

CRISTIANO TAGLIAFERRE

PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÃO DE POLIETILENO E AVALIAÇÃO
DA SUSCETIBILIDADE AO ENTUPIMENTO DE MICROASPELADOR
OPERANDO COM ÁGUA RESIDUÁRIA DE SUINOCULTURA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

T126p
2003

Tagliaferre, Cristiano, 1974-

Perda de carga em tubulação de polietileno e avaliação da suscetibilidade ao entupimento de microaspersor operando com água residuária de suinocultura / Cristiano Tagliaferre. – Viçosa : UFV, 2003.

75p. : il.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa

1. Águas residuais da suinocultura - escoamento. 2. Irrigação por microaspersão - Sistemas localizados - Perda de carga. 3. Aspersores - Entupimento. 4. Águas residuais da suinocultura - Filtração. 5. Filtros de telas metálicas e filtração. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD. 19 ed. 631.587

CDD. 20 ed. 631.587

À Deus.

Aos meus pais Carlos e Odila Maria.

Aos meus irmãos.

Aos meus amigos e colegas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pela oportunidade de estudar.

Aos meus pais e aos meus irmãos, pelo carinho, pelo incentivo e apoio e pela compreensão nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Rubens Alves de Oliveira, pela orientação, pelo incentivo, pela confiança e pela amizade, imprescindíveis durante o Curso.

Aos professores conselheiros Wilson Denículi e Paulo Roberto Cecon, pelas valiosas sugestões.

A SCHNEIDER, pela doação de duas motobombas, indispensáveis à realização do trabalho.

A Carborundum, pela doação das tubulações e dos bocais dos microaspersores.

Aos funcionários da Área de Hidráulica, Irrigação e Drenagem, pelo apoio durante a montagem do experimento.

Aos professores Sebastião Martins Filho, Julião Soares de Souza Lima e José Carlos Lopes, pelo incentivo e apoio na iniciação científica.

Ao professor Edvaldo Fialho dos Reis, pelo companheirismo e pela amizade.

Aos laboratoristas Simão, Lucimar, Chicão e Sr. Antônio, pelo apoio e pela colaboração na realização dos experimentos.

À Rita de Cássia Silva, pelo companheirismo, incentivo, apoio e carinho.

Aos meus companheiros de república Adésio Ferreira, Alexson Mello Cunha, Cristiano Egnaldo Zinato, Giovanni de Oliveira Garcia e Adriano Ribeiro Guerra, pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus amigos Otacílio, Ricardo Schimidt, Carlos Eduardo, Michel, Marcos Vinícius, Guilherme Lyra e tantos outros, pela convivência.

Aos meus amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, pela colaboração e amizade.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

BIOGRAFIA

CRISTIANO TAGLIAFERRE, filho de Carlos Tagliaferre e Odila Maria Menon Tagliaferre, nasceu em Nova Venécia, ES, em 10 de junho de 1974.

Em setembro de 1996, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA/UFES), concluindo-o em agosto de 2001.

Em agosto de 2001, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em julho de 2003.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Produção e caracterização da água residuária de suinocultura.....	3
2.2 Uso de águas residuárias em sistema de irrigação localizada.....	4
2.3 Perda de carga contínua em tubulações de polietileno conduzindo água residuária de suinocultura.....	6
2.4 Suscetibilidade ao entupimento de microaspersor operando com água residuária de suinocultura.....	13
2.5 Características hidráulicas do microaspersor.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 Bancada experimental.....	20
3.2 Determinação da perda de carga contínua em tubulações de polietileno com diferentes diâmetros e concentrações de sólidos totais.....	23
3.2.1 Equações ajustadas.....	24
3.3 Descrição da bancada experimental para avaliar a suscetibilidade ao entupimento de microaspersor.....	26
3.3.1 Características do microaspersor utilizado no experimento.....	27

3.3.2	Suscetibilidade ao entupimento de microaspersor.....	28
3.3.3	Coleta e caracterizações física e química da água residuária de suinocultura.....	29
3.3.4	Determinação da uniformidade de vazão.....	30
3.3.5	Determinação da equação características vazão-pressão do microaspersor.....	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1	Perda de carga em tubulações de polietileno conduzindo água residuária de suinocultura filtrada.....	31
4.1.1	Características físicas e químicas da água residuária.....	31
4.1.2	Comportamento hidráulico do fluido.....	32
4.1.3	Metodologia de Duffy e Titchener (1974).....	38
4.1.4	Metodologia de Hazen-Williams modificada.....	39
4.2	Uniformidade de vazão do microaspersor MF.....	41
4.3	Equação característica de vazão-pressão do microaspersor.....	42
4.4	Suscetibilidade ao entupimento do microaspersor MF operando com água residuária de suinocultura.....	44
4.4.1	Vazão média do microaspersor.....	44
5.	RESUMO E CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
	APÊNDICES.....	57
	APÊNDICE A.....	58
	APÊNDICE B.....	60
	APÊNDICE C.....	75

RESUMO

TAGLIAFERRE, Cristiano, M. S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2003. **Perda de carga em tubulação de polietileno e avaliação da suscetibilidade ao entupimento de microaspersor operando com água residuária de suinocultura.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Conselheiros: Wilson Denículi e Paulo Roberto Cecon.

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de ajustar uma equação de perda de carga contínua em tubulação de polietileno com vários diâmetros, conduzindo água residuária de suinocultura com diferentes concentrações de sólidos totais, bem como avaliar a suscetibilidade ao entupimento de microaspersor operando com água residuária de suinocultura filtrada em telas metálicas de 40, 60 e 80 mesh. Os resultados possibilitaram concluir que: (a) o coeficiente de Hazen-Williams (C) variou de forma acentuada em um mesmo material, nos vários diâmetros e concentrações de sólidos totais estudados, impossibilitando o ajuste de uma equação com um valor (C) médio para polietileno; (b) as equações de perda de carga obtidas pelos modelos de Duffy e Titchener e de Hazen-Williams modificado apresentaram excelentes ajustes, com coeficientes de determinação iguais a 0,9923 e 0,9989, respectivamente. Recomenda-se o seu uso para o cálculo de perda de carga contínua em escoamento de água residuária de suinocultura em tubulações de polietileno; (c) as equações de perda de carga contínua para escoamento de água não devem ser usadas para água residuária de suinocultura com concentrações de sólidos totais variando entre 1,15 e 1,75 g L⁻¹; (d) telas metálicas de 40 e 60 mesh deixaram passar pêlos de suínos presentes na água residuária, provocando o entupimento

do microaspersor operando com bocais de 0,9 e 1,2 mm, respectivamente; (e) a filtração da ARS deve ser feita com tela de 80 mesh ou superior, para evitar o entupimento provocado por pêlos de suínos; (f) o microaspersor com diâmetro de bocal igual a 1,8 mm operou adequadamente em todos os tipos de malhas de telas utilizadas na filtração da água residuária; e (g) o sistema de filtração testado apresentou-se prático e eficiente quando se usou a tela de 80 mesh.

ABSTRACT

TAGLIAFERRE, Cristiano, M. S., Universidade Federal de Viçosa, July 2003.
Head loss in polyethylene tubes and evaluation of susceptibility to clogging up of a microsprinkler distributing wastewater from swine.
Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Committee members: Wilson Denículi and Paulo Roberto Cecon.

This study had the aim of fitting an equation which expresses the loss of continuous head in polyethylene tubes of different diameters which carry wastewater from swine at different concentrations of total solids. Moreover, the susceptibility to clogging of a microsprinkler that distributes wastewater of swine filtered through metallic screens of 40, 60, and 80, was evaluated. The following conclusions were drawn: (a) the Hazen-Williams coefficient (C) varied markedly within the same material under the different studied diameters and total concentrations of solids, which made the fitting of an equation with an average value (C) for polyethylene impossible; (b) the equations of head loss obtained by the modified Duffy and Titchener and the Hazen-Williams models presented an excellent adjustment, with determination coefficients of 0,9923 and 0,9989, respectively – its use is recommended to calculate the loss of continuous head in wastewater flowing off in polyethylene tubes; (c) the equations of continuous head loss for water flowing off must not be used for wastewater from swine with total solid concentrations that vary between 1,15 and 1,75 g L⁻¹; (d) metallic screens of 40 and 60 meshes allowed pass hair of the swine to slip through, causing obstruction of the microsprinkler with nozzles of 0,9 and 1,2 mm, respectively; (e) the wastewater of swine must be filtered with a

80 mesh or superior, to avoid obstruction by swine hair; (f) the microsprinkler with a 1,8 mm nozzle diameter worked satisfactorily for all types of screens used to filter the wastewater; and (g) the tested filter system proved to be practical and efficient when using a 80 mesh.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o intuito de buscar economia de escala e especialização na produção e, sobretudo, agregar valor à produção agropecuária, houve uma transformação no processo produtivo da suinocultura brasileira, que deixou de ser uma atividade de pequenas propriedades ou de subsistência e adquiriu um caráter intensivo de produção. Essa transformação vem provocando discussão acerca da questão ambiental e da sustentabilidade da produção da carne suína, considerando-se o apreciável volume de dejetos produzidos.

Atualmente, a utilização de água residuária na fertirrigação está sendo considerada uma forma de tratamento alternativo, tornando-se objeto de vários estudos. Os recursos hídricos de alta qualidade estão também escassos, o que tem resultado na busca de meios para se utilizar água de qualidade inferior, reduzindo, assim, a pressão sobre os mananciais, principalmente em regiões onde eles se encontram restritos para a irrigação.

Geralmente, os métodos de irrigação por superfície e aspersão são utilizados para a disposição de água residuária no solo. Apesar de esses métodos serem eficientes na aplicação de efluentes, eles possuem limitações relacionadas à contaminação de culturas, do homem (através do contato direto com o efluente) e do ar. Ao contrário, o método de irrigação localizada tem surgido nos últimos anos como uma inovação na aplicação de efluentes, possibilitando minimizar os riscos de contaminação do homem e do meio, além de proporcionar alta eficiência do uso da água. Tal fato possibilita maior precisão na aplicação dos efluentes, fertilizantes e defensivos.

Com relação à utilização do sistema de irrigação localizada na aplicação de efluentes constituídos por água residuária de suinocultura, não há conhecimento acerca do comportamento desse fluido ou da perda de carga que ocorre nos tubos de polietileno de baixa densidade usada em linhas laterais de irrigação localizada, bem como do risco de entupimento de emissores provocado por esses efluentes. Essa falta de informação leva técnicos a cometer erros no dimensionamento de projetos, pois o diâmetro dos tubos é dimensionado em função da magnitude da perda de carga.

O entupimento de emissores é considerado o principal problema dos sistemas de irrigação localizada relacionado às características hidráulicas básicas do sistema, como o pequeno diâmetro de passagem da água e, em particular, a qualidade da água utilizada. Como os efluentes possuem grande quantidade de material em suspensão, o comportamento dos emissores com relação à suscetibilidade ao entupimento, quando em uso na aplicação de água residuária de suinocultura, constitui-se numa informação importante, definindo o sistema de filtragem adequado para o efluente.

Nesse contexto, levando-se em consideração que são poucas as informações referentes à utilização de água residuária aplicada em sistema de irrigação localizada, bem como o seu comportamento hidráulico em tubos de polietileno, este trabalho objetivou:

- Ajustar uma equação de perda de carga contínua em tubulações de polietileno com vários diâmetros, conduzindo água residuária de suinocultura com diferentes concentrações de sólidos totais.
- Avaliar a suscetibilidade ao entupimento do microaspersor operando com água residuária de suinocultura filtrada em telas metálicas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Produção e caracterização da água residuária de suinocultura

Até a década de 70, os dejetos de suínos não constituíam problemas para os criadores, pois era pequena a concentração de animais nas propriedades. Por causa da crescente adoção de sistemas de confinamento de suínos, tem-se produzido quantidade cada vez maior de dejetos, e as inadequações dos sistemas de manejo e armazenamento induzem o seu lançamento em rios e cursos d'água naturais. O despejo de grande volume de dejetos em rios e lagos ocasiona poluição e pode redundar em sério desequilíbrio ecológico, por causa da alta demanda bioquímica do oxigênio (DBO), resultando na redução do teor de oxigênio dissolvido na água. Segundo Konzen (1980), a água residuária de suinocultura possui DBO cerca de 100 vezes maior que a de esgoto urbano, causando danos ao ambiente, especialmente redução da qualidade da água, com riscos à saúde humana.

A quantidade de excrementos produzidos diariamente e o seu teor de umidade variam com o desenvolvimento corporal dos suínos, o tipo de alimentação, a quantidade de água ingerida, a estação do ano e a quantidade de água utilizada na higienização das baias (Andreadakis, 1992). De acordo com o referido autor, um suíno produz sete litros de dejetos por dia quando está nas fases de crescimento e terminação (25 a 100 kg de peso vivo), sendo esse volume decrescente à medida que aumenta o número de animais. A composição dos

dejetos é muito variada, pois depende da alimentação, da fase de crescimento e das condições de manejo e armazenamento.

A Tabela 1 apresenta as características químicas e físicas dos dejetos de suínos produzidos em uma unidade de crescimento e terminação, obtidas no Sistema de Produção de Suínos da Embrapa Suínos e Aves.

Tabela 1 - Características químicas e físicas dos dejetos (mg L^{-1}) produzidos em uma unidade de crescimento e terminação, obtidas no Sistema de Produção de Suínos da Embrapa Suínos e Aves

Característica	Mínimo	Máximo	Média
Demanda química de oxigênio (DQO)	11.530	38.448	25.543
Sólidos totais	12.697	49.432	22.399
Sólidos voláteis	8.429	39.024	16.389
Sólidos fixos	4.268	10.408	6.010
Sólidos sedimentáveis	220	850	429
Nitrogênio total	1.660	3.710	2.374
Fósforo total	320	1.180	578
Potássio total	260	1.140	536

Fonte: Manhães (1996), adaptado por Perdomo (1996). Resultados de análises laboratoriais do Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves. Concórdia, SC.

Apesar de ser uma atividade importante do ponto de vista econômico e social, a suinocultura é considerada, pelos órgãos de fiscalização ambiental, uma atividade de grande potencial poluidor (Perdomo e Lima, 1998). O problema ambiental relacionado à questão dos dejetos de suínos é, atualmente, um grande entrave à sua produção, principalmente em regiões que possuem um relevo acidentado, devido às dificuldades encontradas para manejar os resíduos. Assim, para dar fim aos resíduos acumulados, alguns produtores passaram a lançá-los nos cursos d'água, sem tratamento prévio, poluindo mananciais, além de colocar em risco a saúde animal e humana.

2.2. Uso de águas residuárias em sistema de irrigação localizada

O aumento na demanda por água potável despertou o interesse para a utilização dos efluentes de água residuária como fonte alternativa para a

fertirrigação (Tanji, 1997). Esses efluentes são predominantemente aplicados através de sistemas de irrigação por superfície ou aspersão. Entretanto, nos últimos anos, o interesse em sistemas de irrigação localizada para a aplicação de água residuária tem crescido muito (Hills e Brenes, 2001).

De acordo com Shrivastava et al., citados por Hills e Brenes (2001), a prevenção da poluição e a eficiência no uso da água originária de efluentes de água residuária podem ser alcançadas com sistemas de irrigação localizada. Oron et al. (1993) relataram que a irrigação subsuperficial reduziu o risco de poluição associada à água residuária, uma vez que o solo atua como um verdadeiro filtro. Segundo Trooien et al. (2000), o uso de irrigação por gotejamento subsuperficial para aplicar água residuária proveniente de lagoas que armazenam resíduos de animais tem muitas vantagens, que incluem a redução do contato humano com a água residuária; redução do odor; diminuição do escoamento superficial de água residuária para os cursos d' água; aplicação de água rica em fósforo abaixo da superfície do solo, onde o escoamento superficial é reduzido; garantia de excelente uniformidade de aplicação de água, resultando no melhor controle de água, nutriente e sais; redução da corrosão dos sistemas de irrigação; e, ainda, de acordo com Sadowski et al. (1978), eliminação do risco de transporte de patógenos por via aérea, provocada por aspersores.

De acordo com Adin e Sacks (1991), a água residuária submetida ao tratamento e depois estocada em reservatório durante a estação chuvosa pode ser usada em locais de climas áridos e semi-áridos como fonte para a irrigação durante o verão seco. De acordo com Bui, citado por Hills e Brenes (2001), fitas gotejadoras para aplicação de água residuária provenientes de usinas de açúcar têm sido usadas com muito sucesso no Hawaii.

Yardeni et al. (1992) advertiram que, quando o efluente é usado em sistemas de irrigação localizada, é importante manter o fluxo turbulento nas linhas laterais, para prevenir a sedimentação. Oron et al. (1979) observaram uma redução relativa da vazão dos emissores decorrente de entupimentos no começo das linhas laterais, sendo menor do que no final devido às altas velocidades e a cargas de pressão observadas no começo desses tubos.

