

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ESTUDO DA UNIFORMIDADE DE EMISSÃO DE AGUA UTILIZANDO
DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE GOTEJADORES NA LINHA LATERAL**

LUIZ ANTONIO DE ANDRADE

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU-SP
Junho - 2009

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU**

**ESTUDO DA UNIFORMIDADE DE EMISSÃO DE AGUA UTILIZANDO
DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE GOTEJADORES NA LINHA LATERAL**

LUIZ ANTONIO DE ANDRADE

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Cury Saad

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Irrigação e Drenagem)

BOTUCATU - SP

Junho - 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Andrade, Luiz Antonio de, 1956-
A553e Estudo da uniformidade de emissão de água utilizando diferentes espaçamentos entre gotejadores na linha lateral / Luiz Antonio de Andrade. - Botucatu : [s.n.], 2009. xvii, 87 f. : il. color., gráfs., tabs.

 Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2009
 Orientador: João Carlos Cury Saad
 Inclui bibliografia.

 1. Variação de vasão. 2. Uniformidade de emissão. 3. Dimensionamento de lateral. 4. Espaçamento entre gotejadores. I. Saad, João Carlos Cury. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTUDO DA UNIFORMIDADE DE EMISSÃO DE AGUA UTILIZANDO
DIFERENTES ESPAÇAMENTOS ENTRE GOTEJADORES NA LINHA LATERAL

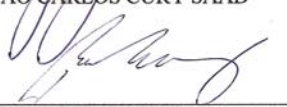
AUTOR: LUIZ ANTONIO DE ANDRADE

ORIENTADOR: JOAO CARLOS CURY SAAD

Aprovada pela Comissão Examinadora:



PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD



PROF. DR. RAIMUNDO LEITE CRUZ



PROF. DR. RÚBENS DUARTE COELHO



PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL



PROF. DR. EVERARDO CHARTUNI MANTOVANI

Data de realização: 08 de Junho de 2009

BIOGRAFIA DO AUTOR

LUIZ ANTONIO DE ANDRADE, filho de Antonio Soares de Andrade e Maria Zambaldi de Andrade, nasceu em Cerqueira César – SP, em 14 de agosto de 1956.

Concluiu o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, em julho de 1982.

Em 1984, ingressou na carreira de Extensionista Rural, junto a CATI, da Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, trabalhando nos municípios de: Florinea, Oscar Bressane, Fartura e Avaré, retirando-se do serviço público em 1995.

Em 1996, foi convidado para implementar a divisão de irrigação na Petroisa Irrigação Ltda (inicialmente Scarcelli). Sendo o responsável pela instalação e funcionamento da primeira unidade de produção de mangueira gotejadora 100% brasileira no ano de 2005.

Em janeiro de 2005 concluiu mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem na UNESP.

A Eliana, Karina, Ana e Pedro.

AGRADECIMENTOS

A Unesp – FCA, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Professor João Carlos Cury Saad, pela confiança nas minhas proposições.

Aos colegas de trabalho da Petroisa Irrigação: Abner, Cesar, Enes, Isaias, Sarto, Rochinha e ao Ezequiel e sua equipe de produção, pelo apoio nos ensaios de Laboratório.

Especial agradecimento ao Sr Gilson Scarcelli pelo apoio e suporte incondicional para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS.....	XV
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4.1 Irrigação por gotejamento em hortaliças e frutas de ciclo anual	7
4.2 Caracterização de mangueira gotejadora colapsável.....	8
4.2.1 Apresentação das mangueiras gotejadoras colapsáveis – MGC	11
4.2.2 Espessuras de parede da mangueira e a pressão nominal trabalho.....	12
4.2.3 Diâmetro interno.....	13
4.3 Modelos de MGC.....	13
4.3.1 Emissores de labirintos longos construídos por espessamento na parede da mangueira	13
4.3.2 Gotejador plano de labirinto curto.....	13
4.4 Vazão do emissor.....	14
4.4.1 Coeficiente de variação de fabricação - CV_f	16
4.4.2 Vazão de entrada na mangueira gotejadora.....	17
4.5 Perdas de carga em mangueira gotejadora colapsável	18
4.5.1 Perda de carga na mangueira.....	18
4.5.2 Perda de pressão localizada no emissor.....	23
4.5.2.1 Método de constrição do diâmetro na posição do emissor.....	24
4.6 Variação de vazão e de pressão na linha lateral.....	26
4.6.1 Vazão ao longo da lateral em nível.....	28
4.7 Comprimento de instalação de MGC.....	30
4.8 Uniformidade de aplicação de água.....	31
5 MATERIAL E METODOS.....	37

5.1 Pressupostos para validade do modelo proposto.....	37
5.2 Avaliação dos parâmetros hidráulicos da Mangueira Gotejadora Colapsável e do modelo proposto.....	38
5.3 Desenvolvimento do modelo.....	41
5.4 Procedimentos na primeira fase.....	42
5.5 Procedimentos na segunda fase.....	43
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
6.1 Perda de carga unitária, J , na mangueira sem os gotejadores.....	45
6.1.1 Determinação de D , D_g , A_c e A_s	45
6.1.2 Perda de carga experimental.....	47
6.1.3 Estimativa de J por equações	49
6.2 Perda de carga unitária, J , na mangueira com os gotejadores	52
6.3 Perda de carga localizada no emissor	53
6.3.1 Obtenção por ensaio em laboratório da perda de carga localizada no gotejador	53
6.3.2 Perda de carga localizada no gotejador estimada por equações	54
6.4 Pressão na entrada, pressão média e pressão mínima na mangueira gotejadora	56
6.5 Comprimento máximo da mangueira gotejadora.....	57
6.5.1 Comprimento máximo da mangueira gotejadora desconsiderando a perda localizada no emissor	58
6.5.2 Comprimento máximo da mangueira gotejadora considerando a perda localizada no emissor	62
6.5.2.1 Análise do Coeficiente de Uniformidade de Emissão para projeto das mangueiras gotejadoras dimensionadas no item anterior.....	64
6.6 Determinação do espaçamento especial para cada espaçamento padrão.....	64
6.7 Determinação do comprimento do segmento “b” do modelo proposto.....	65
6.8 Coeficiente de Uniformidade de Emissão para dimensionamento aplicado no modelo proposto.....	66

6.9 Determinação das características do modelo proposto nos diversos espaçamentos.....	68
6.10 Produção da mangueira gotejadora e avaliação do modelo proposto	75
6.11 Viabilidade da produção comercial do modelo proposto.....	77
7 RECOMENDAÇÕES.....	78
8 CONCLUSÕES.....	79
9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pagina
1. Exemplo de emissor tipo microtubo.	8
2. Modelos de gotejadores na linha.....	8
3. Gotejadores sobre a linha tipo “botão”.....	9
4. Gotejador redondo isolado e dentro da mangueira.....	9
5. Segmento de mangueira gotejadora colapsável de labirinto longo, transparente para melhor visualização do emissor.....	9
6. Gotejador com face labirinto para cima, MGC com gotejador soldado e furo para saída de água e mangueira com corte transversal mostrando o gotejador soldado.....	10
7. Gotejadores planos, vista da face superior com os labirintos e vista inferior com os pré-filtros. Escala em mm.....	14
8. Corte longitudinal de uma MGC pressurizada na posição do gotejador e as grandezas D , D_g e V	25
9. Corte transversal de MGC pressurizada e as dimensões A_c e A_s	25
10. Perfil de pressões em mangueira gotejadora em função do comprimento da lateral. H_f/L é a perda de carga total. Adaptado de BOSWELL 1990 e VALIANTZAS, 2005.....	30
11. Central de controle do Laboratório de controle de qualidade da Petroisa Irrigação Ltda.....	39
12. Vista da plataforma suspensa para ensaios das mangueiras gotejadoras.....	40
13. Conector de linha unindo os segmentos da mangueira gotejadora.....	41
14. Vazão, em $L h^{-1} m^{-1}$, em função do comprimento da lateral, para mangueira gotejadora com dois segmentos, cada um com diferente espaçamento entre emissores.....	42
15. Dados obtidos experimentalmente, pontos em destaque, e a linha ajustada, Equação 46.....	49

16. Perda de carga unitária, J , em $\text{mca} \cdot \text{m}^{-1}$, de mangueira sem os gotejadores, em função da vazão por equações. DW+HP: Darcy Weisbach com Hazen Poiseuille; Bla: Blasius; Cole: Colebrooke-White; Swa: Swamee; HW: Hazen Williams e Exper.: dados obtidos experimentalmente.....51
17. Comparação da perda de carga unitária, em $\text{mca} \cdot \text{m}^{-1}$, dos dados obtidos experimentalmente com o teórico utilizando Darcy Weisbach associado com Blasius, com suas respectivas linhas de tendência para mangueira sem os gotejadores.....51
18. Diagrama com as equações para dimensionamento de mangueira gotejadora.....58
19. Vazão por metro linear em função do comprimento da lateral padrão com 0,30 m entre emissores, e variação de vazão de 0,20. Lateral com 147,6 m.....74
20. Vazão por metro linear em função do comprimento da lateral do modelo proposto com espaçamento no segmento “b” de 0,3508 m e no segmento “a” de 0,30 m, e variação de vazão de 8,05%. Lateral com 150,6 m.....74

LISTA DE TABELAS

Tabelas	Página
1 Características básicas de classes de polietileno usados na fabricação de mangueiras gotejadoras colapsáveis.....	12
2 Variação percentual da vazão em gotejadores, em função do valor de x e da variação de pressão.....	16
3 Classificação do coeficiente de variação de fabricação CV_f (SOLOMON, 1979).....	17
4 Valores de u em função do numero de emissores por planta, ep	32
5 Classificação do CV_f conforme norma ASAE EP405.1, para emissor pontual..	34
6 Recomendação de CUE_{CV_f} para culturas anuais e gotejadores espaçados a menos de 1 m conforme norma ASAE EP405.1.....	34
7 Características da Mangueira Gotejadora marca MANARI [®] , fornecida por Petroisa Irrigação Ltda.....	38
8 Diâmetro externo, interno e espessura de parede da mangueira gotejadora MANARI.....	46
9 Dimensões relacionadas a mangueira gotejadora MANARI.....	47
10 Perda de carga unitária na mangueira sem os gotejadores, com três repetições e três amostras.....	48
11 Perda de carga unitária, J , adimensional, com uso de equações, para mangueira sem gotejadores, diâmetro interno considerado 0,0162 m, altura da rugosidade de 0,00001 m, temperatura da água a 20 °C.....	49
12 Perda de carga unitária experimental, J , na mangueira com os gotejadores fechados. Media de três amostras de 50 metros e três repetições. Espaçamento médio entre emissores igual a 0,319 m.....	52
13 Perda de carga por gotejador, hfg , em mangueiras com gotejadores em espaçamento nominal de 30 cm. Media de 156,33 gotejadores por 50 m, obtidos experimentalmente.....	53
14 Valores experimentais do fator θ pela Equação 18.....	54
15 Valores teóricos do fator θ e da razão r conforme diversos autores.....	54
16 Perda de carga por emissor em função da vazão na mangueira gotejadora, em m.c.a., comparando o método experimental com três teóricos.....	55

17	Pressões e perda de carga total, na mangueira gotejadora MANARI em função da variação de vazão, para x igual a 0,503. A pressão máxima ou de entrada é igual a pressão nominal recomendada pelo fabricante. Dados para mangueira instalada em nível.....	57
18	Planilha para calculo de comprimento maximo de mangueira gotejadora, desconsiderando a perda de carga localizada nos emissores, para variação de vazão de 10%, emissores espaçados de 0,20 m. Diâmetro interno de 0,016232. Perda de carga entre emissores calculados pela Equação 46.....	59
19	Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos entre emissores, para variação de vazão de 10%, desconsiderando perda de carga localizada devida ao gotejador.....	60
20	Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos emissores entre emissores, para variação de vazão de 20%, desconsiderando perda de carga localizada devida ao gotejador.....	61
21	Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos, para variação de vazão de 10%, para diferentes espaçamentos considerando a perda de carga devido aos gotejadores.....	62
22	Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos, para variação de vazão de 20%, para diferentes espaçamentos considerando a perda de carga devido aos gotejadores.....	63
23	Coefficientes de Uniformidade de Emissão, %, para projetos aplicados nas mangueiras gotejadoras com 0,30 m entre gotejadores dimensionados teoricamente, considerando a perda de carga nos emissores para duas variações de vazão.....	64
24	Características da mangueira gotejadora com 0,30 m de distancia entre saídas, dimensionadas com Equação de Darcy-Weisbach com Ff de Blasius e perda de carga devido ao gotejador obtida com o Índice de Obstrução, IO.....	65
25	Resumo da planilha de calculo, mostrando 3 linhas iniciais, 4 linhas próximo do ponto de troca de espaçamento, e duas linhas finais.....	67
26	Características da associação do par “a” + “b”, conforme modelo proposto, para espaçamento padrão de 30 cm e variação de vazão de 10%.....	68
27	Associação dos pares “a+b” nos diversos espaçamentos e variação de vazão de 10% na mangueira com espaçamento padrão e respectivos comprimentos e Coeficientes de Uniformidade.....	69
28	Associação dos pares “a+b” nos diversos espaçamentos e variação de vazão de 20% na mangueira com espaçamento padrão e respectivos comprimentos e Coeficientes de Uniformidade.....	70
29	Comparativo da substituição de mangueira gotejadora com espaçamento padrão de 0,30 m pelo modelo proposto.....	71
30	Comparativo da substituição de mangueira gotejadora com espaçamento padrão de 0,40 m pelo modelo proposto.....	72
31	Comparativo da substituição de mangueira gotejadora com espaçamento padrão de 0,50 m pelo modelo proposto.....	73

- 32** Vazão por metro linear, $L h^{-1} m^{-1}$, em pontos eqüidistantes na mangueira gotejadora, espaçamento de 0,30 m. Lateral com 147,6 m. Mangueiras sem uso..... 76
- 33** Vazão por metro linear, $L h^{-1} m^{-1}$, em pontos eqüidistantes na mangueira gotejadora de dois segmentos. Segmento “b” com 59,7 m e 0,35 m entre emissores e segmento “a” com 90,9 m e espaçamento de 0,30 m. Mangueiras novas..... 76
- 34** Coeficientes de Uniformidade para as mangueiras um modelo de gotejadora padrão e uma para uma lateral dimensionada conforme o modelo proposto. Mangueiras novas..... 77

LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

ΔH	.....variação de pressão
Δq	.....variação de vazão
θ	.....fator de fração da velocidade cinética media
ε	.....altura da rugosidade da parede da mangueira
ν	.....coeficiente de viscosidade cinemática da água
A_c	.....área transversal da mangueira pressurizada, na posição do gotejador
A_s	.....área transversal da mangueira pressurizada, sem o gotejador
C	.....coeficiente que depende da parede da tubulação
CUC	.....coeficiente de uniformidade de Christiansen
CUE_A	.....CUE absoluta no campo
CUE_a	.....coeficiente de uniformidade de emissão de avaliação de projetos
CUE_D	.....CUE de dimensionamento
CUE_d	.....coeficiente de uniformidade do dimensionamento de projeto
CUE_{CVf}	.....CUE considerando o coeficiente de variação de fabricação
CUE_N	.....CUE novo
CVf	.....coeficiente de variação devido ao processo de fabricação
D	.....diâmetro interno da tubulação
D_g	.....diâmetro interno da mangueira menos a altura do gotejador soldado internamente
ep	.....agrupamento de gotejadores
epl	.....agrupamento de emissores por metro linear
es	.....espaçamento entre gotejadores
Fa	.....fator de correção para múltiplas saídas, de Scaloppi
Fc	.....fator de correção para múltiplas saídas, de Christiansen
Ff	.....fator de fricção
g	.....aceleração da gravidade
H	.....pressão de operação do gotejador
H_{ent}	.....pressão no inicio da mangueira
H_{fin}	.....pressão no fim da mangueira

H_f	perda de carga em tubulação
h_{fg}	perda de carga localizada no gotejador
H_{fL}	perda de carga na lateral
H_{max}	pressão maxima
H_{med}	pressão media
H_{min}	pressão mínima
HW	Hazen-Williams
IG	Sistema de Irrigação por Gotejamento
IO	índice de obstrução
J	perda de carga unitária
La	comprimento do segmento “a”
Lb	comprimento do segmento “b”
K_g	constante de proporcionalidade que caracteriza cada gotejador
L	comprimento total da tubulação
ℓ/L	distancia decimal do ponto de pressão media desde o inicio da mangueira gotejadora
m	expoente da velocidade da equação de perda de carga
MGC	mangueira gotejadora colapsável
N	numero de gotejadores ou numero de saídas na lateral
n	numero de gotejadores amostrados
Q_{ent}	vazão na entrada da mangueira gotejadora
q_g	vazão do gotejador
q_{gmax}	vazão maxima do gotejador
q_{gmed}	vazão media do gotejador
q_{gmin}	vazão mínima do gotejador
q_i	vazão do gotejador i
ql	vazão por metro linear da mangueira gotejadora
q_{meda}	vazão media de todos os gotejadores coletados a campo
q_{medd}	vazão media do dimensionamento
q_{medh}	vazão media da amostra de emissores na pressão de referencia
q_{mind}	vazão mínima no dimensionamento

- $q_{minhmin}$ vazão do gotejador com menor pressão
- $q_{12,5\%}$ vazão média das 12,5% maiores vazões observadas
- $q_{25\%h}$ vazão média de 25% dos gotejadores de menor vazão na pressão de
- $q_{25\%a}$ vazão média dos 25% gotejadores de menor vazão coletados a campo
- R numero de Reynolds
- R_h raio hidráulico
- R^2 coeficiente de correlação
- r razão entre áreas transversais com e sem gotejadores A_c/A_s
- Ttemperatura da água em graus Celsius
- u fator de correção em função do numero de gotejadores por planta
- V velocidade do fluxo de água
- x expoente que caracteriza o regime de fluxo do gotejador
- y razão entre a distancia da primeira saída no inicio da tubulação e o espaçamento regular entre as saídas

1 RESUMO

A irrigação por gotejamento no Brasil está crescendo no cultivo de hortaliças e frutas de ciclo anual. O adequado dimensionamento do projeto de irrigação por gotejamento visando altos Coeficientes de Uniformidade de Emissão de água é coerente com a pressão da sociedade pelo uso racional dos recursos naturais, especialmente a água.

A utilização de linhas laterais mais longas promove redução de custos na instalação do projeto, entretanto pode reduzir a uniformidade de emissão de água, sendo que a otimização deste fator é importante objetivo de todo projeto criteriosamente executado.

Propôs-se um modelo de mangueira gotejadora com dois segmentos, sendo o último com um espaçamento padrão, e o segmento inicial com um espaçamento especial entre os emissores, com o objetivo de obter linhas mais longas sem prejudicar o Coeficiente de Uniformidade de Emissão de água.

Mangueira gotejadora dimensionada teoricamente conforme o modelo proposto, com lateral de 150,6 m sendo 59,7 m iniciais com espaçamento entre emissores de 0,35 m associada com 90,9 m finais com distância entre gotejadores de 0,30 m apresentou variação de vazão de 8,05 % e CUE_{CVf} de 97,62% e foi 36% mais longa que a mangueira gotejadora com único espaçamento de 0,30 m, com variação de vazão de 10 %, e CUE_{CVf} de 94,71.

Ganhos semelhantes foram obtidos com os espaçamentos padrões de 0,40 e 0,50 m.

Concluiu-se que modelo proposto tem possibilidade de ser aplicado na prática da irrigação por gotejamento em cultivo adensado, por apresentar melhor CUE, lateral mais longa e menor variação de vazão.

Palavras chaves: espaçamento entre gotejadores, dimensionamento de lateral, variação de vazão, uniformidade de emissão.

2 SUMMARY

STUDY OF WATER EMISSION UNIFORMITY WITH DIFFERENT DRIPPER SPACINGS IN THE LATERAL LINE.

