Campus de São Carlos

**ANÁLISE DE UM COEFICIENTE GEOMÉTRICO
PARA ESTIMATIVA DE PERDAS DE CARGA EM
LINHAS LATERAIS DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO**

PAULO ROBERTO VIEIRA ALVES

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 29/01/01

Ass.: [assinatura]

ANÁLISE DE UM COEFICIENTE GEOMÉTRICO PARA ESTIMATIVA DE PERDAS DE CARGA EM LINHAS LATERAIS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Paulo Roberto Vieira Alves

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, especialidade em Hidráulica e Saneamento

DEDALUS - Acervo - EESC

31100017147

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto

São Carlos
2000

Class.	TESE
Cutt.	0274
	e.1
Tombo	T0061/02

st 1133 761

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A474a Alves, Paulo Roberto Vieira
Análise de um coeficiente geométrico para estimativa
de perdas de carga em linhas laterais de irrigação por
gotejamento / Paulo Roberto Vieira Alves. -- São Carlos,
2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto.

1. Hidráulica. 2. Irrigação. 3. Gotejamento.
4. Gotejador. 5. Perdas de carga. 6. Coeficiente para
estimativa de perdas de carga. 7. Projeto. I. Título.

Dedico:

À minha esposa, Francisca, à minha filha
Paula, à minha mãe Aparecida e ao meu
pai Waltercides (em memória).

AGRADECIMENTOS

- À Deus.
- Ao Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto, pela orientação fornecida durante a elaboração desse trabalho.
- Ao Prof. Dr. José Renato Zanini pela contribuição ao trabalho.
- Aos Professores (a) Fazal H. Chaudhry, Luiza Fernanda Ribeiro Reis, Hans G. Arens e Woodrow N. L. Roma, pelo apoio e incentivo durante o curso e os trabalhos.
- Ao Professores (as) Eloisa A. M. Kronka , João Álvares da Costa e Sonia M.C. dos Santos, pelo uso das dependências da Microdestilaria de Álcool da Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP.
- Aos alunos Pedro, Eudi e Wagner, que me auxiliaram na parte prática do trabalho.
- Aos colegas de trabalho da UNAERP, Sidinei, Beraldo, Gustavo, Clóvis, Cristina, Jacob, Carmem, Vera, Maurício, Marcos, Ana, Adriana, Rose, Ethel, Casarini e Sandra pela colaboração direta ou indireta.
- Aos funcionários do SHS, EESC/USP, Edson, Pavi, Sá, Rose, Paulo e a todos os outros que de alguma forma me apoiaram.
- À Carborundun de Campinas, Casa das Sementes de Franca, Irrigaplan de Leme, Stéfani de Jaboticabal e Terra –Água de Ribeirão Preto pela colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE GRÁFICOS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Generalidades.....	1
1.2 – Objetivos	6
2 – REVISÃO DE LITERATURA.....	7
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 – Instalação, equipamentos e montagens.....	19
3.2 – Características dos gotejadores e tubos plásticos. Limitações da análise.....	33
3.3 – Metodologia empregada.....	39
3.3.1 – Aferições e calibrações.....	41
3.3.1.1 – Aferição dos manômetros de Bourdon.....	41
3.3.1.2 – Calibração do medidor eletromagnético de vazão.....	42
3.3.1.3 – Calibração e aferição de dois sensores de pressão.....	43
3.3.2 – Testes de adequação e funcionamento das instalações.....	48
3.3.2.1 – Teste 1 – Variação da vazão com o número de gotejadores.....	49
3.3.2.2 – Teste 2 – Variação da carga de pressão com o número de gotejadores.....	50
3.3.2.3 – Teste 3 – Curva $f \times R_{ey}$ para um tubo DT no circuito.....	51

3.3.2.4 – Teste 4 – Curva $f \times \text{Rey}$ usando o tubo D20 e circuitos eletrônicos.....	53
3.3.2.5 – Teste 5 – Curva $f \times \text{Rey}$ usando o tubo D16 e piezômetros.....	55
3.3.3 – Metodologia dos levantamentos e da determinação do índice de obstrução.....	60
3.3.3.1 – Metodologia dos levantamentos com os tubos D16 e D18 e os gotejadores G1, G2, G3 e G4.....	60
3.3.3.2 – Metodologia dos levantamento com os tubos D20 e D22 e os gotejadores G2, G3 e G4.....	62
3.3.3.3 – Metodologia para determinar o índice de obstrução OI.....	65
4 – RESULTADOS.....	70
4.1 – Influência do conjunto tubo/gotejador nas perdas.....	70
4.2 – Definição dos coeficientes para uso na equação de Blasius.....	74
4.2.1 – Tubo circular liso, D16.....	75
4.2.2 – Tubo ligeiramente oval e liso, D18.....	77
4.2.3 – Tubo circular liso, D20.....	79
4.2.4 – Tubo ligeiramente oval e liso, D22.....	81
4.2.5 – Equação geral para os tubos D16, D18 e D20.....	84
4.3 – Tabela dos coeficientes de carga cinética - α	87
4.4 – Tabela da associação entre os valores de coeficiente de carga cinética - α e os valores de índice de obstrução – OI.....	88
4.5 – Análise das relações entre α e OI.....	89
5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	95
ANEXOS.....	98
BIBLIOGRAFIA.....	161

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Esquema geral de um sistema de irrigação por gotejamento.....	2
FIGURA 1.2 - Conjunto motor – bomba e cabeçal de controle.....	3
FIGURA 1.3 – Esquema de instalação com a linha lateral diretamente ligada à linha principal.....	3
FIGURA 1.4 – Laranjal irrigado por gotejamento.....	4
FIGURA 1.5 – Linha lateral com gotejador modelo G3.....	4
FIGURA 2.1 – Coeficiente de atrito em tubos circulares lisos.....	8
FIGURA 2.2 – Curva de Blasius obtida por Von Bernuth e Wilson.....	11
FIGURA 2.3 – Perda nos gotejadores de Al-Amoud.....	12
FIGURA 2.4 – Percentual de aumento nas perdas para vários gotejadores comparadas com tubo liso - Al-Amoud	13
FIGURA 2.5 – Seção longitudinal do tubo com gotejador.....	15
FIGURA 2.6 – Relação entre o coeficiente α e o índice de obstrução OI.....	17
FIGURA 3.1 – Vista geral da Microdestilaria de Álcool.....	18
FIGURA 3.2 – Representação do circuito hidráulico.....	19
FIGURA 3.3 – Reservatório Superior.....	20
FIGURA 3.4 – Detalhe do circuito de estudo com encaixe para tomada de pressão.....	21
FIGURA 3.5 – Reservatório superior – detalhes.....	22
FIGURA 3.6 – Vista das saídas no fundo do reservatório superior.....	22
FIGURA 3.7 – Vista do tubo que conduz água do RS para o circuito de estudo.....	23
FIGURA 3.8 – Vista do conjunto de entrada, MF, para o circuito de estudo.....	23
FIGURA 3.9 – Planta da disposição prevista para o circuito hidráulico.....	24
FIGURA 3.10 – Vista do circuito de estudo – Trecho A.....	25
FIGURA 3.11 – Vista do circuito de estudo – Trecho B	25
FIGURA 3.12 – Vista do final do circuito de estudo com conjunto de medição.....	26

FIGURA 3.13 – Esquema da disposição do reservatório inferior – RI.....	27
FIGURA 3.14 – Reservatório inferior com conjunto elevatório.....	27
FIGURA 3.15 – Diagrama do circuito de medição microprocessado.....	28
FIGURA 3.16 – Desenho da instalação dos detetores de pressão.....	29
FIGURA 3.17 – Tubo transparente ligando tomada de pressão ao piezômetro.....	30
FIGURA 3.18 – Instalação da TP3 com medidor eletrônico.....	30
FIGURA 3.19 – Vista da instalação dos piezômetros e forma de medição.....	31
FIGURA 3.20 - Vista e corte longitudinal da tomada de pressão – TP	32
FIGURA 3.21 – Montagem e instalação da tomada de pressão.....	32
FIGURA 3.22 – Perfis dos gotejadores estudados.....	33
FIGURA 3.23 – Corte longitudinal e transversal dos tubos com gotejadores.....	34
FIGURA 3.24 – Seção transversal de tubo com gotejador e cota de medidas.....	34
FIGURA 3.25 – Perfis dos tubos de polietileno utilizados.....	35
FIGURA 3.26 – Gotejadores instalados em trecho de tubulação.....	36
FIGURA 3.27 – Manômetro de Bourdon – M	41
FIGURA 3.28 – Planta da instalação configurada para testes e calibrações.....	48
FIGURA 3.29 – Diagrama do percurso utilizado no Teste 05, Levantamento A6....	56
FIGURA 3.30 – Planta configurada para levantamento com tubos D16, D18 e gotejadores G1, G2, G3 e G4.....	61
FIGURA 3.31 – Planta configurada para levantamento com tubos D20, D22 e gotejadores G2, G3 e G4.....	63
FIGURA 3.32 – Seção transversal de tubo com gotejador e sem gotejador.....	65
FIGURA 3.33 – Fotocópia do perfil do gotejador G1 – Método da balança.....	66
FIGURA 3.34 – Imagem copiada e tratada no AutoCAD.....	67
FIGURA 3.35 – Cópia, em scanner, dos anéis com e sem gotejadores.....	68
FIGURA 4.1 – Gotejadores inseridos no tubo D18.....	73
FIGURA 4.2 – Famílias de gotejadores estudados; G1, G4 e G2, G3.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 – Aferição inicial do medidor eletromagnético.....	42
GRÁFICO 3.2 – Curva correspondente as aferições do medidor eletromagnético....	43
GRÁFICO 3.3 - Aferição do sensor S1 com tubo D20.....	44
GRÁFICO 3.4 – Aferição do sensor S4 com tubo D20.....	45
GRÁFICO 3.5 – Distribuição dos desvios de S1 e S4 ao longo do piezômetro.....	45
GRÁFICO 3.6 – Calibração entre o manômetro de Bourdon e o sensor S1.....	46
GRÁFICO 3.7 – Calibração entre o manômetro de Bourdon e o sensor S4.....	47
GRÁFICO 3.8 – Curva de vazão em função do número de gotejadores.....	49
GRÁFICO 3.9 – Perda de carga em função do número de gotejadores.....	51
GRÁFICO 3.10 – Curva $f \times \text{Rey}$ para o tubo DT (1).....	52
GRÁFICO 3.11 – Curva $f \times \text{Rey}$ para o tubo DT(2).....	52
GRÁFICO 3.12 – Curva $f \times \text{Rey}$ para o tubo D20 e manômetro de Bourdon.....	54
GRÁFICO 3.13 – Curva $f \times \text{Rey}$ para o tubo D20 e sensores eletrônicos.....	54
GRÁFICO 3.14 – Curva $f \times \text{Rey}$ Trecho reto. Tubo D16 e piezômetro.....	57
GRÁFICO 3.15 – Curva $f \times \text{Rey}$ Trecho curvo. Tubo D16 e piezômetro.....	57
GRÁFICO 3.16 – Curva $f \times \text{Rey}$ Trecho misto. Tubo D16 e piezômetro	58
GRÁFICO 3.17 – Curva $f \times \text{Rey}$ Trecho total . Tubo D16 e piezômetro.....	58
GRÁFICO 3.18 – Curva $f \times \text{Rey}$ com $\text{Rey} < 7000$ – Tubos D16 e D18.....	64
GRÁFICO 3.19 – Curva $f \times \text{Rey}$ com $\text{Rey} < 7000$ – Tubos D20 e D22	64
GRÁFICO 4.1 – Influência da vazão no aumento percentual da perda de carga do tubo D16 com gotejador em relação ao tubo liso	71
GRÁFICO 4.2 – Influência da vazão no aumento percentual da perda de carga do tubo D18 com gotejador em relação ao tubo liso	71
GRÁFICO 4.3 – Influência da vazão no aumento percentual da perda de carga do tubo D20 com gotejador em relação ao tubo liso	72

GRÁFICO 4.4 – Influência da vazão no aumento percentual da perda de carga do tubo D22 com gotejador em relação ao tubo liso	72
GRÁFICO 4.5 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D16.....	75
GRÁFICO 4.6 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D16 com coeficiente corrigido.....	76
GRÁFICO 4.7 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D18.....	77
GRÁFICO 4.8 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D18 com coeficiente corrigido.....	78
GRÁFICO 4.9 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D20.....	79
GRÁFICO 4.10 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D20 com coeficiente corrigido.....	80
GRÁFICO 4.11 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D22.....	81
GRÁFICO 4.12 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubo D22 com coeficiente corrigido.....	82
GRÁFICO 4.13 – Curva $f' \times \text{Rey}'$ Tubo D22 não circular.....	83
GRÁFICO 4.14 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubos D16, D18, D20, circular.....	84
GRÁFICO 4.15 – Curva $f \times \text{Rey}$ Tubos D16, D18, D20, corrigido.....	85
GRÁFICO 4.16 – Relação entre OI e α para G2 e tubos D16, D18, D20, D22.....	89
GRÁFICO 4.17 – Relação entre OI e α para G3 e tubos D16, D18, D20, D22.....	90
GRÁFICO 4.18 – Relação entre OI e α para G4 e tubos D16, D18, D20, D22.....	90
GRÁFICO 4.19 – Relação entre OI e α para G1,G4 e tubos D16, D18, D20, D22...	91
GRÁFICO 4.20 – Relação entre OI e α para G2,G3 e tubos D16, D18, D20, D22...	91
GRÁFICO 4.21 – Relação Geral entre OI e α para G1, G2, G3 e G4 e tubos D16, D18, D20, D22.....	92
GRÁFICO 4.22 – Gráfico com a banda de predição para a equação 4.1.....	93
GRÁFICO 4.23 – Gráfico comparativo entre as curvas das equações 4.1 e 2.21.....	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Procedência e modelo dos gotejadores.....	33
TABELA 3.2 – Dimensões da projeção interna dos gotejadores nos tubos.....	34
TABELA 3.3 – Dimensões e características dos tubos utilizados.....	36
TABELA 3.4 – Parâmetros de gotejadores, dados de instalação e velocidades de escoamento.....	37
TABELA 3.5 – Aferição dos manômetros de Bourdon.....	41
TABELA 3.6 – Ajustes de tensão e carga de pressão nos sensores.....	44
TABELA 3.7 – Vazão na tubulação em função do número de gotejadores.....	49
TABELA 3.8 – Perda de carga de pressão em função do número de gotejadores.....	50
TABELA 3.9 – Valores de OI pelo método da balança.....	66
TABELA 3.10 – Valores de OI com recursos da informática.....	67
TABELA 3.11 – Valores de OI para cada conjunto tubo/gotejador estudado.....	69
TABELA 4.1 – Valores de α para cada conjunto tubo/gotejador.....	87
TABELA 4.2 – Valores de OI e α para cada conjunto tubo/gotejador.....	88

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
UNAERP	Universidade de Ribeirão Preto
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m^2).
Ai	Tabelas ou gráficos constantes no Anexo.
A/D	Analógico/digital.
C	Coefficiente de Hazen-Williams.
C _A	Constante da lei da distribuição de velocidades.
c	Coefficiente da equação de Blasius.
D	Diâmetro (mm), (m).
dS	Medida dos desvios entre valores dos sensores e dos piezômetros.
F	Fator de Christiansen
f	Coefficiente de atrito.
f*	Coefficiente de atrito para tubos não circulares.
G	Gotejador
Gi	Modelo do gotejador
g	Aceleração gravitacional, $9,81 \text{ m/s}^2$
H	Perda de carga total incluindo o fator de Christiansen (m)
h _L	Perda de carga na linha (m)
h _f	Perda de carga localizada (m)
h _T	Perda de carga total (m)
J	Perda de carga unitária (m/m)
L	Comprimento da linha (m)
Le	Comprimento equivalente (m)
M	Manômetro de Bourdon
MF	Manômetro de Bourdon e Filtro
MV	Manômetro de Bourdon e Medidor de vazão.
m	Expoente da equação de Blasius.