Lau et al. (1978), utilizando efluente de esgoto tratado para irrigação de cana-de-açúcar, observaram que o entupimento ocorreu predominantemente na extremidade final da lateral. Wu et al. (1991) confirmaram que o entupimento não é distribuído uniformemente ao longo da linha lateral.

Os estudos de Bralts et al. (1982) e Nakayama e Bulks (1981) evidenciaram que o entupimento se dá de maneira uniformemente distribuída, ao longo da linha lateral. Boman (1995) observou tal comportamento em entupimento de origem física.

2.3. Perda de carga contínua em tubulações de polietileno conduzindo água residuária de suinocultura

As características reológicas de um fluido influenciam diretamente a perda de carga que ocorre durante o escoamento. A determinação dessa perda de carga é de fundamental importância no dimensionamento de sistemas pressurizados. O conhecimento do comportamento de fluidos constituídos de água residuária de suinocultura com baixa concentração de sólidos totais em tubos de polietileno para irrigação localizada é escasso. Desse modo, tornam-se necessários estudos para quantificar a perda de carga que ocorre nesses tubos, facilitando o dimensionamento de sistema de irrigação localizada para disposição final dos efluentes no solo.

Assim, o balanço de energia entre duas seções quaisquer para um escoamento incompressível em regime permanente, uniforme e plenamente estabelecido é expresso por:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_t \quad (1)$$

em que:

p_1 = pressão na seção inicial da tubulação, $[M L^{-1} T^{-2}]$;

p_2 = pressão na seção final da tubulação, $[M L^{-1} T^{-2}]$;

= peso específico do fluido circulante, $[M L^{-2} T^{-2}]$;

V = velocidade média do escoamento, $[L T^{-1}]$;

g = aceleração da gravidade, $[L T^{-2}]$;

z = carga de posição, $[L]$; e

h_t = perda de carga total entre as duas seções da tubulação, $[L]$.

A equação anterior aplicada a uma tubulação horizontal, de seção transversal constante e perdas acidentais desprezíveis, resume-se a:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \frac{\Delta p}{\gamma} = h_f \quad (2)$$

em que:

p = diferença de pressão entre duas seções da tubulação, $[M L^{-1} T^{-2}]$; e

h_f = perda de carga distribuída $[L]$.

De acordo com Bernardo (1995) e Von Bernuth (1990), a equação de Darcy-Weisbach, ou a equação universal, é a mais apropriada para o cálculo da perda de carga, pois envolve todas as variáveis responsáveis pelo fenômeno. A dificuldade principal em seu uso é determinar o fator de atrito f , que depende das características do escoamento e da natureza do conduto. Quando se trata de água residuária, o problema se agrava, pois falta informação referente à viscosidade dinâmica e outras propriedades reológicas do fluido. Tais características podem influenciar o comportamento hidráulico. No entanto, a determinação da perda de carga contínua em condutos forçados circulares e de área constante, para regime de escoamento permanente, uniforme e plenamente estabelecido, pode ser calculada por meio da equação universal:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = f \frac{L 8Q^2}{D^5 \pi^2 g} \quad (3)$$

em que:

f = fator de atrito, adimensional;

L = comprimento da tubulação, $[L]$;

D = diâmetro interno da tubulação, [L]; e

Q = vazão média, [L³ T⁻¹].

Existem várias equações que permitem estimar o fator de atrito, em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa das paredes da tubulação, para fluidos newtonianos. Para o emprego dessas equações, deve-se considerar o regime de escoamento (Pizarro, 1996), o qual é definido pelo número de Reynolds:

$$Re_y = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (4)$$

em que:

Rey = número de Reynolds, adimensional;

μ = viscosidade dinâmica, [M L⁻¹ T⁻¹];

ρ = massa específica do fluido, [M L⁻³]; e

ν = viscosidade cinemática, [L² T⁻¹].

No regime laminar (Rey < 2.000), o fator de atrito depende exclusivamente do número de Reynolds, sendo estimado pela equação de Poiseuilli:

$$f = \frac{64}{Re_y} \quad (5)$$

Dentre as equações utilizadas para o regime turbulento (Rey > 4.000), destacam-se as equações de Blasius (Equação 6) e de Colebrook-White (Equação 7) (Azevedo Neto e Alvarez, 1982; Rouse, 1982):

$$f = 0,3164(Re_y)^{-0,25} \quad (6)$$

válida para $4.000 < Re_y < 10^5$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e/D}{3,71} + \frac{2,51}{\text{Re } y \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

válida para $\text{Re } y > 4.000$, em que e representa a rugosidade absoluta das paredes dos tubos, [L].

Segundo Chen e Hashimoto (1976a) e Chen e Hashimoto (1976b), no caso de fluidos não-newtonianos é necessário introduzir a Equação 8, que define o número de Reynolds generalizado, conforme a equação:

$$\text{Reg} = \frac{D^n (V^{2-n}) \rho}{8^{n-1} K} \left(\frac{4n}{1+3n} \right)^n \quad (8)$$

em que:

Reg = número de Reynolds generalizado, adimensional;

K = índice de consistência (constante reológica), $[M L^{-1} T^{-1}]$; e

n = índice de comportamento (constante reológica), adimensional.

Caso o fluido seja newtoniano, $n = 1$ e $K = \mu$, a Equação 8 transforma-se na Equação 4.

Chen e Hashimoto (1976b) encontraram, também, um modelo de equação (Equação 9) que estima o fator f em função do número de Reynolds generalizado, tendo como base a equação de Blasius para água resisúria de bovinocultura e água residuária de avicultura, com cerca de 3 a 5% de sólidos totais, respectivamente, sendo obtido um desvio entre os dados observados e estimados de 18,3%, ou seja:

$$f = 0,030 \text{Reg}^{-0,18} \quad (9)$$

Esses autores citaram, ainda, as seguintes faixas de regimes de escoamentos para água residuária de bovinocultura, suinocultura e avicultura:

Laminar - Reg 3.100

Transição - $3.100 < \text{Reg} < 4.300$

Turbulento - Reg 4.300

A equação de Hazen-Williams é comumente usada em dimensionamentos hidráulicos, por ser prática (Kamand, 1988). Seu uso para dimensionamento de tubos de pequeno diâmetro torna-se inviável, uma vez que o coeficiente C é bastante variável (Kamand, 1988; Keller e Bliesner, 1990). De acordo com Kamand (1988), a adoção de um valor para C, tomando como base apenas o material, pode proporcionar imprecisões nos cálculos de perda de carga, gerando problemas em balanceamentos de pressão em linhas mais complexas e erros no dimensionamento de tubulações e de instalações de bombeamento. Essa equação, proposta por Hazen e Williams (1963), pode ser escrita usando o Sistema Internacional de Unidades (S. I.):

$$h_f = \left(\frac{V}{0,355CD^{0,63}} \right)^{1,852} L = \left(\frac{4Q}{0,355\pi CD^{2,63}} \right)^{1,852} L \quad (10)$$

em que:

V = velocidade média do escoamento, m s⁻¹;

C = coeficiente que depende da natureza das paredes do tubo e do seu estado de conservação;

D = diâmetro interno da tubulação, m;

L = comprimento da tubulação, m; e

Q = vazão média, m³ s⁻¹.

A equação de Hazen-Williams deve ser aplicada somente para água à temperatura ambiente, regime de escoamento turbulento e diâmetro igual ou superior a 50 mm (Azevedo Neto e Alvarez, 1982; Bernardo, 1995).

Para fluidos não-newtonianos, também existe um modelo empírico semelhante à equação de Hazen-Williams (Equação 11), desenvolvido por pesquisadores das áreas de alimentos, papel e celulose e de transporte de óleo em refinarias (Duffy e Titchener, 1974; Moller, 1976; Lee e Duffy, 1976):

$$\frac{h_f}{L} = \beta_1 V^{\beta_2} S T^{\beta_3} D^{\beta_4} \quad (11)$$

em que:

ST = concentração de sólidos totais, %, e

$\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$ = constantes características do fluido, adimensionais.

As equações empíricas que determinam a perda de carga, como é o caso da equação anterior, em geral possuem melhores correlações do que os métodos de correlações gráficas e equações que estimam o fator de atrito (Duffy, 1976).

De acordo com Estep, citado por Kumar et al. (1972), de modo geral a perda de carga contínua para escoamento de água residuária proveniente da criação de animais deve ser aumentada em 10%, com relação à perda de carga com água pura. Oliveira (1996) e Soccol (1996), em estudos envolvendo o bombeamento de ARB e ARS, respectivamente, verificaram a complexidade do comportamento desses fluidos, diante dos problemas práticos encontrados no decorrer dos experimentos. De acordo com os resultados, a bomba apresentou rendimento inferior em relação à água, quando se trabalhou com ambos os fluidos, levando os referidos autores a uma recomendação de adicionar 20% ao valor da potência solicitada pela bomba quando o sistema operar com ARB e ARS.

De acordo com Hughes e Brighton (1974), o escoamento turbulento da mistura de sólidos em água, onde a fase sólida não é muito dispersa, pode produzir menores coeficientes de atrito do que no escoamento turbulento de água. Nas paredes dos tubos a fase sólida separa-se da fase líquida para formar uma camada de baixa viscosidade. O núcleo mais rígido da mistura tende a mover-se como uma rolha. Posto que existe menos transferência de quantidade de movimento turbulento da camada-limite para o núcleo, a camada-limite laminar torna-se mais espessa e o fator de atrito, menor do que seria no escoamento de água pura.

Staley et al. (1971), em seus estudos envolvendo esterco de bovino líquido, concluíram que as propriedades reológicas do esterco dependem do conteúdo de sólidos totais e que, para concentrações abaixo de 3,5%, a perda de carga foi menor que para água limpa.

Sampaio et al. (2000, 2001) ajustaram modelos matemáticos que estimam a perda de carga distribuída em tubulações de aço zincado, ferro galvanizado e PVC com diâmetros comerciais de duas a seis polegadas, utilizando como fluidos

circulantes água residuária de bovinocultura e de suinocultura, com diferentes concentrações de sólidos totais. Esses autores concluíram que os métodos que estimam a perda de carga pela equação universal e que relacionam o fator de atrito às características de escoamento não apresentaram bom ajuste, principalmente quando se utilizou o número de Reynolds generalizado. Segundo esses autores, as equações empíricas utilizando as metodologias de Duffy e Titchener (1974) e Hazen-Williams, modificada para ambos os tipos de água residuária, que relacionam a perda de carga com vazão, diâmetro, coeficiente de rugosidade e concentrações de sólidos totais, exibiram bons resultados, com coeficiente de determinação igual a 98%. Por essa razão, dentro das recomendações especificadas pelos referidos autores, pode-se utilizá-las no dimensionamento de projetos hidráulicos pressurizados, para escoamento de água residuária de bovinocultura e suinocultura, respectivamente, com o uso das seguintes equações:

$$J = \frac{8,17344 ST^{0,100672} Q^{1,760495}}{C^{1,704703} D^{4,520444}} \quad (12)$$

e

$$J = \frac{0,540257 ST^{0,173681} Q^{1,789577}}{C^{1,172486} D^{4,58967}} \quad (13)$$

em que:

J = perda de carga unitária, m m⁻¹;

ST = concentração de sólidos totais, dag L⁻¹;

Q = vazão, m³ s⁻¹;

C = coeficiente que depende da natureza das paredes do tubo e do seu estado de conservação; e

D = diâmetro do tubo, m.

2.4. Suscetibilidade ao entupimento de microaspersor operando com água residuária de suinocultura

A seleção dos emissores para a irrigação localizada constitui-se numa etapa de muito critério e sensibilidade, pois o sucesso do projeto depende da escolha do emissor. De acordo com Vermeiren e Jobling (1980) e Keller e Bliesner (1990), os emissores devem apresentar descarga constante e uniforme, suficiente abertura para não provocar entupimentos, robustez, homogeneidade e ser de baixo custo.

Os sistemas de irrigação localizada têm como característica hidráulica básica a utilização de emissores que operam com baixas vazões, cuja passagem da água ocorre através de orifícios de pequeno diâmetro (0,5 a 1,5 mm), característica que favorece o entupimento dos emissores, o principal problema associado com a operação desses sistemas. Se os emissores entopem facilmente, os procedimentos de recuperação irão adicionar custos à sua manutenção, além da possibilidade de se tornarem insuficientes em algumas circunstâncias. Após freqüentes problemas de entupimento, os produtores se sentirão desencorajados, retornando ao uso de métodos de irrigação menos eficientes (Gilbert e Ford, 1986).

Bralts et al. (1987) identificaram cinco situações em um sistema de microirrigação com a ocorrência de entupimentos: 1) entupimentos parciais que afetam todos os emissores; 2) entupimentos parciais, afetando igualmente uma proporção específica dos emissores; 3) entupimentos completos, prejudicando igualmente todos os emissores; 4) entupimentos completos, afetando uma proporção específica dos emissores; e 5) uma combinação de entupimentos parcial e completo.

A baixa qualidade da água de irrigação, especialmente as residuárias, que contêm altas concentrações de sólidos, podem obstruir rapidamente os emissores. Em geral, as principais causas desse entupimento foram divididas por Gilbert e Ford (1986), Pitts et al. (1990) e Smajstria e Boman (1999) em três categorias: entupimento de origens química, física e biológica.

Bucks et al., citados por Nakayama e Bucks (1991), com base na sensibilidade de entupimentos dos emissores e na experiência adquirida, investigaram e propuseram uma classificação da água para irrigação, incluindo os maiores fatores que provocam o entupimento de emissores (Tabela 2). Essa classificação pode ser usada como um guia para identificar o risco de entupimento, na seleção e projeto de um sistema de tratamento de água.

Tabela 2 - Classificação da qualidade da água quanto ao potencial de entupimento de emissores para irrigação localizada

Fator de Entupimento	Risco de Entupimento		
	Baixo	Moderado	Severo
Físico			
Sólidos suspensos (mg L^{-1})	<50	50-100	>100
Químico			
pH	<7,0	7,0-8,0	>8,0
Sólidos dissolvidos (mg L^{-1})	<500	500-2.000	>2.000
Manganês (mg L^{-1})	<0,1	0,1-1,5	>1,5
Ferro total (mg L^{-1})	<0,2	0,2-1,5	>1,5
Sulfeto de hidrogênio (mg L^{-1})	<0,2	0,2-2,0	>2,0
Biológico			
Número de bactérias ($\text{n}^\circ \text{ mL}^{-1}$)	<10.000	10.000-50.000	>50.000

Fonte: Bucks et al., 1979, citados por Nakayama e Bucks (1991).

De acordo com Oron et al. (1980), o entupimento dos emissores, quando em uso na aplicação de águas residuárias, ocorre por causa de um ou da combinação dos seguintes fatores: material suspenso, incluindo material orgânico (plantas, animais e bactérias) e inorgânico (principalmente solo); depósitos devido à precipitação e fixação de compostos de cálcio e magnésio, como também fertilizantes dissolvidos e metais pesados na água; e fatores biológicos, que envolvem várias algas, bactérias e outros componentes do fitoplâncton contidos na água.

Existem outras causas de entupimentos dos emissores que, de acordo com Pizarro (1996), estão ligadas à sucção de partículas sólidas e à intrusão radicular em sistemas subsuperficiais. A determinação da causa exata do entupimento de emissores pode ser complexa, uma vez que vários agentes na água podem

interagir com outros, agravando o problema do entupimento (Ravina et al., 1992).

As águas contendo sólidos suspensos podem ser usadas na irrigação localizada se estes consistirem de partículas do tamanho de argila e a floculação não ocorrer. Os trabalhos de pesquisas indicam que o uso de água com mais de 500 ppm de sólidos suspensos não causaram entupimento de emissores com a filtragem das partículas maiores (Pitts et al., 1990).

Segundo Adin e Sacks (1991), o entupimento de emissores operando com efluente armazenado é causado, primeiramente, por sólidos suspensos na água, porém estes não provocam entupimentos necessariamente no início do processo. A taxa de entupimento é mais afetada pelo tamanho da partícula do que por seu número e densidade. Esses autores também concluíram que o potencial de entupimento diminuiu com a modificação da arquitetura interna dos emissores e o pré-tratamento químico com oxidantes e floculantes.

Geralmente, recomenda-se remover todas as partículas maiores que um décimo do diâmetro do orifício ou passagem de água do emissor (Keller e Bliesner, 1990; Pizarro, 1996). De acordo com Resende (1999), esse critério pode ser insuficiente, uma vez que partículas de argila que comumente conseguem passar através do sistema de filtragem, embora não constituam problema por si só, podem sofrer processo de cimentação, através de mucilagem de algas filamentosas ou bactérias, causando obstrução física nos emissores. Gilbert et al. (1979) observaram, em linhas secundárias de um sistema de irrigação por gotejamento, uma concentração de sólidos suspensos de 10 a 100 vezes maior que a encontrada na captação no rio Colorado (EUA), resultado da agregação e da cimentação após passarem por um conjunto de filtros de areia e de tela de 200 mesh.

