

PERDA DE CARGA EM FITAS GOTEJADORAS COM EMISSORES MOLDADOS

Verônica Gaspar Martins Leite de Melo¹, Leonardo Leite de Melo²,
José Antônio Frizzone³, Antonio Pires de Camargo⁴

RESUMO: Embora as fitas gotejadoras sejam de baixo custo, é importante que esse material seja avaliado hidráulicamente para prover informações técnicas para o projeto do sistema. O objetivo deste trabalho foi analisar a perda contínua de carga e o fator de atrito em uma fita gotejadora com emissor moldado em seu interior, utilizado em sistemas de irrigação por gotejamento. O experimento foi conduzido no laboratório de irrigação da ESALQ/USP. Utilizou-se a fita gotejadora Rain-Tape® fabricada pela Rain Bird®, parede com espessura de 225 μm e emissores tipo labirinto, espaçados de 0,30 m, vazão nominal de 1 L h⁻¹ e pressão de serviço de 55 kPa. Concluiu-se que: (a) a equação de perda de carga para regime de escoamento turbulento liso em função da vazão e da carga de pressão na entrada da fita apresenta boa habilidade para estimar a perda de carga em fitas gotejadoras com emissores moldados em seu interior, sendo que 95% das estimativas apresentaram erro relativo de até 6,71%. (b) a equação de Darcy-Weisbach pode ser utilizada para o cálculo da perda de carga desde que o diâmetro seja substituído por uma função da pressão de entrada. (c) para o cálculo da perda de carga na fita gotejadora Rain-Tape, com emissores moldados, utilizando a equação de Darcy-Weisbach, o fator de atrito calculado pela equação de Blasius deve considerar um coeficiente $a = 0,3408$.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação por gotejamento; perda de carga por atrito, fator de atrito

HEAD LOSS IN DRIP TAPES WITH MOLDED EMITTERS

ABSTRACT: Although drip tapes are low-cost equipment, proper hydraulic evaluation is important to provide information required for irrigation system design. The aim of this study

¹ Aluna de Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas – ESALQ/USP. E-mail: veronica.martins@usp.br

² Aluno de Doutorado em Engenharia de Sistema Agrícolas – ESALQ/USP. E-mail: leoleitemelo@usp.br

³ Professor Titular do Departamento de Engenharia Biossistemas – ESALQ/USP. E-mail: frizzone@usp.br

⁴ Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP. E-mail: antonio.camargo@feagri.unicamp.br

was to analyze the friction head loss and the friction factor in drip tapes with molded emitters, that are employed in drip irrigation systems. Experiments evaluated the drip tape model Rain-Tape®, manufactured by Rain Bird, 225- μm wall thickness, labyrinth-type emitters, 0.30-m emitters spacing, 1 L h⁻¹ nominal discharge and operating pressure of 55 kPa. The following conclusions were obtained: (a) the equation of head loss for smooth turbulent flow as a function of flow rate and pressure head at the pipe inlet provided good predictions of head loss in drip tapes with molded emitters, since 95% of predictions presented relative errors less than 6.71%; (b) the Darcy-Weisbach equation may be used for calculating head loss, but the pipe diameter must be replaced by a function considering the lateral inlet pressure; (c) for calculating head loss of the Rain-Tape using the Darcy-Weisbach equation, the friction factor obtained by the Blasius equation should use the coefficient $a = 0.3408$.

KEYWORDS: Drip irrigation; frictional head loss; friction coefficient

INTRODUÇÃO

O uso de fitas gotejadoras, com pequena espessura de parede, com emissores do tipo labirinto, moldados na parede interna em espaçamentos regulares, é comum na irrigação por gotejamento devido ao baixo custo agregado a este tipo de material (Melo et al. 2019). Em virtude do tipo de material utilizado, do diâmetro da fita, da espessura de parede e da geometria do emissor, torna-se necessário analisar as características hidráulicas da fita gotejadora, visando fornecer informações que possam subsidiar o dimensionamento do projeto e operação do sistema de irrigação.