Botucatu, 2009. 87 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP - Universidade Estadual Paulista.

Author: LUIZ ANTONIO DE ANDRADE

Adviser: JOÃO CARLOS CURY SAAD.

SUMMARY

The use of drip irrigation in horticultural and annual cycle fruits in Brazil is growing. The correct sizing of a drip irrigation project, using High Emission Uniformity Coefficients, is in accordance with society's pressure for a rational use of natural resources.

Sizing longer lateral irrigation lines promotes a cost reduction in the installation costs of a project.

A model for a drip irrigation lateral composed of two segments is proposed; the last having a standard spacing, the initial segment having a special spacing between emitters, higher than the standard, with the objective of obtaining longer laterals, without decreasing the Emission Uniformity Coefficient of water, EUC.

A theoretically dimensioned drip hose, in accordance with the proposed model, with a total length of 150.6 m, having the initial 59.7 m an emitter spacing of 0.3508 m, while the final 90.9 m an emitter spacing of 0.30 m, presented a flow variation of 8.05% and an EUC of 97.62%. It is 36% longer than a drip irrigation hose with a 0.30 m emitter spacing, with a 10% flow variation and a EUC of 94.71%.

A substitution of the standard lateral model for the proposed lateral model still needs a field trial validation in order to justify its use, considering that the commercial production of this model is viable.

Keywords: dripper spacing, lateral design, flow rate variation, emission uniformity.

3 INTRODUÇÃO

O uso de mangueiras gotejadoras colapsáveis, com espessura de parede entre 0,100 a 0,380 mm, com emissores tipo labirinto plano e com expoente de descarga da equação de vazão do emissor próximos de 0,5 predominam na irrigação localizada de hortaliças, legumes e frutas de ciclo anual. Concorreu para isto a disponibilidade de mangueiras gotejadoras com preços mais competitivos devido à intensificação das importações na década de 90 e o início da produção nacional a partir de 2000.

As mangueiras gotejadoras colapsáveis operam pressão de trabalho entre 60 a 100 kPa na entrada da lateral associada a um comprimento máximo de instalação em função da uniformidade de emissão de água pré estabelecida. Os emissores estão, usualmente, espaçados de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 e 0,50 m, com vazões entre 3 a 11 L h⁻¹ por metro de lateral ou de 1 a 2,5 L h⁻¹ por gotejador, formando um volume contínuo úmido devido a sobreposição dos bulbos molhados no solo.

Sabe-se que no segmento inicial da mangueira gotejadora, correspondente a 40% do comprimento total, perde-se próximo de 74% da perda de carga total desta lateral. Esta perda de carga implica em variação de pressão disponível nos gotejadores, que apresentarão maiores variações de vazão, afetando a uniformidade de emissão de água nesta mangueira gotejadora.

Vários coeficientes expressam a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por gotejamento, utilizados tanto na fase de dimensionamento como para a avaliação de projetos a campo.

Maiores espaçamentos entre gotejadores e laterais mais longas reduzem custos de projetos de irrigação localizada. Algumas estratégias que podem resultar em laterais de maior comprimento e melhor coeficiente de uniformidade de emissão com mangueiras gotejadoras são: 1) maiores diâmetros, 2) emissores com menor Coeficiente de Variação de Fabricação, 3) menor interferência do emissor no fluxo de água dentro da mangueira, e 4) maiores espaçamento entre emissores – desde que os bulbos se sobreponham.

A hipótese desta tese é de que, utilizando na mesma linha lateral dois trechos com espaçamentos diferentes entre emissores, sendo que o espaçamento maior no segmento inicial correspondente a 40% do comprimento da linha lateral, obtém-se linhas laterais mais longas e com melhor uniformidade de emissão de água, quando comparadas com linhas laterais com um único espaçamento entre emissores.

O objetivo deste trabalho foi avaliar se uma linha lateral com espaçamento entre gotejadores maior no segmento inicial que no segmento final permitiria a obtenção de linha lateral mais longa e com melhor uniformidade de emissão de água.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Irrigação por gotejamento em hortaliças e frutas de ciclo anual

Sistemas de irrigação por gotejamento, IG, consistem de um sistema de bombeamento seguido de uma rede de tubulações e emissores (BRALTIS e EDWARDS, 1986). Nakayama 1986, acrescenta os filtros, sistemas de controle e monitoramento.

O IG é dimensionado para fornecer água filtrada, tratada ou não, adicionada de nutrientes e/ou agroquímicos para as plantas, na dosagem e momento adequados para máxima produtividade econômica, se manejados adequadamente e umedecem somente uma parte do volume do solo onde se desenvolvem as raízes (CABELLO, 1996; HOWELL e HILLER, 1974; KELLER e KARMELLI, 1974; WU e GITLIN, 1973).

Nos anos 90, intensificou-se no Brasil a importação de mangueiras gotejadoras para a irrigação de hortaliças e frutas anuais. A partir de 2000, a fabricação nacional se tornou possível devido ao ganho de escala ocorrido em função do volume comercializado (ANDRADE, 2005).

A irrigação por gotejamento em cultivos adensados como as hortaliças e frutas ciclo anual, também conhecido por setor "HF", se caracteriza pela não formação de bulbos úmidos isolados, mas por um volume contínuo molhado subsuperficialmente no solo.

4.2 Caracterização de mangueira gotejadora colapsável

Na evolução tecnológica dos emissores utilizados em gotejamento, predominou no fim dos anos 60 até meados dos anos 70 os emissores tipo microtubo, conforme Figura 1. Os produtores compravam mangueiras plásticas, com espessura de parede de 1 mm ou mais, e o microtubo. Faziam um furo na mangueira e inseriam um pedaço de microtubo de comprimento e diâmetro variável com o objetivo de atingir boa uniformidade de emissão de água.



Figura 1. Exemplo de emissor tipo microtubo.

Surgiram na mesma época os emissores na linha conforme Figura 2 (“in line”), em que o produtor cortava a mangueira transversalmente e conectava esta mangueira usando um gotejador plástico.



Figura 2. Modelos de gotejadores na linha.

Na seqüência surgiram os gotejadores sobre a linha (“on line”) como os da Figura 3, similar a um botão, que eram inseridos num furo feito na mangueira.



Figura 3. Gotejadores sobre a linha tipo “botão”

No fim dos anos 70 começaram a ser produzidos as mangueiras gotejadoras prontas para uso, isto é, o agricultor não precisava mais comprar em separado a mangueira e o gotejador. O emissor já vinha instalado internamente nas mangueiras, como os da Figura 4, do tipo redondo ou “bobe”.



emissor

emissor dentro da mangueira

furo de saída de água

Figura 4. Gotejador redondo isolado e dentro da mangueira.

No início dos anos 80, a preocupação com o custo de material plástico se intensificou devido ao aumento do preço do petróleo, direcionando a indústria a buscar produtos mais econômicos com desempenho igual ou superior. Este processo favoreceu a criação de mangueiras gotejadoras de parede fina e emissores pequenos planos, dando origem às mangueiras gotejadoras colapsáveis representadas nas Figuras 5 e 6.

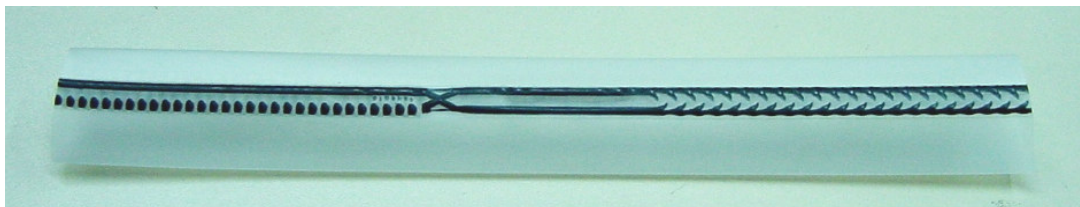


Figura 5. Segmento de mangueira gotejadora colapsável de labirinto longo, transparente para melhor visualização do emissor.



Figura 6. Gotejador com face labirinto para cima, MGC com gotejador soldado e furo para saída de água e mangueira com corte transversal mostrando o gotejador soldado.

Mangueira gotejadora colapsável, MGC, possui parede delgada, com espessura abaixo de 0,400 mm, sendo o mesmo que fita gotejadora, do inglês “drip tape”. Suas características são de acordo com a definição de mangueiras gotejadoras colapsáveis, encontradas em normas internacionais ANSI/ASAE S553 e ISO 9261 (AMERICAN NATIONAL STANDARD, 2001 e INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2004).

As expressões “mangueira gotejadora colapsável” e seu oposto “mangueira gotejadora não colapsável” são os termos mais adequados para denominar estes produtos.

A norma ANSI/ASAE S553 define mangueira gotejadora colapsável como: “mangueira continua com descargas de água em pontos discretos ao longo de seu comprimento, através de passagens com regulação de fluxo formadas dentro ou unidas na mangueira e tendo espessura de parede suficientemente fina que permita o colapsamento quando não está sob pressão”.

Na ISO 9261:2004 encontra-se a definição: “mangueira colapsável – fita – tubulação emissora cuja secção transversal (que é redonda ou arredondada operando na pressão de trabalho recomendada pelo fabricante) se altera quando a pressão é zero, geralmente por causa da pequena espessura de parede ou por causa da natureza flexível do material de que a mangueira é fabricada”.

Em 2008 foram comercializadas no Brasil aproximadamente 104 milhões de metros de MGC.

4.2.1 Apresentação das mangueiras gotejadoras colapsáveis - MGC

As MGC disponíveis no Brasil já vêm prontas para o uso. Não há necessidade de furar e inserir os gotejadores. São fornecidas com comprimento variável de 300 a 3 048 metros, com peso das bobinas entre 13 e 30 kg. As bobinas não ocupam volume expressivo devido ao fato da mangueira estar achatada, similar a uma fita, com pouco ar em seu interior, o que torna mais econômico o transporte, quando comparada com mangueiras rígidas que, mesmo quando despressurizadas, mantêm a forma arredondada.

A indústria tem feito esforços tecnológicos para apresentar produtos de alto desempenho e baixo custo. É o caso dos gotejadores planos de menores dimensões com baixos CV_f e de mangueiras com parede mais delgadas. A manipulação de proporções de diferentes classes de polietileno, na mistura que alimenta a extrusora, permite a fabricação de uma gama de mangueiras com diferentes características, conforme Tabela 1. A proporção entre os diferentes polietilenos e a adição de aditivos é um segredo da indústria.

O aditivo Negro de Fumo é utilizado para tornar a mangueira gotejadora opaca aos raios solares, o que diminui o desenvolvimento de algas que provocam entupimento dos emissores. Este aditivo atua como protetor contra raios UV, o que aumenta a vida útil das mangueiras.

Tabela 01. Características básicas de classes de polietileno usados na fabricação de mangueiras gotejadoras colapsáveis.

Classe de polietileno*	Característica na fabricação de MGC	
	Vantagens	Observações
LDPE – de baixa densidade - “normal”	Melhora o desempenho da extrusora, baixando custos de produção	Próprio para produzir mangueiras de parede grossa. Preço mais baixo
LLDPE – linear de baixa densidade – cadeia de 8 carbonos – Octeno	Permite produção de mangueiras de parede mais fina. Melhora a solda do gotejador. Torna a mangueira mais colapsável	Deixa a mangueira muito flexível. Diâmetro varia muito com a variação de temperatura. Custo maior
HDPE – alta densidade	Melhor resistência mecânica. Temperatura pouco influencia variação do diâmetro a campo	Em excesso pode ressecar a mangueira precocemente no campo

*Dentro de cada classe há outras divisões, ou seja, existem vários LDPE, LLDPE e HDPE.

4.2.2 Espessura de parede da mangueira e pressão nominal trabalho

Uma das estratégias de reduzir o preço da MGC é diminuir sua espessura de parede. A espessura mais comum é a de 0,2 mm, havendo disponibilidade de 0,1 a 0,38 mm.

Com espessuras de paredes mais delgadas, as pressões de ruptura das MGC ficam entre 170 a 300 kPa. Entretanto a pressão nominal de trabalho de todos os modelos disponíveis no mercado estão abaixo de 118 kPa.

4.2.3 Diâmetro interno

Garcia 2006, avaliou 6 modelos de mangueiras gotejadoras colapsáveis disponíveis no Brasil, sendo que 4 apresentaram diâmetro interno informado pelo fabricante de 0,016 m, uma de 0,0165m e outra de 0,0141m. O mesmo autor verificou que nenhum valor variou mais que $\pm 0,0003$ m, atendendo assim a norma ISO 9261:2004.

4.3 Modelos de MGC

Nas mangueiras gotejadoras colapsáveis os emissores tem basicamente duas formas. O emissor contínuo construído ao longo da mangueira e o gotejador plano.

4.3.1 Emissores de labirintos longos construídos por espessamento na parede da mangueira

Os emissores contínuos são construídos ou soldados internamente ao longo da parede da mangueira no momento de sua fabricação, e tem sua origem em empresas Estadunidenses.

Neste processo, ao longo de toda a mangueira são formados ou soldados os gotejadores de labirinto, provocando um espessamento localizado em todo o comprimento da mangueira na posição do emissor. O furo de saída de água é feito na sequencia, na posição correta (Figura 5).

4.3.2 Gotejador plano de labirinto curto

Este tipo de mangueira gotejadora responde por 85% da irrigação por gotejamento utilizada no Brasil no setor de HF, próximos de 88,4 milhões de metros.

Gotejadores discretos, curtos, são fabricados por sistema de injeção de resina plástica, e posteriormente no momento de fabricação da mangueira por processo de extrusão, o gotejador é soldado a quente, internamente, no espaçamento selecionado

(Figura 6). Antes de ser bobinada é feito, na posição correspondente, o furo por onde sairá a água em forma de gotas.

Os gotejadores planos tem origem em empresas israelenses. Os emissores planos têm comprimento de 20 a 55 mm, largura de 4 a 15 mm e altura de 2 a 3 mm. Os agricultores chamam este tipo de emissor de gotejador de “chapinha ou pastilha”. Na Figura 7 são apresentados alguns modelos disponíveis.



Figura 7. Gotejadores planos, vista da face superior com os labirintos e vista inferior com os pré-filtros. Escala em mm.

Os dispositivos mostrados na Figura 7, ainda não são gotejadores. Após a soldagem dentro da mangueira é que se tornarão gotejadores verdadeiros.

4.4 Vazão do emissor

O dispositivo que libera água em formas de gotas ou fluxo contínuo, mais comumente chamado de gotejador, apresenta vazão menor ou igual a 24 L h^{-1} (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2004b). Entretanto encontramos microaspersores com vazão a partir de 14 L h^{-1} (NAANDAN, 2005; MICROJET, 2005). A norma ASAE EP401.1 define como gotejamento um emissor com vazão igual ou menor que 8 L h^{-1} ou mangueira com 12 L h^{-1} ou menos por metro.

A vazão do gotejador é caracterizada pela equação (KELLER e KARMELI, 1974):

$$q_g = K_g \cdot H^x \quad (1)$$

em que q_g é a vazão do emissor, $L T^{-1}$, K_g é uma constante de proporcionalidade que caracteriza cada emissor, H é a pressão em que opera o emissor, em kPa; e x é o expoente que caracteriza do regime de fluxo. Estes mesmos autores definiram que tem-se fluxo laminar, turbulento e totalmente autocompensado, para os valores de x de 1, 0,5 e 0, respectivamente.

Garcia (2006) avaliou 7 modelos de mangueiras gotejadoras com colapsáveis, de parede fina, e encontrou valores de x variando de 0,431 a 0,575, sendo que o valor médio foi de 0,491. O mesmo autor constatou que a vazão média foi de $1,57 L h^{-1}$, com valor mínimo de 1,14 e máximo de 2,30, na pressão nominal de trabalho.

É também usual a divulgação da vazão em litro por metro de mangueira, que pode ser encontrado conforme a equação:

$$ql = \frac{K_g \cdot H^x}{es} \quad (2)$$

onde ql é a vazão por metro linear e es é o espaçamento entre emissores, L.

Para vazão máxima, média e mínima tem-se as equações:

$$q_{g \min} = K_g \cdot H_{\min}^x \quad (3)$$

$$q_{gmed} = K_g \cdot H_{med}^x \quad (4)$$

$$q_{g \max} = K_g \cdot H_{\max}^x \quad (5)$$

onde q_{gmin} , q_{gmed} e q_{gma} são a vazão, média, mínima e máxima do gotejador respectivamente, em $L T^{-1}$. H_{min} , H_{med} e H_{med} é a pressão mínima, média e máxima, respectivamente, em kPa.

Quando ocorre uma variação de pressão no emissor implica em uma variação na vazão do mesmo conforme o valor do expoente x , conforme Tabela 2.

Tabela 2. Variação percentual da vazão em gotejadores, em função do valor de x e da variação de pressão, considerando hipoteticamente CV_f igual a 0.

Variação percentual da pressão	Variação percentual da vazão					
	Valores do expoente de descarga do emissor, x					
	1	0,6	0,5	0,4	0,1	0
-40	-40,00	-26,40	-22,54	-18,48	-4,98	0,00
-30	-30,00	-19,27	-16,33	-13,30	-3,50	0,00
-20	-20,00	-12,53	-10,56	-8,54	-2,21	0,00
-10	-10,00	-6,13	-5,13	-4,13	-1,05	0,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	10,00	5,89	4,88	3,89	0,96	0,00
20	20,00	11,56	9,54	7,57	1,84	0,00
30	30,00	17,05	14,02	11,07	2,66	0,00
40	40,00	22,37	18,32	14,41	3,42	0,00

Quando o valor de x diminui, a variação da vazão é menos influenciada pela variação de pressão.

Consultando a Tabela 2, se houver uma variação de pressão de -30% de um gotejador na posição A para outro na posição G de uma lateral, a vazão do gotejador na posição G é 16,33% menor quando o expoente de descarga x for igual a 0,5. Se o valor de x for 0,4 a redução da vazão neste caso é de 13,30%.

4.4.1 Coeficiente de variação de fabricação - CV_f

O coeficiente de variação de fabricação, CV_f depende integralmente do processo e dos cuidados no momento da fabricação. Os emissores são todos feitos de plásticos, que são sujeitos a consideráveis variações. Existem numerosas variáveis de controle nas máquinas injetoras e extrusoras, como pressão e temperatura de injeção, velocidade de injeção, temperatura do molde, tempo de processo (ciclo) e manutenção do molde. Quaisquer

mudanças nesses fatores causam alterações nas condições de moldagem: temperatura, pressão, e tempo de esfriamento. Tudo isto afeta as características do emissor: tamanho, forma, peso, resistência e a lisura das superfícies (SOLOMON, 1979). O autor não considerou variações que ocorrem em função da qualidade da matéria prima.

Com o tempo de uso, a uniformidade tende a diminuir, justamente por outros fatores associados ao desgaste.

Tabela 3. Classificação do coeficiente de variação de fabricação CV_f , em decimal (SOLOMON, 1979).

CV_f	Interpretação
$\leq 0,03$	Excelente
0,05 a 0,07	Médio
0,08 a 0,10	Marginal
0,11 a 0,14	Pobre
$\geq 0,15$	Péssimo

Nota-se a ausência do valor 0,04 na Tabela 3 provavelmente devido a lapso do autor.

Garcia 2006, mediu o CV_f de seis modelos de MGC disponíveis no Brasil, e o valor médio foi de 0,0285, o máximo de 0,056 e o mínimo de 0,007.

4.4.2 Vazão de entrada na mangueira gotejadora

A vazão na entrada na mangueira gotejadora é o valor da vazão média dos emissores multiplicado pela sua quantidade, conforme Equação 6. Usando os valores máximos de comprimento recomendados pelos fabricantes, com a mangueira instalada em nível, diâmetros de 0,016 m, encontra-se vazão máxima de entrada de 700 L h⁻¹ nos atuais modelos disponíveis no Brasil.

$$Q_{ent} = N \cdot q_{gmed} \quad (6)$$

onde Q_{ent} é a vazão na entrada da mangueira gotejadora, $L T^{-1}$, N é o número de gotejadores nesta mangueira.