N	Número de gotejadores da linha.
n	Parâmetro de distribuição de velocidade
OI	Índice de obstrução
P	Perímetro (m), (mm)
Q	Vazão (m ³ /h), (L/s)
R	Raio (m), (mm)
r	Razão entre áreas
Rey	Número de Reynolds
Rey'	Número de Reynolds para tubos não circulares
R _h	Raio hidráulico (m)
RI	Reservatório inferior
RS	Reservatório superior
S	Sensor de pressão.
TP	Tomada de pressão.
u _x	Velocidade de atrito (m/s)
v	Velocidade (m/s)
V	Volume (m ³)
α	Coefficiente de resistência de carga cinética.
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s)

RESUMO

ALVES, P.R.V. (2000). *Análise de um coeficiente geométrico para estimativa de perdas de carga em linhas laterais de irrigação por gotejamento*. São Carlos. 163p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os projetos hidráulicos para sistemas de irrigação por gotejamento, geralmente, desprezam as perdas de carga localizadas devido ao ressalto resultante da conexão dos gotejadores nas linhas laterais, ou então, estabelecem coeficientes médios ou taxas percentuais para o cálculo destas perdas. No entanto, essas perdas localizadas podem ser bastante significativas, variando com a vazão e a relação modelo do gotejador com diâmetro da tubulação instalada. Esta dissertação apresenta os resultados de uma pesquisa experimental para determinar uma relação matemática que permita estimar as perdas de carga localizadas para cada conjunto gotejador – tubo. Esta relação matemática associa os coeficientes de resistência de carga cinética, em diferentes vazões, com índices geométricos de obstrução para quatro seções, circulares e levemente ovais, de diferentes tubos de polietileno e, quatro modelos de gotejadores, todos comercializados na região de Ribeirão Preto. Abordaram-se ainda aspectos do uso da equação de Blasius para cálculo das perdas de carga distribuída e a influência da variação da viscosidade no escoamento.

Palavras-chave: hidráulica; irrigação; gotejamento; gotejador; perdas de carga; coeficiente para estimativa de perdas de carga; projeto.

ABSTRACT

ALVES, P.R.V. (2000). Analysis of a geometrical coefficient to estimate the head losses in lateral lines of drip irrigation. São Carlos. 163 p. Dissertation (Master's Degree) –São Carlos' Engineering School, São Paulo University. (Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo).

The hydraulic projects to drip irrigation systems, usually disregard the localized head losses because of the detach of the drip's connection in the lateral lines, or establish average coefficients or percentual rates to calculate these losses. However, these localized losses can be rather significant, varying according to the flow and the drip's model connection with the diameter of the installed tubing. This dissertation presents the results of an experimental research to determine a mathematical relation that allows us to estimate the localized head losses to each drip group - tube. This mathematical relation associates the resistance of kinetic head, in different flows, with geometrical contents of obstruction to four sections, circular and slightly oval, from different polietilene tubes, and four models of drips, commercialized in Ribeirão Preto's region. It's also discussed the aspects of the usage of Blasius equation to calculate the losses of distributed head and the influence of viscosity variation during the drain.

Key words: hydraulics; irrigation; drip; head losses – coefficient to estimate; project.

1. INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

Os sistemas de irrigação por gotejamento são aqueles onde a água é aplicada diretamente ao solo, em quantidades controladas de forma a manter uma região úmida próxima à raiz da planta. O processo de gotejamento é realizado por tubos flexíveis de pequeno diâmetro, através de orifícios em sua parede ou por pequenas peças de plástico inseridas no tubo, denominadas gotejadores. Esse método de irrigação, bastante utilizado em países da Europa, Oriente Médio e outros, vem ganhando importância no Brasil, principalmente nas regiões onde a água é escassa, cara ou onde há necessidade de algum tipo de controle e economia, pois o processo possibilita a diminuição da evaporação, maior eficiência na aplicação de fertilizantes, economia no uso de água tratada ou reservada para períodos de estiagem, diminuição na incidência das ervas daninhas e insetos, economia de mão-de-obra, etc. Mas, por apresentar um custo inicial elevado sua utilização fica restrita às culturas que possibilitam um retorno financeiro correspondente. No caso de Ribeirão Preto e região, o sistema é utilizado na cultura de frutas, alguns hortifrutigrangeiros e flores.

Tais sistemas de irrigação consistem em uma rede de tubos, formada por linhas primárias ou de distribuição ligadas às linhas de derivação que, por sua vez, ficam ligadas a linhas secundárias ou laterais. Nas linhas laterais inserem-se gotejadores espaçados, geralmente, de 0,50 a 1,50 m, conforme a cultura. As linhas primárias e derivação são constituídas de tubos de PVC ou polietileno, com diâmetros nominais de 40 a 75 mm, e as linhas secundárias ou laterais, de tubos de polietileno, com diâmetros nominais de 12 a 32 mm, de seções circulares ou ligeiramente ovais. A capacidade nominal de trabalho em função da carga de pressão variam de 20 ou 40 mH₂O. Os comprimentos das linhas laterais possuem, segundo os

catálogos consultados, de 20 a 400 m, sendo mais comum, comprimentos na faixa de 100 m, perfazendo um total de 2000 m/ha para pomares a 20000 m/ha para morangos e flores, conforme Manual da Agrojet ® e contato com revendedores. As Figuras 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, e 1.5 mostram exemplos de instalações típicas deste tipo de irrigação.

Entre os diferentes tipos de gotejadores existentes, foram utilizados neste trabalho os tipos denominados “sobre a linha”, os quais são conectados à linha lateral através de um pequeno orifício, ficando seu corpo para fora e apenas um pequeno ressalto cônico para dentro, prendendo-o ao tubo. Para estes gotejadores, as cargas de pressão nominais variam de 3 a 40 mH₂O, conforme medidas apresentadas nos catálogos consultados, no entanto, para a maioria, a carga de pressão de serviço está em torno de 10 mH₂O de acordo com BERNARDO (1995).

Figura 1.1 – Esquema geral de um sistema de irrigação por gotejamento.

O dimensionamento destes projetos constitui-se, basicamente, em determinar a perda distribuída ao longo dos tubos e as perdas localizadas, devido a singularidades nas linhas primárias, de derivação e aos gotejadores nas linhas laterais. Conforme muitas pesquisas anteriores, citadas em AL-AMOUD (1995), e mais recentemente na internet, em [http:// www. netafim.com.br/dicas](http://www.netafim.com.br/dicas) (1999), as perdas devido aos gotejadores são desprezadas. No entanto, apesar da extensão dos tubos, o número de gotejadores instalados chega a provocar uma perda localizada

bastante significativa sobre o total de perdas das linhas laterais (HOWELL e BARINAS, 1980; AL-AMOUD, 1995; BAGARELLO et al., 1997).

Figura 1.2 – Conjunto motor – bomba e cabeça de controle. UNESP – Jaboticabal-SP.

Figura 1.3 – Esquema de instalação com a linha lateral, com válvula, diretamente ligada à linha principal. Plantação de bananeira, UNESP, Jaboticabal-SP.

Figura 1.4 – Laranjal irrigado por gotejamento – UNESP, Jaboticabal-SP.

Figura 1.5 – Linha lateral com gotejador modelo G3 para irrigação de laranjeira. UNESP, Jaboticabal-SP.

Para o cálculo das perdas distribuídas são, geralmente, usadas as equações de Hazen-Williams, Scobey ou Manning e, para o cálculo das perdas de carga localizadas, são usados ou um coeficiente fixo de resistência de carga cinética ou índices percentuais aplicados sobre as perdas distribuídas. No entanto, pesquisas experimentais vêm mostrando que o melhor procedimento para estimar as perdas distribuídas em tubos plásticos e lisos (PVC, polietileno, etc), de pequeno diâmetro, é através da equação de Darcy-Weisbach, com o fator de atrito calculado pela fórmula de Blasius. Esta fórmula é adequada, porque os escoamentos turbulentos, neste tipo de linha, apresentam números de Reynolds condizentes com a faixa de aplicação da equação de Blasius. Para determinar as perdas localizadas, o trabalho de BAGARELLO et al.(1997) abre a possibilidade de utilização de coeficientes adequados a cada conjunto tubo – gotejador, obtidos a partir da taxa média de ocupação do tubo que cada modelo de gotejador proporciona.

Tendo como fonte principal de referência as publicações de BAGARELLO et al. (1995 e 1997), foi reformada na Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, uma instalação semelhante à descrita na publicação de 1995, adaptando-a ao espaço e condições locais, mas respeitando indicação de pressão média feita em BERNARDO (1995). Nesta instalação o trabalho foi desenvolvido como no campo, sujeito às condições de temperatura ambiente, insolação e exposição ao vento, utilizando tubos e gotejadores comercializados na região de Ribeirão Preto. Com os dados experimentais obtidos nesta instalação foram apresentados resultados que possibilitaram comparações com os resultados de BAGARELLO et al.(1995 e 1997).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem o objetivo de realizar um estudo sobre perdas de carga em linhas laterais de irrigação por gotejamento com tubos e gotejadores comercializados na região de Ribeirão Preto e apresentar um processo de estimativa destas perdas, com base em dados obtidos experimentalmente.

1.2.2. Objetivos Específicos

- verificar as perdas de carga localizadas para diferentes conjuntos tubos – gotejadores.
- analisar a equação de Blasius com modificações, para otimizar o cálculo de perdas de carga distribuídas.
- ajustar uma equação potência capaz de associar coeficientes de resistência de carga cinética, α , com índices de obstrução geométrico, **OI**, obtidos da inserção de gotejadores em tubos plásticos flexíveis de pequeno diâmetro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A bibliografia consultada sobre perdas de carga, em escoamentos permanentes e turbulentos de fluidos reais, através de tubos lisos de seção circular, reporta a equação de Darcy – Weisbach.

$$J = f \frac{v^2}{2 g D} \quad (2.1)$$

Na equação, f é o fator de atrito que, para estes tubos com escoamento permanente em regime turbulento na faixa de $4.10^3 < \text{Rey} < 10^5$, pode ser calculado pela equação de Blasius;

$$f = 0,3164 \text{Rey}^{-0,25} \quad (2.2)$$

conforme mostra o gráfico da Figura 2.1, constante nas referências SCHILICHITING (1955) e MONIN E YAGLOM (1979), a partir de investigações experimentais de Nikuradse e outros.

O escoamento turbulento através de tubos com seção transversal não circular foi investigado por L. Schiller e J. Nikuradse para seções retangulares, triangulares, trapezoidais e tubos circulares chanfrados, conforme SCHILICHITING (1955), que apresenta uma equação geral equivalente a (2.1), utilizando o raio hidráulico, R_h ;

$$J = f' \frac{v^2}{4 g R_h} \quad (2.3)$$

com,

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (2.4)$$

onde A é a área da seção transversal, e P, o perímetro molhado. Se o número de Reynolds, indicado por $Re_y' = v R_h / \nu$ estiver acima de $2 \cdot 10^3$ até 10^5 a equação de Blasius para escoamento turbulento será escrita:

$$f' = 0,133 (Re_y')^{-0,25} \quad (2.5)$$

Figura 2.1 – Coeficiente de atrito em tubos circulares lisos ($\lambda = f$).

1. Escoamento laminar. 2. Curva de Prandtl. 3. Curva de Blasius.

Fonte : MONIN, A. S., e YAGLOM, A. M. (1979), Statistical fluid mechanics: mechanics of turbulence, pg 308 , Vol. 1, MIT Press, Cambridge, Mass.

WATTERS e KELLER (1978) mostram, em um diagrama de Moody de sua publicação, a curva de comportamento de um tubo plástico de $\frac{1}{2}$ ", levemente oval e com pin-heads distribuídos ao longo de sua superfície interna, pouco acima da curva de tubos lisos, na faixa de $4 \cdot 10^3 < Re_y < 2,5 \cdot 10^4$. Mas demonstram, no diagrama seguinte, com dados de Paraqueima (1977), que um tubo de polietileno – $\frac{1}{2}$ ", levemente oval apresenta comportamento de tubo circular a grandes cargas de pressão (42 mH₂O), ou seja, pouco abaixo da curva de tubos lisos, concordando com curvas de tubos de PVC e cobre. Ainda no seu artigo, comentam que a equação de

Hazen-Williams, $J = K (Q / C)^{1,852} D^{-4,87}$, com $C = 150$ subestima valores das perdas, pois foi originalmente desenvolvida para valores de número de Reynolds acima de 10^5 , enquanto que para linhas laterais com gotejadores, os valores de Reynolds acima da região laminar atingem somente de 2.10^4 a 4.10^4 ; citam a facilidade de calcular estas perdas distribuídas, utilizando uma combinação das fórmulas de Darcy-Weisbach e Blasius, e apresentam uma equação empírica que estima em comprimento equivalente as perdas localizadas devido à instalação dos gotejadores.

MONIN e YAGLOM (1979), definem que, para uma faixa limitada de valores de Rey, $4.10^3 < \text{Rey} < 10^5$, o fator de atrito pode ser representado pela equação geral,

$$f = c \text{ Rey}^{-m} \quad (2.6)$$

e a equação da Lei da Distribuição de Velocidades, para regime turbulento, por;

$$\frac{v}{u_x} = C_A \left(\frac{R}{v} u_x \right)^{1/n} \quad (2.7)$$

onde v é a velocidade média, u_x , a velocidade de atrito, R , o raio do tubo, v , a viscosidade cinemática, C_A , constante e n , parâmetro de distribuição de velocidades.

Associando a equação (2.6) à equação da velocidade de atrito $u_x = v \sqrt{\frac{f}{8}}$, para escoamento permanente em tubos circulares, e comparando os expoentes da relação final com a equação (2.7), obtém-se ;

$$m = \frac{2}{(n + 1)} \quad (2.8)$$

que foi utilizada nos trabalhos de Bagarello et al. para cálculo das perdas distribuídas nas linhas laterais.

A partir dos trabalhos de HOWELL e HILER (1974) e KELLER e KARMELI (1975), cuja proposta é que a perda de carga, devido aos gotejadores,

devem ser consideradas nos projetos de irrigação, HOWEL e BARINAS (1980) realizaram um trabalho experimental com seis modelos diferentes de gotejadores, utilizando os resultados das diferenças entre as perdas totais e as perdas distribuídas calculadas com a equação de Hazen-Williams, determinam uma equação empírica que permite o cálculo da perda de carga localizada na forma de um comprimento equivalente, $Le = Ce.Q^B$ onde, Ce e B são constantes específicas para cada gotejador analisado. Neste trabalho, são utilizados tubos de polietileno e de PVC com diferentes diâmetros e cita-se como velocidade limite recomendada 1,5 m/s.

KAMAND (1988) estuda variações na estimativa de potência de bombas através das equações de Hazen-Williams, Manning e Darcy-Weisbach, observando que Hazen-Williams subestima valores e Manning superestima valores de potência, em comparação com Darcy-Weisbach.

Por meio de simulações em computador, Kamandi analisa diferenças no cálculo de perda de carga em tubulações de aço e PVC, em função da velocidade de escoamento e do diâmetro do tubo. Mostra também que para velocidades de escoamento entre 0 e 2 m/s, típicas de irrigação e de redes municipais, os coeficientes C de Hazen-Williams e n de Manning sofrem mais variações do que normalmente os engenheiros consideram nos cálculos das perdas.

VON BERNUTH e WILSON (1989), fundamentados em uma série de resultados experimentais, seus e de outros autores, verificam a validade da equação de Blasius, $f = c \text{Rey}^{-m}$, para tubos lisos de PVC, cobre e polietileno de pequeno diâmetro. No caso de tubos de polietileno, um dos resultados do seu trabalho é representado pela equação ajustada na Figura 2.2, mas quando são utilizados os resultados de todos autores citados no trabalho, a constante c apresenta uma média 0,315 para $4.10^3 < \text{Rey} < 10^5$. Nesse trabalho os autores apresentam também para cálculo da perda de carga distribuída a equação $h_L = k v^{0,25} L Q^{1,75} D^{-4,75}$, associando as equações de Darcy-Weisbach com Blasius.

Na sua montagem experimental, para justificar a localização das tomadas de pressão, Von Bernuth e Wilson citam SCHILICHTING (1968)*. Este indica que em

* Schlichting, H. (1968). "Boundary layer theory." 6th Ed., McGraw-Hill, New York, NY.

regime de escoamento laminar são necessários acima de 300 diâmetros de distância da entrada ou da saída da tubulação para evitar interferências na medição de pressões, enquanto que para escoamentos turbulentos 100 diâmetros são suficientes. Quanto ao efeito de curvas, os autores citam URBINA (1976)* que, através de testes, determinou que quando a razão entre o raio de curvatura e o raio do tubo exceder a 100, a diferença entre as perdas de carga da seção na curva e na reta são desprezíveis.

Friction Factors and Prediction Curves for 1/2-in. (14-mm) Polyethylene Tubing (Univ. of Tennessee Data)

Figura 2.2 – Curva de Blasius que melhor se ajusta aos dados experimentais em relação a outras curvas para tubos lisos em regime turbulento.

Fonte: VON BERNUTH, R.D. e WILSON, T. (1989), Friction factor for small diameter plastic pipe. J. Hydr. Engrg., ASCE. 115 (2).

