

ANÁLISE DOS MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NO DIMENSIONAMENTO DE EMISSORES DO TIPO MICROTUBOS NA MICROIRRIGAÇÃO

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS USED IN MICRO-TUBE TYPE EMITTERS DIMENSIONING IN MICRO-IRRIGATION

DINARA GRASIELA ALVES¹; MARINALDO FERREIRA PINTO²; ANA PAULA ALVES BARRETO DAMASCENO³; CONAN AYADE SALVADOR²; TARLEI ARRIEL BOTREL⁴ E LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA⁵

1 Pós-doutoranda, bolsista PNP/CAPEs, Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, UFRRJ, Seropédica – RJ. Email: dinara_alves@hotmail.com

² Doutor, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, UFRRJ, Seropédica – RJ. Email: mfpufrrj@yahoo.com.br; conanayade@yahoo.com.br

³ Doutora em Ciências, Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ, Piracicaba-São Paulo. Email: pauladamasceno1@hotmail.com.br

⁴ Doutor, Professor Titular, Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ, Piracicaba-São Paulo. Email: tabotrel@usp.br

⁵ Doutor, Professor Associado, Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, UFRRJ, Seropédica – RJ. Email: monitoreambiental@gmail.com

1 RESUMO

A busca por estratégias para otimizar a eficiência de aplicação de água tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. Neste sentido, destaca-se a utilização de sistemas de microirrigação com microtubos devido ao seu baixo custo e elevada uniformidade de aplicação de água, sendo uma boa alternativa para pequenos agricultores. Porém, para que sejam atingidas boas uniformidades de aplicação de água é imprescindível que o sistema seja bem dimensionado, ou seja, é necessário um projeto criterioso e detalhado. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os modelos matemáticos utilizados no dimensionamento de emissores do tipo microtubos na microirrigação. Foram comparados os três principais modelos de dimensionamento de comprimento de microtubos existentes na literatura e avaliado qual apresenta maior aderência aos dados observados em laboratório. A equação de Vermeiren-Jobling foi a que apresentou a melhor exatidão (99,9%) quando comparado com os dados originais.

Palavras-chave: Irrigação, uniformidade de aplicação de água, inovação tecnológica

2 ABSTRACT

The search for strategies to optimize water application efficiency has been study object of several researchers. In this sense, the use of micro-irrigation systems with micro-tubes is outstanding due to their low cost and high uniformity in water application, representing a good option for small farmers. However, to reach good uniformities in water application, it is indispensable a good dimensioning of the system, that is, a judicious and detailed project is required. The present work is intended to assess the mathematical model used in the dimensioning of micro-tubes type emitters in micro-irrigation. Three main models for dimensioning of micro-tubes length existing in the literature were compared, assessing which of them present more alignment with data observed in laboratory. Vermeiren-Jobling equation presented the highest precision (99.9%) when compared to original data.

Keywords: Irrigation, water application uniformity, technological innovation

3 INTRODUÇÃO

A busca por estratégias para otimizar a eficiência de aplicação de água tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. A irrigação se caracteriza como uma tecnologia que está frequentemente apresentando inovações, capazes de proporcionar elevados níveis de desempenho dos sistemas, nas mais adversas e diversas condições. Isso é proveniente de pesquisas, que promovem o desenvolvimento da ciência de irrigação, numa procura constante do melhor resultado aliado ao menor custo.

Neste sentido, destaca-se a utilização de sistemas de microirrigação com microtubos devido ao seu baixo custo e elevada uniformidade de aplicação de água, sendo uma boa alternativa para pequenos agricultores. Os microtubos são gotejadores de longo percurso feito de polietileno cujos diâmetros variam de 0,5 a 1,5 mm. Esses gotejadores utilizados na irrigação dissipam energia ao longo de seu comprimento, descarregando baixa vazão (SOUZA; BOTREL, 2004). O seu comprimento e diâmetro podem ser selecionados para diferentes vazões possibilitando utilizá-lo como emissor.