Pizarro (1996) relatou que o risco de entupimento de um emissor depende do diâmetro mínimo do orifício de passagem e da velocidade da água. Nesse sentido, propôs uma classificação que agrupa os emissores quanto à sensibilidade ao entupimento, com base no diâmetro mínimo de passagem de água, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação de emissores quanto à sensibilidade ao entupimento

Diâmetro Mínimo (mm)	Sensibilidade ao Entupimento
0,7	Alta
0,7 a 1,5	Média
1,5	Baixa

Boman (1995), estudando o efeito de diâmetros de orifício na taxa de entupimentos de microaspersores, observou que aproximadamente 22% dos emissores de 0,76 mm de diâmetro requereram limpeza ou substituição a cada trimestre, em comparação com os 14% dos de 1,02 mm, 7% dos de 1,27 mm e 5% dos de 1,52 mm. Nesse estudo, 46% dos casos de entupimento foram devidos a algas, 34% à obstrução por formigas e aranhas, 16% por lesmas e 4% por partículas de areia e pedaços de PVC. Ele recomendou os emissores com diâmetro de 1,27 mm ou mais para minimizar os custos de manutenção associados ao entupimento de emissores. Segundo Boman e Parsons (1999), emissores com maiores diâmetros de orifício são mais efetivos na limpeza e saída de partículas, insetos ou algas do que emissores com orifícios menores.

De acordo com Ravina et al. (1992), os emissores com maiores vazões são menos suscetíveis ao entupimento e a sensibilidade ao entupimento não está relacionada com o tipo de emissor, embora os do tipo orifício sejam os mais sensíveis. Resende (1999) relata que o entupimento de causa biológica está mais relacionado à arquitetura interna dos emissores do que a parâmetros de vazão e diâmetro do orifício.

Segundo Yuan et al. (1998), o entupimento de origem física pode ser prevenido com o uso de sistemas de filtragem eficientes; os biológicos, com cloração e outros métodos de desinfecção; e a precipitação química, com controle do pH da água de irrigação.

Ravina et al. (1992), trabalhando com 12 gotejadores de diferentes tipos e marcas comerciais, determinaram que o nível de entupimento foi similar tanto para filtragem a 80 mesh quanto para 120 mesh, sendo, no entanto, maior para abertura de 40 mesh.

2.5. Características hidráulicas do microaspersor

O entupimento de emissores resulta em variações na uniformidade de fluxo do emissor e na hidráulica da linha lateral. O entupimento de alguns emissores reduz a vazão total na linha lateral e, dessa forma, a perda de carga total na linha. A redução da fricção resultará no aumento da vazão de emissores não autocompensáveis que não estiverem entupidos (Bralts et al., 1982), afetando bruscamente a uniformidade e a hidráulica do sistema e, por conseguinte, a sua eficiência. De acordo com Nakayama e Bucks (1981), as informações referentes à vazão dos emissores e sua uniformidade são essenciais para o dimensionamento e manejo adequados dos sistemas de irrigação localizada.

Segundo Paes (1985), os emissores constituem um dos componentes de maior importância, tanto no dimensionamento quanto no manejo dos sistemas de irrigação localizada, sendo extremamente importante que os projetistas conheçam suas características hidráulicas. Essas características dos emissores de água em irrigação localizada constituem-se na uniformidade de fabricação, na relação vazão *versus* pressão, na grandeza do raio efetivo e na distribuição d'água ao longo de seu raio. Gilaad et al., citados por Paes (1985), relataram que as características hidráulicas dos microaspersores são influenciadas pela geometria, pelo material, pelo processo de fabricação e pelo método de sua instalação na linha lateral.

Abreu et al. (1987) afirmaram que o desempenho hidráulico de um emissor é determinado, entre outros fatores, pelo coeficiente de variação de fabricação, que é uma medida de mudança de fluxo causada por essa variação. Nakayama e Bucks (1981) citaram como as principais causas de alteração de fabricação a variação na pressão e temperatura da água, a heterogeneidade do material utilizado e o projeto do próprio emissor.

De acordo com Solomon (1979), o coeficiente de variação de fabricação é o melhor parâmetro para avaliar as diferenças individuais entre emissores, sendo também uma informação que representa bem o projeto do emissor, o material empregado e os cuidados aplicados na sua construção.

Esse coeficiente é uma medida estatística que avalia a variação do processo de fabricação dos emissores e tem sido utilizado também para analisar a variação de fluxo do emissor ao longo de uma linha lateral de irrigação localizada. Apesar de ser impossível fabricar um grupo de emissores com o mesmo coeficiente de descarga, a alteração resultante do processo de construção normalmente tende a distribuir-se em torno de um valor médio (Keller e Karmeli, 1974; Bralts et al., 1981). Assim, o coeficiente de variação de fabricação pode ser definido pela razão entre o desvio-padrão da vazão do emissor e sua vazão média, conforme a Equação 14:

$$CVf = 100 \frac{\sqrt{(q_1^2 + q_2^2 + q_n^2 - n q_m^2) / (n - 1)}}{q_m} \quad (14)$$

em que:

CVf = coeficiente de variação de fabricação (%);

q_1, q_2, \dots, q_n = vazão de cada emissor, em $L h^{-1}$;

q_m = vazão média dos emissores, em $L h^{-1}$; e

n = número de emissores.

De acordo com as normas da ASAE, citada por Keller e Bliesner (1990), os emissores podem ser classificados em função do coeficiente de fabricação (Tabela 4).

Tabela 4 - Classificação do coeficiente de variação de fabricação

Coeficiente de Variação de Fabricação (CVf)	Classificação
0,05	Excelente
0,05 - 0,07	Médio
0,07 - 0,11	Marginal
0,11 - 0,15	Deficiente
0,15	Inaceitável

Segundo Solomon (1985), a taxa de fluxo de um emissor individual depende da pressão de serviço, da temperatura da água, do coeficiente de variação de fabricação e do estágio em que os emissores estão entupidos.

Segundo Keller e Bliesner (1990), o fluxo de um emissor é caracterizado por uma função potencial, em que a vazão se relaciona diretamente com a carga hidráulica atuante na entrada do emissor, conforme a Equação 15.

$$q = k H^x \quad (15)$$

A constante k inclui, no seu valor, os fatores relacionados à fabricação do emissor, por exemplo a área da seção transversal dos emissores do tipo orifício. Portanto, quando se consideram as variações de vazão do emissor originadas de fabricação, deve-se referir sempre ao valor de k . Em contrapartida, o expoente x descreve como a vazão varia com a pressão, e seu valor normalmente está entre 0 e 1, dependendo do regime de escoamento, determinado pelo número de Reynolds (Bralts et al., 1981).

De acordo com Keller e Karmeli (1975), o expoente “ x ” que caracteriza o regime de escoamento do emissor é classificado como $0 < x < 0,5$, em que o regime de escoamento varia de turbulento a totalmente turbulento e sua vazão sofre menos influência da variação da pressão; e $0,5 < x < 1,0$, em que o regime de escoamento varia de instável a laminar, verificando-se maior influência das variações de pressão sobre a vazão.

De acordo com Azevedo (1986) e Abreu et al. (1987), para “ x ” igual a zero a vazão é constante, ou seja, independentemente da variação de pressão, o que torna o emissor autocompensante, que é uma condição ideal, por permitir grandes variações de carga nas laterais, provocadas pela fricção ou pelo aclive do terreno.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Bancada experimental

O presente trabalho foi conduzido na Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. Na área foi construída uma bancada experimental de madeira, em nível, com 17,5 m de comprimento e 1,20 m de largura (Figura 1), para determinar a perda de carga contínua em tubulações de polietileno de vários diâmetros e avaliar a suscetibilidade ao entupimento do microaspersor utilizando água residuária de suinocultura filtrada em telas metálicas.



Figura 1 - Vista geral da bancada experimental.

A água residuária utilizada foi proveniente do Setor de Suinocultura da UFV, que era armazenada em um reservatório de concreto com capacidade para 200 m³, conforme mostrado na Figura 2.

Na condução do experimento, a água residuária passava por um sistema de filtragem constituído de telas metálicas fixadas em madeiras, com área útil de 80 x 50 cm e malhas de 40, 60 e 80 mesh, tendo um dispositivo que permitia variar sua inclinação. A tela foi colocada com uma inclinação de 22°, posicionada acima de um reservatório de amianto com capacidade para 500 L, que armazenava o efluente filtrado, permitindo que o material sólido retornasse ao reservatório de concreto.

Na Tabela 5, encontram-se as especificações técnicas das telas utilizadas no experimento.

Tabela 5 - Especificações técnicas das telas usadas no experimento

Malha	Diâmetro do Fio (mm)	Abertura (mm)	Peso/m ² (inox)	Área Aberta
40	0,18	0,450	0,640	52%
60	0,16	0,263	0,778	39%
80	0,12	0,192	0,583	39%

Na saída da tubulação de recalque da bomba submersa foi instalado um cano, em forma de T, dotado de quatro perfurações, que propiciaram melhor distribuição da água residuária sobre a tela (Figura 2).



Figura 2 - Vista do filtro de tela e da bancada de coleta de vazão do microaspersor.

Em todos os ensaios envolvendo a água residuária de suinocultura, o sistema funcionava da seguinte maneira: para a condução da água residuária do reservatório até o sistema de filtragem foi utilizada uma motobomba submersa da marca SCHNEIDER, modelo BCS 305, com rotor de 127 mm e potência de 3 c.v., posicionada a 80 cm do fundo do poço e 70 cm abaixo da superfície líquida.

O efluente foi conduzido da caixa de amianto à bancada de teste por outro conjunto motobomba da marca SCHNEIDER, modelo BC-91S, com rotor de 120 mm e potência de 0,75 c.v., que forneceu a pressão necessária para a condução dos testes.

Após cada dia de trabalho, as caixas de amianto eram esvaziadas para evitar a proliferação de moscas (larvas), que poderiam influenciar os resultados de suscetibilidade ao entupimento do microaspersor.

Nos ensaios feitos com água limpa proveniente do poço artesiano de abastecimento do Aviário da Universidade Federal de Viçosa, não houve necessidade de essa água passar pelo sistema de filtragem.

3.2. Determinação da perda de carga contínua em tubulações de polietileno com diferentes diâmetros e concentrações de sólidos totais

Para determinação da perda de carga contínua, utilizaram-se tubulações de polietileno de baixa densidade, com diâmetros internos de 12,62; 15,47; 19,79; e 25,76 mm, correspondendo aos diâmetros nominais de 13, 16, 20 e 26 mm, respectivamente. Os valores de diâmetros internos foram obtidos por intermédio do peso da água destilada contida em cada segmento de tubo, com 20 cm de comprimento, fazendo-se cinco repetições. Para a determinação do diâmetro, usou-se a Equação 16:

$$D = \sqrt{\frac{4P}{\pi \gamma h}} \quad (16)$$

em que:

D = diâmetro interno do tubo, L;

P = peso da água destilada, M L T⁻²;

= peso específico da água, M L⁻² T⁻²; e

h = altura do segmento do tubo, L.

As tubulações estudadas foram colocadas em nível sobre a bancada de ensaios, conforme ilustrado na Figura 1, possibilitando, assim, o uso da Equação 2 para calcular a perda de carga.

Essa perda de carga foi avaliada numa extensão de 12 m. Nesse trecho foram distribuídos quatro piezômetros, distanciados 4 m, constituídos por mangueiras com diâmetro de 20 mm.

No início de cada tubulação havia uma válvula de gaveta, localizada a 2,50 m a montante do primeiro piezômetro que possibilitava o controle da vazão. No processo de medição de vazão foi usado um recipiente com capacidade para 120 litros, para medir o volume escoado, localizado a 3 m a jusante do último piezômetro, situado no final da linha-teste (Figura 1). Dessa maneira, atendeu-se à recomendação de a distância ser, no mínimo, 30 vezes o valor do maior

diâmetro utilizado, com o objetivo de garantir o escoamento plenamente desenvolvido.

O recipiente foi previamente calibrado com água, em intervalos de 10 litros, e durante os ensaios media-se o tempo para escoar certo volume, fazendo-se três repetições. No fundo do recipiente havia uma válvula de globo que permitia drenar a água.

Foi montado um esquema que possibilitou instalar as quatro tubulações de polietileno de diferentes diâmetros de uma só vez, colocando-se uma válvula de gaveta no início de cada linha. Isso evitou a troca dos tubos no final de cada ensaio, trocando-se apenas as mangueiras dos piezômetros.

As diferenças nas leituras dos meniscos de dois piezômetros consecutivos permitiram a determinação da perda de carga simultaneamente em três trechos de 4 m de comprimento.

Em cada ensaio foram coletados 20 dados de vazão e perda de carga, para cada condição de diâmetro e fluido utilizado.

As concentrações de sólidos totais da ARS usadas no experimento foram de 1,15, 1,24, 1,43 e 1,75 g L⁻¹. As três primeiras concentrações de sólidos totais foram obtidas com uso das telas de 80, 60 e 40 mesh, respectivamente. A concentração de 1,75 g L⁻¹ de sólidos totais foi obtida usando-se a água residuária retirada diretamente do poço coletor.

3.2.1. Equações ajustadas

De posse das combinações dos dados obtidos de perda de carga, concentração de sólidos totais, vazão, coeficiente dependente da natureza das paredes do tubo e do seu estado de conservação e diâmetros, ajustaram-se os coeficientes da equação de Duffy e Titchener (1974) e Hazen-Williams, de acordo com recomendações de Sampaio (1999).

a) Modelo de Duffy e Titchener (1974)

É um modelo empírico em que a perda de carga é estimada em função da velocidade, do diâmetro e da concentração de sólidos totais para cada tipo de material de tubulação (Equação 11). Foi ajustada apenas uma equação para as tubulações de polietileno.

b) Modelo de Hazen-Williams modificado

É uma proposta nova do modelo de Hazen-Williams, adaptado para ARB e ARS (Equação 17), como descrito por Sampaio (1999).

$$J = \frac{k_1 (ST)^{k_2} Q^{k_3}}{C^{k_4} D^{k_5}} \quad (17)$$

em que:

J = perda de carga contínua, $m\ m^{-1}$;

ST = concentração de sólidos totais, $dag\ L^{-1}$;

Q = vazão do fluido, $m^3\ s^{-1}$;

C = coeficiente que depende da natureza das paredes do tubo e do seu estado de conservação;

D = diâmetro interno da tubulação, m; e

k_1, k_2, k_3, k_4 e k_5 = parâmetros da equação, adimensionais.

Os valores de C das tubulações utilizadas no ajuste dessa equação foram determinados a partir dos dados de campo, para cada diâmetro e concentrações de sólidos totais, e estimados por meio da equação de Hazen-Williams. Desse modo, os modelos foram ajustados, usando-se 299 dados para cada variável da equação. Os valores de velocidade variaram de 0,40 a 2,56 $m\ s^{-1}$ e os valores de C, entre 125 e 166, respectivamente.

Os valores do coeficiente de Hazen-Williams (C) e do fator de atrito (f) foram estimados através das equações de Hazen-Williams e Universal, respectivamente.

Para análise dos dados e obtenção dos modelos, utilizou-se o Sistema de Análises Estatística e Genética (SAEG).

3.3. Descrição da bancada experimental para avaliar a suscetibilidade ao entupimento de microaspersor

Sobre a bancada experimental foi colocada uma linha-teste com 5 m de comprimento, constituída de uma tubulação de polietileno flexível com diâmetro de 26 mm, na qual foram inseridos os microaspersores, espaçados a cada 35 cm. O final da linha-teste foi mantido fechado durante os ensaios.

Os microaspersores foram instalados na tubulação por meio de conectores de microaspersores comerciais ligados por tubos de polietileno de 4 mm, com 55 cm de comprimento. Foram colocados em funcionamento, simultaneamente, 10 microaspersores na linha-teste, montados dentro de baldes plásticos, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 3 - Microaspersor instalado no interior do balde.

No processo de medição da vazão pelo método direto, o microaspersor era coberto com outro balde invertido, retendo a água aplicada e conduzindo-a para uma mangueira conectada a uma perfuração localizada no fundo do balde, onde o microaspersor estava instalado. Quando a vazão não estava sendo medida, a água aplicada pelos microaspersores retornava ao reservatório através das mangueiras. Para determinar a vazão da tubulação, havia um dispositivo que possibilitava coletar simultaneamente o volume de água aplicado pelos 10 microaspersores.

No início da linha-teste foi conectada uma válvula de gaveta para controlar a pressão de funcionamento dos microaspersores, medida com um manômetro de tubo em U, utilizando-se o mercúrio como líquido manométrico. O manômetro foi conectado à tubulação distanciado a 0,90 m a partir da válvula de gaveta.

O tempo de coleta foi medido com um cronômetro e o volume coletado, com uma proveta de dois litros, com graduação de 20 mL.