MC ENROE (1989), em discussão publicada, recomenda o abandono das equações de Hazen-Williams e Manning para tubos lisos e aconselha o uso da equação de Darcy-Weisbach com o fator de atrito, calculado por Swamee-Jain. Na mesma discussão, VON BERNUTH (1989) reafirma o uso da equação de Darcy-Weisbach, com o fator de atrito calculado pela equação de Blasius, por terem ambas fundamentação teórica e facilidade de manipulação.

* Urbina, J. L. 1976. "Head loss characteristic of thistle irrigation hose with emitters," thesis presented to the Utah State University, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.

VON BERNUTH (1990) analisa a acurácia da equação de Blasius e substitui $k v^{0,25}$ por uma constante k' na equação apresentada em VON BERNUTH (1989). Apresenta também uma tabela para corrigir k' em função da temperatura quando se utiliza a equação de Darcy-Weisbach fora da temperatura padrão, e justifica que a temperatura altera a viscosidade da água, ocasionando erros nos cálculos das perdas quando este procedimento é ignorado.

AL-AMOUD (1995) realiza um trabalho experimental com os tubos ligados diretamente à bomba e determina a perda de carga, em linhas secundárias, para cinco diâmetros de tubo de polietileno e oito gotejadores diferentes, denominados Ei. Em sua instalação são distribuídos 45 gotejadores em 50 metros de linha, espaçando-os 1,0 m um do outro. Utiliza a equação de Hazen-Williams com valores de C, correspondentes a cada diâmetro, e velocidade limite de 1,5 m/s. Nas análises, gráficas seus resultados mostram a existência de perdas pronunciadas nos tubos de 13 mm, em relação a outros diâmetros (Figura 2.3) e perdas de até 32% a mais nos tubos com gotejadores, quando comparadas com o tubo liso (Figura 2.4), e propõe uma relação entre comprimento equivalente e área de resistência do gotejador.

Figura 2.3 – Perdas nos gotejadores para vários diâmetros internos de tubos e áreas de projeções internas. O, 13 mm; ▲, 16 mm; △, 18 mm; □, 22 mm; ● 25 mm.

Fonte : AL-AMOUD, A. L. (1995), "Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines", J.Agric.Engrg.Res., 60(1), pp 1- 5 .

Figura 2.4 - Porcentual de aumento nas perdas comparadas com as perdas nos tubos lisos para vários gotejadores e diâmetros de tubo para velocidade de 1,5 m/s.

+, E1; O, E2; □, E3; ×, E5; ■, E6; ▲, E7; Δ, E8.

Fonte : Al - AMOUD, A. L. (1995), "Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines", J.Agric.Engrg.Res., 60(1), pp 1- 5 .

BERNARDO (1995) comenta a existência de várias equações para dimensionar as linhas laterais, porém cita, como principais, as equações de Hazen-Williams e a de Darcy-Weisbach.

Para o dimensionamento da instalação, a perda total na linha lateral, H , é determinada a partir do cálculo da perda total na linha, sem gotejadores, h_L , acrescentada das perdas localizadas devido aos gotejadores, $N h_f$, sendo N , o número de gotejadores na linha, e a soma, multiplicada por um fator F , denominado fator de Christiansen, para compensação das múltiplas saídas.

$$H = (h_L + N h_f) \cdot F \quad (2.9)$$

onde,

$$h_L = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (2.10)$$

e,

$$h_f = \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (2.11)$$

sendo, h_f , a perda localizada em um gotejador, v , a velocidade média de escoamento e $\alpha = 0,6$, um valor constante e aproximado, quando se tem gotejadores conectados sobre a linha.

BAGARELLO et al. (1995), a partir de um estudo realizado em uma montagem experimental, com pressão constante e temperatura controlada, propõem uma dupla abordagem da lei de resistência ao escoamento em tubos plásticos de pequeno diâmetro.

Utilizando três diâmetros diferentes de tubos de polietileno (16, 20 e 25 mm), promovem um cuidadoso levantamento de vazões com diferentes números de Reynolds e temperatura, variando entre 10 e 50 °C, e determinam equações para o cálculo de perdas de carga nas tubulações, através de duas abordagens. A primeira, uma fórmula empírica cujo resultado confirma a equação de Blasius com diferente coeficiente c ,

$$f = 0,302 \text{ Rey}^{-0,25} \quad (2.12)$$

A segunda é uma abordagem denominada semiteórica, em que, inicialmente foram associadas as expressões teóricas, envolvendo o resultado da integração da Lei da

Potência, $k \frac{v}{u_x} = \frac{2n^2}{n+1}$, para o perfil de velocidades no regime turbulento com a

equação de Darcy-Weisbach; $f = \frac{2gDJ}{v^2} = 2k^2 \frac{(n+1)^2}{n^4}$, onde k , é a constante de von Kármán. Essa associação permite a obtenção gráfica do par (n, Rey) cuja análise fornece a relação;

$$n = 7 - (12,40 \text{ Rey}^{-0,157}) \quad (2.13)$$

Da relação entre a equação (2.13) e das equações (2.6) e (2.8), tem-se o expoente m em função do número de Reynolds,

$$m = \frac{2}{8 - (12,40 \text{ Rey}^{-0,157})} \quad (2.14)$$

e uma curva é ajustada para o par (c, Rey) obtendo-se a relação;

$$c = 6,152 \text{ Rey}^{-0,183} \quad (2.15)$$

De acordo com a publicação as duas abordagens, uma através da equação (2.12) e outra através da fórmula de Blasius (2.6) com o expoente m, dado por (2.14), e o coeficiente c, dado por (2.15), obtém-se resultados equivalentes e, ambas, podem ser usadas em outras pesquisas.

BAGARELLO et al. (1997), utilizando a montagem do trabalho de 1995 e cuidadoso processo experimental, comprovam a equivalência das equações, empírica e semitéórica, para o cálculo das perdas em tubos de polietileno de diâmetros nominais 16 e 20 mm.

Também é proposto um índice geométrico de obstrução, que represente a conexão do gotejador com o tubo, sua projeção interna e a deformação do tubo na posição de inserção do gotejador, conforme Figura 2.5.

Figura 2.5 - Trecho da seção longitudinal do tubo com gotejador .

Devido à projeção do gotejador, no interior do tubo, tem-se a equação (2.16) obtida pelo princípio da similaridade de Reynolds, SHILICHITING (1955),

$$h_f = \alpha \frac{v_0^2}{2g} \quad (2.16)$$

Nela h_f representa a perda de carga localizada, devido ao gotejador, e corresponde a uma fração da carga cinética. O coeficiente α é um coeficiente adimensional de resistência ou da carga cinética, e v_o , a velocidade média de aproximação da corrente fluida.

Na Figura 2.5, observa-se que a perda de carga h_f é devida ao brusco estreitamento e posterior alargamento no ponto de conexão do gotejador. Essa perda deve ser considerada como a soma das perdas nos trechos de contração, h_c , e alargamento, h_a .

No entanto, a perda de carga, devido à contração, é muito pequena e normalmente desprezada, considerando-se para cálculos apenas a perda devido ao alargamento. Dessa forma, $h_f \cong h_a$.

Aplicando o teorema da quantidade de movimento para o alargamento brusco entre as seções 1 e 2, obtém-se a relação;

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad (2.17)$$

O índice geométrico de obstrução, OI, é obtido a partir da equação (2.17) e associa a área de escoamento na posição em que o gotejador foi instalado, A_1 , com a área de escoamento do tubo livre, A_2 , através da equação da continuidade.

$$OI = \frac{(1 - r)^2}{r^2}, \quad (2.18)$$

para
$$r = \frac{A_1}{A_2} \quad (2.19)$$

A relação (2.20) apresenta OI como um coeficiente da carga cinética.

$$h_f = OI \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.20)$$

Como v_o e v_2 são iguais, as equações (2.16) e (2.20) são correspondentes, e uma equação empírica ajustada por regressão para o par (OI, α) é representada por:

$$\alpha = 1,68 OI^{0,645} \quad (2.21)$$

A equação (2.21) permite o cálculo do coeficiente de resistência, a partir de dados geométricos, e apresenta-se fisicamente consistente, pois, quando A_1 é muito menor que A_2 , o índice de obstrução é grande e o coeficiente de resistência também, porém, se $A_1=A_2$, o índice de obstrução, o coeficiente de resistência e a perda de carga localizada tendem a zero.

O trabalho de BAGARELLO et al.(1997) envolveu de 10 a 15 corridas por gotejador nos tubos com diâmetros 16 e 20 mm, fornecendo uma variação para o coeficiente α entre 0,080 a 1,298. No entanto, a curva que fornece a relação empírica (2.21), associa somente os valores de α menores que 1,0 e os valores de OI entre 0,02 e 0,17 conforme gráfico da Figura 2.6.

Figura 2.6 – Relação entre o coeficiente α e o índice de obstrução OI

Fonte : BAGARELLO, V, et al. (1997), "Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines", J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, Vol. 123, nº 1, January/February, 1997, p5.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido na Microdestilaria de Álcool do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnológicas – CCENT da Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, localizada em Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil, à Av. Costabile Romano nº 2201.

*Figura 3.1 – Vista geral da Microdestilaria de Álcool
UNAERP, Ribeirão Preto - SP*

3.1. INSTALAÇÃO, EQUIPAMENTOS E MONTAGENS.

A instalação consiste de um circuito hidráulico fechado entre dois reservatórios, RS-RI, capaz de propiciar a utilização de água limpa, nas pressões e vazões adequadas para o circuito de tubo plástico, entre as posições MF-MV, que contém os gotejadores em estudo.

Figura 3.2 – Representação do circuito hidráulico. - RS, reservatório superior; RI, reservatório inferior; MF – manômetro Bourdon e filtro; MV – manômetro de Bourdon e medidor de vazão; TP – tomadas de pressão; B – Bomba.

Como reservatório superior foi utilizada uma caixa metálica sobre uma torre de aço tubular de altura igual a 14,8 m acima do solo, com acesso lateral através de uma escada de marinheiro com proteção nos lados e nas costas. Para aumentar a segurança e a estabilidade da estrutura, foram instalados quatro novos cabos de aço ligando o cimo da torre ao solo. Dessa forma, as variações de leitura nos

piezômetros, instalados junto a escada, foram minimizadas, pois a estrutura estava sujeita às vibrações devido aos movimentos do operador e ventos. A caixa foi dividida por uma parede niveladora, em duas partes desiguais, sendo na menor delas instalado um ladrão ligado ao reservatório inferior (Figura 3.3). Na parte maior, com capacidade máxima de $0,224 \text{ m}^3$, ficou a entrada de água através da linha de recalque, em PVC $\frac{3}{4}$ ", que termina em um trecho com a abertura encostada no fundo da caixa para diminuir a turbulência e um orifício, no fundo da caixa (Figuras 3.3 e 3.5), através da qual a água limpa é conduzida por uma tubulação de polietileno Cipla – 32 mm (Figura 3.6), presa a um dos cabos de aço da estrutura, até a posição MF, início do circuito com gotejadores, denominado circuito de estudo. A cota geométrica do nível de água no reservatório superior é mantida constante em $(14,51 \pm 0,02) \text{ m}$ acima da posição MF, através de um conjunto motor – bomba, B, e da parede niveladora do reservatório. Esta cota apesar de mais baixa que a indicada nos trabalhos de BAGARELLO et al.(1995), apresenta valor de carga de pressão acima de $10 \text{ mH}_2\text{O}$, valor médio indicado na publicação de BERNARDO (1995).

Figura 3.3. – Reservatório Superior – RS. Vista superior e corte longitudinal.

A água do reservatório superior, que desce através do tubo de 32 mm, atravessa, antes de entrar no circuito de estudo, o conjunto de entrada (MF) para controle, filtragem e medição. Este conjunto é constituído por um registro de gaveta

$\frac{3}{4}$ " ; um filtro $\frac{3}{4}$ " série Disc Filter Rings, malha 120, modelo DFR075120 da Netafim, e um manômetro de Bourdon comercial, com fundo de escala igual a 20 mH₂O e menor divisão 0,5 mH₂O. O conjunto foi instalado sobre um pequeno poste de PVC concretado ao solo. Este tipo de registro permite bom controle da vazão, e assim como o modelo do filtro utilizado, tem baixa perda de carga. O manômetro de Bourdon foi instalado para pré – testes e usado para acompanhar as manobras no registro.

Através de uma união, os tubos de polietileno foram conectados ao conjunto de entrada (MF) (Figura 3.8) e em seguida, estendidos sobre a estrutura do circuito de estudo. Esta estrutura (Figuras 3.4, 3.10 e 3.11) que inicia a um metro do conjunto de entrada, consiste de dois canos de aço de $\frac{1}{2}$ " que seguem lado a lado aparafusados um ao outro e presos sobre postes de madeira até atingir os degraus de uma pequena arquibancada de aula. Os postes de madeira foram espaçados adequadamente para evitar flexão excessiva dos canos de aço. Do início até o final da arquibancada, onde está localizado o segundo manômetro de Bourdon (M) e o medidor de vazão (V), seguem sobre o degrau de cimento dois canos de PVC $\frac{1}{2}$ ", finalizando a estrutura do circuito de estudo. Os postes de madeira permitem o nivelamento dos canos sobre solo irregular e a disposição dos canos de aço e PVC favorecem o apoio dos tubos de polietileno. Nos pontos de instalação das tomadas de pressão (TP), os canos foram cortados permitindo seu encaixe nos tubos (Figura 3.4).

Figura 3.4 – Estrutura do circuito de estudo com encaixe para tomada de pressão.

Ao longo do circuito de estudo (MF – M), os tubos de polietileno foram assentados entre os canos e amarrados com cordas finas de nylon em intervalos que permitiram impedir o desalinhamento devido a dilatação.

Figura 3.5 – Reservatório superior com divisão para o ladrão à esquerda e entrada da água de recalque à direita com saída junto ao fundo da caixa para evitar a turbulência.

Figura 3.6 – Vista do fundo do reservatório superior, mostrando à direita, saída para o circuito de estudo e à esquerda, o ladrão.

Figura 3.7 – Vista do tubo azul de 32 mm que conduz água do reservatório superior até a entrada do circuito de estudo e detalhe do cabo de aço de reforço da torre que sustenta o tubo.

Figura 3.8 – Vista do conjunto de entrada, MF, para o circuito de estudo, mostrando as conexões, registro, filtro de disco e manômetro de Bourdon.

Em função da área disponível no local, a planta da instalação assumiu a forma representada na Figura 3.9.

PLANTA HIDRAULICA DO PERCURSO

Figura 3.9 – Planta da disposição prevista para o circuito hidráulico.

Figura 3.10 – Vista do circuito de estudo, mostrando acima e à direita, o final do trecho A, em seguida a curva, e abaixo, o início do trecho B.

Figura 3.11 – Vista do circuito de estudo, mostrando o final do trecho B com a curva antecedendo o trecho C, à direita, que segue sobre a arquibancada.

Ao final do circuito, o tubo de polietileno é ligado através de outra união, a um segundo conjunto de controle e medição (MV) (Figura 3.12). Este conjunto, montado em tubo de PVC 32 mm, é constituído de um manômetro de Bourdon comercial (M) com indicação de carga de pressão máxima 20 mH₂O e precisão de 0,25 mH₂O, um medidor de vazão magnético-indutivo - CONAUT - IFS4000 , diâmetro de 32 mm, com conversor de sinal SC 100AS (V) e um registro de gaveta – 32 mm. O circuito de estudo apresenta uma inclinação média de 1,4% do início (MF) até o seu fim no medidor de pressão (M). O trecho final da canalização de PVC fica elevado 40 cm acima do medidor de vazão CONAUT para mantê-lo cheio de água e facilitar a saída das bolhas e resíduos de plástico devido à furação. Percorrido o circuito de estudo, a água é descarregada no reservatório inferior (RI) com capacidade máxima de 0,250 m³. Para devolver a água ao reservatório superior, foi instalado um conjunto elevatório constituído de uma bomba centrífuga DARKA - Modelo ARM-5 de 1,5 cv, trifásica, afogada e 32 m de tubulação de recalque em PVC 3/4" (Figuras 3.13 e 3.14).

Figura 3.12 – Vista do final do circuito de estudo, trecho C, com o conjunto de medição MV constituído de manômetro de Bourdon M e medidor eletromagnético de vazão V. No primeiro plano, detalhe do tubo de PVC elevado para entrada no reservatório inferior.

Figura 3.13 – Esquema da disposição do reservatório inferior – RI, e do conjunto elevatório.