Geralmente esses emissores são utilizados em sistemas de irrigação que funcionam sob regime de escoamento laminar (SOUZA; BOTREL, 2004; SOUZA; PÉREZ; BOTREL, 2006; ALVES et al., 2012) porém, eles também podem ser utilizados em sistemas com regime turbulento (ALMEIDA; BOTREL; SMITH, 2009; SOUZA et al., 2011).

Ressalta-se que, os sistemas que utilizam microtubos podem funcionar por um longo tempo de irrigação sem onerar os custos operacionais, operando sob força da gravidade e sob pequenas pressões. Aliado a isto, os microtubos podem ser adaptados para diversas situações, inclusive locais onde existem grandes diferenças de pressão devido à topografia, sendo possível compensar a variação de pressão por meio da variação do comprimento dos microtubos, e consequentemente, obter vazão uniforme ao longo da linha lateral (ALVES et al., 2012).

Porém, para que sejam atingidas boas uniformidades de aplicação de água é imprescindível que o sistema seja bem dimensionado, ou seja, é necessário um projeto criterioso e detalhado.

3 INTRODUCTION

The search for strategies to optimize water application efficiency has been object of study of several researchers. Irrigation is characterized as a technology that often presents innovations capable to providing high levels of performance of systems, in the most different and adverse conditions. This comes from researches, which promote irrigation science development, a constant seek for the best result combined to the lowest cost.

In this sense, the use of micro-irrigation systems with micro-tubes is outstanding due to their low cost and high uniformity in water application, being therefore a good option to small farmers. Micro-tubes are long length polyethylene drippers whose diameters vary from 0.5 to 1.5 mm. These drippers used in irrigation dissipate energy along their length, discharging low flow (SOUZA; BOTREL, 2004). Their length and diameter can be selected to different flows, and so they can be used as emitter.

In general these emitters are used in irrigation systems working under laminar flow regime (SOUZA; BOTREL, 2004; SOUZA; PÉREZ; BOTREL, 2006; ALVES et al., 2012) however, they can also be used in systems with turbulent regime (ALMEIDA; BOTREL; SMITH, 2009; SOUZA et al., 2011).

Systems with micro-tubes can work for a long time of irrigation without burdening operational costs, operating under gravity and low pressures. Combined with that, micro-tubes can be adapted to different situations, including location where there are large pressure differences due to topography, being impossible to compensate pressure variation by varying micro-tubes length, and, consequently, obtain uniform flow along the lateral line (ALVES et al., 2012).

However, to reach good uniformities in water application, it is indispensable a good dimensioning of the system, that is, a judicious and detailed project is required.

Aliado a isso, em decorrência do tipo de material utilizado, do diâmetro do tubo, da espessura da parede e da geometria do emissor, torna-se importante analisar as características hidráulicas do emissor, visando fornecer elementos para o projeto do sistema de irrigação (FRIZZONE et al., 1998).

Nesse sentido, o dimensionamento de microtubos é realizado com base no cálculo da perda de carga que ocorre no emissor em determinada condição de vazão, a qual resulta de uma combinação entre perda contínua e localizada de carga e energia de velocidade. Souza e Botrel (2004) desenvolveram um modelo para dimensionamento de microtubos em microirrigação. Modelos empíricos como de Vermeiren e Jobling (1997) e a equação de Darcy-Weisbach também são empregados para esse fim. Esses modelos matemáticos podem apresentar diferentes desempenhos por serem provenientes de diferentes considerações teóricas e/ou de análises empíricas.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a exatidão dos principais modelos matemáticos utilizados no dimensionamento de emissores do tipo microtubos na microirrigação, a fim de identificar aquele que apresenta o melhor resultado.

4 DESCRIÇÃO DO ASSUNTO

4.1 Descrição da pesquisa

Foram utilizados dados dos ensaios desenvolvidos por Alves (2014) realizados com diferentes cargas de pressão (4,40; 3,90; 3,40; 2,80; 2,30 e 1,30 m) e comprimentos dos microtubos (0,5 e 0,25 m). Para isto, foram utilizados microtubos com diâmetro interno de 1,074 mm e 0,888 mm, submetidos às mesmas condições de ensaio.