4.5 Perdas de carga em mangueira gotejadora colapsável

A perda de carga em uma lateral – MGC - corresponde a soma da perda de carga que ocorre em todos os segmentos entre dois emissores, mais a perda de carga devido a perturbação ao fluxo causado por cada gotejador soldado internamente na mangueira.

A mangueira gotejadora colapsável nada mais é do que uma lateral de múltiplas saídas com derivações que são os gotejadores, uniformemente espaçados. Para o seu dimensionamento e avaliação são utilizados os mesmos conceitos hidráulicos usados no cálculo de laterais de irrigação por aspersão. Para emissores com expoente de descarga x maiores que 0, a vazão dos emissores ao longo da mangueira não são iguais devido a variação de pressão ao longo desta lateral.

Na avaliação de sete metodologias de cálculo de perda de carga em laterais para microirrigação, o método de cálculo de perda de carga Passo a Passo apresentado por Hathoot et al.¹ 1993 foi o mais preciso, apesar de trabalhoso sem o auxílio de planilha de cálculo ou software específico (YILDIRIM e AGIRALIOGLU, 2004).

4.5.1 Perda de carga na mangueira

Para estimar a perda de pressão na mangueira determina-se inicialmente o regime de escoamento de acordo com o número de Reynolds conforme a Equação 7. Se $R < 2000$ o regime de escoamento é laminar, se $2000 < R < 4000$ é regime de transição, e $R > 4000$ é regime turbulento (BERNARDO, 1982).

¹HATHOOT, H. M.; AL-AMOUD, A.; MOHAMMAD, F. S. Analysis and design of trickle irrigation laterals. **Journal of irrigation and drainage engineering**. ASCE, v. 119, n. 5, p. 756-767, 1993.

$$R = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (7)$$

onde R é o número de Reynolds, adimensional; V é a velocidade média da água, $L T^{-1}$, D o diâmetro interno, L , e ν é coeficiente de viscosidade cinemática, em $L^2.T$. Com a Equação 8 calcula-se o ν .

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2} \quad (8)$$

em que T é a temperatura em graus Celsius, sendo válida para temperatura de 0 a 100 °C.

Para condutos não circulares determina-se o número de Reynolds com a Equação 9 (PORTO, 2001):

$$R = \frac{4 \cdot V \cdot R_h}{\nu} \quad (9)$$

em que R_h é definido como raio hidráulico, que é a razão entre a área molhada pelo perímetro molhado no conduto.

Para MGC com diâmetro interno de 0,016 m e temperatura da água menor que 30 °C, os valores de Reynolds estão sempre abaixo de 20 000 na entrada, tendendo para R menor 100 no fim da mangueira, nas proximidades do último emissor.

Segundo Bernardo 1982, quando o regime é de transição, $2000 < R < 4000$, não se pode determinar com segurança a perda de carga nas tubulações.

A equação comumente utilizada para estimar a perda de pressão em tubulações de irrigação, tanto nas linhas de recalque como laterais, é a de Hazen-Williams, Equação 18, que foi desenvolvida pelo estudo em sistemas de distribuição de água que utilizavam tubulações maiores ou iguais a 75 mm de diâmetro e vazões maiores ou iguais a $0,0032 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Nestas condições o número de Reynolds está acima de $5 \cdot 10^4$ e a equação de

Hazen-Williams estima satisfatoriamente a perda de pressão por atrito. (KELLER e KARMELI, 1975; BERNARDO 1982; KELLER e BLIESNER, 1990).

$$J_{HW} = 6,807 \cdot \frac{1}{D^{1,17}} \cdot \left(\frac{V}{C}\right)^{1,852} \quad (10)$$

onde J_{HW} é a perda de carga unitária, $L L^{-1}$ e C é o coeficiente que depende da parede do tubo (material e estado).

O valor do coeficiente C da Equação 10 para material plástico é 150 (KELLER e BLIESNER, 1990). Para Bernardo 1982, o valor de C para plástico esta entre 140 e 145.

O uso da equação de Hazen-Williams dever ser desestimulada, pois muitos sistemas de condução de água estão fora da faixa de desenvolvimento desta formula (LIOU, 1998), sendo que este autor encontrou erros maiores que 40%.

Esta equação é valida somente para água, o que provoca desinteresse de pesquisadores que trabalham com outros fluidos de a utilizar e divulgar.

Segundo Keller e Bliesner 1990, para diâmetros pequenos e paredes lisas como as tubulações utilizadas em irrigação por gotejamento, a equação de Hazen-Williams, Equação 16, subestima a perda de pressão. Nestes casos estes autores sugerem o uso da equação de Darcy-Weisbach, Equação 11:

$$H_f = F_f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

em que H_f e a perda de carga, L , F_f é o fator de fricção, adimensional, L é o comprimento total, L , e g é a aceleração da gravidade, $L T^{-1}$.

A equação de Darcy-Weisbach, proposta inicialmente em 1845 por Julies Weisbach, deve ser considerada um padrão para o calculo hidráulico em irrigação e as outras equações devem ser deixadas para os historiadores, principalmente após o advento e popularização das calculadoras e planilhas eletrônicas (BROWN, 2002).

Calcular o valor de Ff ao longo de mangueiras gotejadoras não é simples, pois Ff varia em cada segmento entre dois emissores.

Para tubos com paredes lisas e $R < 2000$ utiliza-se a Equação 12.

$$F_f = \frac{64}{R} \quad (12)$$

Para valores de $3000 < R < 100000$, pode ser usada a equação empírica apresentada por Blasius em 1913 (WU E GITLIN, 1973; BAGARELLO et ali, 1997; PORTO, 2001):

$$F_f = \frac{0,3164}{R^{0,25}} \quad (13)$$

A equação implícita de Colebrook-White, Equação 14, apresentada em 1939, apesar de ser trabalhoso o seu manuseio sem o auxílio da computação eletrônica, é a mais conceituada (PORTO, 2001).

$$\frac{1}{\sqrt{Ff}} = -2 \log \left(0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,51}{R \sqrt{Ff}} \right) \quad (14)$$

em que ε é a altura da rugosidade interna da parede da mangueira, L. Porto 2001, define que a rugosidade ε para tubos plásticos esta entre $1,5 \times 10^{-6}$ a $1,0 \times 10^{-5}$ m.

Swamee 1993, trabalhando com condução de petróleo, apresentou uma equação geral para o calculo do fator de atrito, Ff , valida para $0 \leq R \leq 10^8$ assim descrita:

$$Ff = \left\{ \left(\frac{64}{R} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{R^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{R} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (15)$$

Um estudo para verificar o comportamento da Equação 15, em varias situações de condução de água em sistemas pressurizados, concluiu que para um regime turbulento em conduto liso e baixos valores de numero de Reynolds, a equação de Swamee superestimou os valores, em relação às equações implícitas (ANDRADE e CARVALHO, 2001).

Utilizando a equação explicita de Swamee para o calculo do fator de atrito em diversas simulações de irrigação por gotejamento, concluiu-se que é suficiente acurada com um erro máximo de $\pm 1\%$ (VALIANTZAS, 2005).

O cálculo de perda de carga em laterais com múltiplas saídas é usualmente baseado na perda de ocorre em uma tubulação de mesmo comprimento sem as saídas multiplicado por um fator de correção. Christiansen 1942, propôs um fator de correção, F_c , para tubulações com aspersores espaçados igualmente e com mesma vazão, sendo que primeira saída esta localizada a uma distancia da entrada de água igual ao espaçamento entre as saídas (Equação 16):

$$F_c = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \quad (16)$$

Em que m é definido como o expoente da velocidade na equação usada nos cálculos de perda de carga, e N é o numero de saídas na lateral.

Scaloppi 1988, assumindo os mesmos pré-requisitos de Christiansen, apresentou o fator F_a , Equação 17, que permite determinar o fator de correção da perda de carga em laterais com varias saídas uniformes, com a distância da primeira saída entre 0 a 1 vez o espaçamento entre os aspersores.

$$F_a = \frac{N \cdot F_c + y - 1}{N + y - 1} \quad (17)$$

em que y é a razão entre a distância da primeira saída no inicio da tubulação e o espaçamento regular entre as saídas, $0 \leq y \leq 1$.

Analisando as expressões 16 e 17, conclui-se que o pré-requisito de vazão igual em todas as saídas uniformemente espaçadas é verdadeiro se o expoente de descarga da Equação 1, o x , for igual a 0, ou seja, a diferença de pressão ao longo da lateral não altera a vazão de nenhuma saída.

Scaloppi 1998, concluiu em tubulações com mais de 10 saídas, as diferenças entre F_c e F_a são desprezíveis.

O calculo de perda de carga ao longo de mangueiras gotejadoras colapsáveis, de pequenos diâmetros, ao redor de 0,016 m, apresentam em cada saída um emissor soldado internamente na tubulação que perturba o fluxo da água, fato não considerado na definição dos fatores F_c e F_a .

4.5.2 Perda de pressão localizada no emissor

Diversos autores destacaram que a perda de carga localizada no emissor deve ser considerada no dimensionamento de laterais (HOWELL e HILER, 1974; HOWELL e BARINAS, 1980; AL-ALMOUD, 1995; BAGARELLO et al, 1997; JUANA et al, 2002a, 2002b e YILDIRIM, 2007).

Cada gotejador soldado internamente na mangueira adiciona uma obstrução ao fluxo de água, que deve ser considerada nos cálculos hidráulicos de perda de carga da linha lateral.

Na década de 70 os pesquisadores direcionavam pesquisas em IG dimensionando microtubos como gotejadores. Determinavam o comprimento, o diâmetro e o espaçamento de cada microtubo emissor e o diâmetro e comprimento da lateral em que estes microtubos seriam inseridos, visando à maior uniformidade de vazão possível (WU e GITLIN, 1973). Poucos autores pesquisam emissores tipo microtubo atualmente (SOUZA, 2005; SOUZA e BOTREL, 2003).

4.5.2.1 Método de constrição do diâmetro na posição do emissor

A perda de carga no emissor pode ser expressa na forma clássica como uma fração da velocidade cinética conforme De Marchi¹ citado por Bagarello et alii, 1997 e Juana et alii, 2002. Este fator, θ , adimensional, está presente na Equação 18.

$$hf_g = \theta \frac{V_2^2}{2g} \quad (18)$$

onde hf_g é a perda de carga devido ao emissor, L.

Provenzano e Pumo 2004, propuseram a Equação 19 para determinar o θ para vários tipos de emissores.

$$\theta = 0,056 \left[\left(\frac{D}{D_g} \right)^{17,83} - 1 \right] \quad (19)$$

em que D_g é o diâmetro interno da mangueira menos a altura do gotejador, L, conforme mostra a Figura 8.

Provenzano et alii 2005, formularam uma revisão da equação anterior e apresentaram a Equação 20, obtendo melhores resultados para emissores planos.

$$\theta = 0,116 \left[\left(\frac{D}{D_g} \right)^{13,87} - 1 \right] \quad (20)$$

Na Figura 8 está indicada D e D_g .

¹De MARCHI, G. **Idraulica: Basi Scientifiche e applicazioni tecniche** U. Hoepli, Ed., Milano, Italy, 1954, 205p.

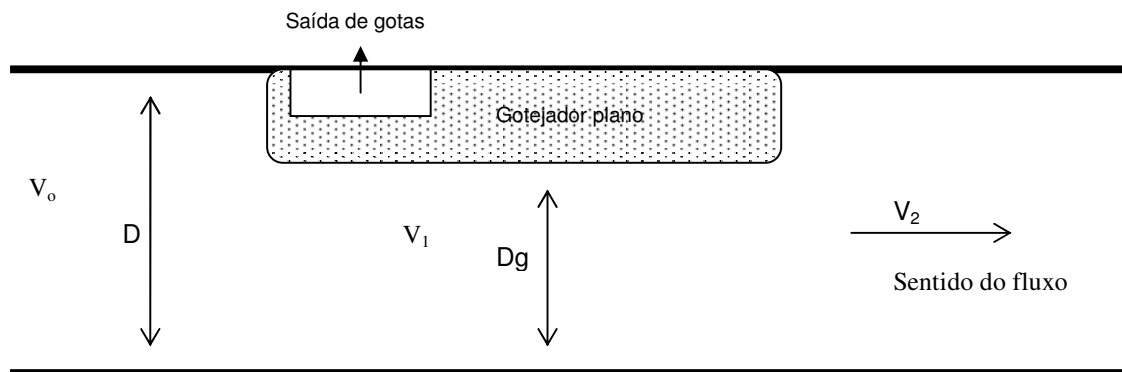


Figura 8. Corte longitudinal de uma MGC pressurizada na posição do gotejador e as grandezas D , D_g e V .

Alves e Porto 2002, apresentaram um método similar ao anterior baseando-se na razão r , entre a área da mangueira com emissor, A_c , e a área na posição sem o gotejador, A_s (Figura 9 e Equação 22). Estes autores modificaram a Equação 18, resultando na Equação 23, introduzindo a razão r e o Índice de Obstrução, IO (ALVES e PORTO, 2002; CARDOSO, 2007).

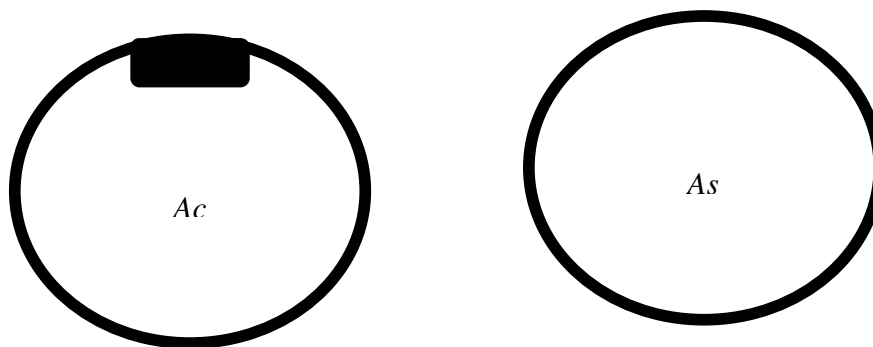


Figura 9. Corte transversal de MGC pressurizada e as dimensões A_c e A_s .

$$r = \frac{A_c}{A_s} \quad (21)$$

$$IO = \frac{(1-r)^2}{r^2} = \theta \quad (22)$$

$$hf_g = \frac{(1-r)^2 V_2^2}{r^2 2g} \quad (23)$$

onde hf_g é a perda de carga em cada gotejador, L. Conclui-se que IO é igual a θ

Cardoso 2007, analisando a perda de carga provocada por emissores inseridos manualmente em mangueiras de polietileno, em 5 diferentes diâmetros, de 10 a 19,7 mm, mostrou que gotejadores com área de protusão interna próxima de 20 mm^2 em mangueira de 16,3 mm de diâmetro, causam um aumento de perda de carga próximo de 10%, com velocidade média de escoamento de $1,5 \text{ m s}^{-1}$.

4.6 Variação de vazão e de pressão na linha lateral

Karmeli e Keller 1975, sugerem que uma variação de vazão de 10% ao longo da linha lateral é aceitável.

A variação de vazão resultante da variação de pressão na mesma lateral deve estar entre 10 a 20% (SAMMIS e WU, 1985).

Bernardo 1989, considera que no Brasil a irrigação por gotejamento deva ser suplementar, sendo aceitável uma variação máxima de 20% na vazão na lateral.

Wu 1997, indica que a variação de vazão entre emissores de uma lateral pode ser relaxada em até 30% no lugar dos tradicionais 10 a 20%, que mesmo assim obtém-se coeficiente de uniformidade de aplicação de água acima de 80%, desde que o coeficiente de variação de fabricação, CV_f , seja menor que 10%.

Wu e Yue 1993, apresentaram a Equação 24 relacionando a variação de pressão em função da variação de vazão.

$$\Delta H = 1 - (1 - \Delta q)^{\frac{1}{x}} \quad (24)$$

em que ΔH é a variação de pressão, decimal, Δq é a variação de vazão, decimal, que podem ser determinados pelas equações:

$$\Delta H = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max}} \quad (25)$$

$$\Delta q = \frac{q_{g \max} - q_{g \min}}{q_{g \max}} \quad (26)$$

Introduzindo na Equação 26 a Equação 1 e rearranjando temos:

$$\Delta q = \frac{K_g \cdot H_{ent}^x - K_g \cdot H_{fin}^x}{K_g \cdot H_{ent}^x} \quad (27)$$

Esta equação pode ser apresentada na seguinte forma:

$$\Delta q = 1 - \left(\frac{H_{fin}}{H_{ent}} \right)^x \quad (28)$$

em que H_{max} é a pressão máxima na lateral que é igual a H_{ent} em mangueiras em nível, H_{min} é a pressão mínima que é igual a H_{fin} em mangueiras em nível, q_{max} é a vazão máxima e q_{min} é a vazão mínima.

A pressão de entrada é a pressão nominal de trabalho na entrada da mangueira gotejadora.

Queiros et al 1995, apresentaram a Equação 29 para determinar o comprimento máximo de linha lateral em nível.

$$L = \frac{\Delta H \cdot H_{ent}}{J} \quad (29)$$

onde L é o comprimento total da mangueira gotejadora, em m.

Os mesmos autores sugerem que para calcular J , deve-se definir uma equação para cada espaçamento entre emissores que se deseje avaliar.

4.6.1 Vazão ao longo da lateral em nível

A vazão de um emissor em particular é somente função da pressão disponível na posição deste emissor. Assim deve-se conhecer o perfil de pressão ao longo do comprimento da mangueira gotejadora.

Os conceitos hidráulicos de dimensionamento de linhas laterais com múltiplas saídas desenvolvidas para irrigação por aspersão podem ser utilizados para dimensionar as mangueiras gotejadoras, desde que considerado a perda de pressão localizada no gotejador colado internamente, devido a perturbação que este provoca no fluxo de água.

Em lateral de diâmetro único, o emissor que tem a vazão média esta localizada a aproximadamente 40% do comprimento da lateral a partir da entrada (KELLER e KARMELI, 1974). Para mangueira disposta em nível foi apresentada a Equação 30 para determinar a pressão média e a Equação 31 para a pressão na entrada da lateral. Os autores consideraram vazão igual para todos os emissores.

$$H_{med} = H_{ent} - 0,77 \cdot H_fL \quad (30)$$

$$H_{ent} = H_{min} + H_fL \quad (31)$$

em que H_{med} é a pressão média, L ; H_fL é a perda de carga na lateral, L , e H_{min} é a pressão mínima na lateral, L . A H_{ent} esta no inicio, a H_{med} esta a 40% da entrada e a H_{min} esta no fim da lateral disposta em nível no terreno (KELLER e KARMELI, 1974).

Howell e Hiler 1974, para fins de dimensionamento de sistema de irrigação por gotejamento, apresentaram a Equação 32 para determinar a pressão média da mangueira gotejadora instalada em nível.

$$H_{med} = H_{ent} - \frac{3}{4} H_f L \quad (32)$$

Substituindo a Equação 32 na Equação 4 tem-se:

$$q_{gmed} = K_g \left(H_{ent} - \frac{3}{4} H_f L \right)^x \quad (33)$$

Gillespie et al 1979, desenvolveram equação para determinar o ponto de pressão média em lateral em nível, Equação 34.

$$\frac{\ell}{L} = 1 - \left[1 - \frac{(m+1)}{(m+2)} \right]^{\frac{1}{m+1}} \quad (34)$$

em que a razão ℓ/L é a posição em que se encontra a pressão média em relação ao comprimento total da linha lateral, adimensional, m é o expoente da vazão da equação de perda de carga selecionada para perda de pressão. Para $m = 2$, a relação resulta em 0,37 e em 0,38 para $m = 1,75$.