3.3.1. Características do microaspersor utilizado no experimento

Utilizou-se o microaspersor MF da marca Carborundum, que operava com bocais de 0,9 mm (preto), 1,2 mm (amarelo) e 1,8 mm (laranja), apresentando as seguintes características técnicas:

Microaspersor Carborundum com bocal preto e bailarina cinza - Feito com plástico de alta resistência e conectado a um tubo flexível de 4 mm, que é acoplado a uma haste de 26 cm que o sustenta. O bocal apresenta um diâmetro de 0,90 mm, com vazões de 28, 35, 40, 45 e 50 L h⁻¹, nas pressões de serviço de 10, 15, 20, 25 e 30 mca, respectivamente. Dispõe de um diâmetro molhado de 5,20 m quando submetido à pressão de serviço de 15 mca.

Microaspersor Carborundum com bocal amarelo e bailarina cinza - O bocal apresenta o diâmetro de 1,20 mm, com vazões de 52, 63, 73, 81 e 90 L h⁻¹, nas pressões de serviço de 10, 15, 20, 25 e 30 mca, respectivamente. Possui um diâmetro molhado de 8,20 m, na pressão de serviço de 15 mca.

Microaspersor Carborundum com bocal laranja e bailarina cinza - O bocal apresenta um diâmetro de 1,80 mm, com vazões de 91, 112, 129, 145 e 157 L h⁻¹, nas pressões de serviço de 10, 15, 20, 25 e 30 mca, respectivamente. Possui um diâmetro molhado de 8,40 m, na pressão de serviço de 15 mca.

3.3.2. Suscetibilidade ao entupimento de microaspersor

Para avaliar a suscetibilidade ao entupimento de microaspersor, conduziu-se o experimento num esquema de parcelas subdivididas, tendo na parcela um esquema fatorial 3 x 3 (três diâmetros de bocais e três tipos de telas) e nas subparcelas os intervalos de tempo (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 e 40 horas), no delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições.

Foram utilizadas três telas com malhas de 40, 60 e 80 mesh, usadas separadamente para filtragem da ARS. A cada 40 horas de funcionamento do sistema, a tela era substituída por outra de malha diferente.

O ensaio teve duração de cinco dias para cada tela testada, ressaltando-se que o sistema funcionava oito horas por dia, num total de 40 horas de funcionamento. Diariamente, a cada quatro horas de atividade do sistema determinavam-se as vazões dos emissores por meio do método direto, estabelecendo-se um tempo de coleta de três minutos, fazendo-se três repetições.

A pressão de serviço utilizada foi de 150 kPa, considerada uma pressão média de funcionamento do microaspersor.

Para efeito de avaliação da eficiência dos tratamentos, foi analisada a vazão média dos microaspersores para os tempos de operação do sistema, expressa como um percentual do valor inicial (vazão medida no início de cada ensaio). Considerava-se o entupimento quando se constatava uma redução de vazão igual ou superior a 15% da vazão inicial. Nesse caso, o microaspersor era desobstruído para evitar aumento de pressão na linha lateral.

O uso de telas com diferentes malhas permitiu a sua seleção na filtragem da água residuária de suinocultura, com fim de utilização em sistemas de

irrigação por microaspersão. A seleção foi baseada no nível de ocorrência de entupimento do microaspersor.

Os resultados foram analisados por meio do Sistema de Análises Estatística e Genética (SAEG).

3.3.3. Coleta e caracterizações física e química da água residuária de suinocultura

A caracterização da água residuária de suinocultura foi realizada no Laboratório de Qualidade de Água do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Para as caracterizações física e química da água residuária usada em cada teste, foram coletadas quatro amostras da água do poço coletor no início do primeiro ensaio e quatro após o uso de tela de 80 mesh. A caracterização química foi realizada somente uma vez, antes e depois da tela de 80 mesh, obtida por meio de amostra composta. Para a ARS filtrada em telas de 40 e 60 mesh e ARS retirada diretamente do poço coletor, foram feitas somente as caracterizações físicas, através de quatro amostras, sendo as amostragens realizadas durante os ensaios.

A caracterização da água residuária foi determinada seguindo-se a metodologia da APHA (1995). As características físicas determinadas foram: sólidos sedimentáveis (SP), determinados em cone de Imhoff; sólidos totais (ST), após a secagem em estufa a 110 °C por 24 horas; sólidos fixos totais (SFT), por combustão em mufla a 550 °C; sólidos voláteis totais (SVT), por diferença entre os sólidos totais e os fixos; sólidos suspensos totais (SST), em filtros de acetato de celulose de 0,45 mm; e os sólidos dissolvidos totais (SDT), por diferença entre os sólidos totais e os suspensos. As análises químicas compreenderam: demanda bioquímica de oxigênio (DBO), obtida com a determinação do oxigênio dissolvido; nitrogênio total (N), obtido por calorimetria; fósforo total (P), determinado por espectrofotômetro; cálcio e magnésio, obtidos por titulometria; e potássio e sódio, conseguidos por fotometria de chama (Hump e Krist, 1992). O

pH foi determinado em peagâmetro. A temperatura da água e da água residuária foi medida durante os testes.

O peso específico da água residuária de suinocultura para cada concentração estudada foi determinado por meio da pesagem de 1.000 mL de uma amostra composta, devidamente agitada, contida num balão volumétrico.

3.3.4. Determinação da uniformidade de vazão

As variações de vazão entre os bocais foram avaliadas considerando suas diferenças individuais, decorrentes do processo de fabricação.

Para cada diâmetro de bocal, retirou-se uma amostra aleatória, constituída de 20 unidades, seguindo as normas da ABNT (1986). As vazões dos emissores foram determinadas com pressões de operação de 40, 80, 120, 160 e 200 kPa. Nos cálculos foram usadas as vazões médias dos emissores, relativo a três repetições, para cada pressão de operação avaliada, sendo o coeficiente de variação de fabricação (CVf) calculado com a aplicação da Equação 14.

3.3.5. Determinação da equação característica vazão-pressão do microaspersor

Para este estudo, o experimento foi montado num esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas os diâmetros de bocais de microaspersores e nas subparcelas as pressões, no delineamento inteiramente casualizado, com 20 repetições.

Os valores de vazões, obtidos para cada pressão de serviço testada, foram analisados por meio de análise de variância. Os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, no coeficiente de determinação e no fenômeno em estudo. Neste caso, ajustou-se uma equação do tipo potencial (Equação 15), relacionando-se a vazão do microaspersor em função da sua pressão de operação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Perda de carga em tubulações de polietileno conduzindo água residuária de suinocultura filtrada

4.1.1. Características físicas e químicas da água residuária

Na Tabela 6, apresentam-se os valores médios das características físicas e químicas das águas residuárias usadas nos testes.

Tabela 6 - Valores médios das análises físicas e químicas das amostras de água residuária de suinocultura

Características	Sistema de Filtragem (mesh)				
	Início	40	60	80	Final
Peso específico (kgf m^{-3})	1.006,04	1.003,02	1.006,10	1.008,20	1.004,06
Sólidos sedimentáveis (mg L^{-1})	1,48	2,97	2,37	1,33	1,50
Sólidos totais (mg L^{-1})	1.344,00	1.429,00	1.240,00	1.149,00	1.749,00
Sólidos fixos (mg L^{-1})	424,75	582,30	437,50	431,50	716,75
Sólidos voláteis (mg L^{-1})	919,00	846,30	802,50	717,00	1.032,00
Sólidos suspensos totais (mg L^{-1})	537,00	602,00	510,00	641,00	530,00
Sólidos dissolvidos totais (mg L^{-1})	806,75	826,50	730,80	507,50	1.219,00
DBO (mg L^{-1})	530,00	nd	nd	591,30	nd
Nitrogênio total (mg L^{-1})	176,40	nd	nd	114,80	nd
Fósforo total (mg L^{-1})	23,74	nd	nd	29,10	nd
Potássio (mg L^{-1})	311,67	nd	nd	376,80	nd
Cálcio (mg L^{-1})	38,99	nd	nd	46,90	nd
Magnésio (mg L^{-1})	12,43	nd	nd	13,30	nd
Sódio (mg L^{-1})	176,79	nd	nd	219,90	nd
pH	6,700	6,76	6,48	6,810	6,88

nd = não determinada.

A concentração de sólidos é uma das principais características que influenciam a determinação da perda de carga em tubulações devido ao atrito interno das partículas com a parede do tubo. De acordo com Chen e Hashimoto (1976a), o aumento da concentração de sólidos totais de 3 para 6% em águas residuárias de avicultura provocou um incremento de 430% na perda de carga em regime de fluxo laminar.

Em razão da filtração e da posição da motobomba submersa, os valores das características analisadas estão abaixo daqueles normalmente encontrados para dejetos brutos. De acordo com Silva (1973), as águas residuárias brutas de pocilgas apresentam conteúdos de sólidos totais aproximados de 40.000 mg L^{-1} e sedimentáveis em torno de 350 a 500 mL L^{-1} . Porém, Lo Monaco (2001), trabalhando com ARS, encontrou valores de sólidos sedimentáveis, sólidos totais e DBO da ordem de $53,5 \text{ mL L}^{-1}$, 3.250 mg L^{-1} e 1.158 mg L^{-1} , respectivamente.

De maneira geral ocorreu uma pequena variação nas características físicas durante o experimento, em decorrência de chuvas intensas ocorridas no início dos ensaios.

4.1.2. Comportamento hidráulico do fluido

Os dados obtidos nos ensaios envolvendo a condução de água e de água residuária de suinocultura na concentração de $1,15 \text{ g L}^{-1}$ estão apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente, para a tubulação de polietileno com diâmetro de 12,62 mm. Os dados dos demais diâmetros encontram-se nos Apêndices A e B.

Tabela 7 - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média do escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C), fator de atrito (f) e número de Reynolds (Rey) em tubo de polietileno com diâmetro de 12,62 mm conduzindo água na temperatura de 25 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f	Rey
0,0247	0,000047	0,3726	122	0,0439	4.655
0,0403	0,000055	0,4425	111	0,0510	5.529
0,0493	0,000063	0,4999	112	0,0488	6.246
0,0582	0,000075	0,5964	123	0,0404	7.451
0,0712	0,000088	0,6998	129	0,0359	8.744
0,0835	0,000094	0,7501	127	0,0367	9.372
0,0978	0,000105	0,8362	130	0,0346	10.448
0,1160	0,000115	0,9187	130	0,0340	11.479
0,1300	0,000123	0,9813	131	0,0334	12.261
0,1450	0,000132	1,0542	132	0,0323	13.172
0,1593	0,000141	1,1236	134	0,0312	14.039
0,1748	0,000147	1,1760	133	0,0313	14.693
0,1913	0,000154	1,2331	133	0,0311	15.407
0,2098	0,000163	1,3052	134	0,0305	16.308
0,2242	0,000167	1,3387	133	0,0309	16.727
0,2370	0,000177	1,4129	136	0,0294	17.653
0,2587	0,000182	1,4580	134	0,0301	18.217
0,2640	0,000191	1,5284	139	0,0279	19.097
0,2835	0,000196	1,5687	137	0,0285	19.600
0,3032	0,000206	1,6490	139	0,0276	20.604

Os valores do coeficiente de rugosidade (C) de Hazen-Williams obtidos para água (Tabela 7) foram inferiores aos recomendados por Azevedo Netto e Alvarez (1982) (C=140) e por Pizarro (1996) (C=150) para tubulação de polietileno. De modo geral ocorreram variações expressivas nos valores do coeficiente de Hazen-Williams para escoamento de água nos diferentes diâmetros estudados, corroborando que a equação de Hazen-Williams não deve ser empregada para tubulações com diâmetros menores que 50 mm (Azevedo Netto e Alvarez, 1982; Kamand, 1988; Keller Bliesner, 1990). Para Kamand (1988), a adoção de um valor para C, tomando-se como base apenas o material, pode proporcionar imprecisões nos cálculos de perda de carga para diâmetro menor que 50 mm.

Na Tabela 8, verifica-se que os valores do coeficiente de Hazen-Williams (C) para ARS foram maiores do que os obtidos para água.

Tabela 8 - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média do escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f) em tubo de polietileno com diâmetro de 12,62 mm conduzindo ARS na concentração de 1,15 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0285	0,000052	0,4138	125	0,04122
0,0393	0,000064	0,5132	130	0,03697
0,0533	0,000076	0,6098	131	0,03551
0,0678	0,000087	0,6940	131	0,03488
0,0788	0,000095	0,7583	132	0,03395
0,0900	0,000102	0,8185	133	0,03326
0,1005	0,000110	0,8771	134	0,03235
0,1100	0,000116	0,9256	135	0,03179
0,1213	0,000124	0,9917	137	0,03055
0,1332	0,000129	1,0349	136	0,03079
0,1518	0,000139	1,1078	136	0,03063
0,1697	0,000149	1,1947	138	0,02943
0,1860	0,000159	1,2673	139	0,02868
0,2042	0,000165	1,3192	138	0,02905
0,2228	0,000176	1,4096	140	0,02777
0,2333	0,000179	1,4307	139	0,02822
0,2500	0,000189	1,5074	141	0,02724
0,2763	0,000201	1,6063	142	0,02652
0,2980	0,000211	1,6901	144	0,02583
0,3218	0,000221	1,7690	144	0,02547

O número de Reynolds generalizado não foi calculado para o escoamento de água residuária de suinocultura, por causa da dificuldade de determinação de sua viscosidade. Porém, baseados nos valores encontrados para água, em todos os diâmetros e concentrações estudados o escoamento se deu em regime turbulento. Assim, nenhum modelo que relaciona o fator de atrito com o número de Reynolds generalizado foi ajustado. Resultados encontrados por Sampaio (1999) indicam que esses modelos tiveram baixos coeficientes de determinação, tendo esse autor optado pelos modelos empíricos, que apresentaram melhores ajustes.

Nas Figuras 4, 5, 6 e 7, apresentam-se as curvas que relacionam a perda de carga unitária e a vazão para água e as respectivas concentrações de sólidos totais de ARS, nos diâmetros de 12,62, 15,47, 19,79 e 25,76 mm, respectivamente.

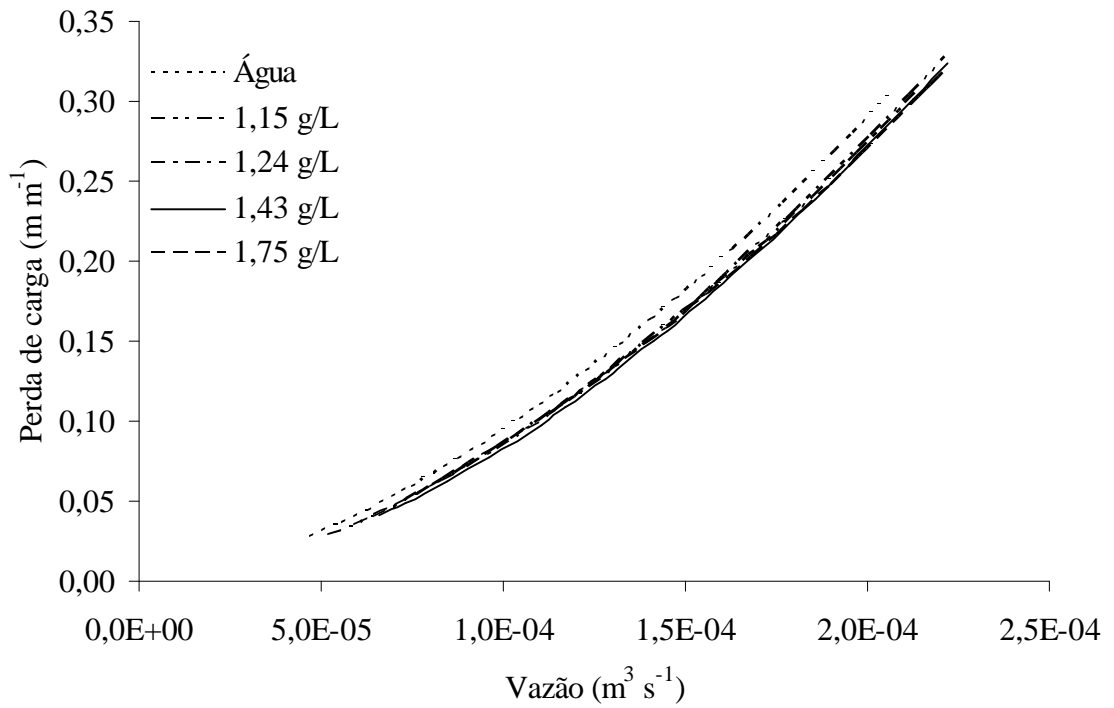


Figura 4 - Estimativa da perda de carga unitária, em função da vazão, na tubulação de polietileno com 12,62 mm de diâmetro, para água e as respectivas concentrações de sólidos totais de ARS.