Os resultados observados foram comparados com os modelos propostos por Souza e Botrel (2004) (Souza-Botrel), Vermeiren e Jobling (1997) (Vermeiren-Jobling) e Darcy-Weisbach que serão descritos a seguir. Foram escolhidos os parâmetros da equação de Vermeiren-Jobling e de Souza-Botrel correspondentes aos diâmetros que ficaram mais próximos aos diâmetros internos.

In addition to that, due to the type of material used, the tube diameter, wall thickness and emitter geometry, the analyses of hydraulic characteristics of the emitter becomes important, to provide elements for the irrigation system project (FRIZZONE et al., 1998).

In this sense, micro-tubes dimensioning is made based on the calculation of load loss occurring in the emitter under certain flow condition, which results in a combination between continuous and localized loss and speed energy. Souza e Botrel (2004) have developed a model for dimensioning of micro-tubes in micro-irrigation. Empirical models like those by Vermeiren e Jobling (1997) and Darcy-Weisbach equation are also employed to this purpose. These mathematical models can present different performances because they come from theoretical considerations and/or empirical analyses.

So, the present work is intended to assess the accuracy of the main mathematical models used for dimensioning micro-tube type emitters in micro-irrigation, in order to identify the one that presents the best result.

4 SUBJECT DESCRIPTION

4.1 Research description

Data from tests developed by Alves (2014) made with different pressure loads (4.40; 3.90; 3.40; 2.80; 2.30 and 1.30 m) and micro-tubes' lengths (0.5 and 0.25 m) were used. For such, micro-tubes with 1.074 mm internal diameter and 0.888 mm, submitted to the same conditions as those of the test were used.

The results observed were compared to the models proposed by Souza-Botrel (2004), Vermeiren-Jobling (1997) and Darcy-Weisbach, which will be described next. Vermeiren-Jobling and Souza-Botrel equation parameters corresponding to diameters closer to internal diameters were chosen.

4.2 Características hidráulicas e modelos para o dimensionamento dos microtubos

Segundo Alves (2010), o dimensionamento de microtubos, pode ser realizado pela equação de Darcy-Weisbach apresentada na equação 1. Neste caso, não é considerada a perda localizada de carga e a carga de velocidade, sendo atribuído que a perda de carga total será igual à carga de pressão na entrada no microtubo.

$$hf = f \frac{LV^2}{2gD} \quad (01)$$

em que:

hf - perda contínua de carga no microtubo, m;
f - fator de atrito, adimensional;
L - comprimento do microtubo, m;
D - diâmetro interno do microtubo, m;
V - velocidade da água no microtubo, m s⁻¹; e
g - aceleração da gravidade, m s⁻².

No caso de regime de escoamento laminar (Re ≤ 2000), o fator de atrito (f) é calculado pela equação de Hagen-Poiseuille apresentada na equação 2.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (02)$$

em que:

Re - número de Reynolds, adimensional calculado pela equação 3.

$$Re = \frac{VD}{\mu} \quad (03)$$

em que:

μ - viscosidade cinemática da água, m² s⁻¹.

Para regime turbulento (Re ≥ 4000 e < 10⁵), o fator de atrito pode ser calculado pela equação de Blasius apresentada na equação 4.

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (04)$$

A perda localizada de carga e a energia de velocidade podem ser representadas pela equação 5 e equação 6, respectivamente:

$$\Delta H_L = k \frac{V^2}{2g} \quad (05)$$

$$EV = \frac{V^2}{2g} \quad (06)$$

4.2 Hydraulic characteristics and models for micro-tubes' dimensioning

According to Alves (2010), micro-tubes' dimensioning can be made with Darcy-Weisbach equation, presented in 1. In this case, the localized loss of load and speed load are not considered, supposing that total load loss will be equal to pressure load at the micro-tube entry.

$$hf = f \frac{LV^2}{2gD} \quad (01)$$

where:

hf – continuous load loss in micro-tube, m;
f – friction factor, dimensionless;
L – micro-tube length, m;
D – micro-tube internal diameter, m;
V – water speed in micro-tube, m s⁻¹; and
g – gravity acceleration, m s⁻².