A perda unitária de carga J (m m⁻¹) em uma linha lateral de gotejamento) pode ser calculada pela equação de Darcy-Weisbach [equação (1)], que é resultante de análise dimensional, possuindo base teórica e não considera um fator de atrito constante para qualquer regime de escoamento, como as demais equações proposta na literatura obtidas por métodos empíricos (Yasmina & Rachid, 2015).

$$J = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{8f}{g \pi^2} \frac{Q^2}{D^5} \quad (1)$$

sendo, J - perda de carga unitária na fita, (m m⁻¹); D - diâmetro do tubo (m); V - velocidade média do escoamento (m s⁻¹); g - aceleração da gravidade (m s⁻²); e, f - fator de atrito, dependente do número de Reynolds (R) e da rugosidade relativa das paredes do tubo.

De acordo com Rocha et al., (2017), os tubos de polietileno apresentam rugosidade pequena ($\varepsilon = 8,116 \mu\text{m}$) e, dados os limites práticos de velocidade de escoamento adotados em dimensionamento de linhas laterais, o regime de escoamento que predomina é hidraulicamente liso e o fator de atrito depende apenas do número de Reynolds. O número de Reynolds é calculado pela [equação (2)]:

$$R = \frac{4Q}{v\pi D} \quad (2)$$

sendo, v – coeficiente de viscosidade cinemática do fluido, ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Para escoamento turbulento hidraulicamente liso o fator de atrito pode ser estimado com boa exatidão pela equação de Blasius [equação (3)] para $4000 \leq R \leq 10^5$ (Bernuth & Wilson, 1989).

$$f = a R^{-b} \quad (3)$$

Para estimar f , Blasius propôs $b = 0,25$ e $a = 0,316$.

Apesar do custo de fitas gotejadoras de polietileno flexível, de pequena espessura de parede com emissor moldado em seu interior, ser atrativo, é fundamental que esse material seja avaliado tecnicamente a fim de prover informações do comportamento hidráulico (Pinto et al., 2014).

O objetivo deste trabalho é analisar a perda contínua de carga e o fator de atrito em uma fita gotejadora comercial com emissor moldado em seu interior, utilizado em sistemas de irrigação por gotejamento.

MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento experimental foi conduzido no laboratório de irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo (Piracicaba, SP). No experimento, foi utilizado a fita gotejadora de polietileno Rain-Tape® fabricado pela Rain Bird®, parede com espessura de $225 \mu\text{m}$ e emissores tipo labirinto, espaçados de $0,30 \text{ m}$. De acordo com o fabricante, a fita gotejadora apresenta vazão nominal de 1 L h^{-1} e pressão de serviço de 55 kPa , disponíveis comercialmente na bobina de 1000 m . A arquitetura do emissor é representada na Figura 1.

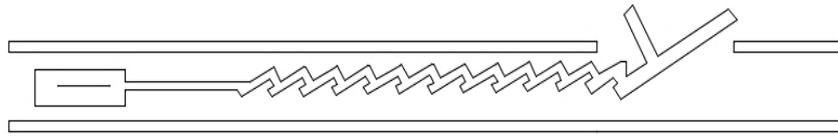


Figura 1. Representação da arquitetura do emissor moldado na parede interna do tubo

