         double qTrecho = 0;
66         double dH;
67         double hfTrecho = 0;
68         double somaHf = 0;
69         double hfUniforme;
70         double F;
71
72         lIni = this.L;
73         hEmissor = hIni;
74         qEmissor = 0.0000002897 * Math.pow(hEmissor, 0.641);
75         qTrecho = qEmissor;
76         hfTrecho = this.a * Math.pow(qTrecho, 1.75) *
77 Math.pow(hEmissor, this.c) * se;
78         somaHf = hfTrecho;
79
80         hfUniforme = this.a * Math.pow(qTrecho, 1.75) *
81 Math.pow(hEmissor, this.c) * lIni;
82
83         F = somaHf / hfUniforme;
84
85         bw.write(1 + "; " + F + " \n");
86         for (int i = 2; i <= nEmissor; i++) {
87
88             lIni += this.L;
89             hEmissor += hfTrecho;
90
91             qEmissor = 0.0000002897 * Math.pow(hEmissor, 0.641);
92
93             qTrecho += qEmissor;
94
95
96             .
97             // dH = 0.027689 * Math.pow(hEmissor, 0.0445);
98
99             hfTrecho = this.a * Math.pow(qTrecho, 1.75) *
100 Math.pow(hEmissor, this.c) * se;
101
102             somaHf += hfTrecho;
103
104             hfUniforme = this.a * Math.pow(qTrecho, 1.75) *
105 Math.pow(hEmissor, this.c) * lIni;
106
107             F = somaHf / hfUniforme;
108
109             bw.write(i + "; " + F + " \n");
110         }
111

```

```

112         bw.flush();
113         bw.close();
114
115         System.out.println("Os dados foram inseridos na tabela " +
116 f.getAbsolutePath());
117     }
118 }

```

Versão do programa utilizado para calcular o comprimento máximo da linha lateral em nível ($L_{máx}$) e a uniformidade de emissão (UE) em linguagem Java.

```

1  package br.ve;
2
3  import java.util.Scanner;
4
5  public class CalculoLMax {
6
7      /*private double qvar;
8      private double k;
9      private double x;
10     private double a;
11     private double m;
12     private double b;
13     private double se;
14     private double h0;
15     private double hVar;
16     private double hFamd;
17     private double hMed;
18     private double qMed;
19     private double ue;
20     private double hMin;
21     private double qMin;
22     private double lMax;
23     private double al;
24     */
25     public static void main(String[] args) {
26         double qVar;
27         double k;
28         double x;
29         double a;
30         double m;
31         double b;
32         double se;
33         double h0;
34         double hVar;
35         double hFamd;
36         double hMed;
37         double qMed;
38         double ue;
39         double hMin;
40         double qMin;
41         double lMax;
42         double al;
43         double cvf;
44
45         Scanner ler = new Scanner(System.in);
46
47         System.out.println("Informe o qVar");

```

```

48
49     qVar = ler.nextDouble();
50
51     System.out.println("Informe k");
52
53     k = ler.nextDouble();
54
55     System.out.println("Informe x");
56
57     x = ler.nextDouble();
58
59     System.out.println("Informe a");
60
61     a = ler.nextDouble();
62
63     System.out.println("Informe m");
64
65     m = ler.nextDouble();
66
67     System.out.println("Informe b");
68
69     b = ler.nextDouble();
70
71     System.out.println("Informe se");
72
73     se = ler.nextDouble();
74
75     System.out.println("Informe o h0");
76
77     h0 = ler.nextDouble();
78
79     System.out.println("Informe o cvf");
80
81     cvf = ler.nextDouble();
82
83     hVar = 1 - Math.pow(1-qVar, 1/x);
84
85     hFamd = hVar * h0;
86
87     hMed = h0 - ((m+1)/(m+2))*hFamd;
88
89     qMed = k * Math.pow(hMed, x);
90
91     hMin = h0 - (h0*hVar);
92
93     qMin = k * Math.pow(hMin, x);
94
95     ue = (1 - (1,27*(cvf/100)/1,41)) * (qMin/qMed);
96
97     a1 = a * (1/(m+1));
98
99
100     lMax = Math.pow((hFamd * Math.pow(se, m))/(a1 * Math.pow(qMed,
    m)*Math.pow(h0, b)), (1/2.75)

```