For laminar flow regime (Re ≤ 2000), friction factor (f) is calculated by Hagen-Poiseuille equation presented in 2.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (02)$$

where:

Re - Reynolds number, dimensionless, calculated by equation 3.

$$Re = \frac{VD}{\mu} \quad (03)$$

where:

μ – water kinematics viscosity, m² s⁻¹.

For turbulent regime (Re ≥ 4000 and < 10⁵), friction factor can be calculated by Blasius equation presented in 4.

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (04)$$

Load localized loss and speed energy can be represented by equations 5 and 6, respectively:

$$\Delta H_L = k \frac{V^2}{2g} \quad (05)$$

$$EV = \frac{V^2}{2g} \quad (06)$$

em que:

ΔH_L - perda localizada de carga, m;

k - coeficiente de perda localizada de carga, adimensional; e

EV - energia de velocidade, m.

Como o número de Reynolds nos microtubos analisados por Alves (2014) funcionaram sob regime laminar, utilizou-se a equação de Hagen-Poiseuille para o cálculo do fator de atrito presente na equação de Darcy-Weisbach.

Com base na equação de Darcy-Weisbach e na equação de Bernoulli, Souza e Botrel (2004) desenvolveram um modelo para o cálculo da perda de carga em microtubos funcionando sob regime laminar e considerando três componentes para a carga de pressão (perda localizada de carga, perda contínua de carga e energia de velocidade), conforme observa-se na equação 7. Nesse caso, a equação é semi-empírica.

$$H = \frac{128\mu}{\pi g} \left(\frac{LQ}{D^4} \right) + \frac{8}{\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D^4} \right) + \left(\frac{(a \ln(Re) + b)Q^2}{D^4} \right) \quad (07)$$

em que:

H - carga de pressão na entrada do microtubo, m

a e b - coeficientes da equação que expressa o coeficiente de perda localizada de carga (K) em função do Re, adimensional;

Q - vazão no microtubo, $m^3 s^{-1}$;

D - diâmetro no microtubo, m.

Os autores utilizaram microtubos com quatro diâmetros diferentes submetidos a diferentes cargas de pressão. Por meio dos resultados dos ensaios em laboratório e do software computacional Table Curve 3D, obtiveram os coeficientes “a” e “b”.

Os valores de diâmetro interno, dos coeficientes “a”, “b”, e coeficiente de determinação do ajuste (R^2) podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de diâmetro interno, “a”, “b” e coeficiente de determinação do ajuste. Parâmetro da equação de Souza e Botrel (2004).

Table 1. Internal diameter, “a” and “b”, and adjustment determination coefficient values. Souza e Botrel (2004) equation parameter.

Microtubo (Micro-tube)	R^2	a	b	Diâmetro interno (mm) (Internal diameter (mm))
A	0,994	1,007	-7,584	1,009
B	0,997	1,154	-7,959	0,835
C	0,997	1,533	-9,926	0,738
D	0,998	1,401	-9,062	0,726

where:

ΔH_L – load localized loss, m;

k - load localized loss coefficient, dimensionless; and

EV – speed energy, m.

Since Reynolds number in micro-tubes analyzed by Alves (2014) work under laminar regime, Hagen-Poiseuille equation was used to calculate the friction factor present in Darcy-Weisbach equation.