BOSWELL 1990, trabalhando com mangueiras gotejadoras apresenta que metade da perda de carga ocorre nos primeiros 22% do comprimento e a pressão média esta a 38% da entrada quando esta lateral esta disposta em nível. O autor adiciona que no ponto de pressão média, já ocorreu 74% da perda de pressão total, ou seja, os 62% do comprimento final da mangueira gotejadora é responsável por apenas 26% da perda de pressão que ocorre ao longo de toda a lateral. Estes valores estão representados na Figura 1.

Os 20% metros finais (0,2 L) do comprimento total da mangueira gotejadora contribuem somente com 1% do total de perda de pressão ao longo desta lateral conforme Gráfico 1 (VALIANTZAS, 2005).

Observando o perfil de pressões em uma lateral com múltiplas saídas equidistantes disposta em nível, verifica-se que a pressão mínima ocorre no fim, a pressão máxima esta na entrada e a pressão média esta a 0,370 do comprimento total desta lateral,

(SCALOPPI e ALLEN, 1993). Os mesmos autores afirmaram que um método mais preciso mostrou que a pressão média esta a 0,40 do comprimento total.

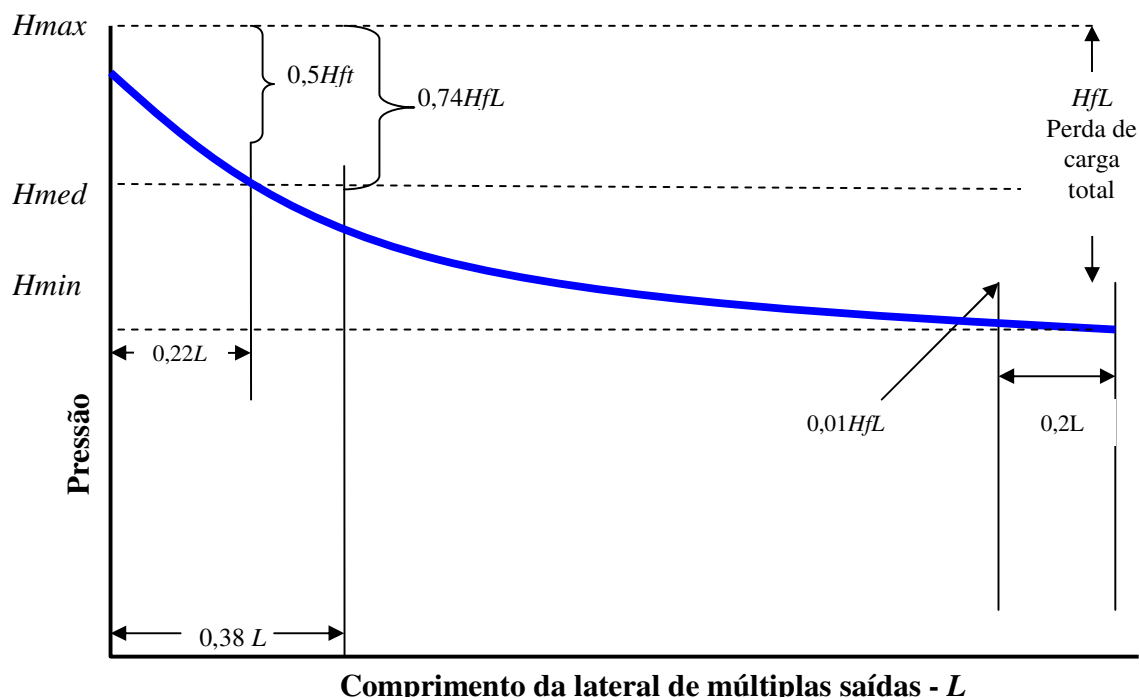


Figura 10. Perfil de pressões em mangueira gotejadora em função do comprimento da lateral. H_{fL} é a perda de carga total. Adaptado de BOSWELL 1990 e VALIANTZAS, 2005.

4.7 Comprimento de instalação de MGC

Os fabricantes indicam em seus catálogos os comprimentos máximos de instalação, em função da uniformidade de aplicação de água desejada, diretamente relacionada com a variação de vazão, e da inclinação da linha de plantio.

Na ausência desta informação dos fabricantes, pode-se dimensioná-la experimentalmente ou por cálculos com equações disponíveis na literatura.

4.8 Uniformidade de aplicação de água

Sistemas de irrigação por gotejamento – IG – não aplicam água com perfeita uniformidade ao longo das linhas laterais quando utilizam mangueiras gotejadoras colapsáveis, pois as vazões dos emissores variam pela imperfeição no processo de fabricação, entupimento, e mudanças de pressão que ocorrem nas tubulações laterais. Sistemas com baixa pressão têm vantagens sobre sistemas operados a altas pressões, devido aos baixos custos operacionais e de fabricação (MYERS & BUCKS, 1972). Estes autores defenderam melhorar a uniformidade de vazão com o uso de microtubos emissores com diâmetros diferentes ao longo da lateral para compensar a variação de pressão na mesma. A pressão de trabalho na entrada da lateral usado por estes pesquisadores foi de 1,43 m.c.a. que é muito abaixo da pressão nominal dos atuais emissores de labirinto que trabalham na pressão nominal de 10 m.c.a. Na época não havia disponibilidade de emissores com labirintos curtos.

A irrigação por gotejamento ideal é aquela que pode irrigar uniformemente, isto é, cada saída tem a mesma vazão (WU e GITLIN, 1973). Os mesmos autores apresentaram um método para alcançar alta uniformidade no dimensionamento de SIG, usando diferentes diâmetros combinados com diferentes comprimentos de microtubos ou diferentes diâmetros combinados com diferentes espaçamentos entre os emissores na mesma lateral. Os emissores eram microtubos com diâmetros que variavam de 0,074 a 0,083 m e com pressão de trabalho variando de 0,8 a 1,5 kPa

O uso de microtubos como emissores não se justifica em grandes áreas de cultivos adensados, devido à facilidade de instalação, a redução de preços e ao aumento da qualidade das mangueiras gotejadoras disponíveis.

Wu e Gitlin, 1974 (a), apresentaram um método gráfico para auxiliar a selecionar a lateral ou linha de gotejamento baseado num desejável ou aceitável Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, CUC, tendo os dados de vazão na entrada da lateral e a declividade desta lateral. A equação para determinar o CUC em gotejamento pode ser apresentada da seguinte forma:

$$CUC = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_{gmed}|}{n \cdot q_{gmed}} \right) \quad (35)$$

em que q_i é a vazão de cada emissor, $L T^{-1}$, q_{gmed} é a vazão média, de todos os emissores coletados, $L T^{-1}$; e n é o numero de pontos coletados.

Keller e Karmeli, 1974, propuseram novo e importante conceito de uniformidade de emissão para dimensionamento, Equação 36, e um para avaliação de projeto já instalado, Equação 37.

$$CUE_d = 100 \cdot \left(1,0 - u + u \cdot \frac{q_{25\%h}}{q_{medh}} \right) \cdot \frac{q_{mind}}{q_{medd}} \quad (36)$$

em que CUE_d é o coeficiente de uniformidade de emissão estimado no dimensionamento, u é o fator de correção que depende do numero de emissores por planta, ver Tabela 4, $q_{25\%h}$ é a media de vazão de 25% dos emissores de menor vazão na pressão de referencia, q_{medh} é a vazão média da amostra de emissores operados a pressão de referencia, q_{mind} é a vazão mínima no dimensionamento; e q_{medd} é a vazão média de dimensionamento.

Tabela 4. Valores de u em função do numero de emissores por planta, ep .

Numero de emissores por planta, ep	≤ 1	2	3	4	6	8
Valor de u	1	0,71	0,58	0,50	0,41	0,35

Para avaliação de dados coletados no campo:

$$CUE_a = 100 - \frac{q_{25\%a}}{q_{meda}} \quad (37)$$

sendo que CUE_a é o coeficiente de uniformidade de emissão para avaliação de projetos, $q_{25\%a}$ é a vazão média dos 25% emissores de menor vazão coletados a campo, q_{meda} é a vazão média de todos os dados coletados no projeto.

O CUE pode ser estimado no momento do dimensionamento levando em consideração o coeficiente de variação de fabricação, CVf , definido por Keller e Karmeli 1975, através da equação:

$$CUE_{cvf} = 100 \cdot \left(1,0 - \frac{1,27 \cdot CVf}{\sqrt{ep}} \right) \cdot \frac{q_{\min h \min}}{q_{gmed}} \quad (38)$$

em que CUE_{cvf} é o coeficiente de uniformidade de emissão considerando o coeficiente de variação de fabricação, CVf , ep é o número de emissores agrupados por planta, o $q_{\min h \min}$ é a menor vazão associada a menor pressão.

Introduzindo a Equação 3 e 4 na Equação 38, podemos apresentá-la assim:

$$CUE_{cvf} = 100 \cdot \left(1,0 - \frac{1,27 \cdot CVf}{\sqrt{ep}} \right) \cdot \left(\frac{H \min}{Hmed} \right)^x \quad (39)$$

Analisando a Equação 39 conclui-se que quando o valor de x tende para zero, tem-se que:

$$CUE_{cvf} = 100 \cdot \left(1,0 - \frac{1,27 \cdot CVf}{\sqrt{ep}} \right) \quad (40)$$

Karmeli e Keller (1975), propuseram outro coeficiente para avaliação de projetos, chamado de uniformidade de emissão absoluta, CUE_A , expressa pela equação:

$$CUE_A = 50 \cdot \left(\frac{q_{25\%a}}{q_{gmed}} + \frac{q_{gmed}}{q_{12,5\%}} \right) \quad (41)$$

em que CUE_A é o coeficiente de uniformidade absoluta no campo, e $q_{12,5\%}$ é a média das 12,5 % maiores vazões observadas.

Ambas as equações, CUE_{CVf} e CVf , estão recomendadas para dimensionamento, instalação e avaliação de desempenho de sistemas de irrigação localizada pela norma EP405.1 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS, 2003). Na Tabela 5, tem-se a classificação para CVf e na Tabela 6, a recomendação de CUE_{CVf} de acordo com esta norma:

Tabela 5. Classificação do CVf conforme norma ASAE EP405.1, para emissor pontual.

Valores de CVf	Classificação
< 0,05	Excelente
0,05 a 0,07	Médio
0,07 a 0,11	Fraco
0,11 a 0,15	Ruim
> 0,15	Inaceitável

Observa-se que os valores da Tabela 5 são similares aos da Tabela 3.

Tabela 6. Recomendação de CUE_{CVf} para culturas anuais e gotejadores espaçados a menos de 1 m conforme norma ASAE EP405.1.

Topografia	Declividade (%)	Valores de CUE_{CVf} (%)
Uniforme	< 2	80 a 90
Ondulada	> 2	70 a 85

Nakayama et ali (1979), desenvolveram uma equação mais simples, baseado no trabalho do pesquisador Hart¹ divulgada em 1961, que pode ser chamada de coeficiente de uniformidade de emissão de dimensionamento, CUE_D . Tendo os valores de CV_f e do numero de emissores por planta, calcula-se este coeficiente com a equação:

$$CUE_D = 100 \cdot \left(1 - \frac{0,798 \cdot CV_f}{\sqrt{ep}} \right) \quad (42)$$

Esta equação também pode ser usada para avaliação de campo, substituindo o CV_f por um novo coeficiente de variação de vazão dos emissores a campo, CV_c , que pode ser determinado da mesma maneira que o CV_f mas usando dados observados a campo.

Barragan et ali (2005), apresentaram uma equação por aproximação estatística usando os mesmos dados da equação de Keller e Karmeli 1975, que apresentam resultados de 5 a 8 % maiores e mais reais. Segundo os autores a formula original é conservadora e subestima o coeficiente de uniformidade por ser uma associação da variação hidráulica com a variação de processo de manufatura. A equação proposta é:

$$CUE_N = 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{q_{\min h \min}}{q_{med}} \right)^2 + \left(\frac{1,27 \cdot CV_f}{\sqrt{ep}} \right)^2} \quad (43)$$

em que CUE_N é o coeficiente de uniformidade de emissão novo, $q_{\min h \min}$ é a vazão menor que ocorre na posição de menor pressão na lateral.

¹HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural engineering**: v. 42, n. 7, p. 354-355, 1961.

Aplicando o mesmo princípio usado na Equação 38, na Equação 43, tem-se:

$$CUE_N = 1 - \sqrt{\left(1 - \left(\frac{H \min}{Hmed}\right)^x\right)^2 + \left(\frac{1,27 \cdot CV_f}{\sqrt{ep}}\right)^2} \quad (44)$$

E a Equação 43 pode ser escrita na forma:

$$CUE_N = 1 - \sqrt{\left(\frac{1,27 \cdot CV_f}{\sqrt{ep}}\right)^2} \quad (45)$$

Favetta e Brotel (2001) concluíram que há alta correlação entre todas as expressões de uniformidade, significando que qualquer uma delas pode ser usada. Deve ser enfatizado que estes autores trabalharam com emissores com valores de x próximo de zero.

Mantovani e Vieira (2004), fizeram estudo comparativo de avaliação de sistemas de irrigação com a medição da vazão de 16 e 32 gotejadores. Usaram os coeficientes CUC e CUE_a e concluíram que em sistemas com manutenção constante é possível fazer as avaliações com apenas 16 gotejadores. Entretanto, em sistemas com problemas sérios de entupimento, o melhor é amostrar 32 gotejadores. Foram avaliadas 4 linhas laterais, a primeira, a última e as localizadas a 1/3 e a 2/3 do início da parcela. Em cada linha lateral foram amostrados 4 gotejadores para 16 avaliações e 8 gotejadores para 32 avaliações. Em cada lateral sempre foram amostrados o primeiro e ultimo gotejador e os demais avaliados estavam equidistantes na lateral.

5 MATERIAL E METODOS

5.1 Pressupostos para validade do modelo proposto

Assume-se os seguintes pressupostos no desenvolvimento do modelo proposto:

1. Na determinação dos Coeficientes de Uniformidade de Emissão a vazão será em $L h^{-1} m^{-1}$ e não por gotejador individual.
2. O agrupamento de emissores, ep , será considerado como sendo o número de emissores por metro na mangueira.
3. Os bulbos úmidos sempre irão se sobrepor formando um volume contínuo molhado.
4. A mangueira estará instalada em nível.
5. O modelo proposto é possível de ser fabricado.
6. O segmento final corresponde a 60% do comprimento da MGC com espaçamento padrão.

5.2 Avaliação dos parâmetros hidráulicos da Mangueira Gotejadora Colapsável e do modelo proposto

A pesquisa foi conduzida *no* Laboratório de controle de qualidade da empresa Petroisa Irrigação Ltda, localizada na cidade de Avaré, SP.

Fez-se o estudo com a mangueira gotejadora MANARI[®], fabricada pela Petroisa Irrigação Ltda, tendo como matéria prima básica resinas de polietileno. Na Tabela 7 estão os dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 7. Características da Mangueira Gotejadora marca MANARI[®], fornecida por Petroisa Irrigação Ltda.

Parâmetro	Valores e unidades
Espessura de parede – mínimo de 0,90 do valor declarado	0,250 mm
Pressão Nominal de Trabalho	10 m.c.a.
Faixa de pressão operacional	6 a 10 m.c.a.
Diâmetro Nominal	16 mm
Diâmetro interno quando pressurizado a 10 m.c.a	16,2 mm ± 0,3 mm
Diâmetro interno quando pressurizado a 6 m.c.a.	16,1 mm ± 0,3 mm
Vazão do emissor na Pressão Nominal	1,474 L h ⁻¹ por emissor
Pressão de Ruptura	25 m.c.a.
Dimensões da menor passagem do gotejador	0,48 x 0,55 mm
Variação distancia entre emissores	Nominal +- 5%
K_g	0,46297
x	0,503
CV_f	0,0353
Comprimento maximo de instalação em nivel, para variação de 10% na vazão	
Para espaçamento de 30 cm	108 m
40 cm	131 m
50 cm	169 m

O Laboratório de controle de qualidade esta constituído de uma plataforma em nível, disposta a 1,50 m acima do solo, com comprimento adaptável de até 250 metros, onde a mangueira é disposta para os ensaios. Faz parte do circuito hidráulico uma caixa com 1000 litros de água e uma motobomba de vazão máxima de $2,44 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e altura manométrica de até 60 m.c.a. conforme Figura 11. Na saída da motobomba esta instalado um filtro de discos plásticos, com abertura máxima de 110 micra.

O controle de pressão e vazão é feito por um inversor de frequência, três registros de agulha e dois registros de gaveta, que permitem todas as combinações necessárias de vazão versus pressão para ensaiar mangueiras gotejadoras.



Figura 11. Central de controle do Laboratório de controle de qualidade da Petroisa Irrigação Ltda.

A água que sai pelos emissores é coletada por uma calha em aço zincado instalada em toda a extensão da plataforma, 30 cm abaixo do suporte da mangueira, e é

retornada a caixa de 1 000 litros visualizada na Figura 12. A temperatura da água é monitorada continuamente por termômetro digital de contato.



Figura 12. Vista da plataforma suspensa para ensaios das mangueiras gotejadoras.

Para a medição de pressão foram utilizados dois manômetros eletrônicos com sensor de pressão de silicone integrado, modelo MPX 5500, fabricado por Freescale Semiconductor Inc, associado a um Indicador Eletrônico Microprocessado modelo HW7000, fabricado por Coelmatic Ltda, com leitura de pressão entre 0 e 12 m.c.a. com precisão de 0,01 m.c.a.

A vazão foi mensurada com um Medidor e Transmissor de Vazão eletromagnético, sem partes moveis, marca INCONTROL, Serie VMS-012, diâmetro de 13 mm, associado a um Indicador Totalizador modelo MEV-100 do mesmo fabricante. O equipamento foi calibrado com água a 22 °C apresentando precisão de +- 2% na leitura, na faixa de vazão entre 120 a 4070 L h⁻¹.

O Laboratório foi utilizado em duas etapas. Na primeira avaliaram-se as características hidráulicas da mangueira necessárias para conduzir este trabalho. Na segunda

etapa foi dimensionada, fabricada e avaliada a mangueira gotejadora com os dois segmentos conforme modelo proposto.

5.3 Desenvolvimento do modelo

A idéia fundamental desta tese é a proposição do uso de linha lateral com uma mangueira gotejadora colapsável composta de dois segmentos. O segmento final, “a”, com comprimento próximo de 0,6 de L_{a+b} e o segmento inicial “b” onde entra a água, com comprimento próximo de 0,4 de L_{a+b} sendo L_{a+b} o comprimento total do modelo proposto.

Os dois segmentos serão acoplados por um conector de linha conforme Figura 13.



Figura 13. Conector de linha unindo os segmentos da mangueira gotejadora.

O conceito básico do modelo é que a vazão no primeiro metro inicial da mangueira L_a terá a mesma vazão que a do início do segmento 0,6 de L_a , em $L h^{-1} m^{-1}$.

No segmento “a” utilizou-se um espaçamento padrão da indústria e no segmento “b” um espaçamento maior, a ser determinado.

A curva da vazão por metro de mangueira em função do seu comprimento com os dois segmentos associados pode ser visualizados na Figura 14.