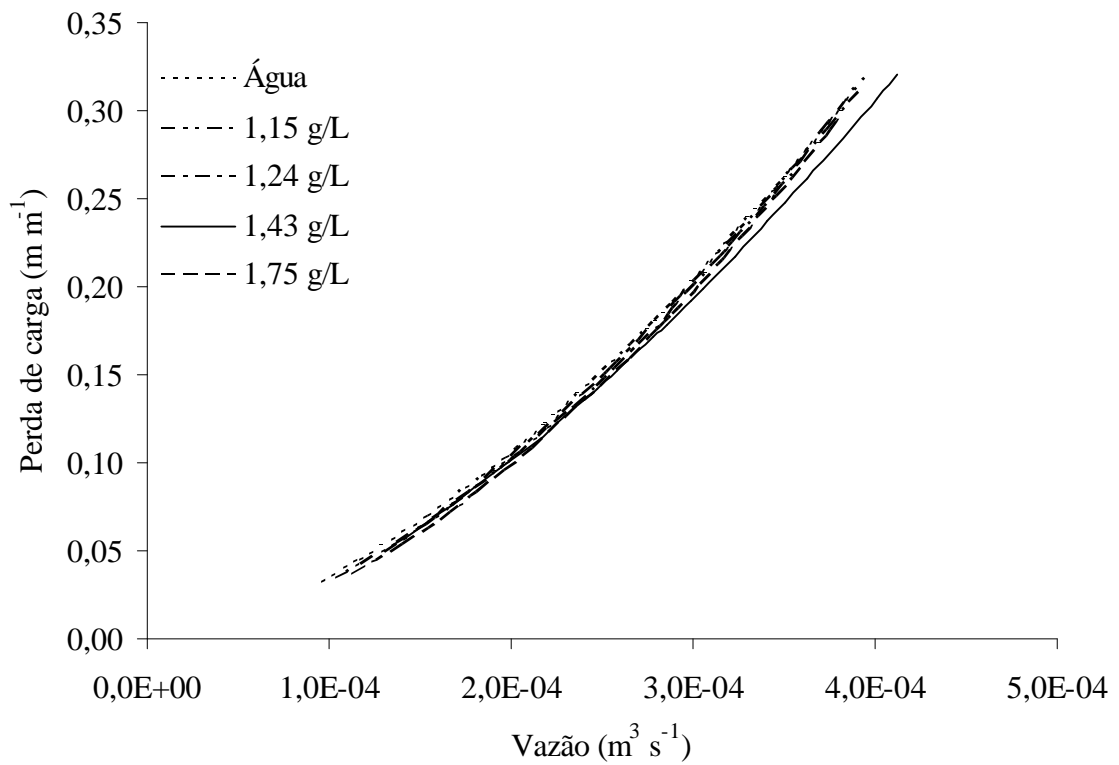


Figura 5 - Estimativa da perda de carga unitária, em função da vazão, na tubulação de polietileno com 15,47 mm de diâmetro, para água e as respectivas concentrações de sólidos totais de ARS.

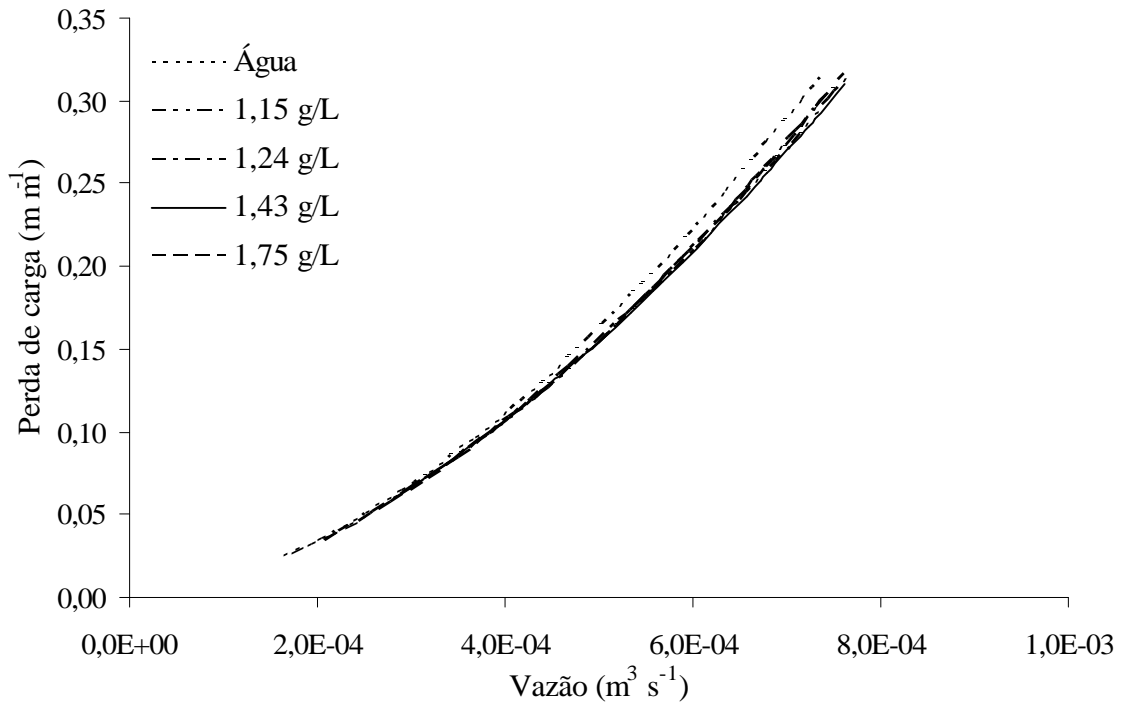


Figura 6 - Estimativa da perda de carga unitária, em função da vazão, na tubulação de polietileno com 19,79 mm de diâmetro, para água e as respectivas concentrações de sólidos totais de ARS.

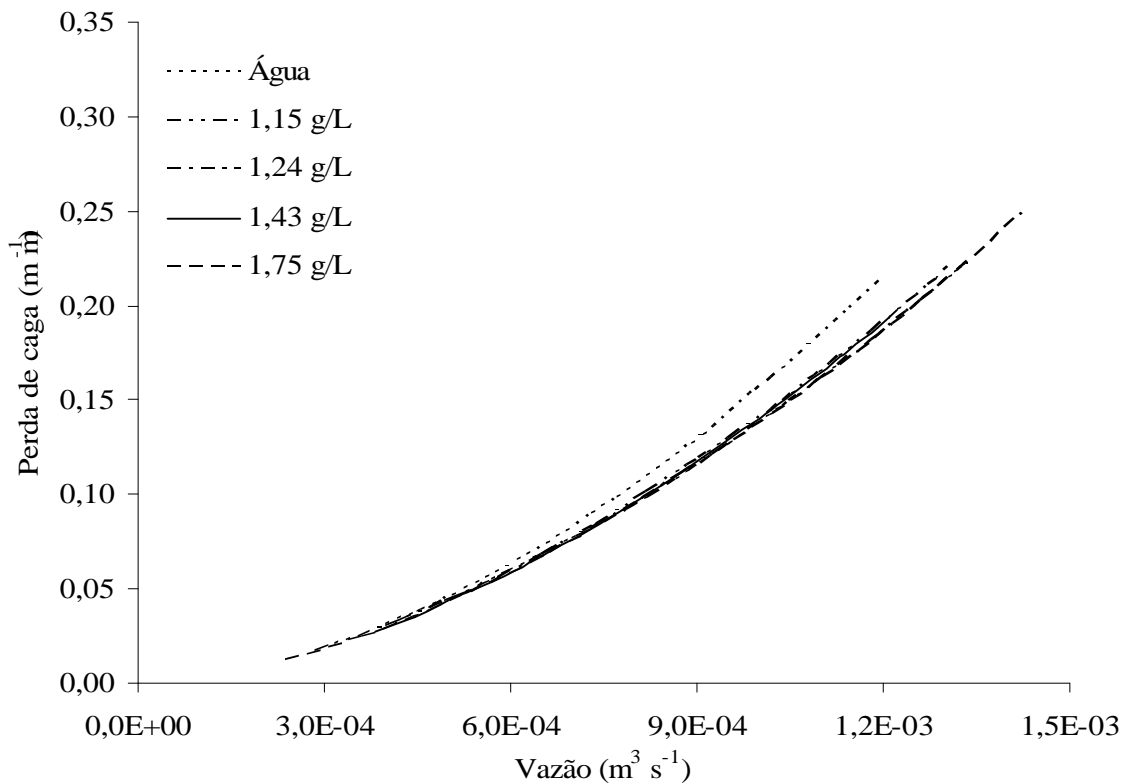


Figura 7 - Estimativa da perda de carga unitária, em função da vazão, na tubulação de polietileno com 25,76 mm de diâmetro, para água e as respectivas concentrações de sólidos totais de ARS.

De acordo com as Figuras 4, 5, 6 e 7, observa-se que a perda de carga provocada pela água foi maior do que a da água residuária de suinocultura nas concentrações de sólidos totais estudadas, corroborando a citação de Hughes e Brighton (1974). Estes autores afirmaram que, quando a fase sólida não é muito dispersa na água, a fase líquida separa-se da fase sólida nas paredes das tubulações, formando uma camada-limite laminar mais espessa, diminuindo o efeito da rugosidade da tubulação. Resultados similares também foram encontrados por Staley et al. (1971) que, utilizando esterco de bovino líquido, concluíram que concentrações abaixo de 3,5% provocaram perda de carga menor que a da água.

Para verificar a igualdade das equações apresentadas nas Tabelas 9 e 10, utilizou-se o teste de identidade de modelos. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que as equações ajustadas para água e ARS nas várias concentrações de sólidos totais para cada diâmetro utilizado diferiram estatisticamente no nível de 1% de probabilidade. Nesse caso, os resultados indicam que as equações utilizadas no cálculo de perda de carga contínua para a água não devem ser recomendadas para o escoamento de ARS com concentrações de sólidos totais variando de 1,15 a 1,75 g L⁻¹ em tubulações de polietileno.

As equações ajustadas relacionando a perda de carga unitária com a vazão para água e ARS com diferentes concentrações de sólidos totais nos vários diâmetros estudados estão apresentadas nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Tabela 9 - Equações ajustadas e os respectivos coeficientes de determinação da perda de carga (J) em função da vazão (Q), para escoamento de água em tubulação de polietileno com vários diâmetros

Material	Diâmetro (mm)	Equação	r ²
Polietileno	12,62	$\hat{J} = 276.452,17 Q^{1,6169}$	0,9953
	15,47	$\hat{J} = 103.631,07 Q^{1,6198}$	0,9990
	19,79	$\hat{J} = 72.682,52 Q^{1,7119}$	0,9976
	25,76	$\hat{J} = 29.667,43 Q^{1,7597}$	0,9891

J - m m⁻¹; Q - m³ s⁻¹.

Tabela 10 - Equações ajustadas e os respectivos coeficientes de determinação da perda de carga (J) em função da vazão (Q), para escoamento de ARS com várias concentrações de sólidos totais em tubulação de polietileno com vários diâmetros

Material	Diâmetro	Concentração (g L ⁻¹)	Equação	r ²
	(mm)			
Polietileno	12,62	1,15	$\hat{J} = 493.105,67 Q^{1,6900}$	0,9996
		1,24	$\hat{J} = 485.377,90 Q^{1,6894}$	0,9989
		1,43	$\hat{J} = 588.139,03 Q^{1,7127}$	0,9971
		1,75	$\hat{J} = 365.687 Q^{1,6579}$	0,9995
	15,47	1,15	$\hat{J} = 154.450,74 Q^{1,6699}$	0,9980
		1,24	$\hat{J} = 166.042,78 Q^{1,6805}$	0,9990
		1,43	$\hat{J} = 82.377,76 Q^{1,5980}$	0,9971
		1,75	$\hat{J} = 212.231,58 Q^{1,7126}$	0,9979
	19,79	1,15	$\hat{J} = 54.425,19 Q^{1,6809}$	0,9986
		1,24	$\hat{J} = 56.032,50 Q^{1,6832}$	0,9995
		1,43	$\hat{J} = 44.765,14 Q^{1,6547}$	0,9980
		1,75	$\hat{J} = 66.424,76 Q^{1,7068}$	0,9979
	25,76	1,15	$\hat{J} = 15.241,58 Q^{1,6781}$	0,9988
		1,24	$\hat{J} = 12.652,02 Q^{1,6539}$	0,9976
		1,43	$\hat{J} = 17.240,11 Q^{1,6965}$	0,9974
		1,75	$\hat{J} = 14.952,37 Q^{1,6791}$	0,9984

J - m m⁻¹; Q - m³ s⁻¹.

4.1.3. Metodologia de Duffy e Titchener (1974)

Seguindo a metodologia proposta por esses autores, estimaram-se os parâmetros α_1 , α_2 , α_3 e α_4 da equação de perda de carga para escoamento de ARS em tubulação de polietileno:

$$\hat{J} = 0,00038 V^{1,64892} S_T^{0,10006} D^{-1,31146} \quad R^2 = 0,9923 \quad (18)$$

em que:

J = estimativa da perda de carga unitária, $m\ m^{-1}$;

V = velocidade média do escoamento, $m\ s^{-1}$;

ST = concentração de sólidos totais, $g\ L^{-1}$; e

D = diâmetro interno da tubulação, m .

Analisando os valores dos coeficientes das variáveis da equação anterior, verificou-se que eles estão próximos dos encontrados por Sampaio (1999) para tubos de PVC operando com ARS, iguais a 1,78, 0,116 e -1,082, para velocidade, concentração de sólidos totais e diâmetro, respectivamente.

4.1.4. Metodologia de Hazen-Williams modificada

A equação de Hazen-Williams modificada com os coeficientes ajustados para o cálculo da perda de carga no escoamento de ARS em tubulação de polietileno, está apresentada a seguir:

$$\hat{J} = \frac{0,17247\ ST^{0,01858}\ Q^{1,77383}}{C^{1,08326}\ D^{4,7843}} \quad R^2 = 0,9989 \quad (19)$$

em que:

J = estimativa da perda de carga unitária, $m\ m^{-1}$;

ST = concentração de sólidos totais, $g\ L^{-1}$;

Q = vazão média, $m^3\ s^{-1}$;

C = coeficiente que depende da natureza das paredes do tubo e de seu estado de conservação; e

D = diâmetro interno da tubulação, m .

Analisando a Equação 19, observa-se que os coeficientes da vazão (Q) e do diâmetro (D) estão próximos dos valores apresentados por Hazen-Williams (1963), iguais a 1,852 e 4,87, respectivamente. De acordo com Sampaio (1999), isso evidencia que não existe interação dessas variáveis com o tipo de água residuária avaliada, relacionada com as suas concentrações de sólidos totais. Esse mesmo autor encontrou valores de coeficiente de vazão, coeficiente de Hazen-

Williams e diâmetro iguais a 1,789, 1,172 e 4,589, respectivamente para escoamento de ARS em tubulação de aço zincado, ferro galvanizado e PVC.

Os coeficientes dos dois modelos avaliados foram estimados envolvendo 299 observações, com valores de velocidades variando de 0,40 a 2,56 m s⁻¹. De acordo com Azevedo Netto e Alvarez (1982), em águas que contêm material em suspensão a velocidade não deve ser inferior a 0,50 m s⁻¹, para evitar a sedimentação nos tubos.

Os valores dos coeficientes de determinação dos modelos empíricos ajustados foram 0,9923 e 0,9989, respectivamente, para a equação de Duffy e Titchener e Hazen-Williams modificada, evidenciando que as mesmas tiveram bons ajustes, corroborando com a citação de Duffy (1976).

Os valores dos coeficientes de Hazen-Williams oscilaram entre 125 e 166 para polietileno, nos vários diâmetros e concentrações de sólidos totais estudados, inviabilizando o ajuste de uma equação com um valor médio. Os resultados obtidos usando a equação com C médio foram comparados com os da Equação 19, por meio do teste t. Testaram-se as hipóteses H₀: $\mu = 1$ e H_a: $\mu > 1$, para Y = X, constatando que os resultados diferiram a 1% de probabilidade. Nesse caso, os resultados foram superiores a 1, representando uma superestimação da perda de carga contínua. Por esse motivo, na Tabela 11 estão apresentados os valores médios de (C) para cada diâmetro de tubulação, nas diversas concentrações de sólidos totais, e a média geral para cada diâmetro, podendo ser empregados na Equação 19 para determinar a perda de carga contínua.

Tabela 11 - Valores médios do coeficiente de Hazen-Williams (C) para cada diâmetro de tubulação em cada concentração de sólidos totais

Diâmetro (mm)	Concentrações de Sólidos Totais (g L ⁻¹)				C (Médio)
	1,15	1,24	1,43	1,75	
12,62	137	138	139	139	138
15,47	144	146	148	148	146
19,79	149	147	149	148	148
25,76	153	156	154	154	154

Pelos resultados apresentados na Tabela 11, observa-se que os valores médios dos coeficientes de Hazen-Williams (C) aumentaram com o acréscimo do diâmetro da tubulação para uma mesma concentração de sólidos totais, corroborando com os resultados obtidos por Kamand (1988) para água em tubulação de PVC. Nesse caso, recomenda-se o valor de C médio igual a 138, 146, 148 e 154 para os diâmetros internos de 12,62, 15,47, 19,79 e 25,76 mm, respectivamente.