Based on Darcy-Weisbach equation and Bernoulli equation, Souza e Botrel (2004) developed a model for calculation of load loss in micro-tubes working under laminar regime, and considering three components for pressure load (localized load loss, continuous load loss and speed energy), as can be observed in equation 7. In this case, the equation is semi-empirical.

$$H = \frac{128\mu}{\pi g} \left(\frac{LQ}{D^4} \right) + \frac{8}{\pi^2 g} \left(\frac{Q^2}{D^4} \right) + \left(\frac{(a \ln(Re) + b)Q^2}{D^4} \right) \quad (07)$$

where:

H – pressure load at micro-tube entry, m

a and b – coefficients of equation that expresses localized load loss coefficient (K) as function of Re, dimensionless;

Q – flow in micro-tube, $m^3 s^{-1}$;

D – diameter in micro-tube, m.

The authors used micro-tubes with four different diameters submitted to different pressure loads. By means of results of lab tests and software Table Curve 3D, coefficients “a” and “b” were obtained.

Internal diameter, “a” and “b” coefficients, and adjustment determination coefficient values (R^2) can be viewed in Table 1.

Vermeiren e Jobling (1997) apresentam uma equação empírica, cuja relação entre vazão, carga piezométrica, comprimento e diâmetro interno do microtubo está apresentada na equação 8.

$$Q = aL^bH^cD^d \quad (08)$$

em que:

a, b, c e d - são coeficientes que dependem do valor do diâmetro interno do microtubo;

Q - vazão do microtubo, L h⁻¹;

L - comprimento do microtubo, m;

H - carga de pressão na entrada do microtubo, m;

D - diâmetro interno do microtubo, mm.

Esses coeficientes podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos coeficientes “a”, “b”, “c” e “d” da fórmula proposta por Vermeiren e Jobling (1997) para cálculo da vazão de um microtubo.

Table 2. Coefficients “a”, “b”, “c” and “d” values of formula proposed by Vermeiren e Jobling (1997) for calculation of micro-tube flow.

Coeficientes (Coefficient)	Diâmetro interno (mm) (Internal diameter (mm))						
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
a	0,86	0,91	1,02	1,14	1,16	1,28	1,38
b	-0,78	-0,75	-0,72	-0,68	-0,65	-0,62	-0,58
c	0,85	0,82	0,78	0,75	0,72	0,69	0,65
d	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1

4.3 Determinação da exatidão dos modelos

As equações citadas anteriormente podem fornecer bons resultados, oferecendo até mesmo praticidade nos cálculos. Porém, sua aplicação se limita às condições para as quais as mesmas foram desenvolvidas. O coeficiente de correlação de Willmott (1981) descrito pela equação 9 foi usado como estimador da exatidão das referidas equações, para diferentes cargas de pressão, vazões e comprimento de microtubo.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

em que:

d - Índice de concordância de Willmott, decimal;

E_i - i-ésimo valor da vazão estimada, L h⁻¹;

N - Número de Observações;

O_i - i-ésimo valor da vazão observada, L h⁻¹;

Recebido em 11/06/2015 e aprovado para publicação em 25/06/2015

Vermeiren e Jobling (1997) presented an empirical equation whose relation among flow, piezometric load, length and internal diameter of micro-tube is presented in equation 8.

$$Q = aL^bH^cD^d \quad (08)$$

where:

a, b, c and d –coefficients that depend on the micro-tube internal diameter value;

Q – micro-tube flow, L h⁻¹;

L - micro-tube length, m;

H – pressure load at micro-tube entry, m;

D - micro-tube internal diameter, mm.

These coefficients can be viewed in Table 2.

4.3 Determination of models' accuracy

Equations previously mentioned can provide good results, offering practicality in calculations, as well. However, their application is limited to the conditions to which they were developed. Willmott (1981) correlation coefficient described in equation 9 was used as an estimator of the mentioned equations accuracy, for different

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

where:

d - Willmott index of agreement, decimal;

E_i - i-fraction of estimate flow value, L h⁻¹;

N - Number of observations;

O_i - i-fraction of observed flow value, L h⁻¹;

\bar{O} - média da vazão observada, L h⁻¹.

As vazões calculadas pelas três equações analisadas podem ser visualizadas na Figura 1. Os resultados para os microtubos com diâmetro interno de 1,073 mm, com comprimento de 0,50 m e 0,25 m, podem ser observados na Figura 1A, e 1B respectivamente. Na Figura 1C e 1D estão os resultados para os microtubos com diâmetro interno de 0,888 mm, com comprimento de 0,50 m e 0,25 m, respectivamente.