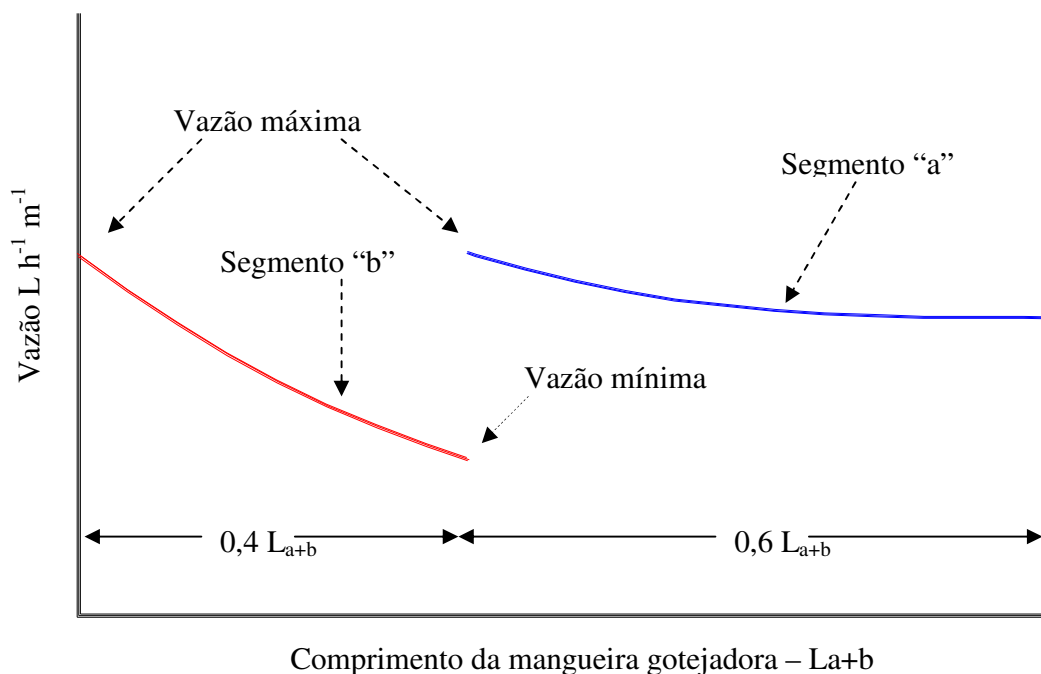


Figura14. Vazão, em $L h^{-1} m^{-1}$, em função do comprimento da lateral, para mangueira gotejadora com dois segmentos, cada um com diferente espaçamento entre emissores.

5.4 Procedimentos na primeira fase

Na primeira fase, foram feitos os seguintes passos:

1. Determinação do valor de D , Dg , Ac e As para uso nas Equações 19, 20, 21, 22 e 23. Avaliação, em ensaio de bancada, de três segmentos de 50 m de comprimento de mangueira sem os gotejadores, com três repetições, obtendo a equação ajustada de perda de carga unitária, J . Foram utilizados valores de vazão máxima que estejam na faixa de operação das mangueiras gotejadoras.
2. Obtenção de equações ajustadas de perda de carga unitária, J , com uso de equações da mangueira sem os gotejadores.
3. Comparação entre a equação de ajuste obtida com dados de ensaio versus as equações derivadas dos cálculos teóricos, para definir a que será utilizada nos cálculos da segunda fase.

4. Avaliação por ensaio de bancada de três segmentos de 50 metros de comprimento de mangueira com gotejadores fechados, em três repetições, em 7 vazões diferentes. Com estes dados observe-se: 1) a equação de perda de carga unitária em função da vazão na mangueira com os gotejadores fechados; 2) a perda de carga ocasionada por cada gotejador, hf_g e 3) os valores experimentais do fator θ para a Equação 18.
5. Com as características da mangueira e do gotejador associados com as informações anteriores, determinou-se o comprimento máximo de instalação das mangueiras gotejadoras com gotejadores abertos, para a variação permissível de vazão ao longo da lateral.

5.5 Procedimentos na segunda fase

Conhecendo-se a vazão por metro no ponto próximo de 0,4 do comprimento máximo de instalação para um espaçamento padrão escolhido, será determinado qual o espaçamento especial entre emissores que terá esta mesma vazão, com pressão igual a de entrada na mangueira.

Proceder-se a análise de Coeficientes de Uniformidade de Emissão para o modelo proposto, com dois segmentos de mangueira, o inicial com espaçamento especial e maior que o espaçamento padrão do segmento final.

Estes foram os procedimentos:

1. Determinou-se pelo processo passo a passo, com auxílio de planilha eletrônica e equações de ajuste definidas na primeira fase, para os espaçamentos padrões escolhidos, o comprimento máximo de instalação em nível das mangueiras gotejadoras para variações de vazão pré estabelecidas. A sequência dos cálculos foi do último gotejador, de vazão menor para o emissor da entrada da mangueira, de vazão maior. O último emissor foi o emissor número 1. Determinou-se a posição do gotejador de vazão média nesta mangueira com espaçamento padrão. Determinou-se neste ponto a vazão por metro de mangueira.

2. Determinou-se qual o espaçamento especial que forneça a mesma vazão por metro encontrado no item anterior mas com pressão igual a pressão na entrada da mangueira. Este espaçamento especial foi utilizado no segmento “b” do modelo.
3. A partir do ponto de pressão média na mangueira com espaçamento padrão, trocou-se na planilha o espaçamento padrão pelo especial determinado no item anterior, encerrando os cálculos quando a pressão disponível para o emissor coincidiu com a pressão de trabalho. O comprimento do segmento da lateral com o espaçamento especial foi o comprimento do segmento “b”.
4. Avaliou-se teoricamente o Coeficiente de Uniformidade de Emissão de Água do modelo proposto, isto é, a associação do segmento “b” com o “a”.
5. Fabricou-se a mangueira com espaçamento especial.
6. Montou-se exemplares do modelo proposto, e avaliou-se na bancada do Laboratório o Coeficientes de Uniformidade de Emissão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Perda de carga unitária, J , na mangueira sem os gotejadores

6.1.1 Determinação de D , D_g , A_c e A_s

Pressurizando a mangueira a 10 e 6 m.c.a. mediu-se o diâmetro externo com micrometro eletrônico Mitoyo. Nas mesmas posições mediu-se a espessura de parede da mangueira não pressurizada em quatro pontos equidistantes transversalmente. Na Tabela 8 tem-se os valores encontrados para as 16 amostras analisadas. Os diâmetros internos, D , foram calculados pela subtração do diâmetro externo de duas vezes a espessura média. Para os cálculos seqüentes, quando necessário utilizou-se o diâmetro interno obtido a 10 m.c.a.

Para a determinação do diâmetro sob o emissor, D_g , desconta-se do diâmetro interno a altura do emissor mais a parede da mangueira na qual está integrado. Os cálculos de A_c e A_s foram realizados em programa de desenho auxiliado por computador, CAD, para as 10 primeiras amostras da Tabela 8. Na Tabela 9 temos os valores de D_g , A_c e A_s .

Tabela 8. Diâmetro externo, interno e espessura de parede da mangueira gotejadora MANARI.

Amostras	Espessura de parede, mm				Diâmetros Externos mm		Diâmetro internos, <i>D</i> mm	
	1	2	3	4	10 m.c.a	6 m.c.a	10 m.c.a	6 m.c.a.
1	0,247	0,272	0,289	0,279	16,854	16,848	16,311	16,305
2	0,239	0,255	0,244	0,264	16,952	16,923	16,451	16,422
3	0,244	0,270	0,244	0,221	16,789	16,750	16,300	16,261
4	0,247	0,237	0,257	0,269	16,748	16,600	16,243	16,095
5	0,258	0,278	0,235	0,266	16,656	16,554	16,138	16,036
6	0,252	0,233	0,254	0,265	16,614	16,576	16,112	16,074
7	0,251	0,238	0,274	0,278	16,740	16,602	16,220	16,082
8	0,227	0,238	0,267	0,243	16,721	16,622	16,234	16,135
9	0,260	0,243	0,240	0,236	16,753	16,626	16,264	16,137
10	0,255	0,248	0,223	0,253	16,771	16,637	16,282	16,148
11	0,265	0,276	0,260	0,251	16,788	16,603	16,262	16,077
12	0,280	0,261	0,233	0,255	16,710	16,589	16,196	16,075
13	0,265	0,276	0,260	0,251	16,692	16,603	16,166	16,077
14	0,250	0,239	0,271	0,257	16,648	16,516	16,140	16,008
15	0,270	0,241	0,266	0,282	16,719	16,545	16,190	16,016
16	0,261	0,279	0,266	0,240	16,736	16,636	16,213	16,113
MEDIAS	0,254	0,255	0,255	0,257	16,743	16,639	16,232	16,129
CV*	0,050	0,068	0,069	0,065	0,005	0,007	0,005	0,007

*coeficiente de variação.

Para os cálculos teóricos foi utilizado o valor de 0,01632 m como sendo o diâmetro interno da mangueira gotejadora MANARI.

Tabela 9. Dimensões relacionadas a mangueira gotejadora MANARI.

Amostras	Espessura próxima ao gotejador, mm	D , mm	Altura do emissor integrado, mm	Dg mm	Ac mm ²	As mm ²
1	0,247	16,311	3,317	13,241	190,36	208,95
2	0,239	16,451	3,382	13,308	194,20	212,56
3	0,244	16,300	3,347	13,197	189,83	208,67
4	0,247	16,243	3,375	13,115	188,13	207,22
5	0,258	16,138	3,383	13,013	185,52	204,55
6	0,252	16,112	3,347	13,017	185,14	203,89
7	0,251	16,220	3,381	13,090	187,63	206,63
8	0,227	16,234	3,335	13,126	188,11	206,99
9	0,260	16,264	3,364	13,160	188,86	207,75
10	0,255	16,282	3,335	13,202	189,56	208,21
Medias	0,248	16,256	3,357	13,147	188,73	207,54
CV*	0,039	0,006	0,007	0,007	0,0136	0,0116

*coeficiente de variação.

A área transversal ocupada pelo gotejador dentro da mangueira é de 188,73 mm², com CV de 0,0136 na avaliação de 10 amostras.

6.1.2 Perda de carga experimental

Na linha de produção da mangueira gotejadora MANARI, configurou-se para que a máquina suspendesse a inserção dos gotejadores, produzindo assim mangueira sem os emissores, mantendo todas as outras características. Nesta mangueira sem os emissores, foram avaliadas as perdas de carga em três segmentos de 50 metros, com três repetições. Durante os ensaios a temperatura da água variou de 25 a 30 °C. O diâmetro interno pressurizado a 10 m.c.a. foi avaliado em 0,016232 m.

A pressão na entrada das mangueiras foi mantida em 10 m.c.a. em todo o ensaio. Na Tabela 10 são apresentados os valores médios da perda de carga unitária das mangueiras avaliadas.

Nos ensaios, as velocidades do fluxo foram de 0,16 a 0,94 m s⁻¹ com o número de Reynolds entre 2500 a 14 400.

Tabela 10. Perda de carga unitária na mangueira sem os gotejadores, com três repetições e três amostras.

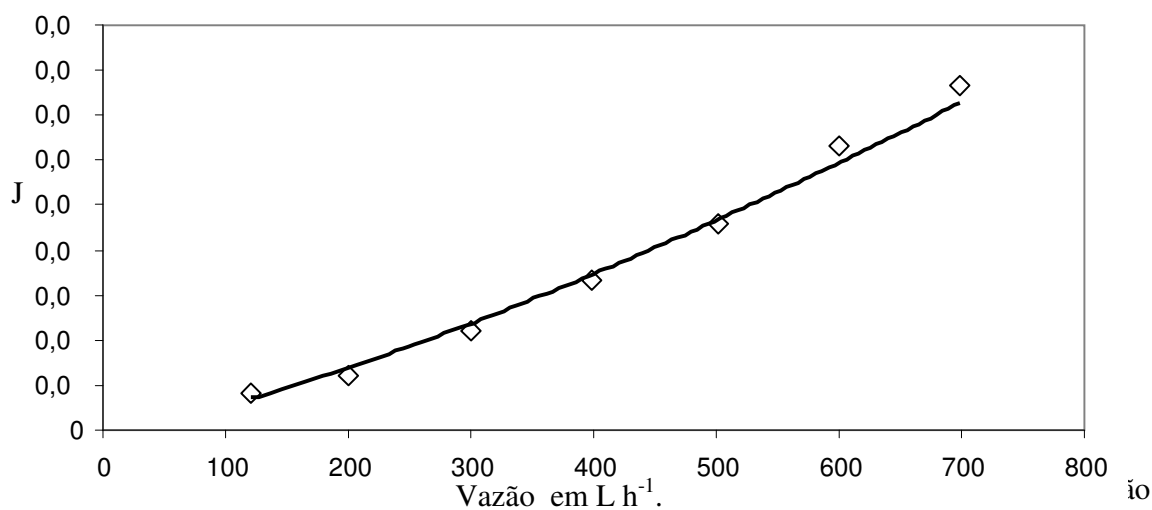
Vazão L h ⁻¹	Ensaio
	J
699,05	0,076524
600,47	0,063177
500,83	0,046046
398,01	0,033515
299,43	0,022229
199,79	0,012033
121,35	0,008203

A equação de ajuste potencial para os valores experimentais está representada na Equação 46 com seu respectivo coeficiente de relação. Na Figura 15 são apresentados os pontos obtidos e a linha de tendência.

$$J = 1 \times 10^{-5} \cdot Q^{1,325} \text{ ent} \quad R^2 = 0,988 \quad (46)$$

onde Q é a vazão em L h⁻¹.

Desconsiderando os dois menores valores da Tabela 10, o valor do expoente da vazão da Equação 46 é igual a 1,4727 com R² igual a 0,99.



6.1.3 Estimativa de J por equações

Com as mesmas vazões e considerando o diâmetro interno de 0,016232m conforme informado pelo fabricante, determinou-se as perdas de carga unitária, J , adimensional, com o uso de diversas equações conforme Tabela 11.

Tabela 11. Perda de carga unitária, J , adimensional, com uso de equações, para mangueira sem gotejadores, diâmetro interno considerado 0,0162 m, altura da rugosidade de 0,00001 m, temperatura da água a 20 °C quando necessário.

Vazão L h ⁻¹	Equação de Darcy Weisbach, com fatores de atrito:				Hazen Williams C=150	Experimental
	Hazen e Poiseuille	Blasius	Colebrooke- White	Swamee		
699,05	0,01242	0,08066	0,08157	0,08191	0,07075	0,07652
600,47	0,01067	0,06182	0,06233	0,06264	0,05339	0,06317
500,83	0,00890	0,04500	0,04527	0,04555	0,03815	0,04604
398,01	0,00707	0,03010	0,03026	0,03050	0,02493	0,03351
299,43	0,00532	0,01829	0,01844	0,01862	0,01472	0,02222
199,79	0,00355	0,00901	0,00917	0,00917	0,00696	0,01203
121,35	0,00216	0,00377	0,00392	0,00288	0,00276	0,00820

Analisando os dados da Tabela 11 e com a visualização da Figura 16, concluiu-se que o fator de atrito com a Equação de Colebrooke-White é a mais adequada devido à sua acuracidade e base científica.

A equação de Darcy Weisbach com o fator de atrito calculado pela expressão de Blasius, é opção simples e de boa precisão para cálculos teóricos de perda de carga em mangueira de polietileno similar as ensaiadas, o está de acordo com diversos autores (CARDOSO 2007; JUANA et al 2002; BAGARELLO et ali, 1997).

Em fluxo de regime laminar, $R < 2000$, que ocorre em tubos plásticos de pequenos diâmetros utilizados em gotejamento, o coeficiente de atrito calculado com a equação de Blasius resulta super estimado. Entretanto isto é insignificante porque a perda de carga na parte final da mangueira gotejadora, onde ocorre o fluxo laminar, é desprezível quando comparado com a perda no total da lateral (BAGARELLO, 1995).

Valiantzas 2005, mostrou em diversas simulações, envolvendo diâmetros variando de 10 a 30 mm, gotejador com vazões entre 2 a 18 L h⁻¹, espaçamentos de emissores entre 0,3 a 2 m e excluindo valores de perda de carga menores que 3 e maiores que 7 m.c.a., que ignorando o regime laminar que ocorre na fração final da lateral, resulta em erros de no maximo 1,5%, que podem ser considerados insignificantes.

Associando Darcy Weisbach com Blasius tem-se a Equação 47, de perda de carga unitária para a mangueira ensaiada considerado o diâmetro informado pelo fabricante. Na Figura 17 tem-se esta opção comparada com os dados ensaiados.

A equação potencia ajustada para Darcy Weisbach com Blasius esta apresentada na forma:

$$J = 9 \times 10^{-7} \cdot Q_{ent}^{1,75} \quad (47)$$

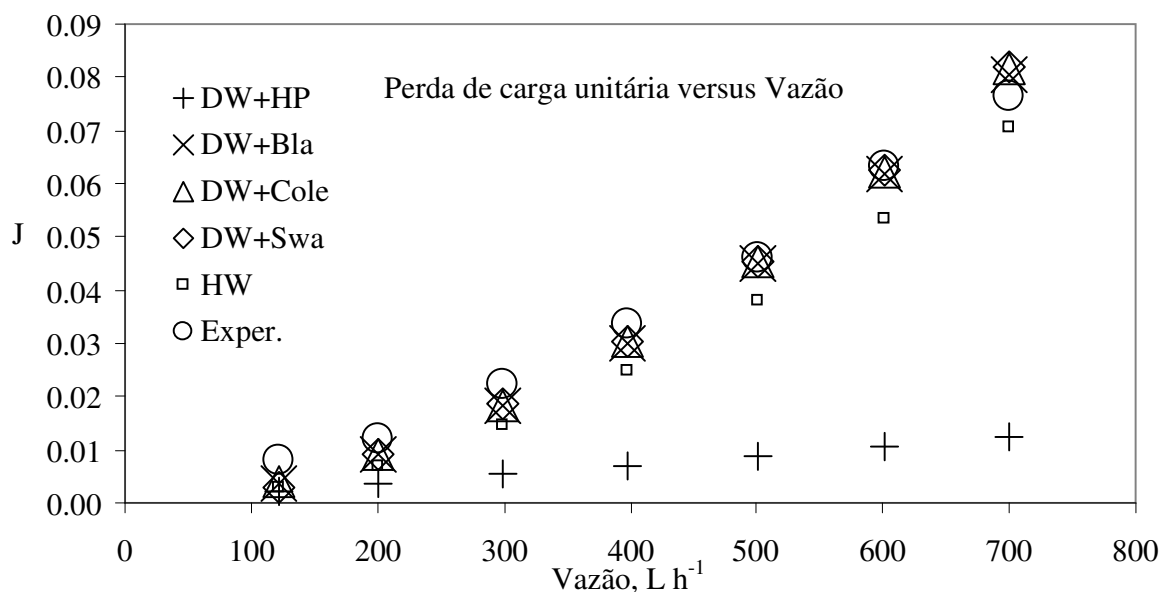


Figura 16. Perda de carga unitária, J , em $\text{mca} \cdot \text{m}^{-1}$, de mangueira sem os gotejadores, em função da vazão por equações. DW+HP: Darcy Weisbach com Hazen Poiseuille; Bla: Blasius; Cole: Colebrooke-White; Swa: Swamee; HW: Hazen Williams e Exper.: dados obtidos experimentalmente.

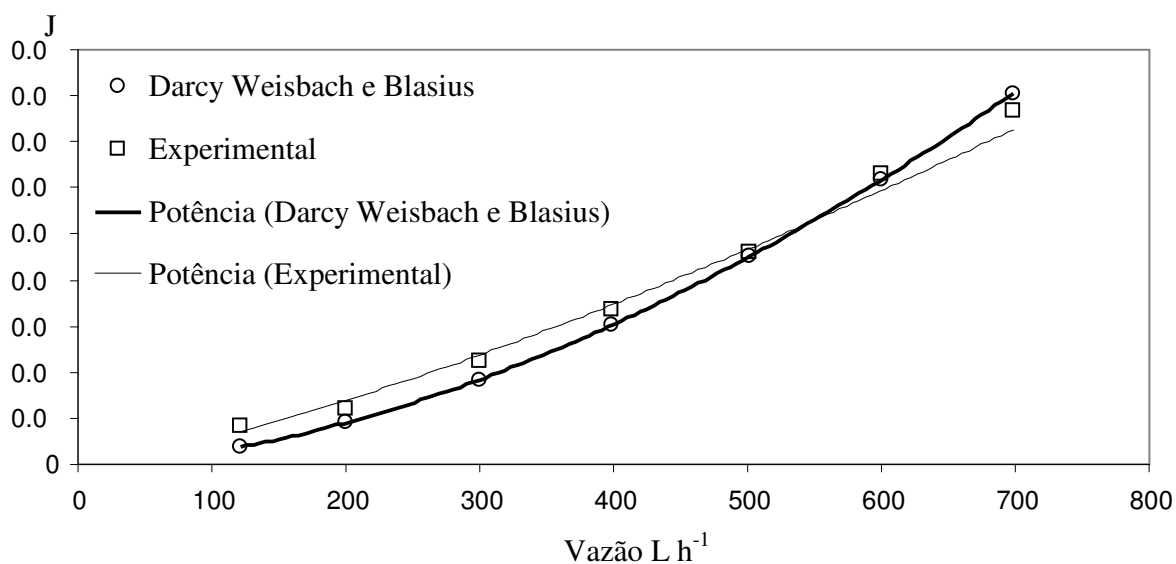


Figura 17. Comparação da perda de carga unitária, em $\text{mca} \cdot \text{m}^{-1}$, dos dados obtidos experimentalmente com o teórico utilizando Darcy Weisbach associado com Blasius, com suas respectivas linhas de tendência para mangueira sem os gotejadores.