4.2. Uniformidade de vazão do microaspersor MF

A variação de vazão do microaspersor MF decorrente do processo de fabricação foi avaliada para os bocais de 0,9, 1,2 e 1,8 mm, submetidos às pressões de serviço de 40, 80, 120, 160 e 200 kPa. Os valores médios de vazão e do coeficiente de variação de fabricação do microaspersor estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores médios da vazão e do coeficiente de variação de fabricação do microaspersor MF operando com os três tipos de bocais na aplicação de água, para cada pressão de serviço testada

Pressão (kPa)	Vazão (L h ⁻¹)			CVf (%)		
	0,9 mm	1,2 mm	1,8 mm	0,9 mm	1,2 mm	1,8 mm
40	18,52	31,83	60,08	0,04	0,03	0,05
80	26,85	45,79	86,27	0,04	0,03	0,05
120	33,49	56,54	106,05	0,03	0,03	0,05
160	39,10	65,80	122,86	0,03	0,04	0,05
200	44,08	73,83	138,63	0,03	0,04	0,03
Média				0,034	0,034	0,046

Considerando que as condições dos testes foram as mesmas em todas as unidades ensaiadas, as diferenças de vazão ocorridas são devidas a variações no processo de fabricação do microaspersor, conforme indicam os valores de CVf para cada diâmetro de bocal. O microaspersor estudado pode ser classificado como de excelente qualidade, de acordo com a classificação da ASAE, citada por Keller e Bliesner (1990). Tais resultados evidenciaram pequena variação na

vazão decorrente do processo de fabricação, sendo o melhor critério para avaliar as diferenças individuais entre os emissores (Solomon, 1979). Observa-se ainda, na Tabela 12, que os coeficientes de variação de fabricação independeram da pressão de serviço do emissor. Para Abreu et al. (1987), isso ocorre quando a pressão está compreendida na faixa de pressão de funcionamento do emissor recomendada pelo fabricante.

4.3. Equação característica de vazão-pressão do microaspersor

A partir dos valores médios de vazões obtidas nas diversas pressões testadas (Tabela 12), ajustaram-se às equações características para o microaspersor MF operando com água e os três tipos de bocais.

Na Tabela 13 está apresentado o resumo da análise de variância da variável vazão em função da pressão. Verifica-se, nessa tabela, que tanto os efeitos principais quanto a interação foram significativos a 1% de probabilidade, pelo teste F.

Tabela 13 - Resumo da análise de variância da variável vazão em função da pressão dos bocais de microaspersores estudados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio
Bocais de microaspersores	2	129.292,10 ^{**}
Resíduo (a)	57	51,2888
Pressão	4	21.982,97 ^{**}
Pressão X Bocais de microaspersores	8	2.249,5430 ^{**}
Resíduo (b)	228	1,7100
C. V. (%) da parcela		11,31
C. V. (%) da subparcela		2,06

^{**} Significativo a 1% de probabilidade.

Como a interação pressão x bocais de microaspersores foi significativa, adotou-se fazer o seu desdobramento. Às variáveis bocais do microaspersor aplicou-se o teste de média, como mostrado na Tabela 1 do Apêndice C. No caso

da variável pressão para cada bocal de microaspersor, fez-se a análise de regressão, obtendo-se as curvas características vazão em função da pressão.

Na Figura 8 estão apresentadas as curvas características obtidas com o microaspersor MF operando com os bocais de 0,9, 1,2 e 1,8 mm, bem como as equações com os respectivos coeficientes de determinação, em que q é a vazão do microaspersor, expressa em $L h^{-1}$, e H é a pressão de operação do emissor, em kPa.

Notou-se que as equações ajustadas para os bocais são do tipo potencial, com coeficiente da variável pressão assumindo valores próximos de 0,5, o que indica que o microaspersor trabalha em regime de fluxo turbulento, de acordo com Keller e Karmeli (1975).

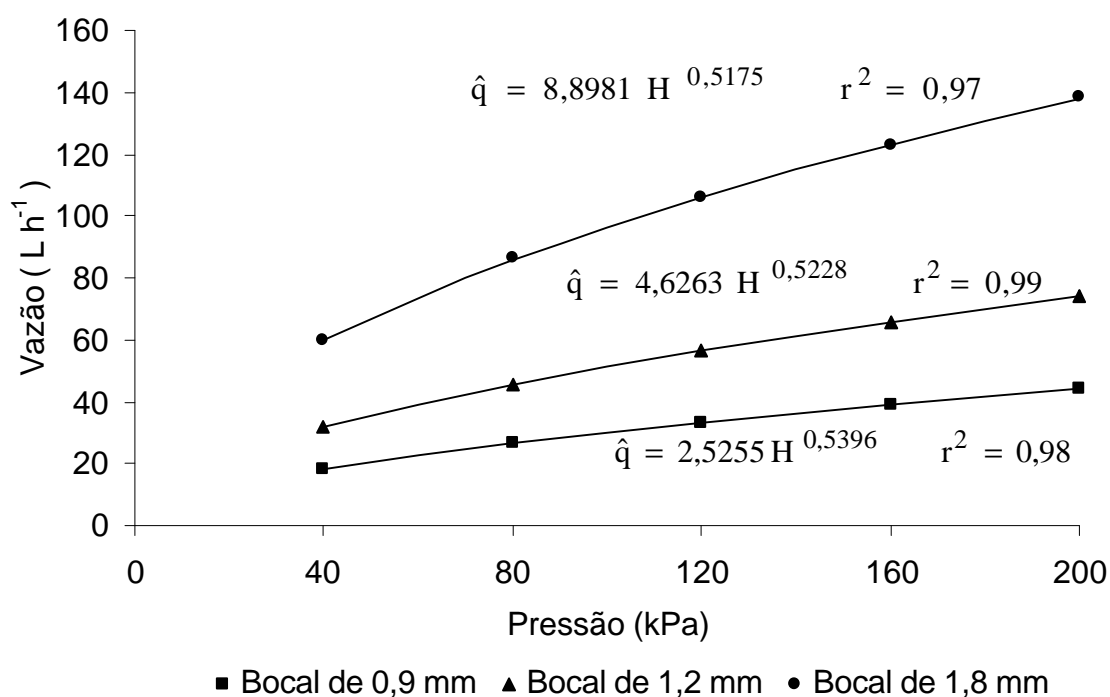


Figura 8 - Curvas características da vazão-pressão do microaspersor MF operando com água e com os bocais de 0,9, 1,2 e 1,8 mm e os respectivos coeficientes de determinação.

4.4. Suscetibilidade ao entupimento de microaspersor MF operando com água residuária de suinocultura

Na operação do microaspersor MF com água residuária de suinocultura, avaliou-se apenas o entupimento ocasionado por agente físico (partículas sólidas).

Um dos maiores problemas provocados por efluentes de água residuária de suinocultura usados em sistema de irrigação localizada é o entupimento de emissores, principalmente quando a seção transversal de escoamento possui diâmetro pequeno, resultando em baixa descarga. Para possibilitar a aplicação de água residuária por meio desse tipo de sistema de irrigação, é necessário o emprego de um sistema de filtragem eficiente para remover grande parte dos sólidos presentes. De acordo com Ravina et al. (1992), todos os elementos que contribuem para o entupimento de emissores estão presentes nos reservatórios de água residuária, pois são grandes e abertos e, nesse caso, demanda maior controle na qualidade da água.

A ARS utilizada apresentou concentração de sólidos em suspensão superior aos valores indicados como limite de risco severo para irrigação por gotejamento, como descrito por Bucks et al., citados por Nakayama e Bucks (1991). Porém, em pesquisa realizada por Pitts (Pitts et al., 1990), foi evidenciado que águas contendo concentração de sólidos em suspensão superiores a 500 ppm não provocaram entupimentos de emissores com a filtração de partículas maiores. Tais resultados evidenciam que a água residuária de suinocultura, quando submetida a um sistema de filtragem eficiente, pode ser utilizada na fertirrigação de culturas em sistema de irrigação localizada.

4.4.1. Vazão média do microaspersor

A vazão média do microaspersor pode ser considerada um bom parâmetro para avaliar o entupimento, como descrevem os trabalhos desenvolvidos por Nakayama et al. (1977) e Ravina et al. (1992).

Nas Tabelas 14, 15 e 16, apresentam-se os valores de vazão média dos diâmetros de bocais e os diversos tempos de avaliação, para filtragem de ARS em telas com malhas de 40, 60 e 80 mesh, respectivamente.

Tabela 14 - Vazão média do microaspersor, em $L h^{-1}$, expressa como percentual da vazão nominal (%), para os diâmetros de bocais e os diversos tempos de avaliação, usando ARS filtrada em tela com malha de 40 mesh

Tempo de Funcionamento (h)	Diâmetro do Bocal					
	0,9 mm		1,2 mm		1,8 mm	
0	37,78	(100)	62,30	(100)	121,06	(100)
4	18,60	(50)	61,71	(99)	122,58	(101)
8	37,12	(98)	62,32	(100)	122,17	(101)
12	37,62	(100)	61,84	(99)	121,81	(101)
16	37,90	(100)	61,68	(99)	122,42	(101)
20	37,25	(99)	62,54	(100)	121,19	(100)
24	37,79	(100)	62,18	(100)	119,75	(99)
28	37,97	(101)	63,12	(101)	120,39	(99)
32	38,16	(101)	61,75	(99)	122,10	(101)
36	37,80	(100)	62,14	(100)	122,08	(101)
40	37,59	(100)	62,07	(100)	122,64	(101)

Tabela 15 - Vazão média do microaspersor, em $L h^{-1}$, expressa como percentual da vazão nominal (%), para os diâmetros de bocais e os diversos tempos de avaliação, usando ARS filtrada em tela com malha de 60 mesh

Tempo de Funcionamento (h)	Diâmetro do Bocal					
	0,9 mm		1,2 mm		1,8 mm	
0	35,60	(100)	60,47	(100)	114,40	(100)
4	35,57	(100)	60,31	(100)	114,46	(100)
8	35,50	(100)	60,25	(100)	115,34	(101)
12	35,65	(100)	60,17	(99)	114,50	(100)
16	35,49	(100)	40,42	(67)	115,26	(101)
20	35,35	(99)	61,57	(102)	112,41	(98)
24	35,33	(99)	61,20	(101)	112,41	(98)
28	35,26	(99)	60,99	(101)	112,18	(98)
32	35,08	(99)	61,26	(101)	114,92	(100)
36	35,41	(99)	61,36	(101)	114,01	(100)
40	35,31	(99)	61,08	(101)	113,60	(99)

Tabela 16 - Vazão média do microaspersor, em $L h^{-1}$, expressa como percentual da vazão nominal (%), para os diâmetros de bocais e os diversos tempos de avaliação, usando ARS filtrada em tela com malha de 80 mesh

Tempo de Funcionamento (h)	Diâmetro do Bocal					
	0,9 mm		1,2 mm		1,8 mm	
0	36,14	(100)	63,65	(100)	119,62	(100)
4	35,98	(100)	63,27	(99)	119,26	(100)
8	35,95	(99)	63,58	(100)	118,21	(99)
12	35,99	(100)	63,03	(99)	118,60	(99)
16	36,16	(100)	63,34	(99)	117,76	(98)
20	36,00	(100)	63,33	(99)	116,99	(98)
24	36,08	(100)	63,36	(100)	118,86	(99)
28	35,95	(99)	63,51	(100)	118,27	(99)
32	36,17	(100)	63,68	(100)	118,69	(99)
36	36,06	(100)	63,53	(100)	119,03	(99)
40	35,94	(99)	63,51	(100)	118,31	(99)

Os resultados da análise de variância dos efeitos principais e das interações simples e tripla foram não-significativos, a 5% de probabilidade, pelo teste F (Tabela 17).

Tabela 17 - Resumo da análise de variância da vazão para telas, diâmetros de bocais e horas de funcionamento do sistema

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios
Telas	2	16,0649 ^{ns}
Bocais	2	40,0197 ^{ns}
Telas x Bocais	4	85,7217 ^{ns}
Resíduos (a)	9	90,9121
Horas	10	65,7884 ^{ns}
Horas x Telas	20	76,3089 ^{ns}
Horas x Bocais	20	82,0596 ^{ns}
Horas x Telas x Bocais	40	73,9636 ^{ns}
Resíduo (b)	90	72,8560
Total	197	
CV (%) parcela		9,63
CV (%) subparcela		8,62

^{ns} Não-significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Apesar de os efeitos principais e de as interações não serem significativos, a operacionalidade e a eficiência do sistema de irrigação localizada estão diretamente relacionadas ao entupimento de emissores. Nesse caso, os

entupimentos ocorridos quando o microaspersor operou com os bocais de 0,9 e 1,2 mm, aplicando água residuária filtrada em telas de 40 e 60 mesh, respectivamente, devem ser levados em consideração. Assim, o sistema de filtragem deve ser suficientemente capaz de reter os sólidos (pêlos de suínos) presentes na ARS para evitar o entupimento dos bocais dos microaspersores.

Nas Tabelas 14, 15 e 16, observa-se que, de maneira geral, não houve redução de vazão nos três diâmetros de bocais operando nas diferentes concentrações de sólidos totais, obtidas com o uso de telas com malhas de 40, 60 e 80 mesh, respectivamente, durante o período do ensaio. Apenas dois entupimentos foram verificados quando o microaspersor operou com bocais de 0,9 mm e 1,2 mm, aplicando água residuária de suinocultura filtrada em telas de 40 e 60 mesh (Tabelas 14 e 15), nos tempos de 4 e 16 horas de funcionamento, respectivamente. Os entupimentos foram provocados por pêlos de suínos, com uma redução de 50 e 33% da vazão relativa nos bocais de 0,9 e 1,2 mm, respectivamente. Esses resultados encontram-se próximos dos valores de redução de vazão obtidos por Oron et al. (1979), os quais alcançaram 29% utilizando água residuária. Nakayama et al. (1977) observaram reduções de vazão de 25 a 50%, causadas principalmente por mucilagem de bactéria, em gotejadores com dois anos de funcionamento. De acordo com Pizarro (1996), esses diâmetros de bocais são considerados de média suscetibilidade ao entupimento, pois o risco de entupimento de um emissor depende do diâmetro mínimo do orifício de saída e da velocidade da água. Segundo Ravina et al. (1992) e Boman (1995), emissores com maiores vazões são menos suscetíveis ao entupimento.

As telas com malhas de 40 e 60 e 80 mesh não apresentaram diferença estatística, no nível de 5% de probabilidade, pelo teste F. Porém, as telas com malhas de 40 e 60 mesh deixaram passar pêlos de suínos, responsáveis pelo entupimento dos bocais de 0,9 mm e 1,2 mm, o que é indesejável do ponto de vista operacional do sistema no campo. Tal fato não ocorreu para a tela de 80 mesh, como pode ser observado na Tabela 16. Essa tela pode ser recomendada para filtragem da água residuária de suinocultura para sua disposição final no solo, através de sistemas de irrigação por microaspersão, com base em entupimento ocasionado por agente físico.

A presença de pêlos é um dos problemas mais sérios no bombeamento de águas residuárias de suinocultura e bovinocultura, pois podem provocar o entupimento de rotores de bombas, além dos emissores de sistemas de irrigação. De acordo com Oliveira (1996) e Soccol (1996), a presença de sólidos em suspensão nas águas residuárias de bovinocultura e suinocultura, respectivamente, podem provocar o entupimento do canal de lubrificação das gaxetas de bombas centrífugas, ocasionando aquecimento excessivo do mancal e do eixo. Esses resultados evidenciam a importância de uso de um sistema de filtragem eficiente para possibilitar o bombeamento e a disposição adequada dessas águas no solo.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

As águas residuárias geradas pela atividade suinícola em regime de confinamento têm-se transformado em sério problema ambiental devido ao seu grande potencial poluidor. Porém, quando usadas com base em critérios agronômicos corretos, podem se constituir em fontes de fertilizantes e ser utilizada em sistemas de irrigação. Nos últimos anos, o uso dos sistemas de irrigação localizada para disposição final desses resíduos no solo tem sido uma promissora alternativa. Entretanto, pouco se conhece sobre o comportamento da água residuária de suinocultura em tubulações de polietileno, bem como o desempenho de microaspersores em sua aplicação, dificultando o dimensionamento de projetos.

Nesse contexto, desenvolveu-se o presente trabalho com os seguintes objetivos: (a) ajustar uma equação de perda de carga contínua em tubulação de polietileno, de vários diâmetros, conduzindo água residuária de suinocultura com diferentes concentrações de sólidos totais; e (b) avaliar a suscetibilidade ao entupimento do microaspersor operando com água residuária de suinocultura filtrada em telas metálicas.