*Figura 3.14 – Reservatório inferior com conjunto elevatório.
Detalhe da saída do ladrão em tubo de polietileno preto.*

Para controle das cargas de pressão nas posições TP1, TP2, TP3 e TP4 nas extremidades dos trechos A, B e C, (Figura 3.9) foram montados quatro medidores microprocessados, utilizando-se sensores piezoresistivos, de marca Ômega, modelos PX71 – 030 GV, adequados para montagem em PC. Capaz de suportar carga de pressão até 21 mH₂O e possuindo sensibilidade de 7,8 mV/m, cada sensor teve seu sinal amplificado até 5 V, equivalente a 15 m de coluna de água. Do amplificador operacional de cada sensor, o sinal foi transportado por um cabo coaxial até uma placa A/D de 8 bits instalada em um PC-486. Cada amplificador foi alimentado por uma fonte retificada de 9 V, veja Figura 3.15 com desenho do diagrama elétrico.

Figura 3.15 – Diagrama do circuito de medição microprocessado.

Para processar os dados recebidos de cada tomada de pressão, foram desenvolvidos dois programas; um, preliminar, em Pascal e outro em Delphi. Os circuitos eletrônicos e os programas foram desenvolvidos no Laboratório de Eletrônica do Depto. de Análise de Sistemas da Universidade de Ribeirão Preto. O

programa em Pascal permitia plotar até 20 linhas com 7 colunas, contendo cada uma a média aritmética das pressões lidas em cada sensor. Uma limitação de até 1000 leituras para a média, em cada linha, foi adotada, já que um grande número de dados tornava o processamento muito lento. Por isso, poucas vezes trabalhou-se com mais de 500 dados para uma média. O programa em Delphi não chegou a ser utilizado, pois durante o período de testes a placa A/D sofreu uma sobrecarga e, mesmo após seu conserto, não foi possível calibrá-la adequadamente, pois passou a apresentar problemas de reprodução do sinal. Dessa forma, apesar do sistema eletrônico permanecer montado, não foi utilizado nos estudos finais.

Em paralelo aos medidores microprocessados, foram instalados quatro piezômetros ligados a cada uma das tomadas de pressão (Figura 3.16). Esses piezômetros, confeccionados com tubos de polietileno transparente de diâmetro 10 mm, foram estendidos pelo solo até a escada de marinho da torre e subindo verticalmente até o reservatório superior (Figuras 3.17, 3.18 e 3.19).

Figura 3.16 – Desenho de instalação dos detetores de pressão.

Ao pé da escada, para diminuir a frequência de oscilação da água, cada tubo foi cortado e suas partes foram novamente ligadas através de uma conexão metálica reduzindo o diâmetro do tubo. Os piezômetros foram justapostos ao lado de uma

trena metálica instalada ao longo da escada de marinheiro. Este procedimento permitiu realizar com boa precisão a leitura dos valores de altura da água, utilizando um nível de bolha. A ligação entre sensores e piezômetros, com as tomadas de pressão, foram feitas através de registros tipo agulha.

Figura 3.17 – Tubo transparente ligando a tomada de pressão TP1 ao piezômetro 1.

Figura 3.18 – Instalação da tomada de pressão TP3 com medidor eletrônico e ligação para o piezômetro 3 no início do trecho C.

Figura 3.19 – Vista da instalação dos piezômetros na escada de marinheiro e forma de medição com nível de bolha.

Em cada tubo de polietileno estudado, foram instalados quatro tomadas de pressão – TP , projetadas no Laboratório de Hidráulica da EESC. Como se pode observar na Figura 3.20, estas tomadas de pressão foram confeccionadas em PVC na forma de dois anéis, um interno, com uma câmara ligada ao tubo de polietileno através de quatro furos, e outro, externo, para vedação, com uma saída para o medidor de pressão. As quatro saídas de água para a câmara da tomada de pressão permitem melhor distribuição da pressão e diminui a possibilidade de interrupção da medição devido a entupimentos.

Com pequenos ajustes as tomadas de pressão foram encaixadas e coladas nos tubos plásticos (Figura 3.21).

Figura 3.20 – Vista e corte longitudinal da tomada de pressão – TP.

Figura 3.21 – Montagem e instalação das tomadas de pressão – TP.

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS GOTEJADORES E TUBOS PLÁSTICOS

LIMITAÇÕES DA ANÁLISE.

O experimento foi conduzido, utilizando-se quatro tipos de gotejadores denominados G1, G2, G3 e G4 (Tabela 3.1) e, quatro diâmetros diferentes de tubos de polietileno, circulares e levemente ovais, denominados D16, D18, D20 e D22, todos utilizados ou produzidos na região.

Tabela 3.1 – Procedência e modelos dos gotejadores utilizados.

Código	Loja – Cidade	Fabricante	Modelo
G1	Agrocac – Rib. Preto	Agrojet	GA-2
G2	Carborundun – Campinas	Carborundun	Microgotejador AC
G3	Irrigaplan– Leme	Katif	Negro
G4	Casa Sementes – Franca	Azud	1804

Estes gotejadores, cujos troncos de cone para inserção nos tubos possuem diferentes formas – Figura 3.22, e dimensões – Tabela 3.2, foram instalados nos tubos através de orifícios abertos com furadeira elétrica, utilizando broca com diâmetro de 4,0 mm. Este diâmetro, menor que o diâmetro do “pescoço” do gotejador, permitiu melhor encaixe e minimizou os eventuais vazamentos entre o “pescoço” do gotejador e a parede do tubo.

Figura 3.22 – Perfis dos gotejadores estudados.

A Figura 3.23 mostra as deformações ocasionadas nos tubos após a inserção dos gotejadores, e, na Tabela 3.2, encontram-se as medidas da projeção interna dos diferentes gotejadores, obtidas com paquímetro, de uma média de 10 peças, conforme desenho da Figura 3.24

Figura 3.23 – Corte longitudinal e transversal dos tubos e gotejadores utilizados.

Figura 3.24 – Seções transversais do tubo sem e com o gotejador.

Tabela 3.2 – Dimensões da projeção interna dos gotejadores testados.

Código	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	e (mm)
G1	7,0	5,0	5,5	3,7	6,3
G2	7,5	1,3	5,4	3,6	6,5
G3	7,3	3,1	3,1	3,0	6,6
G4	7,9	4,0	7,7	4,3	6,4

Para os estudos, cada gotejador foi vedado com cola de silicone ou adesivo epóxi antes da instalação no tubo.

Dos diferentes diâmetros internos dos tubos de polietileno utilizados na região, variando entre 10 mm e 25 mm, foram escolhidos os quatro mais comuns para os trabalhos. Estes tubos, encontrados nas lojas de Ribeirão Preto e Jaboticabal, foram indicados por engenheiros da área e revendedoras. Não foram incluídos tubos com diâmetros menores que 12 mm, porque apresentam perdas de cargas pronunciadas conforme demonstrado por AL-AMOUD (1995).

Para os tubos escolhidos, foram dadas as denominações D16, D18, D20 e D22, devido à proximidade destes valores com seus diâmetros médios externos; 15,9 mm; 17,7 mm; 19,0 mm; 21,5 mm, respectivamente (Figura 3.25).

Figura 3.25 – Perfis dos tubos de polietileno.

A Tabela 3.3 identifica o tubo e relaciona seus dados: nome do fabricante, valor médio da espessura das paredes cujas medidas foram obtidas com paquímetro, o valor médio do diâmetro interno obtido por processo volumétrico de nove medidas de três trechos de 1,0 m, pressão nominal, geometria e características da superfície interna.

Tabela 3.3 – Dimensões e características dos tubos utilizados no trabalho.

Obs. *DT, tubo conduíte utilizado em testes preliminares.

Tubo	Fabricante	Espessura da parede em mm	Diâmetro interno em mm	Carga de pressão em mH ₂ O	Geometria da seção – características da superfície interna
D16	Cande	1,3	13,27	40	circular - lisa polida
D18	Cande	1,0	15,72	40	ligeiramente oval - lisa polida.
D20	Cipla	1,3	16,40	45	circular - lisa
D22	Éden	1,7	18,09	-	ligeiramente oval - lisa com pin-heads.
*DT	Sta. Cruz	1,5	15,43	-	circular - áspera

Para os trabalhos foram cortados tubos de 45 m de comprimento iniciando em MF e terminando em M , conforme traçado na planta da Figura 3.9.

A partir da primeira tomada de pressão, TP1, foram instalados nos trechos retos, A, B e C os diferentes modelos de gotejadores, separados por trechos curvos. Os gotejadores do mesmo modelo foram conectados à linha, em sequência, com espaçamentos de 0,50 m (Figura 3.26) sugeridos na bibliografia e catálogos e, para comprovação de que não haveria interferência de um gotejador no outro, foi feito um teste preliminar – Teste 2, Gráfico 3.9, página 51.

Figura 3.26 – Gotejadores G1, instalados no trecho C do circuito de estudo com espaçamento 0,50 m.

Com os dados das Tabelas 3.3 e 3.4 foi possível estimar a potência da bomba para a linha de recalque, a faixa do número de Reynolds a ser trabalhada e a mínima pressão a ser medida.

Da Tabela 3.4, tem-se a velocidade na entrada das linhas laterais. Essa velocidade foi calculada com os diâmetros, mínimo e máximo, do tubos indicados nos catálogos, a vazão máxima prevista para os gotejadores, considerando o espaçamento mínimo entre eles, e o comprimento da linha lateral, recomendados pelos fabricantes.

Tabela 3.4 – Parâmetros de gotejadores, dados de instalação e velocidades previstas

Fabricante	Modelo	Vazão do gotejador (L/h)	Comprimento máximo, recomendado para a linha. (m)	Espaço mínimo entre gotejadores (m)	Diâmetro interno do tubo, mínimo e máximo.(mm)	Velocidade média na entrada do tubo. (m / s)
Agrojet	GA-2	0,85	< 2000	2,0	12,7	1,87
				1,0	19,0	1,67
Netafim	PCJ	2	191	0,5	13,6	1,46
			306	0,5	17,4	1,43
Azud	1804	1,9	111	0,5	13,6	0,81
			192	0,5	17,6	0,83
			*65	0,5	13,6	0,47
Katif	Negro	2,3	156	0,5	13,6	1,37
			196	0,5	15,2	1,38
Carborundum	AC	3,8	-	-	-	-

Obs. *65 m é o comprimento mínimo associado à menor vazão, entre os gotejadores escolhidos para cálculo, para fornecer o menor Rey a ser utilizado.

O gotejador da Agrojet, GA-2, possui vazão regulável manualmente e não foi possível conseguir seu catálogo. Os dados apresentados foram obtidos de um exemplo em um catálogo de um modelo similar, denominado GA-1, para uma carga de pressão de 10 mH₂O. Este mesmo valor é considerado para o Azud 65, enquanto que para os demais a carga de pressão pode variar, entre 10 a 30 mH₂O, que a vazão permanece constante, pois são do tipo auto compensante.

Para realizar algumas estimativas foi utilizado o catálogo do gotejador da Netafim, apesar de ter sido substituído pouco antes da fase de estudos, porque esgotou o estoque da loja e não foi possível encontrar o suficiente para os trabalhos. Em seu lugar foi utilizado outro gotejador, cedido pela Carborundum de Campinas, cujo catálogo não forneceu dados suficientes para estimativas.

O quadro de velocidades confirma, em média, o que a literatura propõe como velocidade limite para linhas secundárias, ou seja, $v = 1,5 \text{ m/s}$.

Considerando ainda os dados padrões para a água a 25°C , massa específica $\rho = 997,1 \text{ kg/m}^3$, viscosidade absoluta $\mu = 0,894 \cdot 10^{-3} \text{ N.s / m}^2$ obtidos em STREETER e WYLIE (1982) e os dados da tabela 3.4; velocidade $v = 1,67 \text{ m/s}$ para o correspondente diâmetro $D = 19,0 \text{ mm}$ e velocidade mínima $0,47 \text{ m/s}$ para o correspondente $D = 13,6 \text{ mm}$, verifica-se que os números de Reynolds, máximo $Re_y = 35373$ e mínimo $Re_y = 7125$, estão na faixa propícia ao uso da fórmula de Blasius.

A bomba foi estimada, consultando a tabela de peças de PORTO (2000) e o catálogo do fabricante, Darka, em $1,5 \text{ cv}$, monoestágio, com injetor interno, para uma vazão aproximada de $1,7 \text{ m}^3/\text{h}$, considerado o máximo valor de Reynolds e uma perda de carga de $35 \text{ mH}_2\text{O}$, já que a saída da canalização do recalque encosta no fundo do reservatório superior (RS).

Para definir as características dos medidores de pressão, foi feita uma estimativa da menor medida de carga de pressão, $h_{L\text{mín}} = 0,042 \text{ m}$, calculada com $Re_y = 4000$, para o tubo do projeto com diâmetro interno $D = 19,0 \text{ mm}$, considerando um trecho livre e reto, equivalente ao trecho C, de aproximadamente 11 m . Mas, a placa A/D de 8 bits, utilizada para a aquisição de dados, só conseguia realizar uma leitura mínima de $0,060 \text{ m}$, definido o valor máximo de tensão de saída para uma altura de $15,0 \text{ mH}_2\text{O}$. Para melhorar a precisão dos resultados apresentados, preparou-se o programa em Pascal para trabalhar com alta frequência de coleta de dados e apresentar o valor da média aritmética de pelo menos 100 a 500 valores medidos.

3.3. METODOLOGIA EMPREGADA

Com o conjunto experimental montado, iniciou-se o procedimento com as aferições dos instrumentos de medida e os testes e trabalhos que se realizaram em quatro etapas. Na primeira etapa, fez-se uma série de testes preliminares usando os manômetros de Bourdon, medidores de pressão nas extremidades do tubo plástico e, o medidor de vazão, conforme Figuras 3.28 e 3.29. Na segunda etapa, foram usadas quatro tomadas de pressão, piezômetros, o medidor de vazão, os tubos D16 e D18 e os quatro modelos de gotejadores, seguindo as medidas da instalação representada na Figura 3.30. Na terceira etapa, de acordo com as medidas da instalação representada na Figura 3.31, foram usados os mesmos equipamentos da segunda etapa, os tubos D20 e D22 e apenas os gotejadores G2, G3 e G4. Os gotejadores G1 foram excluídos da terceira etapa porque começaram a apresentar vazamentos entre o “pescoço” e o tubo. Na quarta etapa, procedeu-se ao seccionamento dos tubos e a medição, em computador, das áreas das seções transversais dos tubos com e sem gotejadores para cálculo dos índices de obstrução OI.

Para as três primeiras etapas realizadas no campo, foram mantidos os raios das curvas do circuito, sendo que a de maior curvatura apresentou uma razão, entre o raio da curva e o maior raio interno de tubo utilizado, igual a 180. Este valor está acima do valor 100, descrito na literatura, VON BERNUTH e WILSON (1989). No entanto a instalação das tomadas de pressão nos tubos de polietileno foram feitas com 50 diâmetros de distância ou menos, da entrada (MF) e da saída (M), para a primeira e segunda etapas (Figuras 3.28, 3.29 e 3.30). Na terceira etapa, foi feita a correção nas medidas destas distâncias (Figura 3.31) observando os valores propostos na literatura, VON BERNUTH e WILSON (1989).

Durante as atividades, os tubos de diferentes diâmetros foram submetidos a uma série de vazões, respeitando os números de Reynolds previstos para as linhas de irrigação.

As medições de carga, correspondentes às vazões ajustadas, foram feitas utilizando-se três técnicas, duas, durante o período de testes com os manômetros de Bourdon e processando os sinais elétricos dos sensores de pressão em um

computador, e outra, durante os trabalhos da segunda e terceira etapas, manual, visualizando o nível da água em piezômetros, ligados às tomadas de pressão. Para cada vazão, a perda de carga devido à projeção interna do gotejador no tubo, (h_f), foi calculada pela diferença das medidas das perdas de carga feitas em dois levantamentos, um com a tubulação sem gotejadores e outro com gotejadores.

Realizados os dois levantamentos em cada tubulação, procedeu-se ao seccionamento transversal dos tubos, em anéis, nas posições com gotejador e sem gotejador para medição das respectivas áreas internas livres. Para medição destas áreas aplicou-se duas técnicas, uma, no período de testes, utilizando uma balança de precisão para medir a massa do papel recortado correspondente às áreas livres dos tubos e, outra, durante o levantamento com os tubos selecionados, utilizando imagem capturada por scanner e computador com os softwares Photoshop e AutoCAD para o cálculo das áreas livres. A escolha destas técnicas, ao invés do uso do paquímetro, deve-se ao fato de os tubos não possuírem perfeita circunferência e, com a inserção do gotejador, sua área transversal ficar ainda mais deformada, conforme Figura 3.23 e publicação de BAGARELLO et al. (1997).