Para determinação da perda de carga contínua na fita gotejadora, utilizou-se uma bancada de ensaios automatizada, desenvolvida e validada por Bombardelli et al. (2017). Os procedimentos experimentais foram realizados em laboratório utilizando-se seguimentos de tubos de 20,87 m de comprimento, em nível, retirados de uma bobina de 1000 m, adquirida aleatoriamente no comércio. As pressões de ensaio foram monitoradas e mantidas constantes por motobomba equipada com inversor de frequência e controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID). O ajuste da vazão foi realizado pelo controle eletrônico da válvula proporcional Belimo® LRB24-3, com passagem de $\frac{1}{2}$ "', instalada a jusante da amostra sob ensaio. Para medição da vazão utilizou-se o medidor eletromagnético marca Krohne®, modelo IFC 010 D, com resolução de $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, faixa de vazão de 0 a $4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. A diferença de pressão proporcionada pelo escoamento através da fita foi medida por um transmissor de pressão diferencial da marca Novus®, modelo NP800H, resolução $1 \times 10^{-2} \text{ kPa}$, faixa de medição de 1-100 kPa, exatidão de 0,075% informada pelo fabricante. A bancada possui ainda um circuito eletrônico microcontrolado gerenciado por um aplicativo supervisor, sendo este responsável pela aquisição de dados dos sensores e controle do processo experimental.

Foram obtidas equações de perda de carga em três segmentos de fitas para as pressões de entrada de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 kPa, utilizando-se vazões crescentes e decrescentes, em incrementos de $0,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Em cada seção da abertura da válvula proporcional foram registrados 30 pares de pontos vazão-perda de carga. Foram realizadas medições em 20 seções de abertura da válvula, totalizando 600 pares de pontos em cada segmento de fita em cada pressão de entrada. Durante os ensaios, monitorou-se a temperatura da água por um transmissor de temperatura da marca Zurich®, modelo TZD 420, com resolução de $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, faixa de medição entre 0 e $50 \text{ }^\circ\text{C}$, incerteza de medição de 0,5% FE. A temperatura média da água durante os ensaios foi medida e feita a correção da massa específica da água em função da temperatura, especificada para a pressão atmosférica de 101,3 kPa e aceleração da gravidade de $9,807 \text{ m s}^{-2}$ de acordo com Tanaka (2001). O coeficiente de viscosidade

cinemática da água (v , $m^2 s^{-1}$), em função da temperatura (T , $^{\circ}C$), foi calculado de acordo com Rodríguez-Sinobas et al. (1999), utilizando uma relação potencial simples [equação (4)].

$$v = 0,000006177 T^{-0,603} \quad (4)$$

A perda de carga registrada experimentalmente na temperatura T_{ensaio} foi corrigida para a temperatura T_{23} utilizando-se o seguinte fator de multiplicação [equação (5)]:

$$\lambda = \frac{v_{T_{23}}}{v_{T_{\text{ensaio}}}} \quad (5)$$

O conjunto total dos dados coletados para cada pressão geraram os modelos empíricos deste trabalho. Os orifícios foram vedados durante os ensaios, para se ter vazão constante longo dos segmento.

Considerando o diâmetro constante da fita, e mantendo a tubulação em nível, a perda de carga contínua foi analisada em função da vazão, utilizando-se um modelo tipo potência, na forma da equação (6):

$$J = k Q^m \quad (6)$$

sendo, J - perda de carga unitária na fita, $m m^{-1}$; Q - vazão, $m^3 s^{-1}$; k - constante de regressão que depende do tubo estudado; e, m - constante de regressão que depende do regime de escoamento. Foram ajustadas equações com $m = 1,75$ para possibilitar a comparação com a equação de Darcy-Weisbach, com f calculado por Blasius.

Para relacionar a carga de pressão de (H , mca) com o diâmetro interno da fita (D , m) utilizou-se um modelo potencial [equação (7)] cujos valores dos coeficientes para a fita estudada, à temperatura de $23^{\circ}C$, foram obtidos experimentalmente por Araújo (2019).

$$D = cH^d \quad (7)$$

sendo $c = 15,7726$ e $d = 0,0352$ ($R^2 = 0,9968$).