6.2 Perda de carga unitária, J, na mangueira com os gotejadores

Na linha de produção da mangueira gotejadora MANARI, configurou-se para que a máquina suspendesse a furação de saída de água dos gotejadores, produzindo assim mangueira com gotejadores fechados. Foram avaliadas as perdas de carga em três segmentos de 50 metros, com três repetições com espaçamento nominal de 0,30 m. Em média cada mangueira apresentou 156,3 gotejadores, resultando em espaçamento médio de 0,319 m. Durante os ensaios a temperatura da água variou de 25 a 30 °C. O diâmetro interno pressurizado a 10 m.c.a. variou de 0,016451 a 0,016616 m.

A pressão na entrada das mangueiras foi mantida em 10 m.c.a. em todo o ensaio. Na Tabela 12, os valores da perda de carga unitária média das avaliações.

Tabela 12. Perda de carga unitária experimental, J, na mangueira com os gotejadores fechados. Média de três amostras de 50 metros e três repetições. Espaçamento médio entre emissores igual a 0,319 m.

Vazão – L h ⁻¹	J
	es = 0,30 m (nominal)
699,05	0,08484
600,47	0,06630
500,83	0,05017
398,01	0,03510
299,43	0,02320
199,79	0,01339
121,35	0,00743

Nas menores vazões ensaiadas as diferenças são desprezíveis, mostrando influência quase nula dos gotejadores na perda de carga. A Equação 48 apresenta o ajuste para os dados da Tabela 12 com seu respectivo coeficiente de correlação

$$J = 8 \times 10^{-6} \cdot Q_{ent}^{1,3988} \quad R^2 = 0,9964 \quad (48)$$

6.3 Perda de carga localizada no emissor

6.3.1 Obtenção por ensaio em laboratório da perda de carga localizada no gotejador

Na linha de produção da mangueira Manari, desligou-se o equipamento que produz o furo de saída de água. Foram separadas para ensaio, três mangueiras com 50 metros de comprimento e espaçamento nominal entre gotejadores de 0,30, 0,40 e 0,50 m, com as saídas de água fechadas. Cada mangueira foi ensaiada três vezes.

Foram avaliadas as perdas de carga por gotejador e seu comprimento equivalente em segmentos de 50 metros de mangueira no espaçamento de 0,30 m nominal com os resultados apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Perda de carga por gotejador, hfg , em mangueiras com gotejadores em espaçamento nominal de 30 cm. Média de 156,33 gotejadores por 50 m, obtidos experimentalmente.

Vazão L h ⁻¹	Perda de carga, m.c.a. – média de três mangueiras e três repetições.			
	50 m sem gotejadores	50 m com 156,33 gotejadores	Devido aos gotejadores, hfg	Por gotejador
699,05	3,826	4,242	0,416	0,00266
600,47	3,159	3,315	0,156	0,00100
500,83	2,302	2,509	0,206	0,00132
398,01	1,676	1,755	0,079	0,00051
299,43	1,111	1,160	0,049	0,00031
199,79	0,602	0,670	0,068	0,00043
121,35	0,410	0,372	0*	0*

*Adotou-se valor igual a 0 quando obteve-se valores negativos.

Com os dados das Tabelas 13 temos os valores experimentais do fator θ da Equação 18 conforme Tabela 14.

Tabela 14. Valores experimentais do fator θ pela Equação 18.

Vazão L h ⁻¹	θ experimental
	es = 0,30 m nominal
699,05	0,000119379
600,47	0,000033114
500,83	0,000030408
398,01	0,000007420
299,43	0,000002553
199,79	0,000001576
121,35	0*

*Valor negativo foi considerado como sendo igual a 0.

6.3.2 Perda de carga localizada no gotejador estimada por equações

Utilizando os valores médios da Tabela 9 determinamos o fator θ das Equações 19 e 20 e o valor de r da Equação 21, resultando na Tabela 15.

Tabela 15. Valores teóricos do fator θ e da razão r conforme diversos autores.

Autores	Equação	Valores r	Valores de θ
PROVENZANO e PRUMO, 2004 Equação 19	$\theta = 0,056 \left[\left(\frac{D}{D_g} \right)^{17,83} - 1 \right]$	-	2,409373539
PROVENZANO et al, 2005. Equação 20	$\theta = 0,116 \left[\left(\frac{D}{D_g} \right)^{13,87} - 1 \right]$	-	2,087393495
ALVES e PORTO, 2002 Equação 21	$r = \frac{Ac}{As}$	0,909366869	-

Com o valor de r da Tabela 16 temos resultado de $IO = \frac{(1-r)^2}{r^2}$ igual a 0,009933.

Com este conjunto de dados calculou-se a perda de carga localizada devido ao gotejador e comparou-se com os dados observados, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16. Perda de carga por emissor em função da vazão na mangueira gotejadora, em m.c.a., comparando o método experimental com três teóricos.

Q L h ⁻¹	Perda de carga unitária localizada por emissor, em m.c.a.			
	Experimental	θ		
	Experimental	Equação 19	Equação 20	Equação 23
699,05	0,000119379	0,107599337	0,093220147	0,0004435942
600,47	0,000033114	0,079391817	0,068782179	0,0003273045
500,83	0,000030408	0,05522984	0,047849122	0,0002276932
398,01	0,000007420	0,03488037	0,030219082	0,0001437995
299,43	0,000002553	0,019741663	0,017103458	0,0000813879
199,79	0,000001576	0,008789023	0,00761449	0,0000362341
121,35	-0,000000333	0,003242445	0,002809137	0,0000133675

Descarta-se o uso das Equações 19 e 20 para os gotejadores estudados devido a discrepância em relação aos dados experimentais. No procedimento passo a passo para a perda de carga da mangueira gotejadora com os emissores abertos, adiciona-se uma coluna para contemplar a perda localizada.

Para perda localizada, hfg , teórica escolhe-se Equação 49.

$$hfg = 0,009933 \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (49)$$

Para a perda localizada experimental determinou-se uma equação de ajuste para substituir o fator θ na Equação 18, desconsiderando o valor negativo obtido com a menor vazão ensaiada resultando na Equação 50.

$$\theta_{exp} = 1 \cdot 10^{-14} \cdot Q^{3,459}_{ent} \quad R^2 = 0,9341 \quad (50)$$

6.4 Pressão na entrada, pressão média e pressão mínima na mangueira gotejadora

A pressão na entrada, H_{ent} , da mangueira é a pressão nominal de trabalho recomendada pelo fabricante, 10 m.c.a. que também é a maior pressão, H_{max} .

A menor pressão para a mangueira em nível esta no fim da lateral, onde esta posicionado o emissor de menor vazão. A perda de carga total, H_fL , é a diferença entre a pressão máxima menos a mínima, $H_fL = H_{max} - H_{min}$.

Substituindo os valores de variação de vazão aceitável, Δq , e o valor de x fornecido pelo fabricante na Equação 24 encontra-se o valor da variação de pressão permissível, ΔH . Introduzindo este valor na Equação 25 tem-se a pressão mínima, H_{min} . A pressão média é determinada pela Equação 32.

Foram gerados valores de pressão mínima em função da variação de vazão aceitável para a mangueira MANARI, pressão média e perda de carga total na mangueira, apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Pressões e perda de carga total, na mangueira gotejadora MANARI em função da variação de vazão, para x igual a 0,503. A pressão máxima ou de entrada é igual a pressão nominal recomendada pelo fabricante. Dados para mangueira instalada em nível.

Variação de vazão, Δq , em decimais	Pressão, em m.c.a.		Perda de carga, em m.c.a.
	H_{max}	H_{min}	H_{ft}
0,10	10	8,11	1,89
0,20	10	6,42	3,58

6.5 Comprimento máximo da mangueira gotejadora

Considerando que as pressões mínima e máxima estão definidas, tem-se somente um comprimento possível para a mangueira gotejadora em nível.

No ultimo emissor, nomeado gotejador numero 1, acontece a pressão mínima na lateral. O penúltimo emissor é o numero 2 e assim sucessivamente até o emissor N que esta na entrada da mangueira onde tem-se a pressão maxima ou de entrada.

Aplicando a Equação 1 no gotejador se tem a vazão que ocorre no segmento entre o gotejador 1 e 2. Esta vazão é utilizada para calcular a perda de carga que ocorre no trecho de mangueira entre estes dois emissores. Esta perda de pressão somada a pressão do emissor 1 fornece a pressão de trabalho do emissor 2. A soma da vazão do emissor n. 1 com a do emissor n. 2, fornece a vazão que flui entre o emissor 2 e 3. A pressão no emissor 3 é a soma da pressão no emissor 1 mais a perda de pressão localizada no emissor 2, mais a perda de pressão no trecho entre o emissor 2 e 3. Nesta sequencia quando atingir a pressão de trabalho igual a 10 m.c.a, alcançou-se o emissor N localizado na entrada da mangueira.

A soma das vazões de todos os emissores de 1 a N fornece a vazão de entrada na mangueira. O numero de emissores multiplicado pelo espaçamento entre eles fornece, mais a distancia entre a entrada de água até o emissor n. N, resulta no comprimento total desta lateral, conforme Figura 18.

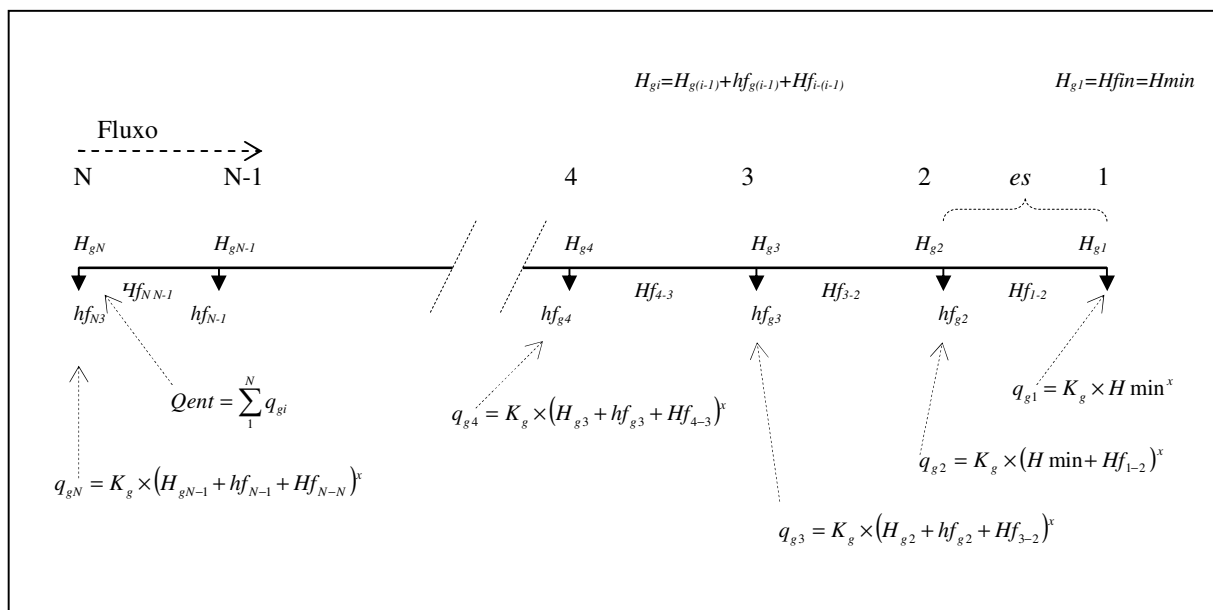


Figura 18. Diagrama com as equações para dimensionamento de mangueira gotejadora.

Com auxílio de planilha eletrônica, inicia-se os cálculos do emissor n. 1 localizado no fim da mangueira até o emissor n. N, localizado no início e ponto de entrada de água na lateral. Esta planilha tem, no mínimo, tantas linhas quanto o número de emissores, N , na lateral.

Dividindo a soma da vazão de todos os gotejadores da lateral pelo número de emissores, obtém-se a vazão média. Localiza-se na planilha esta vazão, identifica-se o número do emissor de vazão média e a sua distância desde a entrada de água.

6.5.1 Comprimento máximo da mangueira gotejadora desconsiderando a perda localizada no emissor

Para simular o comprimento máximo de uma mangueira gotejadora sem as perdas localizadas devido aos gotejadores inseridos internamente na tubulação, foi preparada uma planilha eletrônica para cálculo passo a passo, utilizando os dados fornecidos pelo fabricante da mangueira MANARI (Tabela 7).

Para perda de carga entre os gotejadores, utilizou-se Equação 46, ajustada com dados observados em Laboratório. Considerando aceitável uma variação de vazão de 10% na lateral usou-se os dados da Tabela 17 para os cálculos.

Procedeu-se cálculos linha por linha, encerrando-se quando a pressão de trabalho se igualou a pressão nominal.

Tabela 18. Planilha para cálculo de comprimento máximo de mangueira gotejadora, desconsiderando a perda de carga localizada nos emissores, para variação de vazão de 10%, com emissores espaçados de 0,20 m. Diâmetro interno de 0,016232m. Perda de carga entre emissores calculados pela Equação 46.

g_i	H_{g_i} m.c.a.	q_{g_i} $L h^{-1}$	Fluxo antes do emissor g_i $L h^{-1}$	Hf entre g_i e g_{i+1} m.c.a.	$H_{g_{i+1}}$ l m.c.a.	Comprimento desde o g_i m
1	8,1100	1,3268	1,3268	0,0000	8,1100	0,0000
2	8,1100	1,3268	2,6535	0,0000	8,1100	0,2000
3	8,1100	1,3268	3,9803	0,0000	8,1100	0,4000
..
267	8,6604	1,3713	357,8503	0,0048	8,6652	53,2000
268	8,6652	1,3717	359,2220	0,0049	8,6701	53,4000
269	8,6701	1,3721	360,5941	0,0049	8,6750	53,6000
..
450	9,9953	1,4738	617,2417	0,0100	10,0053	89,8000
451	10,0053	1,4746	618,7163	0,0100	10,0153	90,0000

Aplicou-se para os espaçamentos de 0,30, 0,40 e 0,50 m os mesmos procedimentos que geraram a Tabela 18, utilizando-se a Equação 47 de ajuste associando Darcy-Weisbach com Blasius, que estão resumidos nas Tabelas 19 e 20 para variações de vazão de 10 e 20% , respectivamente.

Tabela 19. Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos entre emissores, para variação de vazão de 10%, desconsiderando perda de carga localizada devida ao gotejador.

Características	Espaçamentos, m							
	0,20		0,30		0,40		0,50	
	Equação ajustada, J (mca.m ⁻¹).							
	Exp*	DWB**	Exp.	DWB	Exp.	DWB	Exp.	DWB
Qent, L h ⁻¹	678,7	586,38	519,9	505,7	459,6	455,1	417,0	419,6
L, m	90,0	85,6	113,4	110,7	133,6	132,8	151,5	153,0
Nº gotejadores	451	429	379	370	335	333	304	307
q_{med} , L h ⁻¹	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
Lq_{med} da entrada, m	36,6	32,8	46,2	42,3	54,0	50,8	61,5	58,5
Lq_{med} , da entrada, %	40,66	38,32	40,74	38,21	40,42	38,25	40,59	38,23
Hmed, m.c.a	8,66	8,60	8,66	8,61	8,67	8,60	8,66	8,60
% de Hf até o q_{med} ,	70,89	73,82	70,89	72,46	70,37	73,84	70,89	73,83

* Equação de ajuste experimental. **Equação de ajuste Darcy Weisbach com Blasius.

Tabela 20. Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos emissores entre emissores, para variação de vazão de 20%, desconsiderando perda de carga localizada devida ao gotejador.

Características	Espaçamentos, m							
	0,20		0,30		0,40		0,50	
	Equação ajustada, J.							
	Exp.*	DWB**	Exp.	DWB	Exp.	DWB	Exp.	DWB
Qent, L h ⁻¹	796,9	724,6	668,4	626,5	590,9	563,3	537,6	520,6
L, m	125,2	114,8	157,5	148,8	185,6	178,4	211,0	206,0
Qtd. Got.	627	575	526	497	465	447	423	413
q_{med} , L h ⁻¹	1,27	1,26	1,27	1,26	1,27	1,26	1,27	1,26
Lq_{med} da entrada, m	51,12	44,2	64,2	57,3	75,6	68,8	86	79,5
Lq_{med} , da entrada, %	40,89	38,50	40,76	38,51	40,73	38,56	40,75	38,59
Hmed, m.c.a	7,44	7,32	7,44	7,33	7,44	732	7,45	7,32
% de Hf até o q_{med} ,	71,44	74,80	71,44	74,69	71,23	74,86	71,23	74,75

* Equação de ajuste experimental. **Equação de ajuste Darcy Weisbach com Blasius.

Observa-se nas Tabelas 19 e 20 que o gotejador de vazão média está situado próximo de 39% do início da lateral, concordando com Keller e Karmeli, 1974, que consideraram os emissores com vazão constante e também não consideraram a perda localizada devida ao emissor.

Nota-se que na posição do gotejador de vazão média já ocorreu de 70 a 75% de toda a perda de carga da lateral, próximo do valor apresentado por Boswell, 1990.

Comparando os dados de perda de carga da Tabela 19 e 20 com mangueiras similares sem as múltiplas saídas e mesma vazão, encontra-se a relação entre 0,36 e 0,37, valor um pouco acima do que previsto pelos fatores de correção de Christiansen e Scaloppi, que foi de 0,33.

6.5.2 Comprimento máximo da mangueira gotejadora considerando a perda localizada no emissor

Preparou-se planilha de cálculo para o procedimento passo a passo. Para perda de carga entre os gotejadores, utilizou-se somente a equação de Darcy-Wiesbach com coeficiente de Blasius e na perda de carga localizada no emissor usa-se o θ_{exp} e o θ teórico definido nas Equações 49 e 50. Na Tabela 21 e 22 são apresentados os resultados desta simulação para diversos espaçamentos.

Tabela 21. Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos, para variação de vazão de 10%, considerando a perda de carga devido aos gotejadores.

Características	Espaçamentos, m							
	0,20		0,30		0,40		0,50	
	Equação Darcy-Weisbach com Ff de Blasius							
	θ_{exp}	IO	θ_{exp}	IO	θ_{exp}	IO	θ_{exp}	IO
Qent, L h ⁻¹	585,0	580,9	505,8	505,8	455,1	453,8	419,6	418,2
L, m	85,4	84,8	110,7	110,7	132,8	132,4	153,0	152,5
Qtd. Got.	428	425	370	370	333	332	307	306
q_{med} , L h ⁻¹	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
Lq_{med} da entrada, m	32,8	32,4	42,6	42,6	50,8	50,8	58,5	58,5
Lq_{med} , da entrada, %	38,41	38,2	38,48	38,48	38,25	38,37	38,23	38,36
Hmed, m.c.a	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60
% de Hf até o q_{med}	74,01	73,78	73,98	73,98	73,77	73,88	73,77	73,96

Tabela 22. Características da mangueira gotejadora, em diversos espaçamentos, para variação de vazão de 20%, considerando a perda de carga devido aos gotejadores.