Neste estudo, utilizaram-se tubos com 13, 16, 20 e 26 mm de diâmetros nominais e a água residuária de suinocultura (ARS) nas concentrações de 1,15; 1,24; 1,43; e 1,75 g L⁻¹ de sólidos totais, além de água pura. A perda de carga foi avaliada em trechos de 4 m de comprimento, com o uso de piezômetros, já a vazão o foi por meio do método direto.

Para avaliar a suscetibilidade ao entupimento, utilizou-se o microaspersor MF da Carborundum com bocais de 0,9, 1,2 e 1,8 mm de diâmetro. A ARS empregada nos ensaios foi filtrada em telas de 40, 60 e 80 mesh.

O experimento foi montado num esquema de parcelas subdivididas, tendo na parcela um esquema fatorial 3 x 3 (três diâmetros de bocais e três tipos de telas) e nas subparcelas os intervalos de tempo (0, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 e 40 horas), no delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. As vazões foram determinadas a cada quatro horas de atividade do sistema, que trabalhou oito horas por dia. O entupimento foi considerado quando se constatava uma redução de vazão igual ou superior a 15% da vazão inicial, medida no início de cada teste, para cada tela utilizada.

De acordo com os resultados, concluiu-se que:

- O coeficiente de Hazen-Williams (C) variou de forma acentuada para um mesmo material, nos vários diâmetros e concentrações de sólidos totais estudados, inviabilizando o ajuste de uma equação com um valor médio para polietileno.
- As equações de perda de carga obtidas pelos modelos de Duffy e Titchener e Hazen-Williams modificado apresentaram excelentes ajustes, com coeficientes de determinação iguais a 0,9923 e 0,9989, respectivamente. Recomenda-se o seu uso para o cálculo de perda de carga contínua em escoamento de águas residuárias de suinocultura em tubulações de polietileno.
- As equações de perda de carga contínua para escoamento de água não devem ser usadas para ARS com concentrações de sólidos totais de 1,15 a 1,75 g L⁻¹.
- Telas metálicas de 40 e 60 mesh deixaram passar pêlos de suínos presentes na ARS, provocando o entupimento do microaspersor operando com bocais de 0,9 e 1,2 mm, respectivamente.
- A filtragem da ARS deve ser feita com tela de 80 mesh ou superior, para evitar o entupimento provocado por pêlos de suínos.
- O microaspersor com diâmetro de bocal igual a 1,8 mm foi adequado para todos os tipos de malhas de telas utilizadas na filtragem da ARS.
- O sistema de filtragem testado apresentou-se prático e eficiente quando se usou a tela de 80 mesh.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Requisitos mínimos para elaboração de projeto de sistema de irrigação localizada.** São Paulo: ABNT, 1986. 8 p. PNBR 12:02.08-022.

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

ADIN, A.; SACKS, M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 6, p. 813-826, 1991.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 19. ed. New York: APHA, WWA, WPCR, 1995.

ANDREADAKIS, A.D. Anaerobic digestion of piggery wastes. **Wat. Sci. Tech.**, v. 25, n. 1, p. 9-16, 1992.

AZEVEDO, H. M. Irrigação localizada. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, n. 139, p. 40-53, 1986.

AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica.** 7. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982. 336 p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação.** 6 ed. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1995. 657 p.

BOMAN, B. J. Effects of orifice size on microsprinkler clogging rates. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n. 6, p. 839-843, 1995.

BOMAN, B. J.; PARSONS, L.R. Microsprinkler experiences in Florida citrus. **Applied Engineering in Agriculture**, New York, v. 15, n. 5, p. 465-475, 1999.

BRALTS, V. F.; EDWARDS, D. M.; WU, I. P. Drip irrigation design and evaluation based on the statistical iniformity concept. **Advances in Irrigation**, New York, p. 67-117, 1987.

BRALTS, V. F.; WU, I. P.; GITLIN, H. M. Emitter plugging and drip irrigation lateral line hydraulics. **Transactions oh the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n. 5, p. 1274-1281, 1982.

BRALTS, V. F.; WU, I. P.; GITLIN, H. M. Manufacturing variation and drip irrigation uniformity. **Transactions oh the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 1, p. 113-119, 1981.

CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. Pipeline transport of livestock waste slurries. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 19, n. 5, p. 898-906, 1976b.

CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. Rheological properties of aerated poultry waste slurries. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 19, n. 5, p. 128-133, 1976a.

DUFFY, G. G. A review and evaluation of design methods for calculations friction loss in stock piping systems. **Tappi**, Atlanta, v. 59, n. 8, p. 124-127, August, 1976.

DUFFY, G. G.; TITCHENER, A. L. Design procedures for obtaining pipe friction loss for chemical pulps. **Tappi**, Atlanta, v. 57, n. 5, p. 162-166, May, 1974.

GILBERT, R. G.; FORD, H. W. Operational principles/emitter clogging. In: NAKAYAMA, F. S.; BULCKS, D. A. **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. cap. 3, p. 142-163.

GILBERT, R. G.; NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Trickle irrigation: prevention of clogging. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, n. 3, p. 514-519, 1979.

HAZEN, A.; WILLIAMS, G. S. **Hydraulic tables**. New York: John Wiley & Sons, 1963. 120 p.

HILLS, D. J.; BRENES, M. J. Microirrigation of wastewater effluent using drip tape. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 17, n. 3, p. 303-308, 2001.

HUGHES, W. F.; BRIGHTON, J. A. **Dinâmica dos fluidos**. São Paulo: Mcgraw-Hill, 1974. 358 p.

HUMP, H.H.; KRIST, H. **Laboratory manual for the examination of water, waste water, and soil**. Weinheim: VCH, 1992. 190 p.

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

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird splinkles manufacturing corporation, 1975, 133 p.

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

KONZEN, E. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em forma líquida**. Belo Horizonte: UFMG, Escola de Veterinária, 1980. 556 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KUMAR, M.; BARTELETT, H. D.; MOHSENIN, N. N. Flow properties of animal waste slurries. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 15, n. 2, p. 718-722, 1972.

LAU, L. S.; YOUNG, R. H. F.; LOH, P. C.; BRALTS, V. F.; LIU, E. F. F. Recycling of sewage effluent by sugarcane irrigation: a post treatment study. In: **Water resources research center**. Manoa, Honolulu, University of Hawaii, 1978. 42 p. (Technical Report, 212).

LEE, P. F. W., DUFFY, G. G. An analysis of the drag reducing regime of pulp suspension flow. **Tappi**, Atlanta, v. 59, n. 8, p. 119-123, August, 1976.

LO MONACO, P. A. **Influência da granulometria do material orgânico filtrante na eficiência do tratamento de águas residuárias**. Viçosa, MG: UFV, DGU, 2001. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MOLLER, K. General correlations of pipe friction data for pulp suspensions. **Tappi**, Atlanta, v. 59, n. 8, p. 111-114, August, 1976.

NAKAYAMA, F. S.; BULKS, D. A. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**. St Joseph, v. 24, n. 1, p. 77-80, 1981.

NAKAYAMA, F. S.; BULKS, D. A.; FRENCH, O. F. Reclaiming partially clogged trickle. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 20, n. 2, p. 278-280, 1977.

NAKAYAMA, F. S.; BULKS, D. A. Water quality in dril/trickle irrigation: a review. **Irrigation Science**, New York, v. 12, p. 187-192, 1991.

OLIVEIRA, R. A. **Desempenho de bomba centrífuga operando com esterco bovino líquido**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1996. 73 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ORON, G.; MALACH, Y.; HOFFMAN, Z.; MANOR, Y.; De-MALACH, Y. Secondary wastewater reuse. **Water and Irrigation, Review**, v. 13, n. 1, p.17-20, 1993.

ORON, G.; SHELEF, G.; ZUR, B. Stormwater an reclaimed effluent in trickle irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 106, n. 4, p. 299-310, 1980.

ORON, G.; SHELEF, G.; TURZYNSKI, B. Trickle irrigation using treated wastewaters. **Jornal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 105, n. 2 p. 175-185, 1979.

PAES, L. A. D. **Características hidráulicas dos microaspersores Dantas MA120 e Irtec e das linhas laterais em sistemas de irrigação por microaspersão**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1985. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PERDOMO, C. C. Uso racional de dejetos de suínos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE SUINOCULTURA, 1., 1996, Campinas. **Anais...** Campinas, SP: Gessuli, 1996. p. 1-19.

PERDOMO, C. C.; LIMA, G. J. M. M. Considerações sobre a questão dos dejetos e o meio ambiente. In: **Suinocultura Intensiva - Produção, Manejo e Saúde do Rebanho**. SOBESTIANSKY, J.; WENTZ, I.; SILVEIRA, P. R. S. da; SESTI, L., A. C. (Eds.). Brasília: Embrapa - CNPSA, 1998. 388 p.

PITTS, D.J.; HAMAN, D.Z.; SMAJSTRLA, A.G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems**. Florida: Cooperative Extension Service, University of Florida, 1990. p. 1-12. Bulletin, 258.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, Israel, v. 13, n. 1, p. 129-139, 1992.

REZENDE, R. S. **Suscetibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica e avaliação do desentupimento via cloração da água de irrigação**. Piracicaba, SP. ESALQ, 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

ROUSE, H. Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence. In: **Classic paper in hydraulics**. New York: ASAE, 1982. p. 52-94.

SADOVSKI, A. Y.; FATTAL, B.; GOLDBERG, D. Microbial Contamination of Vegetables Irrigated with Sewage Effluent by the Drip Method. **Journal of Food Protection**, v. 41, n. 5, p. 336-340, 1978.

SAMPAIO, S. C.; DENICULI, W.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, D. D. da; CECON, P. R.; PINTO, F. A. Equações de perda de carga distribuída para tubulações comerciais conduzindo água residuária de bovinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 20, n. 2, p. 108-118, mai. 2000.

SAMPAIO, S. C.; DENICULI, W.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, D. D. da; MATOS, A. T.; MARTINEZ, M. A. Perda de carga contínua em tubulações conduzindo água residuária da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 391-396. 2001.

SAMPAIO, S. C. **Perda de carga em tubulações comerciais conduzindo águas residuárias de bovinocultura e suinocultura**. Viçosa, MG: UFV, Impr, Univ., 1999. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SILVA, P. R. Estudo das características dos resíduos das instalações de confinamentos de suínos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA, 7., 1973, Salvador. **Separata**: São Carlos: EESC-USP, 1973. 18 p.

SMAJSTRIA, A. G. ; BOMAN, B. J. **flushing procedures for microirrigation systems**. Florida: Cooperative Extension Service, University of Florida, 1999. p. 1-12. Bulletin 333.

SOCOL, J. O. **Desempenho de bomba centrífuga operando com esterco suíno líquido**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1996. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SOLOMON, K. H. Global uniformity of trickle emitters. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 4, p. 1151-1158, 1985.

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

STALEY, L. M.; BULLEY, N. R.; WINDT, T. A. Pumping characteristics, biological and chemical properties of dairy manure. **ASAE Publication Proc.**, St. Joseph, n. 271, p. 142-145, 1971.

TANJI, K. K. Irrigation with marginal quality waters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 3, p. 165-169, 1997.

TROOIEN, T. P.; LAMM, F. R.; STONE, L. R.; ALAM, M.; ROGERS, D. H.; CLARK, G. A.; SCHLEGEL, A. J. Subsurface drip irrigation using livestock wastewater: dripline flow rates. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 16, n. 5, p. 505-508, 2000.

VERMEIREN, I.; JOBLING, G.A. **Localized irrigation**. Rome: FAO, 1980. 203 p. (Irrigation and Drainage Paper, 36).

VON BERNUTH, R. D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 116, n. 2, p. 294-297, 1990.

WU, I. P.; LIN, O. Y.; LAU, L. S. Plugging evaluation in the re-use of sewage effluent by drip irrigation. In: **Irrigation and Drainage-Proceeding ASCE Speciality Conference, Honolulu**, Hawaii: ASCE, 1991. p. 780-786.

YARDENI, A.; BENYAMIMI, A.; RUBENSTEIN, Z. Managing effluents for low volume irrigation. **Water and Irrigation Review**, v. 11, n. 4, p. 4-7, 1992.

YUAN, Z.; WALLER, P. M.; CHOI, C. Y. Effects of organic acids on salt precipitation in drip emitters and soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph. v. 41, n. 6, p. 1689-1696, 1998.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1A - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média do escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C), fator de atrito (f) e número de Reynolds (Rey), em tubo de polietileno com diâmetro de 15,47 mm conduzindo água na temperatura de 25 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f	Rey
0,0312	0,000096	0,5085	129	0,0365	7.789
0,0440	0,000116	0,6189	130	0,0348	9.479
0,0572	0,000134	0,7149	131	0,0339	10.949
0,0703	0,000153	0,8167	133	0,0320	12.508
0,0818	0,000175	0,9292	140	0,0287	14.233
0,0933	0,000184	0,9768	137	0,0296	14.961
0,1053	0,000197	1,0465	137	0,0291	16.028
0,1258	0,000225	1,1988	143	0,0265	18.361
0,1412	0,000245	1,3012	146	0,0253	19.930
0,1560	0,000255	1,3558	144	0,0257	20.766
0,1677	0,000265	1,4123	144	0,0255	21.632
0,1813	0,000279	1,4843	145	0,0249	22.734
0,1947	0,000289	1,5357	145	0,0250	23.522
0,2130	0,000308	1,6367	147	0,0241	25.068
0,2312	0,000325	1,7268	148	0,0235	26.448
0,2513	0,000346	1,8409	151	0,0225	28.196
0,2687	0,000353	1,8760	149	0,0231	28.733
0,2847	0,000365	1,9429	149	0,0228	29.758
0,2997	0,000376	2,0011	149	0,0227	30.650
0,3103	0,000396	2,1076	154	0,0212	32.281

Tabela 2A - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média do escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C), fator de atrito (f) e número de Reynolds (Rey), em tubo de polietileno com diâmetro de 19,79 mm conduzindo água na temperatura de 25 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f	Rey
0,0220	0,000164	0,5334	140	0,0300	10.450
0,0377	0,000204	0,6645	130	0,0331	13.020
0,0518	0,000252	0,8186	135	0,0300	16.040
0,0647	0,000290	0,9424	138	0,0282	18.465
0,0772	0,000320	1,0392	138	0,0277	20.362
0,0945	0,000369	1,1996	143	0,0255	23.505
0,1088	0,000407	1,3224	146	0,0241	25.912
0,1247	0,000428	1,3899	143	0,0250	27.234
0,1398	0,000447	1,4531	140	0,0257	28.471
0,1542	0,000490	1,5939	146	0,0235	31.230
0,1700	0,000504	1,6392	142	0,0245	32.117
0,1872	0,000537	1,7447	144	0,0238	34.186
0,2010	0,000580	1,8868	150	0,0219	36.970
0,2142	0,000595	1,9344	148	0,0222	37.901
0,2355	0,000621	2,0197	147	0,0224	39.573
0,2512	0,000637	2,0694	145	0,0227	40.547
0,2633	0,000666	2,1659	148	0,0218	42.438
0,2763	0,000680	2,2096	148	0,0219	43.294
0,2957	0,000718	2,3333	150	0,0210	45.718
0,3138	0,000735	2,3910	149	0,0213	46.850

Tabela 3A - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média do escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C), fator de atrito (f) e número de Reynolds (Rey), em tubo de polietileno com diâmetro de 25,76 mm conduzindo água na temperatura de 25 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f	Rey
0,0330	0,000399	0,7658	136	0,0284	19.530
0,0448	0,000504	0,9671	146	0,0242	24.666
0,0588	0,000558	1,0703	140	0,0259	27.298
0,0733	0,000655	1,2576	146	0,0234	32.076
0,0852	0,000729	1,3988	149	0,0220	35.677
0,0987	0,000771	1,4794	146	0,0227	37.731
0,1147	0,000835	1,6016	146	0,0225	40.849
0,1262	0,000890	1,7071	147	0,0218	43.538
0,1370	0,000909	1,7438	144	0,0227	44.475
0,1450	0,000995	1,9098	153	0,0200	48.710
0,1552	0,001019	1,9559	151	0,0205	49.885
0,1653	0,001093	2,0978	157	0,0189	53.503
0,1767	0,001110	2,1296	153	0,0196	54.314
0,1863	0,001146	2,1987	154	0,0194	56.078
0,2082	0,001196	2,2942	151	0,0199	58.514

APÊNDICE B

Tabela 1B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 15,47 mm conduzindo ARS na concentração de 1,15 g L⁻¹, na temperatura de 26 °C