Por se tratar de um material flexível, e assumindo que o diâmetro da fita (D) aumenta com a carga de pressão na entrada da linha (H_0), e a perda de carga reduz-se com o aumento do diâmetro, utilizando-se a equação (7) e as equação de perda de carga em função da vazão [equação (6)], ajustou-se um modelo empírico de perda de carga para o escoamento permanente uniforme na forma da equação (8):

$$J = \alpha Q^{1,75} H_0^{-c} \quad (8)$$

sendo, J - perda de carga unitária na fita, $m\ m^{-1}$; Q - vazão, $m^3\ s^{-1}$; α - coeficiente de ajuste para um tubo particular; H_0 - carga de pressão na entrada, mca; c - coeficiente que expressa o efeito da pressão de entrada no diâmetro interno da fita.

Do conjunto total de dados obtidos experimentalmente, 70% foram utilizados para ajustes dos coeficientes da equação (8), enquanto que 30% dos dados foram utilizados para validação e análise de desempenho da equação obtida.

A inferência sobre a precisão entre as perdas de carga observadas nos ensaios e as perdas de carga estimadas pelo modelo ajustado experimentalmente, foi analisada em uma reta 1:1, pela raiz quadrada do erro médio (RMSE) e por frequência acumulada dos erros relativos das estimativas (Ali & Abustan, 2014; Devore, 2006). O RMSE quantifica a dispersão entre valores observados e estimados e, idealmente, seu valor tende a zero.

Determinou-se o fator de atrito f da equação (1), explicitando-se f em junção de J , $V^2/2g$ e D , que são quantidades conhecidas. O número de Reynolds (R) foi calculado a partir da equação (2) com os dados experimentais. Por análise de regressão, ajustou-se uma equação potência semelhante à equação (3). Para facilitar a comparação dos valores de f obtidos experimentalmente com os obtidos pela equação de Blasius, foram ajustados valores da constante a para obter uma equação com $b = 0,25$. Um valor médio do expoente a foi obtido por regressão linear entre os valores de f observados e $R^{-0,25}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 apresenta-se, para cada uma das pressões ensaiadas, para o tubo sem orifícios, as equações ajustadas para cálculo da perda de carga unitária (J , $m\ m^{-1}$) em função da vazão (Q , $m^3\ s^{-1}$). Nos ajustes foram obtidos $R^2 \geq 0,9933$.

Tabela 1. Equações de perda de carga unitária ($m\ m^{-1}$) em função vazão ($m^3\ s^{-1}$) para o tubo Rain-Tape.

Carga de Pressão (m)	Equação de perda de carga unitária ($m\ m^{-1}$)	Intervalo Reynolds	R^2
4	$J = 269663,5 Q^{1,75}$	6668 - 17111	0,9933
5	$J = 249187,6 Q^{1,75}$	7323 - 24274	0,9997
6	$J = 247611,9 Q^{1,75}$	7700 - 10706	0,9997
7	$J = 246220,9 Q^{1,75}$	9908 - 26730	0,9999
8	$J = 243988,9 Q^{1,75}$	10893 - 29306	0,9998
9	$J = 243617,9 Q^{1,75}$	11572 - 31536	0,9998

As equações apresentadas na Tabela 1 revelam redução do coeficiente k da equação de perda de carga com o aumento da pressão, o que indica dependência do diâmetro interno em relação à pressão de operação. O coeficiente k reduziu-se de 269663,5 para 243988,9 (10,52%) enquanto a carga de pressão (H) aumentou de 4 mca para 9 mca (55,55%). Nesse intervalo de carga de pressão o diâmetro interno aumentou de 16,56 mm para 17,04 mm (2,82%). Melo et al. (2019) estudaram a perda de carga em tubos de polietileno flexíveis, perfurados a laser, com D especificado pelo fabricante de 28 mm e espessura de parede 200 μm , e encontram 19,34% de redução na perda de carga com um aumento de 50% na pressão de operação.

Ajustou-se uma equação empírica de perda de carga, com os dados experimentais de perda unitária de carga (J , m m^{-1}) em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e da pressão de entrada (H_0 , m), obtendo-se a equação (9). O ajuste apresentou raiz quadrada do erro médio (RMSE) igual a 0,006146.

$$J = 280625,9 Q^{1,75} H_0^{-0,06652} \quad R^2 = 0,9993 \quad (9)$$

A concordância entre as perdas de carga observadas nos ensaios e as perdas de carga estimadas pela equação ajustada é apresentada na Figura 2.