Verifica-se que, quanto menor a vazão ensaiada mais as estimativas das equações se aproximaram dos dados observados. Observa-se também que, para microtubos com vazões próximas a 1 L h⁻¹, as equações analisadas tenderam a convergir para um mesmo ponto.

Todas as equações superestimaram as vazões, no entanto, a equação de Vermeiren e Jobling (1997) foi a que estimou a vazão com maior exatidão apresentando coeficiente de correlação de Willmott de 98,8 e 99,9% para os microtubos com diâmetro interno de 1,073 mm e 0,888 mm, respectivamente.

A equação de Souza e Botrel (2004) apresentou coeficiente de correlação de Willmott de 98,7 e 96,6% para os microtubos com diâmetro interno de 1,073 mm e 0,888 mm, respectivamente.

Os valores de exatidão das equações de Vermeiren e Jobling (1997) e Souza e Botrel (2004) provavelmente podem ter sido reduzidos pelo fato dos diâmetros utilizados nos ensaios não corresponderem exatamente aos diâmetros especificados pelos autores. Isto pode ser considerado como uma limitação dos modelos, visto que os microtubos apresentam diâmetro variável entre os lotes, devendo ser determinado experimentalmente, segundo Almeida e Botrel (2010). Mesmo assim, as duas equações apresentaram elevado coeficiente de determinação.

Contudo, como a equação de Vermeiren e Jobling (1997) apresentou maior coeficiente de correlação e é uma equação mais simples, dentre as equações analisadas, é mais indicado uso da equação Vermeiren-Jobling para dimensionamento de microtubos para a faixa de vazão de analisada (até 9,0 L h⁻¹).

\bar{O} - average of observed flow, L h⁻¹.

Flows calculated with the three equations analyzed can be viewed in Figure 1. Results for micro-tubes with 1.073 mm internal diameter, 0.50 m and 0.25 m length, can be seen in Figure 1A, and 1B, respectively. Figures 1C and 1D show the results for micro-tubes with 0.888 mm internal diameter, 0.50 m and 0.25 m length, respectively.

It is verified that, the lower the flow tested the more equations estimates get closer to data observed. It is also observed that, for micro-tubes with flows close to 1 L h⁻¹, equations analyzed tended to converge to one same point.

All equations overestimate flows, however, Vermeiren e Jobling (1997) equation was the one that estimated flow with the highest accuracy, presenting Willmott correlation coefficient of 98.8 and 99.9% for micro-tubes with 1.073 mm and 0.888 mm internal diameters, respectively.

Souza e Botrel (2004) equation presented Willmott correlation coefficient of 98.7 and 96.6% for micro-tubes with 1.073 mm and 0.888 mm internal diameters, respectively.

Vermeiren e Jobling (1997) and Souza e Botrel (2004) equations accuracy values may have been reduced because diameters used in tests do not exactly correspond to the diameters specified by the authors. It can be considered a limitation of the models, since micro-tubes present variable diameter across lots, which should be determined experimentally, according to Almeida e Botrel (2010). Even so, the two equations presented high determination coefficient.

However, since Vermeiren e Jobling (1997) equation presented higher correlation coefficient and is a simpler equation, when compared to the other equations analyzed, Vermeiren-Jobling equation is more indicated for dimensioning of micro-tube in the flow range analyzed (up to 9.0 L h⁻¹).

A equação de Darcy-Weisbach foi a que teve maior variação no valor do coeficiente de correlação de Willmott com valor de 44,0 e 63,0% para os microtubos com diâmetro interno de 1,073 mm e 0,888 mm, respectivamente. Todavia, para valores de vazões abaixo de 1,5 L h⁻¹, essa equação apresentou exatidão superior a 97,0%. Provavelmente a equação de Hagen-Poiseuille utilizada no cálculo do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach pode ser indicada apenas para uma faixa mais estreita de número de Reynolds que a faixa indicada na literatura para regime laminar. Isso explica o elevado coeficiente de correlação para vazões baixas.