Lançando-se em gráfico os valores de h_f contra os valores $[v^2 / 2g]$ obteve-se por regressão linear o valor do coeficiente α para cada conjunto tubo/gotejador, enquanto que com o valor de r obtido da razão entre a média das áreas livres do tubo com gotejador, A_1 , e a média das áreas livres do tubo sem gotejador, A_2 , equação 2.19, obteve-se o valor do coeficiente OI, equação 2.18, para o mesmo conjunto tubo/gotejador. Plotou-se em seguida os diferentes valores de α e seus correspondentes OI e, por regressão, conseguiu-se a relação matemática procurada.

Para completar o trabalho, verificou-se a validade da equação de Blasius apresentada em BAGARELLO et al. (1997) e procedeu-se aos testes de validade da equação para tubos não circulares (SCHILICHTING, 1955), no tubo ligeiramente oval, D22.

3.3.1. AFERIÇÕES E CALIBRAÇÕES

3.3.1.1. Aferição dos manômetros de Bourdon

Para os manômetros de Bourdon adquiridos (Figura 3.27), considerou-se sua aferição comercial, verificando-se apenas os valores máximo e mínimo de carga de pressão comparados com os medidos pelo piezômetro.

Tabela 3.5 – Aferição dos manômetros de Bourdon.

Carga no piezômetro (mH ₂ O)	Carga no manômetro de Bourdon (mH ₂ O)
14,49 ± 0,02	14,5 ± 0,25
0	0

Na tabela 3.5, primeira coluna, consta uma média das leituras feitas no período de realização dos trabalhos, de maio/99 a dezembro/99 nas tomadas de pressão TP1 e TP4. Para os manômetros de Bourdon, foram considerados os desvios avaliados dos instrumentos, 0,025 bar ou 0,25 mH₂O.

Figura 3.27 – Manômetro de Bourdon utilizado nas posições MF e M

3.3.1.2. Calibração do medidor eletromagnético de vazão

Após a instalação do medidor, respeitadas as orientações do manual, o mesmo apresentou uma medida igual a $-0,05 \text{ m}^3/\text{h}$ para vazão nula. Fez-se então a aferição do aparelho, utilizando-se um bequer de dois litros contra o medidor. O Gráfico 3.1, mostra o desvio na equação, obtida pela regressão linear das medidas da Tabela A1.1 no anexo 1.

Confirmado o desvio, fez-se o ajuste do aparelho de acordo com o manual de instruções.

O Gráfico 3.2, apresenta a curva de nove aferições aleatórias realizadas no período de maio/99 a fevereiro/00, listadas na Tabela A1.2 do anexo 1. Estas aferições foram realizadas com as medidas de vazão do medidor eletromagnético calibrado, contra as vazões medidas com um bequer de dois litros, nos primeiros meses e, nos dois últimos meses, com um bequer de quatro litros.

Gráfico 3.1 – Aferição inicial do medidor eletromagnético.

Medida no medidor, Q_{med} , versus medida no bequer, Q_{beq} .

Gráfico 3.2 – Curva correspondente ao conjunto das aferições do medidor eletromagnético após sua calibração em maio/99.

A partir da equação da curva de regressão do Gráfico 3.2 e seu coeficiente de determinação, mostrando uma relação praticamente equivalente entre as medições no bequer e no medidor eletromagnético, foram adotados, sem correções, os valores de vazão fornecidos pelo medidor eletromagnético.

3.3.1.3. Calibração e aferição de dois sensores de pressão

Para realizar a calibração dos dois primeiros sensores de pressão que serviram nos testes iniciais com um tubo D20, foi utilizado um piezômetro instalado na escada de acesso ao reservatório superior. Encheu-se o piezômetro com água até a altura de 15 m, instalaram-se os sensores no piezômetro e regulando a coluna de água com um registro, ajustaram-se os amplificadores operacionais para fornecer uma tensão entre 0 e 5 V, de acordo com a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Ajustes de tensão e carga de pressão para os sensores do teste

	Tensão mínima em volts	Carga mínima em mH ₂ O	Tensão máxima em volts	Carga máxima em mH ₂ O
Sensor S1	0,006	0,003	4,80	15,00
Sensor S4	0,004	0,003	4,98	15,00

Acertados os valores máximo e mínimo para as tensões de entrada na placa A/D, montaram-se os circuitos elétricos e eletrônicos dos dois sensores e procedeu-se a um levantamento cuidadoso para obtenção das funções que relacionam as cargas de pressão em mH₂O com o sinais digitais, em byte, plotados pelo programa em Pascal. Veja em anexo 2 as equações ajustadas para os sensores S1 e S4.

Após algumas pequenas alterações para melhorar as curvas, as equações obtidas foram inseridas no programa do computador. Na seqüência procedeu-se a aferição dos resultados através de um novo levantamento. Veja em anexo 2 a Tabela A2 de aferição para os dois sensores, da qual obtiveram-se os Gráficos 3.3 e 3.4 para aferição dos sensores e, o Gráfico 3.5 para avaliação da dispersão dos erros.

As curvas relacionam as medidas fornecidas pelo computador para S1 e S4 e os desvios dS1 e dS4, com as medidas fornecidas pelo piezômetro tomado como padrão.

Gráfico 3.3 – Aferição do sensor S1 com piezômetro.

Gráfico 3.4 – Aferição do sensor S4 com piezômetro.

Gráfico 3.5 – Distribuição dos desvios de S1 e S4 ao longo do piezômetro.

Observa-se nos gráficos de aferição que as curvas médias ajustadas por regressão, tanto para o sensor S1 como para o sensor S4, possuem coeficiente angular próximos de 1 e um coeficiente linear próximo de 0. No entanto, no gráfico de dispersão de erros, observa-se para S1 um erro de 0,08 m, valor esse, acima da precisão de 0,04 m para uma faixa de 10m e acima do erro previsto pela leitura em bytes, discutidos no final do item 3.2 do Capítulo 3, pag. 38. Porém, para os levantamentos, os sensores S1 e S4 foram instalados tendo entre si uma distância de

43 m, possibilitando assim um erro de até 0,16 mH₂O. Levando-se em conta ainda que a mínima carga de pressão observada no manômetro de Bourdon da posição MF durante os primeiros testes foi maior que 10 mH₂O, o Teste 4 do item 3.3.2 do Capítulo 3, teve condições de ser realizado sem alterações nas equações.

Após a aferição, instalaram-se os dois sensores nas posições TP1 e TP4 da tubulação D20, conforme figura 3.28. Do levantamento realizado conforme Tabela A5 no anexo 5, montaram-se os Gráficos 3.6 e 3.7, de calibração entre as cargas de pressão fornecidas pelos sensores e pelos manômetros de Bourdon instalados em MF e M, com S1 no início da tubulação, a 1,05 m a frente da posição MF e S4 no final da tubulação, a 0,50m antes de M.

Os Gráficos 3.6 e 3.7 mostram que apesar da diferença de precisão entre as duas medições, os instrumentos apresentaram boa concordância de resultados, principalmente os medidores da saída, M e TP4. O desvio observado na equação do Gráfico 3.6, dos medidores de entrada – MF e TP1, deve-se à ausência de valores abaixo de 12 mH₂O, menor carga de pressão medida para máxima vazão no tubo.

Gráfico 3.6 – Calibração entre o manômetro de Bourdon e o sensor instalado na entrada da tubulação D20 para realização do teste 4.

Gráfico 3.7 – Calibração entre o manômetro de Bourdon e o sensor instalado na saída da tubulação D20 para realização do teste 4.

3.3.2. TESTES DE ADEQUAÇÃO E FUNCIONAMENTO DAS INSTALAÇÕES

Utilizando a estrutura e equipamentos representados na Figura 3.28 foram feitos os primeiros testes para avaliar o comportamento da vazão e da pressão em

Figura 3.28 – Planta da instalação configurada para testes e calibrações relação ao número de gotejadores instalados no circuito e a qualidade dos resultados fornecidos pelo sistema eletrônico e pelos piezômetros.

3.3.2.1. TESTE 1 - Variação da vazão com número de gotejadores instalados.

Este teste teve como objetivo analisar a influência do número de gotejadores na vazão do sistema, a partir da relação entre a vazão fornecida pelo medidor eletromagnético corrigido e três diferentes quantidades de gotejadores instalados, para cada carga de pressão escolhida (Tabela 3.7) e (Gráfico 3.8). Foi utilizado o tubo tipo conduíte de ½" designado na Tabela 3.3 por DT, os manômetros de Bourdon instalados nas posições MF e M e os gotejadores G1, Figura 3.22, espaçados 0,50 m um do outro. Os gotejadores foram instalados em grupos de 10 em cada trecho reto, A, B e C do circuito de estudo da Figura 3.28. Os dados da Tabela 3.7 correspondem aos resultados obtidos das curvas de regressão de quatro levantamentos, com duas corridas cada um, acrescentando-se 10 gotejadores em cada levantamento de acordo com anexo 3. Na Tabela 3.7, h_t , representa a perda total entre os manômetros.

Tabela 3.7 – Vazão na tubulação em função do número de gotejadores

	NÚMERO DE GOTEJADORES				
h_f (mH ₂ O)	30	20	10	0	Q (m ³ /h)
12,1	1,155	1,185	1,210	1,243	Qmax
12,0	1,147	1,182	1,212	1,239	Q1
4,0	0,623	0,640	0,660	0,685	Q2
0,5	0,140	0,161	0,154	0,165	Q3

Gráfico 3.8 – Curva de vazão em função do número de gotejadores para as cargas de pressão; 0,5; 4,0; 12,0 e 12,1 mH₂O .

Obs. : As curvas de Qmax. e Q(12m) estão sobrepostas.

Observa-se no Gráfico 3.8 que a variação da vazão, para qualquer das quatro cargas de pressão estudadas, é linear em relação ao número de gotejadores, tendo no entanto queda mais acentuada quanto maior a diferença de carga. O fato da vazão se mostrar linear permite escolher seus valores de vazão em escala aritmética facilitando a coleta dos dados.

3.3.2.2. TESTE 2 - Variação da carga de pressão com o número de gotejadores.

Este teste teve como objetivo estudar a variação da carga de pressão em função do número de gotejadores a partir de uma curva relacionando a perda de carga em mH_2O , fornecida pelos manômetros de Bourdon, com três diferentes quantidades de gotejadores instalados, para quatro vazões escolhidas na Tabela 3.8. Veja gráfico 3.9. Foi utilizado o tubo tipo conduíte de $\frac{1}{2}$ " por DT, os manômetros de Bourdon instalados nas posições MF e M e os gotejadores G1, Figura 3.22, espaçados 0,50 m um do outro. Os gotejadores foram instalados em grupos de 10 em cada trecho reto, A, B e C do circuito de estudo, conforme Figura 3.28. Os dados da Tabela 3.8 correspondem aos resultados obtidos das curvas de regressão de quatro levantamentos, com duas corridas cada um, acrescentando 10 gotejadores em cada levantamento subsequente, conforme o anexo 3. Na Tabela 3.8, h_T , está representando a diferença de carga entre o manômetro de entrada e o manômetro de saída.

Tabela 3.8 – Perda de carga em função do número de gotejadores instalados.

		NÚMERO DE GOTEJADORES			
		30	20	10	0
Nº Rey	Q (m^3/h)	Perda de carga, h_T , em (mH_2O)			
0	0	0	0	0	0
3833	0,15	0,42	0,37	0,37	0,32
7666	0,30	1,18	1,07	1,05	0,96
11499	0,45	2,29	2,12	2,06	1,90
15332	0,60	3,74	3,50	3,38	3,15
19165	0,75	5,53	5,22	5,02	4,72
22998	0,90	7,67	7,28	6,97	6,59
26831	1,05	10,15	9,69	9,25	8,78
30664	1,20	12,97	12,43	11,84	11,27

Gráfico 3.9 – Perda de carga por número de gotejadores para quatro vazões

De acordo com o gráfico, a perda de carga é linear em função do número de gotejadores, mostrando que não há influência da perda de carga de um gotejador sobre a do outro quando o espaçamento é de 0,50 m. A tabela 3.8 mostra que para baixo número de gotejadores e baixa vazão, a diferença da perda de carga no trecho com gotejador e sem gotejador é pequena. Assim, é conveniente trabalhar com mais de 10 gotejadores por vez e por modelo, em cada trecho reto. Realizar os levantamentos sem e com gotejadores, subtraindo posteriormente os resultados para se obter a perda nos gotejadores, ou seja, considerando-se os efeitos de superposição medem-se valores altos de carga de pressão, sem e com gotejadores, para minimizar erros de leitura. Evita-se trabalhar com vazões muito baixas, de preferência com número de Reynolds na faixa de 7 000, para que os sensores possam ler sem que seu erro interfira em demasia nos resultados.

3.3.2.3. TESTE 3 – Curva f contra Rey para um tubo DT no circuito.

No mesmo período de realização dos testes 1 e 2, foram feitos dois levantamentos com uma corrida cada um, para obter duas curvas f contra Rey de um tubo DT de diâmetro 14,43 mm, instalado no circuito. Considera-se corrida, a medição de diferentes vazões após a abertura da válvula e, levantamento, uma ou mais corridas com os mesmos materiais já instalados. Os dois levantamentos foram realizados com

Gráfico 3.10 – Curvas do coeficiente de atrito (f) contra o número de Reynolds (Rey) para escoamento turbulento no tubo de testes DT.

Gráfico 3.11 – Curvas do coeficiente de atrito (f) contra o número de Reynolds (Rey) para escoamento turbulento no tubo de testes DT.

a utilização dos manômetros de Bourdon nas posições MF e M, localizados na entrada e na saída do circuito, e do medidor de vazão eletromagnético. O comprimento do circuito de estudo entre MF e M ficou igual a 44,6 m, conforme Figura 3.28. Para a viscosidade cinemática da água foi utilizado o valor $0,000000897 \text{ m}^2/\text{s}$, correspondente à temperatura média do período, $25 \text{ }^\circ\text{C}$. As curvas estão

representadas nos Gráficos 3.10 e 3.11. As tabelas correspondentes às curvas encontram-se em anexo 4.

Observa-se que o circuito fornece condições para se obter a curva f contra Rey, com as características da curva de Blasius, apesar de os valores lidos dependerem da estimativa do operador. Esta dependência é devido à baixa precisão dos manômetros de Bourdon. A diferença de posição da curva nos dois levantamentos mostra que uma curva média tende a ficar abaixo da curva de Blasius. Observa-se também a necessidade de se fazer mais de uma corrida para cada levantamento com o objetivo de se trabalhar com mais valores para a média. Acredita-se que o uso de um manômetro de Bourdon com divisão de 0,1 mH₂O ou mais preciso, instalados em posições que proporcionem uma distância acima de 40 m, como a apresentada na planta da Figura 3.28, permitiria melhor repetição dos dados.

3.3.2.4. TESTE 4 – Curva f contra Rey usando o tubo D20 e circuitos eletrônicos.

Depois de preparados os circuitos eletrônicos para os sensores S1 e S4, realizadas suas aferições e montadas as instalações provisórias para a sua utilização, fez-se um levantamento, para se obter a curva f contra Rey, para um tubo liso, tubo D20. Neste processo foi utilizada a mesma montagem do teste 3, com os manômetros de Bourdon nas posições MF e M e os sensores de pressão S1 e S4 nas posições TP1 e TP4, conforme Figura 3.28.

Neste levantamento foi utilizado o mesmo valor de viscosidade do teste anterior. O comprimento do circuito de estudo foi medido igual a 44,6 m entre os manômetros e igual a 43,1 m entre as tomadas de pressão TP1 a TP4. O diâmetro interno do tubo utilizado, D20 = 16,40 mm.

O levantamento foi realizado fazendo-se duas leituras de carga de pressão e uma de vazão para cada carga piezométrica no manômetro M. As duas leituras lançadas na Tabela A5.1 correspondem à menor e maior média das cinco médias de 100 leituras que o computador plotou na tela.

As curvas apresentadas nos Gráficos 3.12 e 3.13 correspondem aos resultados dos levantamentos nas Tabelas A5.2 e A5.3 do anexo 5.

Gráfico 3.12 - Curva no diagrama de Moody usando tubo D20 e manômetros de Bourdon

Gráfico 3.13 – Curva no diagrama de Moody utilizando o tubo D20 e os sensores de pressão eletrônicos.

Para a construção do Gráfico 3.12 não foram utilizadas as quatro medidas iniciais da Tabela A5.2, pois as duas primeiras correspondem à vazão nula e as duas segundas apresentaram erros considerados de estimativa mal feita pelo operador, enquanto que para a curva do Gráfico 3.13 não foram utilizadas as duas primeiras medidas da tabela A5.3, pois correspondem à vazão nula.