Para o conjunto de dados utilizados, observa-se boa distribuição entre os pares de pontos em torno da reta 1:1. O RMSE é próximo de zero indicando boa acurácia nas estimativas realizadas pelo modelo empírico. As estimativas realizadas com a equação (9) indicaram erro relativo máximo de 14,7%, sendo que 95% das estimativas apresentam erro relativo de até 6,71%.

Na figura 3 apresenta-se a curva f em função de $R^{-0,25}$ para os dados experimentais, independentes da pressão de operação. O coeficiente angular obtido foi $a = 0,3408$, superior ao proposto por Blasius (0,316) como esperado por se tratar de um tubo gotejador com emissores moldados na parede interna da fita, causando o aumento do fator de atrito. Bernuth & Wilson (1989) encontraram $a = 0,345$ para tubos de PVC. Para tubos de polietileno não colapsáveis, Alves (2000) encontrou $a = 0,295$, Bagarello et al. (1995) 0,302 e Cardoso et al. (2008) encontraram 0,300.

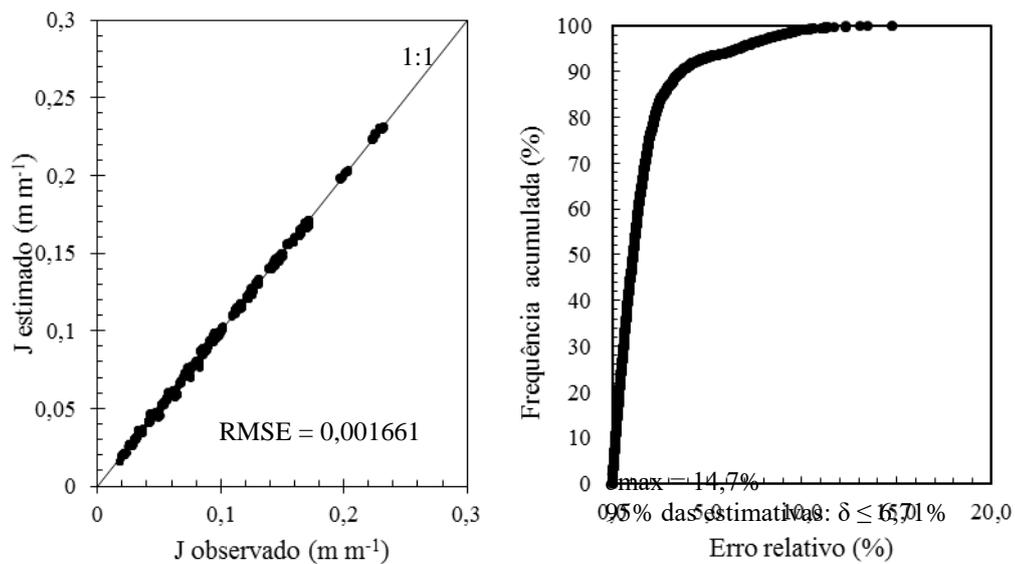


Figura 2. Concordância entre perdas de carga observadas e perdas de carga calculadas pela equação ajustada [equação (9)]