J (mm ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (ms ⁻¹)	C	f
0,0338	0,000103	0,5489	133	0,03408
0,0418	0,000118	0,6266	135	0,03233
0,0548	0,000137	0,7281	136	0,03139
0,0667	0,000157	0,8339	140	0,02910
0,0772	0,000170	0,9045	140	0,02863
0,0900	0,000186	0,9904	142	0,02785
0,1022	0,000200	1,0662	142	0,02728
0,1143	0,000216	1,1470	144	0,02638
0,1290	0,000229	1,2179	143	0,02640
0,1428	0,000240	1,2748	142	0,02668
0,1570	0,000251	1,3367	141	0,02667
0,1653	0,000255	1,3549	139	0,02734
0,1762	0,000270	1,4379	143	0,02586
0,1903	0,000290	1,5436	147	0,02425
0,2067	0,000301	1,6030	146	0,02441
0,2237	0,000319	1,6974	148	0,02356
0,2450	0,000337	1,7923	149	0,02315
0,2617	0,000355	1,8864	151	0,02232
0,2833	0,000380	2,0224	156	0,02103
0,3065	0,000390	2,0750	153	0,02161

Tabela 2B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 19,79 mm conduzindo ARS na concentração de 1,15 g L⁻¹, na temperatura de 26 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0617	0,000290	0,9416	141	0,02701
0,0705	0,000316	1,0262	143	0,02599
0,0787	0,000345	1,1200	147	0,02435
0,0893	0,000363	1,1792	145	0,02495
0,1018	0,000385	1,2518	143	0,02523
0,1142	0,000423	1,3766	148	0,02339
0,1277	0,000438	1,4223	144	0,02450
0,1417	0,000475	1,5432	148	0,02310
0,1538	0,000499	1,6236	149	0,02266
0,1682	0,000520	1,6897	148	0,02287
0,1778	0,000545	1,7726	150	0,02197
0,1877	0,000558	1,8128	149	0,02217
0,2000	0,000580	1,8854	150	0,02185
0,2120	0,000604	1,9624	151	0,02138
0,2275	0,000637	2,0711	154	0,02059
0,2400	0,000651	2,1161	152	0,02081
0,2558	0,000682	2,2181	154	0,02019
0,2717	0,000705	2,2932	155	0,02006
0,2982	0,000744	2,4195	155	0,01978
0,3125	0,000764	2,4830	155	0,01968

Tabela 3B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 25,76 mm conduzindo ARS na concentração de 1,15 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0168	0,000285	0,5468	140	0,02845
0,0298	0,000397	0,7611	143	0,02603
0,0447	0,000514	0,9872	149	0,02317
0,0575	0,000585	1,1234	148	0,02303
0,0712	0,000650	1,2468	147	0,02314
0,0855	0,000737	1,4150	151	0,02158
0,1047	0,000819	1,5719	150	0,02141
0,1177	0,000904	1,7354	156	0,01975
0,1333	0,000951	1,8245	153	0,02024
0,1473	0,001038	1,9911	158	0,01878
0,1617	0,001081	2,0743	157	0,01899
0,1735	0,001115	2,1391	156	0,01916
0,1863	0,001181	2,2662	159	0,01834
0,2008	0,001272	2,4401	164	0,01705
0,2158	0,001308	2,5104	162	0,01731

Tabela 4B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 12,62 mm conduzindo ARS na concentração de 1,24 g L⁻¹, na temperatura de 26 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0533	0,000076	0,6066	131	0,03588
0,0618	0,000083	0,6654	132	0,03458
0,0715	0,000090	0,7212	133	0,03404
0,0822	0,000098	0,7856	134	0,03297
0,0985	0,000112	0,8984	139	0,03022
0,1097	0,000116	0,9242	135	0,03179
0,1237	0,000124	0,9898	135	0,03125
0,1368	0,000131	1,0464	136	0,03094
0,1507	0,000139	1,1091	136	0,03033
0,1628	0,000145	1,1606	137	0,02993
0,1737	0,000154	1,2274	140	0,02854
0,1842	0,000158	1,2670	140	0,02841
0,2053	0,000170	1,3600	142	0,02749
0,2230	0,000177	1,4175	141	0,02748
0,2355	0,000185	1,4782	143	0,02669
0,2467	0,000191	1,5252	144	0,02626
0,2625	0,000195	1,5615	142	0,02666
0,2710	0,000198	1,5791	141	0,02691
0,2872	0,000204	1,6298	142	0,02677
0,3065	0,000214	1,7102	143	0,02595

Tabela 5B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 15,47 mm conduzindo ARS na concentração de 1,24 g L⁻¹, na temperatura de 26 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0500	0,000130	0,6939	136	0,03151
0,0657	0,000154	0,8181	139	0,02978
0,0750	0,000167	0,8902	140	0,02873
0,0830	0,000180	0,9586	143	0,02742
0,0967	0,000195	1,0354	142	0,02737
0,1042	0,000202	1,0770	142	0,02726
0,1142	0,000216	1,1487	144	0,02626
0,1215	0,000224	1,1929	145	0,02592
0,1292	0,000235	1,2489	147	0,02514
0,1402	0,000247	1,3131	148	0,02467
0,1502	0,000257	1,3677	148	0,02437
0,1700	0,000270	1,4358	146	0,02503
0,1882	0,000286	1,5235	146	0,02460
0,1988	0,000297	1,5810	147	0,02414
0,2137	0,000315	1,6785	150	0,02302
0,2300	0,000322	1,7147	148	0,02374
0,2470	0,000345	1,8341	152	0,02229
0,2690	0,000360	1,9131	151	0,02231
0,2917	0,000373	1,9869	150	0,02242
0,3180	0,000392	2,0869	151	0,02216

Tabela 6B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 19,79 mm conduzindo ARS na concentração de 1,24 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0258	0,000173	0,5612	135	0,03185
0,0388	0,000223	0,7249	140	0,02869
0,0520	0,000260	0,8461	139	0,02820
0,0665	0,000298	0,9703	140	0,02743
0,0805	0,000334	1,0857	141	0,02652
0,0937	0,000368	1,1970	143	0,02538
0,1083	0,000404	1,3148	146	0,02433
0,1207	0,000427	1,3895	145	0,02427
0,1372	0,000468	1,5225	148	0,02298
0,1507	0,000496	1,6110	149	0,02254
0,1680	0,000522	1,6962	148	0,02267
0,1830	0,000537	1,7466	146	0,02329
0,1982	0,000581	1,8876	151	0,02160
0,2173	0,000607	1,9747	150	0,02164
0,2353	0,000633	2,0585	150	0,02156
0,2458	0,000661	2,1473	153	0,02070
0,2593	0,000677	2,2016	152	0,02077
0,2783	0,000712	2,3133	154	0,02019
0,2905	0,000733	2,3817	155	0,01988
0,3155	0,000761	2,4754	154	0,01999

Tabela 7B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 25,76 mm conduzindo ARS na concentração de 1,24 g L⁻¹, na temperatura de 26 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0315	0,000420	0,8059	147	0,02452
0,0433	0,000494	0,9482	146	0,02436
0,0568	0,000580	1,1130	148	0,02319
0,0698	0,000656	1,2585	150	0,02229
0,0830	0,000736	1,4122	153	0,02103
0,0995	0,000815	1,5633	153	0,02058
0,1165	0,000877	1,6836	152	0,02077
0,1272	0,000937	1,7971	155	0,01990
0,1420	0,001048	2,0106	163	0,01775
0,1568	0,001088	2,0879	160	0,01818
0,1717	0,001129	2,1656	158	0,01850
0,1862	0,001180	2,2645	159	0,01835
0,2013	0,001290	2,4758	166	0,01660
0,2148	0,001331	2,5538	165	0,01665
0,2283	0,001335	2,5606	161	0,01760

Tabela 8B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 12,62 mm conduzindo ARS na concentração de 1,43 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0363	0,000066	0,5272	140	0,03237
0,0505	0,000073	0,5832	129	0,03677
0,0625	0,000085	0,6764	134	0,03382
0,0803	0,000096	0,7693	133	0,03361
0,1012	0,000110	0,8808	134	0,03229
0,1118	0,000117	0,9363	135	0,03159
0,1297	0,000128	1,0219	136	0,03075
0,1417	0,000135	1,0772	137	0,03023
0,1497	0,000141	1,1286	139	0,02909
0,1570	0,000145	1,1597	140	0,02890
0,1633	0,000149	1,1944	141	0,02835
0,1750	0,000153	1,2268	139	0,02879
0,1892	0,000163	1,2999	141	0,02772
0,2033	0,000171	1,3678	143	0,02691
0,2200	0,000177	1,4166	142	0,02714
0,2342	0,000186	1,4846	144	0,02631
0,2523	0,000194	1,5513	144	0,02596
0,2687	0,000197	1,5779	142	0,02672
0,3022	0,000212	1,6985	143	0,02593
0,3175	0,000222	1,7726	146	0,02502

Tabela 9B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 15,47 mm conduzindo ARS na concentração de 1,43 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0522	0,000135	0,7162	137	0,03087
0,0632	0,000150	0,7996	138	0,02998
0,0747	0,000168	0,8919	141	0,02849
0,0865	0,000181	0,9609	140	0,02843
0,0947	0,000194	1,0317	143	0,02699
0,1087	0,000209	1,1119	144	0,02668
0,1238	0,000225	1,1982	144	0,02618
0,1380	0,000240	1,2758	145	0,02573
0,1513	0,000248	1,3174	142	0,02646
0,1600	0,000259	1,3753	144	0,02567
0,1747	0,000278	1,4813	148	0,02416
0,1807	0,000286	1,5206	149	0,02371
0,1887	0,000299	1,5922	153	0,02259
0,2018	0,000305	1,6250	150	0,02320
0,2103	0,000323	1,7186	155	0,02161
0,2283	0,000341	1,8141	157	0,02106
0,2448	0,000351	1,8657	155	0,02135
0,2685	0,000362	1,9274	153	0,02194
0,2957	0,000401	2,1326	160	0,01973
0,3180	0,000412	2,1906	158	0,02011

Tabela 10B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 19,79 mm conduzindo ARS na concentração de 1,43 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0573	0,000282	0,9156	143	0,02655
0,0677	0,000298	0,9700	138	0,02793
0,0788	0,000331	1,0761	141	0,02643
0,0935	0,000371	1,2069	145	0,02492
0,1050	0,000403	1,3095	147	0,02378
0,1165	0,000423	1,3744	146	0,02395
0,1292	0,000450	1,4620	147	0,02346
0,1400	0,000467	1,5168	146	0,02363
0,1565	0,000497	1,6153	147	0,02329
0,1713	0,000534	1,7345	150	0,02211
0,1880	0,000557	1,8098	149	0,02229
0,1953	0,000568	1,8451	149	0,02228
0,2078	0,000588	1,9127	149	0,02206
0,2212	0,000619	2,0122	152	0,02121
0,2342	0,000657	2,1351	156	0,01995
0,2500	0,000672	2,1834	154	0,02036
0,2580	0,000680	2,2096	153	0,02052
0,2725	0,000724	2,3535	158	0,01910
0,2905	0,000731	2,3753	154	0,01999
0,3107	0,000762	2,4766	155	0,01967

Tabela 11B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 25,76 mm conduzindo ARS na concentração de 1,43 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0257	0,000381	0,7307	149	0,02430
0,0370	0,000444	0,8516	143	0,02578
0,0488	0,000532	1,0199	147	0,02373
0,0598	0,000606	1,1631	150	0,02235
0,0692	0,000655	1,2568	150	0,02213
0,0813	0,000706	1,3547	148	0,02240
0,0930	0,000779	1,4947	152	0,02104
0,1070	0,000861	1,6522	156	0,01981
0,1217	0,000940	1,8045	159	0,01889
0,1350	0,001000	1,9194	160	0,01852
0,1493	0,001042	1,9994	158	0,01888
0,1653	0,001124	2,1559	161	0,01798
0,1783	0,001147	2,2004	158	0,01862
0,1922	0,001189	2,2820	157	0,01865
0,2042	0,001222	2,3457	156	0,01875

Tabela 12B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 12,62 mm conduzindo ARS na concentração de 1,75 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0358	0,000059	0,4691	125	0,04032
0,0508	0,000074	0,5908	131	0,03606
0,0617	0,000084	0,6682	133	0,03420
0,0832	0,000098	0,7870	133	0,03325
0,1058	0,000113	0,9061	135	0,03192
0,1245	0,000125	0,9968	136	0,03102
0,1320	0,000129	1,0274	136	0,03097
0,1515	0,000140	1,1176	137	0,03003
0,1680	0,000151	1,2040	140	0,02870
0,1825	0,000157	1,2537	139	0,02875
0,1885	0,000162	1,2961	141	0,02779
0,2015	0,000168	1,3451	141	0,02757
0,2165	0,000175	1,4017	142	0,02728
0,2305	0,000182	1,4589	143	0,02682
0,2462	0,000190	1,5184	143	0,02644
0,2617	0,000198	1,5810	144	0,02592
0,2807	0,000203	1,6222	143	0,02641
0,2942	0,000214	1,7137	147	0,02480
0,3127	0,000218	1,7411	144	0,02554
0,3210	0,000222	1,7733	145	0,02528

Tabela 13B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 15,47 mm conduzindo ARS na concentração de 1,75 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0355	0,000112	0,5973	141	0,03020
0,0550	0,000140	0,7465	139	0,02995
0,0702	0,000167	0,8874	145	0,02704
0,0870	0,000181	0,9635	140	0,02844
0,0972	0,000197	1,0476	144	0,02687
0,1113	0,000212	1,1260	143	0,02665
0,1242	0,000231	1,2301	148	0,02491
0,1427	0,000250	1,3289	148	0,02452
0,1578	0,000266	1,4137	149	0,02397
0,1725	0,000280	1,4889	150	0,02362
0,1800	0,000289	1,5362	151	0,02315
0,1925	0,000304	1,6195	154	0,02228
0,2038	0,000316	1,6836	155	0,02183
0,2152	0,000317	1,6882	151	0,02291
0,2350	0,000328	1,7445	148	0,02344
0,2538	0,000346	1,8430	150	0,02268
0,2717	0,000361	1,9225	151	0,02231
0,2818	0,000370	1,9680	152	0,02209
0,2950	0,000376	1,9981	150	0,02243
0,3087	0,000383	2,0371	150	0,02258

Tabela 14B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 19,79 mm conduzindo ARS na concentração de 1,75 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0355	0,000208	0,6757	137	0,03019
0,0457	0,000245	0,7968	141	0,02793
0,0558	0,000280	0,9090	144	0,02624
0,0697	0,000319	1,0370	146	0,02515
0,0813	0,000352	1,1441	148	0,02413
0,0957	0,000383	1,2464	148	0,02391
0,1053	0,000392	1,2739	143	0,02520
0,1227	0,000441	1,4328	148	0,02320
0,1368	0,000470	1,5282	149	0,02275
0,1513	0,000488	1,5853	147	0,02338
0,1655	0,000499	1,6223	143	0,02442
0,1797	0,000543	1,7646	149	0,02240
0,1925	0,000569	1,8489	150	0,02186
0,2100	0,000590	1,9180	149	0,02216
0,2278	0,000642	2,0858	155	0,02033
0,2428	0,000652	2,1193	152	0,02099
0,2580	0,000679	2,2071	153	0,02057
0,2683	0,000699	2,2734	154	0,02016
0,2862	0,000732	2,3805	156	0,01961
0,3133	0,000746	2,4255	151	0,02068

Tabela 15B - Valores de perda de carga unitária (J), vazão (Q), velocidade média de escoamento (V), coeficiente de Hazen-Williams (C) e fator de atrito (f), em tubo de polietileno com diâmetro de 25,76 mm conduzindo ARS na concentração de 1,75 g L⁻¹, na temperatura de 27 °C

J (m m ⁻¹)	Q (m ³ s ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	C	f
0,0125	0,000238	0,4569	137	0,03026
0,0242	0,000361	0,6934	146	0,02540
0,0385	0,000470	0,9010	148	0,02397
0,0550	0,000598	1,1480	155	0,02109
0,0733	0,000662	1,2699	147	0,02298
0,0855	0,000752	1,4430	154	0,02075
0,1023	0,000820	1,5727	152	0,02091
0,1172	0,000907	1,7412	157	0,01953
0,1233	0,000960	1,8426	161	0,01836
0,1400	0,001023	1,9626	160	0,01837
0,1658	0,001101	2,1132	157	0,01877
0,1833	0,001216	2,3333	165	0,01702
0,2008	0,001260	2,4176	162	0,01737
0,2242	0,001320	2,5336	160	0,01765

APÊNDICE C

Tabela 1C - Valores médios de vazão em função da pressão de serviço dos bocais de microaspersor estudados

Pressão kPa	Vazão dos Microaspersores (L h ⁻¹)		
	0,9 mm (Preto)	1,2 mm (Amarelo)	1,8 mm (Laranja)
40	18,51 c	31,82 b	60,07 a
80	26,85 c	45,79 b	86,26 a
120	33,48 c	56,53 b	106,05 a
160	39,10 c	65,79 b	122,86 a
200	44,08 c	73,82 b	138,63 a

¹ Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si, em nível de 1% de probabilidade, pelo teste de Tukey.