Observa-se também que as curvas médias dos Gráficos 3.12 e 3.13 estão abaixo da curva de Blasius e apresentam uma boa aproximação da curva proposta por BAGARELLO et al. (1995) para tubos lisos. Nota-se também uma diminuição da diferença do valor entre os pares de leituras realizadas, à medida que aumenta o número de Rey, ou seja, esperam-se maiores desvios nas leituras de vazões baixas, principalmente aquelas com número de Rey próximo de 4000.

3.3.2.5. TESTE 5 - Curva f contra Rey usando o tubo D16 e piezômetros

Após o teste 4, foi realizada uma série de calibrações no intuito de minimizar os desvios de leituras dos sensores S1 e S4, enquanto montavam-se os circuitos eletrônicos para mais dois sensores, S2 e S3.

No entanto, durante o processo de calibração simultânea dos quatro sensores aconteceu uma sobrecarga de tensão na placa A/D, o que ocupou o mês seguinte na substituição dos componentes e testes no circuito da placa.

Retomou-se posteriormente a calibração conjunta dos quatro sensores, S1, S2, S3 e S4, instalados nas posições TP1, TP2, TP3 e TP4 do circuito de estudo conforme Figura 3.29. Após vários levantamentos para se conseguir as equações individuais dos sensores, não se obteve entretanto reprodutibilidade conveniente dos valores de carga de pressão durante as calibrações. Em alguns casos, levantamentos seguidos para calibração dos sensores, realizados com as mesmas equações, apresentaram variações de leitura de até 20 cm, incompatíveis com os desvios desejados.

Suspendeu-se o método de medição eletrônica e, após algumas tentativas utilizando manômetro de mercúrio, que resultaram em valores de pouca precisão e duvidosos, foi adotado, por indicação do orientador, o uso de quatro piezômetros, que foram montados na escada de acesso ao reservatório superior, ao lado de uma

trena milimetrada, ligado cada um à sua tomada de pressão, TP1, TP2, TP3 ou TP4.

Utilizando-se a montagem com piezômetros, modificada em relação às demais (Figura 3.29), foi feito um levantamento dos trechos A, B e C, Levantamento A6, para estudar a influência da curva do trecho B, nos resultados finais.

Neste levantamento foi utilizada a viscosidade cinemática igual a $0,000000804 \text{ m}^2/\text{s}$ correspondente à temperatura média de 30°C , registrada no período. O diâmetro interno do tubo utilizado, $D = 13,27 \text{ mm}$.

Figura 3.29 – Diagrama de percurso utilizado no Teste 5, levantamento A6.

Os gráficos 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 mostram as curvas $f \times \text{Rey}$, ajustadas por regressão, para cada trecho do circuito e para o comprimento total.

Gráfico 3.14 – Gráfico com os dados da Tabela A6.2 – Levantamento A6

Gráfico 3.15 – Gráfico com os dados da Tabela A6.3- Levantamento A6

Gráfico 3.16 – Gráfico de trecho final, misto, com duas retas e uma curva de raio longo, com os dados da Tabela A64 – Levantamento A6.

Gráfico 3.17 – Gráfico, para o trecho total, com os dados da Tabela A6.5 – Levantamento A6.

Observa-se que o trecho curvo - B, representado no Gráfico 3.15, possui características gráficas próximas das curvas dos demais trechos, mas, mais próxima da curva de Blasius. O trecho C no entanto, assim como o trecho total, encontram-se

em uma posição intermediária, com características parecidas. Considerando-se o trecho total, pode-se ver que as curvas existentes no circuito não influenciam significativamente no resultado.

Verifica-se novamente, nos Gráficos 3.15 e 3.17, que as leituras com baixo número de Reynolds apresentam dispersão sensivelmente maior do que as leituras com valores de Reynolds, acima de 20000. Apenas os Gráficos 3.15 e 3.17, mostram uma atenuação nesta dispersão. Acredita-se que esta dispersão mais alta é devido a medições com números de Reynolds próximos da zona de transição, à influência da distância das tomadas de pressão em relação a singularidades e a falta de repetição das leituras para se conseguir uma média.

Quanto ao número de Reynolds estar próximo da faixa de transição, já foi previsto no final do item 3.2 do Capítulo 3, trabalhar com vazões iniciais correspondentes a valores de Re acima de 7000.

Quanto à distância das tomadas de pressão TP1 e TP4 em relação às singularidades na entrada (MF) e na saída (M) da tubulação, foram instaladas com espaçamentos equivalentes a $59D = 1,0$ m e $29D = 0,50$ m, respectivamente, para D correspondente ao diâmetro interno do tubo $D_{18} = 15,72$ mm, pois é considerado de uso comum e suficiente um espaçamento de $30D$. Este espaçamento pode ser confirmado no teste 2, pois entre os gotejadores não há interferência quando apresentam um intervalo de instalação equivalente a $29D$, aproximadamente 50 cm.

Quanto ao número de leituras, no teste 5, o levantamento A6 foi realizado com poucas leituras, 6 leituras e, sem repetição, enquanto que no teste 4, no levantamento A5 onde houve repetição e maior número de leituras, um total de 18 leituras, o ajuste das curvas $f \times Re$, por regressão, foi favorecido. Veja o Gráfico 3.13.

3.3.3. METODOLOGIA DOS LEVANTAMENTOS E DA DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE OBSTRUÇÃO.

3.3.3.1 Metodologia dos levantamentos com os tubos D16 e D18 e os gotejadores G1, G2, G3 e G4.

Dos resultados dos testes definiu-se a metodologia dos levantamentos, ou seja, passou-se à realização dos levantamentos com duas ou três corridas cada um e cada corrida com até onze leituras de carga piezométrica e a correspondente vazão. Os valores de vazão foram sempre regulados para regime de escoamento turbulento, variando até a vazão máxima permitida pelo tubo ou pela vazão limite de recalque da bomba. Para as corridas de um mesmo levantamento fixavam-se as mesmas vazões, para que as medidas das cargas piezométricas apresentassem valores próximos, evitando-se assim erros grosseiros de leitura.

Para estes levantamentos, a tomada de pressão TP3 foi transferida para a saída da segunda curva deixando o trecho B mais longo, com duas curvas e uma reta, e o trecho C mais curto e totalmente reto, conforme Figura 3.30.

Quanto à distância das tomadas de pressão TP1 e TP4 em relação às singularidades da entrada e da saída do circuito, foram mantidos os espaçamentos do teste 05, equivalentes a 59D18 e 29D18 respectivamente.

Foi utilizado o valor da viscosidade cinemática igual a $0,000000804 \text{ m}^2/\text{s}$, correspondente à temperatura média de 30°C , registrada no período.

Para o tubo D16, foram realizados dois levantamentos, A7 e A8, com três corridas no primeiro e duas corridas no segundo, sem gotejadores e, dois levantamentos A7G e A8G, com três corridas cada um, com os gotejadores G1, G2, G3 e G4.

Para o tubo D18 foram realizados três levantamentos, A9, A10 e A11, com duas corridas em cada um, sem gotejadores e três levantamentos A9G, A10G e A11G, tendo três corridas em cada um, com os gotejadores G1, G2, G3 e G4.

Cada levantamento foi realizado com um total de 30 gotejadores, 15 gotejadores instalados no trecho A e 15 no trecho C.

Os levantamentos, sem e com gotejadores, foram realizados alternadamente, aproveitando-se o tubo já instalado no circuito.

PLANTA HIDRAULICA DO PERCURSO

Figura 3.30 – Planta configurada para levantamentos com os tubos D16, D18 e gotejadores G1, G2, G3 e G4.

Os levantamentos forneceram os dados necessários para a construção dos gráficos $f \times \text{Rey}$ das tubulações D16 e D18 e para a determinação gráfica do coeficiente α relativo a cada conjunto tubo/gotejador.

Os levantamentos aparecem tabelados nos anexos 7, 8, 9, 10 e 11 no final do trabalho. Os gráficos $f \times \text{Rey}$ e a tabela com os valores de α encontram-se no Capítulo 4.

3.3.3.2 Metodologia dos levantamentos com os tubos D20 e D22 e os gotejadores G2, G3 e G4.

Após os levantamentos com os tubos D16 e D18, para melhor analisar o comportamento de um único gotejador, foi considerado conveniente realizar outra série de levantamentos, utilizando-se mais dois tubos de polietileno com diâmetros maiores que os anteriores. Foram escolhidos dois novos diâmetros dentro da faixa de aplicação em linhas laterais, descritos na Tabela 3.3, como D20 e D22. Nessa etapa foi descartado o gotejador G1, pois o mesmo passou a apresentar pequenos vazamentos entre seu tronco e a parede do tubo, quando após a sua instalação, aumentava-se a pressão na tubulação.

Foi observado também, conforme o Gráfico 3.18, que para valores de Reynolds, abaixo ou próximos de 7000, nos tubos D16 e D18, a curva experimental, $f \times \text{Rey}$, apresenta uma tendência maior que a curva de Blasius em aumentar os valores de f . Essa tendência é mais acentuada no tubo D16.

Pelo fato de os escoamentos com número de Reynolds abaixo de 7000 estarem próximos da zona de transição e a entrada e a saída da tubulação possuírem um conjunto de singularidades e condições construtivas capaz de interferir muito mais no escoamento, quando o número de Reynolds é baixo, optou-se por aumentar as distancias livres entre MF e TP1, de 1,05 m para 3,50 m e entre TP4 e M, de 0,50 m para 1,60 m, correspondentes a 194D22 e 89D22, respectivamente, conforme planta na Figura 3.31, seguindo a proposta em VON BERNUTH e WILSON (1989). Este procedimento forneceu o Gráfico 3.19, que apresentou melhor comportamento da curva experimental com valores de Rey abaixo de 7000.

PLANTA HIDRAULICA DO PERCURSO

Figura 3.31 – Planta configurada para levantamentos com os tubos D20 e D22 e, os gotejadores G2, G3 e G4.

Gráfico 3.18 – Curva experimental com valores de Rey < 7000.

Gráfico 3.19 – Curva experimental para valores de Rey < 7000 após a correção das distâncias entre TP1 e TP4 e as singularidades na entrada e saída do circuito.

Com estas novas condições de instalação foram realizados dois levantamentos com duas corridas cada um, para os tubos D20 e D22, sem gotejadores (Tabelas A12 e A13), e dois levantamentos com duas corridas cada um para os mesmos tubos, com os gotejadores G2, G3 e G4, (Tabelas A12G e A13G). Utilizando-se a mesma quantidade de gotejadores dos levantamentos anteriores, os três modelos foram instalados nos trechos A, B e C, sendo 15 unidades de cada modelo em cada trecho.

Os levantamentos forneceram os dados necessários para a construção dos gráficos $f \times \text{Rey}$ das tubulações D20 e D22 e para a determinação gráfica do coeficiente α , relativo a cada modelo de gotejador e respectivo tubo.

Foi utilizado o mesmo valor de viscosidade cinemática da metodologia 3.3.3.1.

Os levantamentos aparecem tabelados nos anexos 12 e 13, enquanto que os gráficos $f \times \text{Rey}$ e os valores de α no Capítulo 4.

3.3.3.3. Metodologia para determinar o índice de obstrução OI.

Para determinar o índice de obstrução, foram realizados, após cada levantamento com gotejadores, cortes transversais nos tubos para retirar trechos em forma de anel, com espessura variando entre 0,5 e 1,0 cm. Estes anéis foram cortados com gotejadores e sem gotejadores, conforme Figura 3.32, e, após a medição da área transversal livre dos anéis nestas seções, foi calculada a razão, r , entre a média das áreas com gotejador e sem gotejador. Conhecido o valor de r , obteve-se para cada gotejador e tubo, o correspondente índice de obstrução OI.

Figura 3.32 – Seção transversal de tubo com gotejador e sem gotejador.

Inicialmente foram feitas algumas medições de OI, utilizando-se a razão, r , entre as massas dos papéis recortados no formato das áreas livres a partir de fotocópias ampliadas dos gotejadores. Neste procedimento foi utilizada uma balança analítica de quatro casas decimais, possibilitando bons resultados, como mostra a Figura 3.33 e a Tabela 3.9 com as medidas de três gotejadores. No entanto, o número de fotocópias para conseguir mais que 100% de ampliação, a qualidade final da fotocópia e a morosidade do processo (recorte e pesagem), foram incentivos para procurar um novo método.

Figura 3.33 – Fotocópia mostrando o perfil recortado das áreas livres do tubo DT sem gotejador e com o gotejador G1.

Tabela 3.9 – Valores de OI para gotejadores G1 em tubo DT.

Seção	Massa com gotejador, em gramas - m_c	Massa sem gotejador, em gramas - m_s	$r = \frac{m_c}{m_s}$	$OI = \frac{(1-r)^2}{r^2}$
1	0,0132	0,0217	0,608	0,415
2	0,0131	0,0223	0,587	0,495
3	0,0136	0,0226	0,602	0,438

Um método pesquisado que se mostrou bastante conveniente para calcular as áreas livres dos perfis, foi a utilização dos recursos da informática. Utilizando um scanner, foram copiados os perfis dos vários anéis com e sem gotejadores para o software Photoshop e, em seguida transferidos para o software Auto Cad, o que possibilita, através do recurso Objetic properties, calcular áreas e perímetros

circundados pela Polyline (Figura 3.34) e dados na Tabela 3.10. Outro recurso do Photoshop e do Auto Cad, que melhorou a precisão das medidas, foi a possibilidade de aumentar a figura até o tamanho que ainda permitisse uma boa definição de imagem, chegando muitas vezes, dependendo do tubo e do gotejador, a cinco ou dez vezes o tamanho original.

Não foi definido no Auto CAD nenhuma unidade de medida de área, inicialmente por não haver necessidade, já que o valor de interesse está na razão entre as áreas, e por fim, cada ampliação foi feita em função tipo de gotejador e tubo.

Figura 3.34 – Imagem copiada e tratada no autoCAD

Tabela 3.10 – Valores de OI para gotejadores G1 em tubo DT.

Seção	Área com gotejador - A_c	Área sem gotejador - A_s	$r = \frac{A_c}{A_s}$	$OI = \frac{(1-r)^2}{r^2}$
1	2862,69	4760,54	0,6013	0,4395
2	2828,50	4632,90	0,6105	0,4070
3	2730,92	4609,02	0,5925	0,4729

Os dois testes, mostrados nas Tabelas 3.9 e 3.10, apresentaram desvios médios de 9% e 8% respectivamente, em relação à média das três medidas de OI, mostrando que apesar de possuírem dispersões aproximadas, o método utilizando informática torna o procedimento mais prático.

A dispersão alta nas medidas das áreas é prevista devido às diferentes deformações dos tubos, tanto pela montagem e exposição ao tempo quanto pelo processo de instalação dos gotejadores, realizada com maior ou menor pressão manual. Outro fator de deformação da área é o aparecimento de rebarbas produzidas durante a abertura dos furos.

Definido o método a ser utilizado, procedeu-se, após o levantamento de cada tubo com gotejador, ao corte de 10 anéis com gotejador e 10 anéis sem gotejador. Para os cálculos das áreas foram copiados, simultaneamente, anéis sem gotejadores com anéis com gotejadores, para que as duas áreas possuissem a mesma ampliação.

Figura 3.35 – Cópia em scanner dos anéis com e sem gotejadores

O menor número de gotejadores copiados simultaneamente foi com três anéis sem gotejadores e quatro com gotejadores, e o maior, seis anéis sem gotejadores e dez anéis com gotejadores, dependendo do espaço ocupado pelos anéis no centro do scanner (Figura 3.35).

Os valores de r foram calculados para cada conjunto copiado, através da razão entre a média das áreas com gotejadores pela média das áreas sem gotejadores, conforme Tabela A14. No cálculo das áreas foi considerada a ocupação das rebarbas.

A Tabela 3.11 apresenta os valores de **OI** para cada conjunto tubo/gotejador, calculados com a equação 2.18.

Tabela 3.11 – Valores de OI

Gotejador Tubo	OI
G1-D18	0,3824
G1-D16	0,5408
G2-D22	0,07636
G2-D20	0,1419
G2-D18	0,1399
G2-D16	0,3379
G3-D22	0,05417
G3-D20	0,1175
G3-D18	0,1409
G3-D16	0,2642
G4-D22	0,1631
G4-D20	0,2574
G4-D18	0,4825
G4-D18	0,4238
G4-D16	0,9455

4. RESULTADOS

Os resultados deste trabalho foram divididos, de acordo com o motivo e objetivos da pesquisa.

4.1. INFLUÊNCIA DO CONJUNTO TUBO/GOTEJADOR NAS PERDAS.

O motivo principal da pesquisa é o fato de os projetistas utilizarem taxas fixas de acréscimo ou desprezarem as perdas de carga localizadas nas linhas laterais, quando dimensionam os projetos de irrigação por gotejamento.