Características	Espaçamentos, m							
	0,20		0,30		0,40		0,50	
	Equação Darcy-Weisbach com Ff de Blasius							
	θ_{exp}	IO	θ_{exp}	IO	θ_{exp}	IO	θ_{exp}	IO
Qent, L h ⁻¹	723,3	718,3	625,1	621,2	563,4	560,8	519,3	518,0
L, m	114,6	113,8	148,5	147,6	178,4	177,6	205,5	205,0
Qtd. Got.	572	570	496	493	447	445	412	411
q_{med} , L h ⁻¹	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26
Lq_{med} da entrada, m	44,2	43,8	57,3	68,4	68,8	68,4	79,0	79,00
Lq_{med} , da entrada, %	38,57	38,49	38,58	38,51	38,56	38,51	38,44	38,54
Hmed, m.c.a	7,32	7,32	7,32	7,32	7,32	7,32	7,32	7,32
% de Hf até o q_{med}	74,91	74,79	74,91	74,79	74,78	74,79	74,67	74,76

Verifica-se nas Tabelas 21 e 22 que, para cada espaçamento, todos os valores são praticamente iguais e independentes do método de cálculo da perda de carga localizada no emissor. Evidencia-se que o procedimento de cálculo da relação r para determinar o Índice de Obstrução, IO , para este modelo de gotejador, plano e de pequenas dimensões, é o menos trabalhoso.

6.5.2.1 Análise do Coeficiente de Uniformidade de Emissão para projeto das mangueiras gotejadoras dimensionadas no item anterior

Escolheu-se a mangueira gotejadora com espaçamento de 30 cm, presente nas Tabelas 21 e 22 para analisar o CUE para projeto. Os valores de ep , agrupamento de emissores foi considerado como sendo a quantidade de emissores por metro linear. Os valores de CUE por metro linear são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23. Coeficientes de Uniformidade de Emissão, %, para dois valores de variação de vazão e três espaçamentos entre gotejadores.

Coeficientes de Uniformidade de emissão para dimensionamento	Variação de vazão, %					
	10			20		
	Espaçamento, m			Espaçamento, m		
	0,30	0,40	0,50	0,30	0,40	0,50
$CUE_{CV_f} = 100 \cdot \left(1,0 - \frac{1,27 \cdot CV_f}{\sqrt{ep}} \right) \cdot \left(\frac{H \text{ min}}{H \text{ med}} \right)^x$	94,71	94,34	94,01	91,31	90,96	90,65
$CUE_D = 100 \cdot \left(1 - \frac{0,798 \cdot CV_f}{\sqrt{ep}} \right)$	98,46	98,22	98,01	98,46	98,22	98,01
$CUE_N = 100 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(1 - \left(\frac{H \text{ min}}{H \text{ med}} \right)^x \right)^2 + \left(\frac{1,27 \cdot CV_f}{\sqrt{ep}} \right)^2} \right)$	96,19	95,94	95,70	93,16	93,01	92,87

6.6 Determinação do espaçamento especial para cada espaçamento padrão

Considera-se espaçamento padrão aquele presente nos catálogos dos fabricantes.

A mangueira com espaçamento padrão foi designada segmento “a” e o seu par especial, denominado segmento “b”, com espaçamento maior. A vazão por metro no início deste segmento “b” especial é igual à vazão por metro no ponto de vazão média da lateral com somente um espaçamento padrão, que é o mesmo do segmento “a” do modelo.

A características da mangueira com espaçamento de 0,30 m estão na Tabela 24.

Tabela 24. Características da mangueira gotejadora com 0,30 m de distancia entre saídas, dimensionadas com Equação de Darcy-Weisbach com Ff de Blasius e perda de carga devido ao gotejador obtida com o Índice de Obstrução, IO.

Características da mangueira	Variação de vazão, %	
	10%	20%
<i>Hent</i> ou <i>Hmax</i> , m.c.a.	10	10
<i>Hmed</i> , m.c.a.	8,60	7,32
<i>Hmin</i> , m.c.a.	8,11	6,42
<i>qmed</i> , L h ⁻¹	1,37	1,26
<i>qlmed</i> , L h ⁻¹ m ⁻¹	4,566	4,20
L total, m	110,7	147,6
Distancia do emissor 1 ao emissor <i>qmed</i> , m	68,1	79,2

Manipula-se a Equação 2 para definir o espaçamento que, na pressão de 10 m.c.a, forneça vazão de 4,566 L h⁻¹ m⁻¹. Substituindo-se os valores da Tabela 24 na Equação 2, para uma variação de vazão de 10%, e resolvendo obtém-se:

$$4,566 = \frac{0,4629 \cdot 10^{0,503}}{es} \rightarrow es = 0,3228 \text{ m} \quad (51)$$

6.7 Determinação do comprimento do segmento “b” do modelo proposto

Utilizando a planilha de calculo que dimensionou esta mangueira e a partir do emissor de vazão media, 1,37 L h⁻¹, troca-se o espaçamento de 0,30 m para 0,3228 m, continuando os cálculos até que a pressão disponível ao gotejador seja igual a 10 m.c.a. O segmento “a” tem 68,1 m com emissores espaçados de 0,30 m. Deste ponto em diante tem-se o

segmento “b” do modelo proposto com espaçamento de 0,3228 m e com comprimento que esta apresentado na Tabela 25.

Verifica-se que a associação do segmento “a” com o “b” resulta em La+b igual a 111,7m, sendo 68,1 m no segmento “a” com emissores espaçados em 0,30 m e 43,6 m do segmento “b” com gotejadores espaçados de 0,3228 m. Houve um acréscimo de 1 m sobre a mangueira que utiliza somente espaçamento de 0,30 m, redução de 7 gotejadores e a vazão na entrada esta 9,9 L h⁻¹ menor.

6.8 Coeficiente de Uniformidade de Emissão e variação de vazão para dimensionamento aplicado no modelo proposto

Na Tabela 26 são apresentados os valores necessários do par “a” associado com “b” para o calculo dos CUE da “a+b” dimensionada conforme Tabela 25.

Calcula-se o CUE e o Δq para o par “a+b” com a média ponderada dos dois segmentos conforme as Equações 52 e 53 e 54. As grandezas com índices *a* e *b* correspondem aos respectivos segmentos, sendo que *ql* indica vazão por metro linear, em L h⁻¹. *epl* indica agrupamento de emissores por metro linear no respectivo segmento,

$$CUE_{CVf} = \frac{La \cdot 100 \cdot \left(1,0 - \frac{1,27 \cdot CVf}{\sqrt{epl} \cdot a}\right) \cdot \frac{ql \min "a"}{qlmed "a"} + Lb \cdot 100 \cdot \left(1,0 - \frac{1,27 \cdot CVf}{\sqrt{ep} \cdot b}\right) \cdot \frac{ql \min "b"}{qlmed "b"}}{La + Lb} \quad (52)$$

$$CUE_N = \frac{La \cdot 100 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(1 - \frac{ql \min "a"}{qlmed "a"}\right)^2 + \left(\frac{1,27 \cdot CV_f}{\sqrt{epl} \cdot a}\right)^2}\right) + Lb \cdot 100 \cdot \left(1 - \sqrt{\left(1 - \frac{ql \min "b"}{qlmed "b"}\right)^2 + \left(\frac{1,27 \cdot CV_f}{\sqrt{ep} \cdot b}\right)^2}\right)}{La + Lb} \quad (53)$$

$$\Delta q = \frac{Lb \cdot \frac{ql \max "b" - ql \min "b"}{ql \max "b"} + La \cdot \frac{ql \max "a" - ql \min "a"}{ql \max "a"}}{Lb + La} \quad (54)$$

Tabela 25. Resumo da planilha de cálculo, mostrando 3 linhas iniciais, 4 linhas próximas do ponto de troca de espaçamento e as duas linhas finais

Gi	Hi m.c.a	qgi L h ⁻¹	es m	Q gi L h ⁻¹	Hfi -Hfi-1 m.c.a.	hfgi m.c.a.	Hgi+1 m.c.a.	L g1 - gi m
1	8,1100	1,3268	0,3000	1,3268	0,0000	0,00000000161	8,1100	0,0000
2	8,1100	1,3268	0,3000	2,6535	0,0000	0,00000000025	8,1100	0,3000
3	8,1100	1,3268	0,3000	3,9803	0,0000	0,00000000056	8,1100	0,6000
--	--	--	--	--	--	--	--	--
227	8,5958	1,3662	0,3000	303,5800	0,0060	0,00000191748	8,6018	67,8000
228	8,6018	1,3666	0,3000	304,9466	0,0060	0,00000195659	8,6078	68,1000
229	8,6078	1,3671	0,3228	306,3137	0,0065	0,00000199644	8,6143	68,4228
230	8,6143	1,3676	0,3228	307,6814	0,0066	0,00000203704	8,6209	68,7456
--	--	--	--	--	--	--	--	--
362	9,9988	1,4741	0,3228	494,4258	0,0151	0,00001958551	10,0138	111,3552
363	10,0138	1,4752	0,3228	495,9010	0,0151	0,00001986657	10,0290	111,6780

Legendas: Gi: gotejador numero i; Hi: pressão disponível no Gi; qgi: vazão no gotejador i; es: espaçamento entre emissores; Q gi: vazão que passa pelo gi; Hfi-Hfi-1: perda de carga entre o gi e o gi+1; hfgi: perda de carga localizada no emissor; Hgi+1: pressão disponível para gotejador a jusante; L: comprimento desde o g1 até o gi. O negrito destaca o ponto de mudança de espaçamento na posição do emissor numero 229.

Tabela 26. Características da associação do par “a” + “b”, conforme modelo proposto, para espaçamento padrão de 30 cm e variação de vazão de 10%.

Característica	Segmento “a”	Segmento “b”	“a” + “b”
es, m	0,30	0,3228	-
L, m	68,1	43,6	111,7
Somatório da vazão dos gotejadores, L h ⁻¹	304,9	190,9	495,8
Numero de Gotejadores	230	133	363
<i>qlmin</i> , L h ⁻¹ m ⁻¹	4,422	4,234	-
<i>qlmed</i> , L h ⁻¹ m ⁻¹	4,517	4,381	-
<i>qlmax</i> , L h ⁻¹ m ⁻¹	4,556	4,569	-
<i>ep</i>	3,33	3,05	
<i>CUE_{CVf}</i> , Equação 52, %	-	-	97,55
<i>CUE_N</i> , Equação 53, %	-	-	99,98
Δq , Equação 54	-	-	0,0467

Observa-se que para o par “a+b” no espaçamento padrão de 0,30 m e variação de vazão de 0,10, o *CUE_{CVf}* aumentou de 94,71 para 97,55 e o *CUE_N*, de 96,19 para 99,98%, com Δq resultando em 0,0467.

6.9 Determinação das características do modelo proposto nos diversos espaçamentos

Na Tabela 27 são apresentados os resultados para todos os pares “a+b” nos espaçamentos padrões de 0,30, 0,40 e 0,50 m para variação de vazão de 10 % e na Tabela 28 os mesmos resultados com variação de vazão de 20 %. A variação de vazão considerada para os dimensionamentos do modelo proposto é sempre a da mangueira com espaçamento padrão. Cada variação de vazão implica em uma variação de pressão, conforme Tabela 17, que é utilizada para dimensionar a mangueira com espaçamento padrão.

Tabela 27. Associação dos pares “a+b” nos diversos espaçamentos e variação de vazão de 10% na mangueira com espaçamento padrão e respectivos comprimentos, Coeficientes de Uniformidade e variação de vazão, Δq .

Características	Espaçamento padrão, m		
	0,30	0,40	0,50
L padrão, m	110,1	132,4	152,5
Q_{ent} L padrão, L h ⁻¹	503,0	453,8	418,2
Num. Got. L padrão	368	332	306
Δq na mangueira padrão, Equação 26	10,0	10,0	10,0
CUE_{CVf} de L padrão, %	94,71	94,34	94,01
CUE_N de L padrão, % es do segmento “b”	96,19	95,94	95,70
La, m	0,3228	0,4404	0,5381
Lb, m	68,1	81,6	94,04
L(a+b)	43,6	52,4	59,73
Q_{ent} L(a+b), L h ⁻¹	111,7	134,0	153,7
Quantidade de Got. L(a+b)	495,9	442,5	409,8
Δq no modelo proposto, Equação 54	363	324	300
CUE_{CVf} de L(a+b), %	0,0467	0,0465	0,0463
CUE_N de L(a+b), %	97,56	97,42	97,29
	99,95	99,95	99,99

Tabela 28. Associação dos pares “a+b” nos diversos espaçamentos e variação de vazão de 20% na mangueira com espaçamento padrão e respectivos comprimentos e Coeficientes de Uniformidade.

Características	Espaçamento padrão, m		
	0,30	0,40	0,50
L padrão, m	147,6	177,6	205,0
Q_{ent} L padrão, L h ⁻¹	621,2	560,8	518,0
Num. Got. L padrão	493	445	411
Δq na mangueira padrão, Equação 26	0,20	0,20	0,20
CUE_{CVf} de L padrão, %	91,31	90,96	90,65
CUE_N de L padrão, %	93,16	93,01	92,87
es do segmento “b”	0,3508	0,4680	0,5853
La, m	90,9	109,2	125,8
Lb, m	59,7	72,14	83,2
L(a+b)	150,6	181,3	209,2
Q_{ent} L(a+b), L h ⁻¹	595,74	538,0	496,6
Quantidade de Got. L(a+b)	474	411	395
Δq no modelo proposto, Equação 54	0,0805	0,0964	0,0965
CUE_{CVf} de L(a+b), %	97,62	97,42	97,28
CUE_N de L(a+b), %	99,73	99,90	99,91

Verifica-se nas Tabelas 27 e 28 melhoria em todas as características hidráulicas das laterais dimensionadas conforme o modelo, para todas as simulações, com destaque para a redução da variação de vazão, Δq .

Na Tabela 29 são apresentados os parâmetros do modelo proposto comparados com o padrão nas variações de vazões de 10% e 20% no espaçamento padrão de 0,30 m.

Tabela 29. Comparativo da substituição de mangueira gotejadora com espaçamento padrão de 0,30 m pelo modelo proposto.

Características	Mangueira gotejadora					
	Para Δq de 10 % no padrão			Para Δq de 20 % no padrão		
	Padrão	Modelo proposto	Diferenças	Padrão	Modelo proposto	Diferenças
es , m	0,30	0,3228 e 0,30	-	0,30	0,3508 e 0,30	-
L, m	110,1	111,1	+ 1 m	147,6	150,6	+ 3 m
Qent, L h ⁻¹	503,0	495,9	- 1,96 %	621,2	595,74	- 4,10 %
Quantidade de gotejadores	368	363	- 1,36 %	493	474	- 3,85 %
Δq no modelo proposto, Equação 54	0,10	0,0467	- 0,053	0,20	0,0805	- 0,119
CUE_{CVf} , %	94,71	97,55	+ 2,84 pontos %	91,31	97,62	+ 6,31 pontos %

Observa-se na Tabela 29 que substituindo uma lateral padrão com 0,30 m de espaçamento, com variação de vazão de 10%, por uma lateral dimensionada conforme o modelo proposto, espaçamento no segmento “a” de 0,30 m e segmento “b” com 0,35m resulta em:

1. Comprimento da lateral: 110,1 m contra 150,6 m, com incremento de 36,78 %.
2. Vazão na entrada da lateral: 503,0 para 595,74 L h⁻¹, com acréscimo de 18,44 %
3. Numero de gotejadores: 368 contra 474: aumento de 28,8 %.
4. CUE_{CVf} , de 94,71 para 97,62: um ganho de 2,91%.
5. Variação de vazão, Δq : de 0,10 para 0,0805.

O ganho de 36,78 % no comprimento da lateral e aumento no Coeficiente de Uniformidade de Emissão são fatores de redução de custos no projeto. Nesta substituição tem-se uma redução da variação de vazão de 10% para 8,05%. Salienta-se que estes ganhos são anulados em projetos sem manejo adequado.

Utilizou-se do mesmo procedimento anterior para preparar as Tabelas 30 e 31 para os espaçamentos padrões de 0,40 e 0,50 cm.

Tabela 30. Comparativo da substituição de mangueira gotejadora com espaçamento padrão de 0,40 m pelo modelo proposto.

Características	Mangueira gotejadora					
	Para Δq de 10 % no padrão			Para Δq de 20 % no padrão		
	Padrão	Modelo proposto	Diferenças	Padrão	Modelo proposto	Diferenças
es, m	0,40	0,4408 e 0,40	-	0,40	0,4680	-
L, m	132,4	134,0	+ 1,6 m	177,6	181,3	+ 3,7 m
Qent, L h ⁻¹	453,8	442,5	- 2,49%	560,8	538,0	- 4,06%
Quantidade de gotejadores	332	324	- 2,41%	445	411	- 7,64 %
Δq no modelo proposto, Equação 54	0,10	0,0465	-0,0535	0,20	0,0964	0,1036
CUE_{cvf} , %	94,34	97,42	+ 3,08 pontos %	90,96	97,42	+ 6,46 pontos %

Tabela 31. Comparativo da substituição de mangueira gotejadora com espaçamento padrão de 0,50 m pelo modelo proposto.

Características	Mangueira gotejadora					
	Para Δq de 10 % no padrão			Para Δq de 20 % no padrão		
	Padrão	Modelo proposto	Diferenças	Padrão	Modelo proposto	Diferenças
es, m	0,50	0,5381 e 0,50	-	0,50	0,5853 e 0,50	-
L, m	152,2	153,7	+ 1,5 m	205,0	209,2	+ 4,2 m
Qent, L h ⁻¹	418,2	409,8	- 2,01 %	518,0	496,6	- 4,13%
Quantidade de gotejadores	306	300	- 1,96 %	411	395	- 3,89%
Δq no modelo proposto, Equação 54	0,10	0,0463	-0,0537	0,20	0,0965	0,1035
CUE_{cvf} , %	94,01	97,29	+ pontos %	90,65	97,28	+ 6,63 pontos %

Observa-se que o modelo proposto, lateral com dois espaçamentos entre emissores, para todos os espaçamentos padrões analisados, 0,30, 0,40 e 0,50 m, apresentou laterais 36% mais longas e variação de vazão menor que 10%.

Na Figura 19 é apresentado o perfil da curva vazão por metro linear da lateral em função de seu comprimento, para o padrão com 0,30 cm de espaçamento com 20% de variação de vazão e na Figura 20 a visualização do modelo proposto, com 0,3508 m e 0,30 m de distancia entre emissores e 8,05% de variação de vazão.

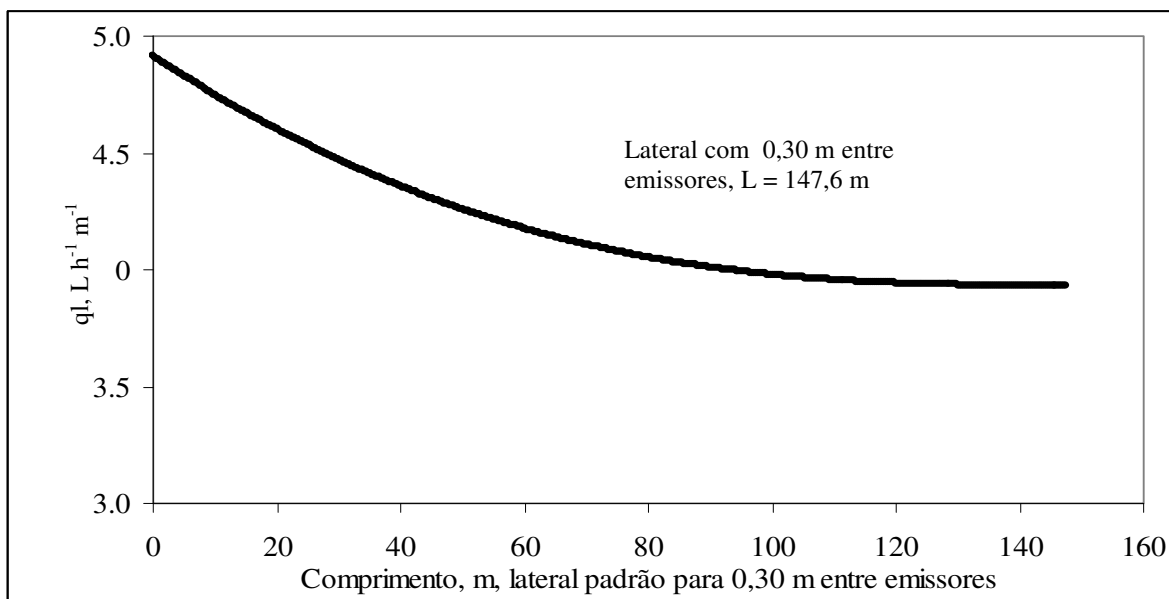


Figura 19. Vazão por metro linear em função do comprimento da lateral padrão com 0,30 m entre emissores, e variação de vazão de 0,20. Lateral com 147,6 m.