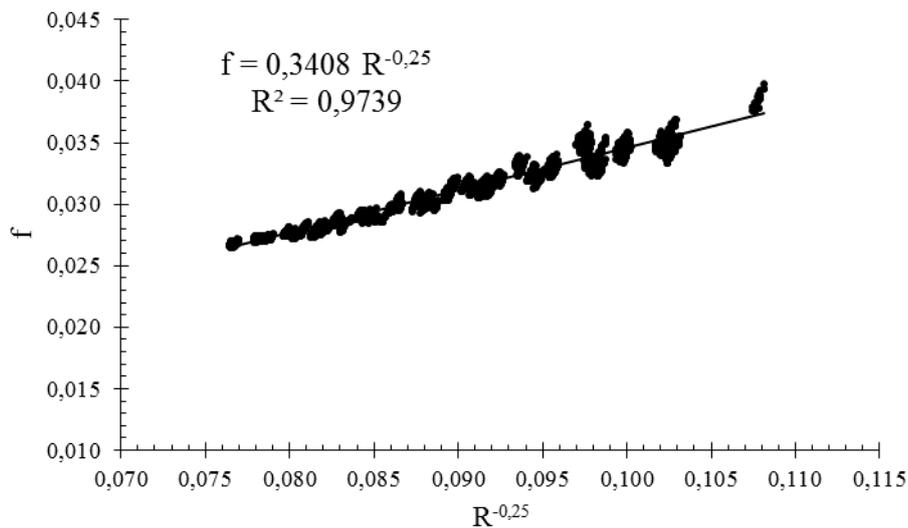


Figura 3. Fator de atrito (f) experimentais ajustados com $b = 0,25$

CONCLUSÕES

(a) A equação de perda de carga para regime de escoamento turbulento hidraulicamente liso em função da vazão e da carga de pressão na entrada da tubulação apresenta boa habilidade para estimar a perda de carga em tubos gotejadores com emissores moldados em seu interior, sendo que 95% das estimativas apresentaram erro relativo de até 6,71%.

(b) A equação de Darcy-Weisbach pode ser utilizada para o cálculo da perda de carga em tubos gotejadores com emissores moldados em seu interior, cujo diâmetro varia com a pressão, desde que o diâmetro seja substituído por uma função da pressão de entrada.

(c) Para o cálculo da perda de carga nos tubos gotejadores Rain-Tape, com emissores moldados, utilizando a equação de Darcy-Weisbach, o fator de atrito calculado pela equação de Blasius deve considerar um coeficiente angular $a = 0,3408$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, M.H.; ABUSTAN, I. A new novel index for evaluating model performance. *Journal of Natural Resources and Development*, v.4, n.1, p.1-9, 2014.

ALVES, P.R.V. Análise de um coeficiente geométrico para estimativa de perdas de carga em linhas laterais de irrigação por gotejamento. São Carlos: EESC/USP, 2000. 123p. Dissertação de Mestrado.

ARAÚJO, A.C.S. Desempenho hidráulico de fitas gotejadoras operando sob diferentes temperaturas da água. Piracicaba: ESALQ/USP, 2019. 77p. Dissertação Mestrado.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G; PUMO, D. Experimental study on flow resistance law for small-diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:5(313), 313–316. 1995.

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

BOMBARDELLI, W.A.; CAMARGO, A.P.; LAVANHOLI, R., ARAÚJO, A.C.S.; TALAMINI JÚNIOR, M.V.T., FRIZZONE, J.A. Projeto e validação de uma bancada de ensaios de perda de carga localizada. *Irriga - Edição especial*, v.1, n.1, p. 1-10, 2017.

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

DEVORE, L.J. Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. São Paulo: Pioneira Tomson Learning, 2006. 692p.

MELO, V.G.M.L.; FRIZZONE, J.A.; CAMARGO, A.P. BOMBARDELLI, W.W.Á. Head loss in laser-perforated thin-walled polyethylene pipes for irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.23, n.5; p.317-323, 2019.

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

ROCHA, H. S.; MARQUES, P.A.A.; CAMARGO, A.P.; FRIZZONE, J.A.; SARETTA, E. Internal surface roughness of plastic pipes for irrigation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, p. 143-149, 2017.

RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; JUANA, L.; LOSADA, A. Effects of temperature changes of emitter discharge. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.125, n.2, p.64-73, 1999.

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

YASMINA, L.; RACHID, L. Evaluation of energy losses in pipes. *American Journal of Mechanical Engineering*, v.3, p.32-37, 2015.