Os Gráficos de 4.1 a 4.4, resultantes dos levantamentos realizados, mostram a influência do conjunto tubo/gotejador na perda das linhas laterais deste tipo de irrigação. Esses gráficos apresentam as curvas do acréscimo percentual da perda de carga em cada tubo com gotejador em relação ao tubo liso. Os dados foram obtidos da diferença entre as curvas ajustadas, por regressão, para os tubos com gotejadores e lisos, conforme a seguinte sequência de tabelas, A7G3, A7G4, A8G3, A8G4, A10G3, A11G3, A10G4, A11G4, A12G3, A12G4, A12G5, A13G3, A13G4 e A13G5, apresentadas nos anexos correspondentes.

Na análise dos gráficos desse item deve-se considerar que, para comparações, os gotejadores, em todos os levantamentos estão instalados com um intervalo de 0,50 m, entre um e outro, e o percentual calculado é sobre um gotejador em relação ao tubo liso.

Os pontos lançados nos gráficos são os que representam valores de escoamento em regime turbulento.

Gráfico 4.1 - Influência da vazão no aumento porcentual da perda de carga do tubo D16 com gotejador em relação ao tubo liso.

Gráfico4.2 - Influência da vazão no aumento porcentual da perda de carga do tubo D18 com gotejador em relação ao tubo liso.

Gráfico 4.3 - Influência da vazão no aumento porcentual da perda de carga do tubo D20 com gotejador em relação ao tubo liso.

Gráfico 4.4 - Influência da vazão no aumento porcentual da perda de carga do tubo D22 com gotejador em relação ao tubo liso.

Observa-se nos gráficos que a taxa de perda localizada é maior para o gotejador G4 conectado ao tubo de menor diâmetro, D16, em seguida para o G1 e depois para os gotejadores G3 e G2, conectados aos demais tubos. A razão da

diferença pode ser observada na Figura 4.1 onde para todos os gotejadores instalados no mesmo tubo, o gotejador G4 apresenta maior área de ocupação no interior do tubo e causa nele maior deformação.

Figura 4.1 – Gotejadores inseridos no tubo D18.

As taxas de perdas mostradas nos gráficos de 4.1 a 4.4 referem-se a um espaçamento de 0,50 m entre os gotejadores e essa perda será menor, à medida que o espaçamento aumenta ou se for diminuído o número de gotejadores instalados no trecho. O teste 2, realizado nesta pesquisa, mostra através do Gráfico 3.9 que a perda de carga aumenta linearmente com o número de gotejadores instalados no trecho. Associando-se essas condições deve-se esperar que o percentual de perda para um espaçamento de 1,0 m, entre os gotejadores, diminua para a metade. No entanto, como não foi encontrada qualquer comprovação nesse sentido, nos trabalhos consultados ou nesta pesquisa, fica em aberto uma questão a ser analisada nos próximos trabalhos.

4.2. DEFINIÇÃO DOS COEFICIENTES PARA USO NA EQUAÇÃO DE BLASIUS

Os trabalhos de VON BERNUTH (1990), VON BERNUTH e WILSON (1989) mostram que, no cálculo das perdas em tubos plásticos lisos e de pequeno diâmetro, a equação de Blasius apresenta boa acurácia para calcular o coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weisbach, quando o número de Reynolds é menor que 10^5 , permitindo inclusive sua correção, se ocorrerem mudanças de viscosidade. BAGARELLO et al. (1995), sugerem a utilização da equação $f = 0,302 \text{ Rey}^{-0,25}$, demonstrando graficamente que o coeficiente 0,302 é mais adequado aos tubos circulares lisos estudados, pois os mesmos se apresentam mais lisos que os tubos lisos de Prandtl.

Utilizando como referência os trabalhos citados, foi realizada nesta pesquisa, uma série de levantamentos, tabelados nos anexos 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13, que resultaram nos gráficos de 4.5 a 4.17, possibilitando avaliar os coeficientes das equações, encontradas para os diferentes tubos utilizados. Nesse conjunto de gráficos foram, inicialmente, ajustadas, por regressão, equações potência para cada diâmetro ou conjunto de diâmetros de tubos, que foram comparadas a outras equações denominadas corrigidas ($f_{\text{corr.}}$). Essas equações corrigidas são obtidas com os dados dos levantamentos, fixando o expoente m em $-0,25$ e corrigindo o coeficiente c da equação potência. O objetivo de se obter as equações corrigidas é facilitar sua aplicação e permitir comparações com a equação de Blasius.

Foi também realizada uma análise para o tubo D22, utilizando as equações para escoamento turbulento, em tubos não circulares.

Após os resultados, foram feitos comentários sobre a distribuição dos dados experimentais e os valores obtidos para o coeficiente c da equação de Blasius.

4.2.1. TUBO CIRCULAR LISO – D16

Esse tubo apresenta seção transversal circular de diâmetro médio, medido por processo volumétrico, igual a 13,27 mm. Tendo espessura igual a 1,3 mm, apresenta boa resistência a deformações. Sua superfície interna é lisa e polida.

Gráfico 4.5 – Curva ajustada por regressão para escoamento turbulento.

$Rey > 6000$

A curva experimental foi obtida com os dados de três levantamentos, com seis corridas, realizados para um comprimento total de 43 m com o tubo D16 e maior velocidade igual a 1,9 m/s.

O Gráfico 4.6 mostra a curva obtida com os dados experimentais (f exp.), a curva e equação obtidas com os dados experimentais e o expoente corrigido (f corr.) e, apresenta a curva de Blasius como referência.

Gráfico 4.6 – Gráfico para o tubo D16 comparando a curva experimental e a curva com o coeficiente corrigido.

Observa-se que a curva experimental e a curva corrigida apresentam pouca diferença entre si, considerando suas posições em relação a curva de Blasius, dentro da faixa de Reynolds considerada.

4.2.2. TUBO LIGEIRAMENTE OVAL E LISO – D18

Esse tubo apresenta seção transversal ligeiramente oval com diâmetro médio, medido por método volumétrico, igual a 15,72 mm. Por apresentar espessura da parede igual a 1,0 mm, sua seção tende a ficar arredondada com o aumento da pressão. Sua superfície interna é perfeitamente lisa e polida.

Gráfico 4.7 – Curva ajustada por regressão para escoamento turbulento com $\text{Rey} > 6000$

A curva experimental foi obtida com os dados de três levantamentos, com seis corridas, realizados para o trecho total de 43 m com o tubo D18 e maior velocidade igual 2,0 m/s.

Observa-se no Gráfico 4.8 que a curva experimental e a curva corrigida são praticamente coincidentes.

Gráfico 4.8 – Gráfico para o tubo D18 comparando a curva experimental e a curva com o coeficiente corrigido.

4.2.3. TUBO CIRCULAR LISO – D20

Esse tubo apresenta seção transversal circular de diâmetro médio, medido por processo volumétrico, igual a 16,40 mm. Tendo espessura igual a 1,3 mm, apresenta boa resistência a deformações. Sua superfície interna é lisa e polida.

Gráfico 4.9 – Curva ajustada por regressão para escoamento turbulento com $Rey > 4000$

Curva experimental obtida com os dados de um levantamento, com duas corridas, realizado para o trecho total de 39 m com o tubo D20 e maior velocidade igual a 2,0 m/s.

Observa-se no Gráfico 4.10 que a curva experimental e a curva corrigida são praticamente coincidentes, para a faixa de Reynolds analisada.

Gráfico 4.10 – Gráfico para o tubo D20 comparando a curva experimental e a curva com o coeficiente corrigido.

4.2.4. TUBO LIGEIRAMENTE OVAL E LISO – D22

Esse tubo apresenta seção transversal ligeiramente oval com diâmetro médio, medido por método volumétrico, igual a 18,09 mm. Por apresentar espessura da parede igual a 1,7 mm, sua seção praticamente manteve a forma oval sob as pressões utilizadas no trabalho, no máximo 15 mH₂O. Sua superfície interna é lisa, mas com pequenos caroços (pin-heads), distribuídos de forma esparsa.

Gráfico 4.11 – Curva ajustada por regressão para escoamento turbulento com $\text{Rey} > 5000$.

A curva experimental foi obtida com os dados de um levantamento, com duas corridas, realizado para o trecho total de 39 m com tubo D22 e maior velocidade igual a 1,65 m/s.

A curva ajustada aos dados experimentais apresenta um desvio percentual de 12% em relação à curva de Blasius.

Gráfico 4.12 – Gráfico para o tubo D22 comparando a curva experimental e a curva com o coeficiente corrigido.

Também, nesse gráfico, percebe-se que a curva corrigida coincide com a curva experimental obtida.

Devido ao fato de a curva experimental do Gráfico 4.11 apresentar um desvio tão alto em relação à curva de Blasius, foi realizada uma análise para o tubo D22 com as equações para escoamento turbulento em tubo não circulares, conforme proposta em SCHILICHITING (1955).

Para essa análise, foi assumida a seção transversal do tubo como oval e, através de medidas com paquímetro, determinaram-se para a área e perímetro do tubo D22 os valores $A = (264,0 \pm 3,6) \text{ mm}^2$ e $P = (57,7 \pm 0,4) \text{ mm}$, respectivamente, como média de 12 seções transversais.

Com os valores da vazão da Tabela A13.1 e da perda unitária da Tabela A13.3, obteve-se o Gráfico 4.13.

Gráfico 4.13 – Curva ajustada por regressão para escoamento turbulento em tubos não circulares.

A equação experimental f'_{exp} apresentou um desvio de 21%, em relação à equação de Blasius para tubos não circulares. Esse desvio é maior do que o obtido da análise do Gráfico 4.11.

4.2.5. EQUAÇÃO GERAL PARA OS TUBOS D16, D18 E D20

O gráfico 4.14 apresenta a equação ajustada por regressão com os dados obtidos, para os três tubos com seção transversal circular.

Gráfico 4.14 – Melhor curva para o conjunto de pontos dos tubos D16, D18 e D20 para $6000 < \text{Rey} < 50000$.

A seguir, o Gráfico 4.15 apresenta a curva experimental, a curva corrigida e a curva de Blasius como referência.

Gráfico 4.15 – Gráfico comparativo entre a curva experimental e a curva corrigida, para escoamento turbulento nos tubos D16, D18 e D20.

O tubo ligeiramente oval e liso, D18, tratado nos Gráficos 4.7 e 4.8, foi incluído no conjunto de tubos circulares, por apresentar comportamento de tubo circular, mesmo quando submetido a baixas cargas de pressão, 15 mH₂O, como as utilizada neste trabalho. Verifica-se esse comportamento na distribuição dos dados e pelo coeficiente c da equação corrigida, cujo valor está próximo dos valores encontrados para os dois tubos circulares.

Para todos os gráficos, tem-se a distribuição dos dados experimentais abaixo da curva de Blasius, mostrando que os tubos de polietileno, utilizados nas linhas laterais de irrigação, são mais lisos que os tubos analisados por Blasius. Esse modelo de distribuição também é observado nos gráficos e tabelas das análises de

WATTERS e KELLER (1978), BAGARELLO et al. (1995) e VON BERNUTH e WILSON (1989).

As equações obtidas dos pontos experimentais apresentaram sempre coeficiente de ajuste igual ou acima de 96% e são adequadas para determinação de f , mas as equações corrigidas têm forma mais conhecida e praticamente coincidiram com as equações ajustadas aos dados experimentais. Para uso geral, a equação corrigida do Gráfico 4.15, mantém as características do conjunto e torna mais simples o cálculo de f , para tubos circulares dentro da faixa Reynolds analisada, ou seja, para o número de Reynolds variando entre 7000 e 40000.

Para o tubo D22, é preferível o uso da equação obtida no Gráfico 4.12 à equação obtida no Gráfico 4.13, pois além do fato de ser mais conhecida, apresenta resultados mais próximos de tubos circulares que não circulares, em relação às equações de Blasius tomadas como referência.

4.3. TABELA DE COEFICIENTES DE CARGA CINÉTICA - α

A seguir, estão relacionados os valores dos coeficientes de resistência de carga cinética - α , ajustados por regressão linear, a partir das perdas de carga localizadas, h_f , de cada conjunto tubo/gotejador e sua correspondente carga cinética, $\frac{v^2}{2g}$. Os dados utilizados encontram-se nos anexos correspondentes, conforme a apresentação da Tabela 4.1.

4.1 – Valores de α para cada conjunto tubo/gotejador.

ANEXO	TUBO - GOTEJADOR	α	COEF. DE AJUSTE – R ²
A7G.3	D16 - G1	0,8769	0,9971
A7G.4	D16 – G2	0,4565	0,9974
A8G.3	D16 – G3	0,5188	0,9967
A8G.4	D16 – G4	1,3305	0,9999
A9G.3	D18 – G4	0,7939	0,9997
A10G.3	D18 – G1	0,7873	1
A11G.3	D18 – G2	0,3463	0,9987
A10G.4	D18 – G3	0,3848	0,9975
A11G.4	D18 – G4	0,7162	0,9985
A12G.3	D20 – G2	0,4167	0,9959
A12G.5	D20 – G3	0,3187	0,9996
A12G.4	D20 – G4	0,6937	0,9995
A13G.3	D22 – G2	0,2376	0,9993
A13G.4	D22 – G3	0,1614	0,9995
A13G.5	D22 – G4	0,4841	0,9997

4.4. TABELA DA ASSOCIAÇÃO ENTRE VALORES DE COEFICIENTE DE CARGA CINÉTICA - α , E VALORES DE ÍNDICE DE OBSTRUÇÃO – OI.

A tabela 4.2 associa os valores de coeficiente de carga cinética - α , obtidos da Tabela 4.1, com os valores de índice de obstrução **OI**, obtidos da Tabela 3.11., para cada conjunto tubo/gotejador.

Tabela 4.2 – Valores de OI e α para cada conjunto tubo/gotejador.

Gotejador	Tubo	OI	α
G1	D18	0,3824	0,7873
G1	D16	0,5408	0,8769
G2	D22	0,07636	0,2376
G2	D20	0,1419	0,4167
G2	D18	0,1399	0,3463
G2	D16	0,3379	0,4565
G3	D22	0,05417	0,1614
G3	D20	0,1175	0,3187
G3	D18	0,1409	0,3848
G3	D16	0,2642	0,5188
G4	D22	0,1631	0,4841
G4	D20	0,2574	0,6937
G4	D18	0,4825	0,7162
G4	D18	0,4238	0,7939
G4	D16	0,9455	1,3305

4.5. ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE α E OI .

Nos gráficos que seguem, são ajustadas por regressão as equações que possibilitam determinar o valor do coeficiente de resistência de carga cinética - α , a partir do índice de obstrução geométrico OI .

Os valores da tabela 4.2, que são utilizados nos gráficos seguintes, representam os valores médios de α e OI , obtidos de todos os levantamentos.

Os resultados são apresentados por modelo de gotejador, nos gráficos 4.16, 4.17 e 4.18, por família (gotejadores que apresentam características geométricas próximas e percentuais de perdas aproximados), nos gráficos 4.19 e 4.20 e com todos os gotejadores, no gráfico 4.21.

O gotejador G1 não foi apresentado individualmente, pois participou apenas de dois levantamentos com os tubos D16 e D18.

Gráfico 4.16 – Relação entre OI e α para o gotejador G2 e os tubos D16, D18, D20 e D22

Gráfico 4.17 – Relação entre OI e α para o gotejador G3 e os tubos D16, D18, D20 e D22

Gráfico 4.18 – Relação entre OI e α para o gotejador G4 e os tubos D16, D18, D20 e D22

Gráfico 4.19 – Relação entre OI e α para os gotejadores G1 e G4 nos tubos D16, D18, D20 e D22

Gráfico 4.20 – Relação entre OI e α para os gotejadores G2 e G3 nos tubos D16, D18, D20 e D22

Gráfico 4.21 – Relação geral entre OI e α para os gotejadores G1, G2, G3 e G4 nos tubos D16, D18, D20 e D22.

Cada ponto do Gráfico 4.21 representa com sua forma e cor uma relação tubo/gotejador do trabalho realizado.

A equação geral, 4.1, obtida com os dados do Gráfico 4.21, é para ser utilizada com gotejadores e tubos em geral,

$$\alpha = 1,35 OI^{0,67} \quad (4.1)$$

fornecendo sempre um valor médio. Enquanto que os gráficos de 4.16 a 4.20 apresentam equações, para serem utilizadas com cada gotejador, G2, G3 ou G4, ou com a família, G1, G4 ou G2, G3 (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Gotejadores estudados, com as famílias G1, G4 e G2, G3.

O Gráfico 4.22 mostra a banda de predição, entre as curvas pontilhadas, para a curva da equação 4.1, contendo todos os pontos obtidos.