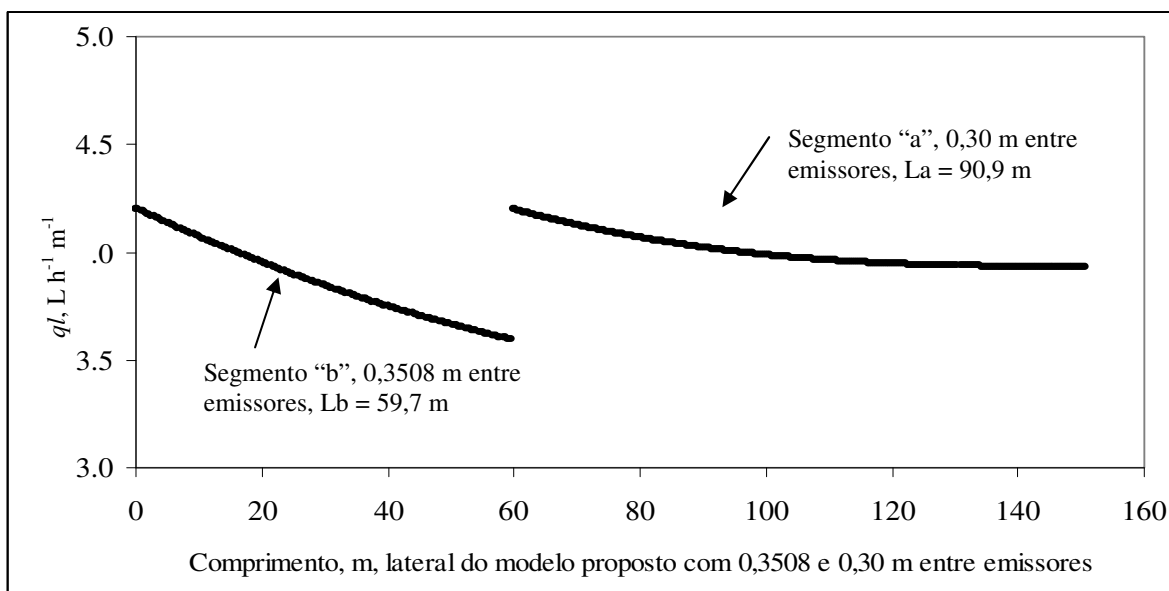


Figura 20. Vazão por metro linear em função do comprimento da lateral do modelo proposto com espaçamento no segmento "b" de 0,3508 m e no segmento "a" de 0,30 m, e variação de vazão de 8,05%. Lateral com 150,6 m.

Para o segmento “b” foi ajustada a Equação 55.

$$ql = 5 \cdot 10^{-5} \cdot L^2 - 0,0124 \cdot L + 4,7681 \quad R^2 = 0,998 \quad (55)$$

E para o segmento “a” foi ajustada a Equação 56.

$$ql = 6 \cdot 10^{-5} \cdot L^2 - 0,0137 \cdot L + 4,2034 \quad R^2 = 1 \quad (56)$$

6.10 Produção da mangueira gotejadora e avaliação do modelo proposto

Avaliou-se as duas laterais, quatro exemplares de cada, a padrão com 0,30 m e a modelo proposto com 0,3508m e 0,30 m de espaçamentos nominal entre emissores.

Configurou-se a maquina fabricante de mangueira gotejadora MANARI para inserir gotejadores a cada 0,3508 m para ser montada a mangueira modelo conforme apresentada no Gráfico 7. Em 50 m de mangueira gotejadora contou-se 143 emissores. O espaçamento real do segmento “b” avaliado foi de 0,3496 m na media. No segmento “a” contou-se 166 gotejadores em 50 m, resultando em 0,3012 m de espaçamento médio entre emissores.

Na linha lateral padrão foram coletadas as vazões em 16 pontos, no inicio, a 1/3, a 2/3 da entrada e no final de cada mangueira.

Na lateral do modelo proposto foram avaliados 32 pontos, 16 no espaçamento nominal de 0,30 m e 16 no espaçamento especial, 0,3508 m, distribuídos como na lateral padrão.

Salienta-se que todas as avaliações de vazão foram feitas com pressão de 10 m.c.a na entrada da mangueira, o que foi possível com o uso de reguladores de pressão no inicio da linha.

Em cada ponto de amostragem, coletou-se a vazão de 4 emissores por 3 minutos, pesados em balança com capacidade de leitura de 0,1 g. Todos os valores foram

transformados em vazão por metro linear de mangueira, $L h^{-1} m^{-1}$. Na Tabela 32 e 33 são apresentados os valores observados de vazão das laterais ensaiadas.

Tabela 32. Vazão por metro linear, $L h^{-1} m^{-1}$, em pontos equidistantes na mangueira gotejadora, espaçamento de 0,30 m. Lateral com 147,6 m. Mangueiras novas.

Lateral	Posição do ponto de coleta de vazão			
	Início	1/3	2/3	Fim
Lat. 1	4,773	4,245	4,072	3,965
Lat. 2	4,545	4,258	3,888	3,993
Lat. 3	4,897	4,325	4,178	3,890
Lat. 4	4,792	4,132	4,156	4,065

Tabela 33. Vazão por metro linear, $L h^{-1} m^{-1}$, em pontos equidistantes na mangueira gotejadora de dois segmentos. Segmento “b” com 59,7 m e 0,35 m entre emissores e segmento “a” com 90,9 m e espaçamento de 0,30 m. Mangueiras novas.

Lateral	segmento “b”, es = 0,3496 m				segmento “a” es = 0,3012 m			
	Posição do ponto de coleta de vazão no respectivo segmento							
	Início “b”	1/3	2/3	Fim “b”	Início “a”	1/3	2/3	Fim “a”
Lat. 1	4,128	3,883	3,770	3,610	3,943	4,054	3,825	3,951
Lat. 2	3,833	3,790	3,674	3,444	4,120	3,775	3,888	3,969
Lat. 3	4,022	3,767	3,909	3,453	4,213	3,881	3,639	3,884
Lat. 4	3,854	3,664	3,713	3,368	4,127	3,801	3,785	3,886

Utilizou-se os dados das Tabelas 32 e 33 para elaborar a Tabela 34 com os valores dos Coeficientes de Uniformidade mais usuais para avaliação de mangueiras gotejadoras instaladas no campo.

Tabela 34. Coeficientes de Uniformidade para a linha lateral com espaçamento padrão e para a linha lateral com dois espaçamentos entre gotejadores (modelo proposto). Mangueiras novas.

Equações	Coeficientes Uniformidade		
	Padrão	Modelo proposto	
$CUC = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |ql_i - ql_{med}|}{n \cdot ql_{med}} \right)$	Equação 35	94,05	96,08
$CUE_a = 100 \cdot \frac{ql_{25\%a}}{ql_{meda}}$	Equação 37	92,33	93,19
$CUE_A = 50 \cdot \left(\frac{ql_{25\%a}}{ql_{med}} + \frac{ql_{med}}{ql_{12,5\%}} \right)$	Equação 41	90,14	92,79

Observa-se que os Coeficientes de Uniformidade no modelo proposto sempre apresentaram resultados melhores que os da mangueira padrão.

6.11 Viabilidade da produção comercial do modelo proposto

Segundo o fabricante seu equipamento tem recursos tecnológicos para produzir espaçamentos entre emissores de 0,15 m até 9,99 m, em múltiplos de 0,005 m.

Na instalação do projeto, uma porcentagem das mangueiras será entregue com o espaçamento padrão, e outra parte no espaçamento especial, bastando no momento da instalação realizar a conexão entre os segmentos determinados no projeto. O preço do espaçamento especial será no máximo igual ao do espaçamento menor mais imediato na tabela de modelos do fabricante. A quantia mínima de produção são 1000 metros.

7 RECOMENDAÇÕES

Sugere-se o desenvolvimento de modelos teóricos analíticos que possam ser utilizados de forma generalizada aos demais modelos de mangueiras gotejadoras, bem como identificar o ponto ideal de mudança de espaçamento, para o modelo proposto.

O trabalho a campo, com avaliações de desempenho agrônômico, desempenho hidráulico, formação de bulbo molhado e uniformidade de distribuição de água no perfil e em diferentes condutividades hidráulicas de solo deve ser realizado para validar e identificar as limitações do modelo proposto.

É possível melhorar o catálogo técnico do produto comercial avaliado com as informações mostradas neste trabalho.

Um sistema de controle de temperatura no circuito de água no Laboratório forneceria resultados mais precisos.

Para a instalação mecanizada do modelo proposto é necessário o desenvolvimento de equipamento específico.

A mangueira com espaçamento especial deve ser de fácil identificação para facilitar a instalação.

8 CONCLUSÕES

A mangueira gotejadora dimensionada conforme o modelo proposto, com lateral de 150,6 m sendo 59,7 m iniciais com espaçamento entre emissores de 0,35 m associada com 90,9 m finais com distancia entre gotejadores de 0,30 m, apresentou variação de vazão de 8,05 %, CUE_{CVf} de 97,62% e foi 36% mais longa que a mangueira gotejadora com único espaçamento de 0,30 m, com variação de vazão de 10 % e CUE_{CVf} de 94,71.

O modelo proposto melhorou o CUE, permitiu laterais mais longas e diminuiu a variação de vazão em todas as combinações avaliadas.

O modelo proposto tem possibilidade de ser aplicado na pratica da irrigação localizada em culturas anuais, com plantio adensado.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ALMOUD, A. I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of agricultural engineering research**. SILSOE, v. 60, p. 1-5, 1995.

ALVES, P. R. V.; PORTO R. M. Coeficiente geométrico para estimativa de perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 1, p. 51-59, 2002.

AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI/ASAE S553**: Collapsible emitting hose (drip tape): specifications and performance testing. St Joseph, 2001. 6p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASAE EP405.1** Design and installation of microirrigation systems: St. Joseph, 2003, 6 p.

ANDRADE, L. A. **Avaliação hidráulica e de resistência a tração de dois modelos de mangueiras gotejadoras**. 2005. 76 f. Dissertação (Mestrado Agronomia – Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, 2005.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study of flow resistance law for small diameter plastic pipes. **Journal of irrigation and drainage engineering**. ASCE, v. 121, n. 5, p. 313-316, 1995.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. **Journal of irrigation and drainage engineering**. ASCE, v. 123, n. 1, p. 1-7, 1997.

BARRABAN, J.; BRALTS, V.; WU, I.P. Assessment of emission uniformity for micro-irrigation design. **Byosystems Engineering**. ELSEVIER, v. 93, n. 1, p. 89-97, 2005.

BENAMI, A.; OFEN, A. **Irrigation engineering: sprinkler, trickle, surface irrigation, principles, design and agricultural practices**. Haifa: IESP, 1984. 257 p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV, 1982. 463.

BORDOVSKY, J. P.; PORTER, D. O. Comparison of subsurface drip irrigation uniformity designs on cotton production. 2006, **ASABE Paper 062276**. St Joseph, 12 p.

BOSWELL, M. J. **Micro irrigation design manual**. El Cajon, James Hardie irrigation, 1990. 291 p.

BROWN, G. O. The history of the Darcy-Weisbach Equation for pipe flow resistance. In: ROGERS, J. R.; FREDRICH, A. J. (Edit.). **Environmental and water resources history**. Washington, D.C.: ASCE, 2002. p. 3-7.

CARARO, D.C. **Manejo de irrigação por gotejamento para aplicação de água residuária visando a minimização do entupimento de emissores**. 2004. 130 f. Tese (Doutorado Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” USP, Piracicaba, 2004.

CARDOSO, G. G. G. **Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros.** 2007. 64 f. Dissertação (Mestrado – Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” USP, Piracicaba, 2007.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling.** Berkeley: University of California, 1942. 124 p. ENCISO, J.; JIFON, J.; WIEDENFELD, B. Subsurface drip irrigation of onions: effects of emitter spacing and drip depth on yield. ASABE: St Joseph, Paper N. 052242, Tampa, 6 p. 2005 (Written for presentation at the 2005 ASAE Annual International Meeting).

FAVETTA, G. M.; BOTREL, T. A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. **Scientia Agrícola**, Cidade, v. 58, n. 2, p. 427-430, 2001.

FRAVET, A. M. M. F. et al. Evaluación de las características hidráulicas de una cinta de goteo marca chapin. In: CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAGE, 1, 2004, Lima: **Anais...** Lima: Universidad Agrária La Molina, 2004. CD-ROM.

GARCIA, C. J. B. **Avaliação técnica de tubos emissores para irrigação localizada.** 2006. 64 f. Tese (Doutorado Agronomia – Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

HOWELL, T. A.; BARINAS, F. A. Pressure losses across trickle irrigation fittings and emitters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 23, n. 4, p. 928-933, 1980.

HOWELL, T. A.; HILER, E. A. Trickle irrigation lateral design. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 5, p. 902-908, 1974.

HUNG, J. Y. T. Determination of emitter spacing and irrigation run time including plant root depth. In: International Microirrigation Congress, 5., 1995, Orlando. **Proceedings ..** St Joseph: ASAE, 1995. p 292-298.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 9261:2004:** Agricultural irrigation equipment – emitters and emitting pipe – specification and test methods: Geneva, 2004, 16 p.

JUANA, L.; SINOBAS, L. R; LOSADA, A. Determining minor losses head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of irrigation and drainage engineering:** ASCE, v. 128, n. 6, p 376-384, 2002a.

JUANA, L.; SINOBAS, L. R; LOSADA, A. Determining minor losses head losses in drip irrigation laterals. I: Experimental study and validation. **Journal of irrigation and drainage engineering:** ASCE, v. 128, n. 6, p 385-396, 2002b.

KARMELI, D.; KELLER, J. **Trickle irrigation design.** Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.

KARMELI, D.; PERI, G. Trickle irrigation design principles (in Hebrew). **The technion students Publishing House,** Haifa, Israel, 112 p. 1972.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: Avi Book, 1990. 652 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.

LIU, C. P. Limitations and proper use of the Hazen-Williams equations. **Journal of hydraulic engineering:** ASCE, v. 124, n. 9 p. 951-954, 1998.

MANTOVANI, E. C.; VIEIRA, G. H. S. Estudo comparativo da avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento com medição de vazão de 16 e 32 gotejadores. CONIRD 4. Porto Alegre, 6 p.

MYERS, L. E.; BUCKS, D. A. Uniform irrigation with low-pressure trickle systems. **Journal of the irrigation and drainage division**. ASAE: St Joseph, v. 98, n. IR3, p. 341-346, 1972.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A.; CLEMMENS, A. J. Assessing trickle emitter application uniformity. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, n. 4, p. 816-821, 1979.

NETO, S.A. **Desempenho hidráulico de tubos de emissão em módulos de irrigação sob adução por gravidade**. 2000. 78 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

NOGUEIRA, C. C. P. et al. Características e dimensões do volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n.3, p. 315-320, 2000.

QUEIROZ, J.E.; FRIZZONE, J.A.; FERREIRA, J.O.P. Equações para determinar o comprimento máximo de linhas laterais em sistemas de irrigação localizada. **Revista Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 6, n. 1, p. 77-91, 1995.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC-USP, 2001. 519 p.

ROSA, C. I. L. F.; FREITAS, P. S. L.; GONSALVES, R. R.; BERTONHA, A.; TRINTINALHA, M. A. Dimensões de bulbo molhado no solo, a partir de fonte pontual de água, para manejo de água na cultura da pupunha (*Bactris gasipaes*, Kunth). **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 2, p. 169-174, 2004.

SAMMIS, T.W.; WU, I.P. Crop yield as affected by irrigation. In: **International drip/trickle irrigation congress**. 3. Fresno. Proceedings. St Joseph. ASAE (ASAE Publication 10-85. p. 22-28. 1985

SCHMIDT, M. V. V. **Características hidráulicas do tubogotejador “QUEEN GIL”**. 1995. 56 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

SILVA, C. S.; MARTINI, R. Tomate mergulha na tecnologia. **Hortifruti Brasil**, Piracicaba: CEPEA USP/ESALQ. n. 47, p. 6-14, 2006.

SCALOPPI, E. J. Adjusted F factor for multiple-outlet pipes. **Journal of irrigation and drainage engineering**: ASCE, v. 114, n. 1, p. 169-174. 1988.

SCALOPPI, E. J; ALLEN, R. G. Hydraulics of irrigations laterals: comparative analysis. **Journal of irrigation and drainage engineering**: ASCE, v. 119, n. 1, p. 91-115. 1993.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**. St Joseph. 22, n. 5, p. 1034-1038, 1979.

SOLOMON, K. H.; DEDRICK, A. R. Standards development for microirrigation. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5., 1995, Orlando, **Proceedings...** St Joseph: ASAE, 1995. p. 303-313

SOUZA, O. R. M. S; BOTREL, T. A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p 16-22, 2004.

SOUZA, O. R. M. S. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento com microtubos**. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 2005

SOUZA, F. S.; MATSURA, E. E. Infiltração e distribuição de água no solo para o dimensionamento de irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n.1, p. 7-15, 2004.

SWAMEE, P. K. Design of a submarine oil pipeline. **Journal of transportation engineering: ASCE**, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

TESTEZLAF, R.; CAMPIONI, E. C. Comportamento hidráulico do tubogotejador “Queen Gil”. **Engenharia Agrícola**, Campinas, v. 13, p. 29-38, 1993.

VALIANTZAS, J. D. Modified Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation lateral. **Journal of irrigation and drainage engineering: ASCE**, Renton, v. 131, n. 4, p. 342-350, 2005.

VIEIRA, A. T. **Caracterização hidráulica de um tubo gotejador**. 1996. 71 f. Dissertação (Mestrado Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 1996.

WU, I-Pai. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. **Agricultural Water Management**. Amsterdam: Elsevier Science, v. 32, p. 275-284, 1997.

WU, I-pai,; GITLIN, H. M (a). Drip irrigation design based on uniformity. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, v. 17, n. 3, p. 429-432, 1974.

WU, I-pai,; GITLIN, H. M. Hydraulics and uniformity for drip irrigation. **Journal of the irrigation and drainage division**. Renton, v. 99, n. IR2, p. 157-167, 1973.

WU, I-pai,; YUE, R. Drip lateral design energy gradiente line approach. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, v. 36, n. 2, p. 389-394, 1993

ZAZUETA, F.S.; SEPULVEDA, E. S. Wetted bulb dimensions from a trickle source. IFAS EXTENSION, Gainesville, 2 p. 2004.

YILDIRIM, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. **Irrigation and drainage**. ICID-CIID, v. 56, n.4 , p. 399-421, 2007.

YILDIRIM, G.; AGIRALIOGLU, N. Comparative analysis of hydraulic calculation methods in design of microirrigation laterals. **Journal of irrigation and drainage engineering**. ASCE, v. 130, n. 3, p. 201-217, 2004.