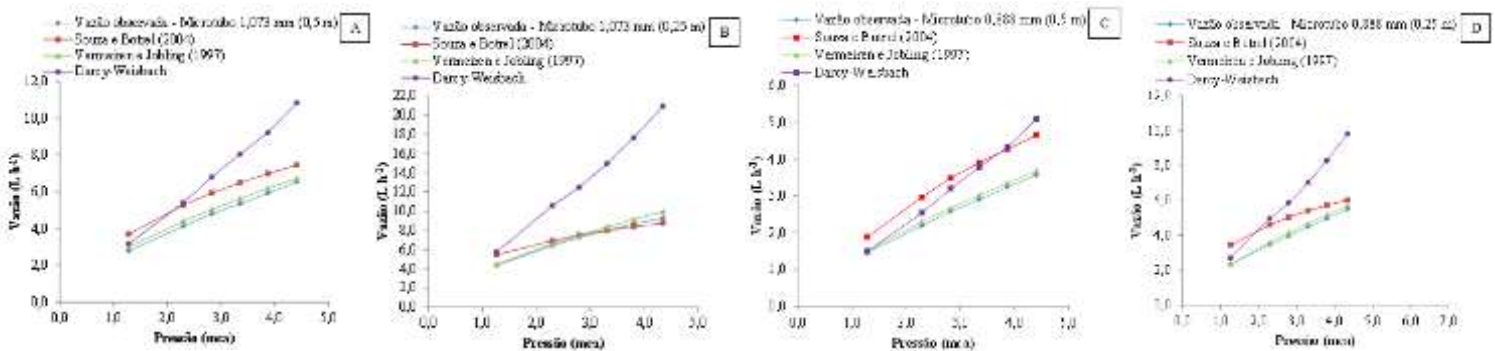
Contudo, diversos trabalhos sobre dimensionamento de sistemas de irrigação com microtubos (SOUZA; BOTREL 2004; ALVES et al., 2012) utilizaram a equação de Hagen-Poiseuille e obtiveram elevados coeficientes de determinação de 99,67% e exatidão de 99,0%, respectivamente. Almeida e Botrel (2010) conduziram um experimento funcionando sob regime de escoamento laminar e desenvolveram um modelo para determinar o diâmetro interno do microtubo utilizando a equação de Hagen-Poiseuille e este método não apresentou diferenças quando comparado com o padrão (projektor ótico de perfil).

Darcy-Weisbach equation showed the highest variation in Willmott correlation coefficient, with 44.0 and 63.0% for micro-tubes with 1.073 mm and 0.888 mm internal diameters, respectively. However, for flow values below 1.5 L h⁻¹, this equation presented accuracy superior to 97.0%. Probably, the Hagen-Poiseuille equation used to calculate Darcy-Weisbach equation friction factor can be indicated only to a narrower range of Reynolds number that the one indicated in the literature for laminar regime. That explains the high coefficient of correlation for low flows.

However, several works on the dimensioning of irrigation systems with micro-tubes (SOUZA; BOTREL 2004; ALVES et al., 2012) have used Hagen-Poiseuille equation and obtained high determination coefficients of 99.67% and accuracy of 99.0%, respectively. Almeida e Botrel (2010) conducted an experiment working under laminar flow regime and developed a model to determine the micro-tube internal diameter using Hagen-Poiseuille equation; and this method did not show differences when compared to the standard (optical profile projector).

Figura 1. Equações Souza e Botrel (2004), Vermeiren e Jobling (1997) e Darcy-Wiesbach comparadas com os dados experimentais. Na Figura 1A e 1B são microtubos com diâmetro interno de 1,073 mm, com comprimento de 0,50 m e 0,25 m, respectivamente. Na Figura 1C e 1D são microtubos com diâmetro interno de 0,888 mm, com comprimento de 0,50 m e 0,25 m, respectivamente.

Figure 1. Souza e Botrel (2004), Vermeiren e Jobling (1997) and Darcy-Wiesbach equations compared to experimental data. Figures 1A and 1B show micro-tubes with 1.073 mm internal diameter, 0.50 m and 0.25 m length, respectively. Figures 1C and 1D show micro-tubes with 0.888 mm internal diameter, 0.50 m and 0.25 m length, respectively.
Flow observed – Micro-tube 1.073 mm (0.5m) / Flow observed – Micro-tube 1.073 mm (0.25m) / Flow observed – Micro-tube 0.888 mm (0.5m) / Flow observed – Micro-tube 0.888 mm (0.25m) / Flow (Lh⁻¹) / Pressure (mca)



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A equação com maior exatidão e que mais se aproximou dos dados experimentais apresentou

5 FINAL CONSIDERATIONS

The equation with higher accuracy and which got closer to experimental data presented

exatidão superior a 98% no dimensionamento de microtubos espaguete.

Para as condições avaliadas neste trabalho, verificou-se que a equação de Darcy-Weisbach pode ser utilizada apenas para vazão no microtubo de até $1,5 \text{ L h}^{-1}$. Acima desse valor, a exatidão da equação decresce bastante. Entretanto, este valor não deve ser extrapolado para outros diâmetros de microtubos não avaliados neste trabalho.

Uma possível causa da equação de Darcy-Weisbach, utilizando a equação de Hagen-Poiseuille para o cálculo do fator de atrito, ter apresentado baixo coeficiente de correlação é que a definição da faixa do regime de escoamento para microtubos pode ser diferente dos tubos convencionais, sendo necessária a realização de estudos complementares para se obter resultados mais conclusivos.

accuracy superior to 98% in the dimensioning of spaghetti tubing.

For the conditions assessed in this work, it was observed that Darcy-Weisbach equation can only be used for micro-tube flow up to 1.5 L h^{-1} . Above this value, the equation accuracy decreases very much. However, this value should not be taken to other micro-tube diameters, not assessed in this work.

One possible cause for Darcy-Weisbach equation, using Hagen-Poiseuille equation to friction factor calculation, have presented low correlation coefficient is that the definition of the flow regime range for micro-tubes can be different from that of conventional tubing, being therefore necessary complementary studies to obtain more conclusive results.

6 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C.D.G.C.; BOTREL, T.A. Determinação do diâmetro de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, p. 413-417, 2010.
- ALMEIDA, C.D.G. C.; BOTREL, T.A.; SMITH, R.J. Characterization of the microtube emitters used in a novel micro-sprinkler. **Irrigation Science**, New York, v. 27, p. 209-214, 2009.
- ALVES, D.G. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos ramificados**. 2010. 86 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- ALVES, D. G. **Modelagem e caracterização hidráulica de microtubos com múltiplas saídas**. 2014. 102 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- ALVES, D.G.; PINTO, M.F.; SALVADOR, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; ALMEIDA, C.D.G.C. de; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de um sistema de microirrigação utilizando microtubos ramificados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 125-132, fev. 2012.
- FRIZZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P.S.; BOTREL, T.A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, set./dez. 1998.
- SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, p. 16-22, 2004.
- SOUZA, R.O.R.M.; PÉREZ, G.F.E.; BOTREL, T.A. Irrigação localizada por gravidade com microtubos. **Irriga**, Botucatu, v. 11, p. 266-279, 2006.
- SOUZA, W.J.; BOTREL, T.A.; ALMEIDA, A.C.S.; CORREA, C.B. Modelo matemático aplicado à irrigação localizada com microtubos sob regime de escoamento turbulento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, p. 278-289, 2011.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada**. Tradução de H.R. Gheyi et al. Campina Grande: UFPB, 1997. 184 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).
- WILLMOTT, C.J.;CKLESON,S.G.;DAVIS,R.E.Statistics for Evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.C5, p.8995-9005, 1981.