Gráfico 4.22 – Gráfico com a banda de predição da Equação 4.1

A equação 4.1 foi ajustada para quatro modelos de gotejadores e quatro tubos de diferentes diâmetros, formando 15 conjuntos tubos/gotejadores e foi conduzida

em condições próximas do trabalho de campo utilizando material comercializado na região.

Nessas condições apresentou resultados comparáveis ao trabalho de BAGARELLO et al. (1997), cuja equação 2.21 foi ajustada a partir de um conjunto de dados envolvendo 16 conjuntos tubos/gotejadores de outra procedência.

Gráfico 4.23 – Gráfico comparativo entre as equações 4.1 e 2.21, obtidas para os mesmos valores de OI.

Observa-se no gráfico 4.23 que, apesar das diferenças de procedimento, de material, de local e condições de trabalho, tanto no que se refere às cargas de pressão máximas utilizadas, quanto às temperaturas a que o sistema esteve submetido, que resultaram nas equações 4.1 e 2.21, foram obtidas curvas de mesma família.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa conduzida para alguns conjuntos tubos/gotejadores, utilizados em linhas laterais de irrigação na região de Ribeirão Preto, mostra que a projeção interna, ocasionada pela conexão dos gotejadores, denominados “sobre a linha”, promove uma parcela maior de perda localizada do que geralmente é considerada, na perda de carga total dessas linhas.

Essas perdas localizadas variam com a vazão, o número de gotejadores na linha, o espaçamento entre eles e com o conjunto tubo/gotejador, cuja perda está associada, não só à ocupação do gotejador no interior do tubo, mas também à deformação causada devido à sua inserção.

Os gráficos de 4.1 a 4.4 mostram que as perdas de carga percentuais, em relação à vazão, aumentam rapidamente no início e tendem a um percentual constante para grandes valores de vazão, apresentando diferenças significativas, entre alguns conjuntos tubos/gotejadores.

Quanto ao número de gotejadores na linha e o espaçamento entre eles, um teste preliminar mostrou uma variação linear entre a perda de carga total e o número de gotejadores inseridos na linha com o mesmo espaçamento, mas deixa-se para trabalhos futuros uma análise melhor a este respeito e que possa envolver também a variação do espaçamento entre eles.

Para os conjuntos tubos/gotejadores analisados, foram obtidos pares (α, OI) , onde o coeficiente de resistência de carga cinética - α , para cada conjunto, apresentou-se constante em relação ao número de Reynolds com coeficiente de determinação ou ajuste na faixa de 99,8 % em todas as regressões. Os correspondentes índices geométricos de obstrução, OI , obtidos por software técnico,

permitiu, através das ampliações, um levantamento cuidadoso, considerando as deformações e rebarbas, devido à inserção do gotejador.

Para esses pares (α , OI), foi ajustada uma curva potência fisicamente consistente, pois quando OI é igual a zero, a razão r entre as áreas é 1 e α também é igual a zero. Essa equação geral apresentou um coeficiente de ajuste igual a 93%.

Uma comparação com o trabalho de BAGARELLO et al. (1997) mostra a validade e as possibilidades desse método, capaz de estimar valores de coeficiente de resistência de carga cinética, a partir de um coeficiente geométrico, possibilitando uma acurácia maior do que os processos de estimativa utilizados em geral, pois o mesmo não considera α constante, leva em conta a deformação do tubo e não há necessidade de se definir o espaçamento entre os gotejadores, para calcular o comprimento equivalente.

A curva e equação obtidas, no Gráfico 4.21, são convenientes para determinação geral de α , mas as curvas e equações individuais obtidas nos Gráficos 4.16 a 4.18 ou por família, nos Gráficos 4.19 e 4.20, podem constar nos catálogos dos fabricantes, desde que se amplie o número de ensaios, incluindo outros diâmetros, para melhorar o ajuste das curvas e aumentar a acurácia do procedimento.

Esse procedimento para estimativas de α é prático, exigindo apenas que o interessado, com um pedaço de tubo e alguns gotejadores, meça as áreas livres dos tubos com e sem gotejador, utilizando para isso um scanner e computador, ou ainda um processo expedito, tal como medir as massas de papéis correspondentes às áreas livres em uma balança de precisão obtendo o valor de OI necessário para calcular α , e, portanto, a perda de carga localizada de cada conjunto unitário tubo/gotejador.

Quanto à perda distribuída nas linhas laterais, as análises mostraram que, dentro do regime de escoamento turbulento, com número de Reynolds entre 7000 e 40000, típico nos projetos de irrigação, a equação de Blasius é uma forma acurada para determinar o coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

Observou-se que, para tubos flexíveis de pequeno diâmetro circulares, ou ligeiramente ovais com paredes deformáveis, o coeficiente c para a equação de Blasius, $f = c \text{ Rey}^{-0,25}$ variou de 0,294 a 0,299. Um valor médio mais adequado para uso, igual a 0,295, foi obtido no Gráfico 4.15. Esse valor 6,5 % menor que o valor de Blasius e 2,3 % menor que o valor proposto por BAGARELLO et al. (1995)

mostra que os tubos de polietileno são mais lisos que os de Blasius. Para o tubo D22, liso, ligeiramente oval e com paredes pouco deformáveis, um coeficiente c igual a 0,277 foi determinado. Como esse foi o único tubo, com essas características, a ser analisado e, a bibliografia consultada não apresentou dados para comparação, fica aqui mais uma sugestão para outro trabalho. Em vista dessa variação de coeficientes, abre-se uma possibilidade às empresas, de definirem, para os tubos de sua fabricação, o valor da constante c da equação de Blasius, facilitando ao projetista o cálculo do coeficiente de atrito - f .

Recomenda-se, corrigir a viscosidade cinemática à temperatura do local de trabalho, para obter melhor qualidade no ajuste das curvas e nos resultados das perdas de carga. Recomenda-se também utilizar, para tubos plásticos de pequeno diâmetro, distância de 100 diâmetros ou mais, das tomadas de pressão às singularidades, a fim de conseguir medidas mais seguras de carga de pressão, em regime de escoamento turbulento, e, no caso de existir curva na linha, a mesma deverá possuir uma razão entre o raio da curva e o raio do tubo, pelo menos, maior que 100, para que sua interferência possa ser considerada desprezível.

Apesar de a tentativa de se fazer a aquisição e o tratamento dos dados de pressão com computador apresentar problemas, o pouco que se conseguiu mostrou que é uma tecnologia que deve ser desenvolvida, para facilitar o trabalho de coleta de dados e monitorar em tempo real as variações das grandezas físicas envolvidas nos escoamentos, inclusive para fins didáticos.

ANEXOS

ANEXO 1

Levantamento A1

Tabela A1.1 – Dados para a construção do Gráfico 3.1 obtidos do medidor eletromagnético, antes da calibração.

Q_{bequer} m^3/h	$Q_{\text{equip.}}$ m^3/h	Q_{bequer} m^3/h	$Q_{\text{equip.}}$ m^3/h
0	-0,045	0	-0,045
0,091	0,04	0,0846	0,04
0,159	0,11	0,165	0,12
0,277	0,23	0,252	0,22
0,542	0,5	0,536	0,51
0,75	0,71	0,774	0,74
0,888	0,84	1,21	1,18
1,134	1,11		

Tabela A1.2 - Levantamentos de vazão do medidor eletromagnético contra um bequer.

Dados para construção do Gráfico 3.2.

Med.Elet	Bequer	Mês	Med.Elet	Bequer	Mês	Med.Elet	Bequer	Mês
		Volume Bequer			Volume Bequer			Volume Bequer
0	0	05/Mai	0	0	04/Ago	0	0	20/Jan
0,085	0,085	1,8L	0	0	1,8	0,18	0,194	4L
0,165	0,165		0,2	0,189		0,18	0,190	
0,265	0,252		0,21	0,195		0,285	0,275	
0,565	0,536		0,51	0,484		0,29	0,282	
0,785	0,774		0,48	0,480		0,395	0,366	
1,225	1,206		0,67	0,647		0,395	0,363	
0	0	10/Mai	0,65	0,631		0,4	0,385	
0,085	0,091	1,8L	0,85	0,811		0,505	0,485	
0,155	0,159		0,84	0,822		0,505	0,486	
0,275	0,277		0,99	0,914		0,61	0,602	
0,545	0,542		0,97	0,882		0,61	0,599	
0,755	0,75		1,03	0,973		0,715	0,696	
0,885	0,888		1,01	1,022		0,715	0,698	
1,155	1,134		1,26	1,189		0,79	0,747	
0	0	17/Mai	1,24	1,241		0,805	0,794	
0,05	0,041	1,8L	1,37	1,331		0,805	0,785	
0,1	0,096		1,34	1,328		0,89	0,895	
0,225	0,228		1,47	1,379		0,89	0,878	
0,515	0,527		1,46	1,493		1,01	1,009	
0,725	0,764		0	0	30/Nov	1,02	1,014	
1,155	1,24		0,18	0,170	1,8L	1,085	1,036	
0	0	08/Jul	0,44	0,433		1,11	1,111	
0,05	0,045	1,8L	0,59	0,562		1,11	1,110	
0,11	0,111		0,72	0,671		1,185	1,191	
0,195	0,185		0,83	0,788		1,185	1,158	
0,29	0,281		0,93	0,874		0	0	04/Fev
0,39	0,395		0	0	02/Dez	0,105	0,097	4L
0,48	0,463		0,235	0,224	1,8L	0,3	0,293	
0,585	0,565		0,43	0,422		0,475	0,454	
0,7	0,680		0,59	0,567		0,605	0,612	
0,785	0,762		0,74	0,706		0,925	0,932	
0,9	0,894		0,83	0,820		1,015	0,993	
1	0,979		0,94	0,908		1,19	1,219	
1,1	1,069					1,5	1,535	
1,2	1,216					1,505	1,516	
1,29	1,320							
1,41	1,385							
1,51	1,507							

ANEXO 2

Levantamento A2

Tabela de valores para construção dos Gráficos 3.3, 3.4 e 3.5, de aferição de dois sensores de pressão. As leituras dos sensores foram fornecidos em mH₂O pelo programa em Pascal utilizando as equações $S1 = 0,063 \text{ byte} + 0,000003 \text{ byte}^2$ e $S4 = -0,015 + 0,0606 \text{ byte} - 0,000006 \text{ byte}^2$, contra as medidas fornecidas pelo piezômetro em mH₂O. As duas últimas colunas indicadas dS1 e dS4, correspondem aos desvios entre os valores dos sensores e do piezômetro. Para construção da tabela foram plotadas 10 médias de 100 leituras e selecionadas duas médias para a tabela, a menor e a maior.

Tabela A2 – Medidas lidas nos sensores contra leituras no piezômetro.

Piezômetro (mH₂O)	S1 (mH₂O)	S4 (mH₂O)	dS1 (mH₂O)	dS4 (mH₂O)
14,930	14,903	14,915	0,027	0,015
14,930	14,907	14,917	0,023	0,013
14,915	14,886	14,880	0,029	0,035
14,915	14,895	14,887	0,020	0,028
12,980	12,976	12,972	0,004	0,008
12,980	12,982	12,976	-0,002	0,004
10,015	10,052	10,001	-0,037	0,014
10,015	10,056	10,009	-0,041	0,006
7,970	8,028	7,957	-0,058	0,013
7,970	8,032	7,960	-0,062	0,010
5,980	6,055	6,006	-0,075	-0,026
5,980	6,058	6,015	-0,078	-0,035
5,995	6,054	6,017	-0,059	-0,022
5,995	6,058	6,026	-0,063	-0,031
4,020	4,069	4,035	-0,049	-0,015
4,020	4,073	4,041	-0,053	-0,021
4,010	4,069	4,034	-0,059	-0,024
4,010	4,073	4,038	-0,063	-0,028
2,030	2,071	2,041	-0,041	-0,011

Tabela A2 – Medidas lidas nos sensores contra leituras do piezômetro

2,030	1,068	2,044	-0,044	-0,014
1,060	1,068	1,072	-0,008	-0,012
1,060	1,074	1,077	-0,014	-0,017
0,410	0,439	0,407	-0,029	0,003
0,410	0,441	0,412	-0,031	-0,002
0,120	0,125	0,120	-0,005	0,000
0,120	0,128	0,138	-0,008	-0,018
0,070	0,063	0,092	0,007	-0,022
0,070	0,069	0,104	0,001	-0,034
0,000	0,002	0,025	-0,002	-0,025
0,000	0,004	0,041	-0,004	-0,041

ANEXO 3

Levantamento A3

Testes de relação entre pressão, vazão e número de gotejadores.

Dados obtidos para realização dos testes 1 e 2. As tabelas e gráficos dos levantamentos A3, correspondem a duas corridas por levantamento. Em cada levantamento foi acrescentado 10 gotejadores, iniciando pelo tubo sem gotejadores. As equações ajustadas, por regressão, para cada levantamento permitiram melhor apresentação das Tabelas 3.7 e 3.8 e dos Gráficos 3.8 e 3.9, já que os valores fornecidos pelos manômetros de Bourdon apresentaram-se dispersos.

Os levantamentos foram realizados na instalação de acordo com planta da Figura 3.28.

A3.1 -TUBO SEM GOTEJADORES

$Q(m^3/h)$	$h_L(mH_2O)$
0	0,2
0,09	0,1
0,16	0,3
0,26	0,8
0,55	2,7
0,75	4,8
1,24	12,0
0	0,1
0,09	0,1
0,16	0,2
0,26	0,4
0,55	2,8
0,75	4,8
1,25	12,0

A3.2 - TUBO COM 10 GOTEJADORES

$Q(m^3/h)$	$h_T(mH_2O)$
0	0
0,09	0,1
0,17	0,6
0,25	0,8
0,56	3,0
0,75	5,0
1,22	12,0
0	0,2
0,09	0,1
0,17	0,5
0,26	0,5
0,56	3,0
0,75	5,0
1,21	12,0

A3.3 - TUBO COM 20 GOTEJADORES

$Q(m^3/h)$	$h_T(mH_2O)$
0	0
0,10	0,1
0,15	0,2
0,25	0,6
0,56	3,1
0,75	5,1
1,19	12,2
0	0,1
0,10	0,1
0,17	0,3
0,26	0,8
0,55	3,2
0,76	5,5
1,19	12,0

A3.4 - TUBO COM 30 GOTEJADORES

$Q(m^3/h)$	$h_T(mH_2O)$
0	0
0,09	0,2
0,15	0,4
0,26	1,0
0,56	3,3
0,75	5,4
1,16	12,2
0	0
0,09	0,2
0,17	0,4
0,26	1,0
0,56	3,2
0,75	5,5
1,16	12,0

ANEXO 4

Levantamento A4

Dados para construção dos gráficos $f \times \text{Rey}$ para o tubo DT – Teste 3
Conforme Figura 3.28.

Levantamento A4.1

Tabela A4.1.1 – Carga de pressão nos manômetros de Bourdon
e vazão no medidor eletromagnético.

Carga em	Carga em	Vazão
M (mH2O)	MF(mH2O)	Q (m3/h)
14,4	14,5	0,00
14,2	14,3	0,09
13,9	14,2	0,15
13,2	14,0	0,27
10,9	13,6	0,55
8,3	13,2	0,76
0	12,0	1,23

Tabela A4.1.2 – Valores de perda de carga na linha (h_L), com comprimento 44,6 m.

Dados para construção do Gráfico 3.10

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,1	0,002	0,00				
0,1	0,002	0,13				
0,3	0,007	0,22	3833	0,0410	0,0402	0,0384
0,8	0,018	0,40	6900	0,0338	0,0347	0,0331
2,7	0,061	0,81	13927	0,0280	0,0291	0,0278
4,9	0,110	1,13	19421	0,0261	0,0268	0,0256
12,0	0,269	1,83	31432	0,0244	0,0238	0,0227

Levantamento A4.2

Tabela A4.2.1 – Carga de pressão nos manômetros de Bourdon e vazão no medidor eletromagnético.

Carga em	Carga em	Vazão
M (mH2O)	MF(mH2O)	Q (m3/h)
14,3	14,5	0,00
14,2	14,3	0,09
13,9	14,2	0,16
13,3	14,1	0,26
10,9	13,6	0,55
8,4	13,2	0,75
0	12	1,24

Tabela A4.2. 2 – Valores de perda de carga na linha (hf), com comprimento 44,6 m.
Dados utilizados para construção do Gráfico 3.11.

hf(m)	J(m/m)	v(m/s)	Rey	f exp	f Blasius	f Bagarello
0,2	0,004	0,00				
0,1	0,002	0,13				
0,3	0,007	0,23	3961	0,0359	0,0398	0,0381
0,8	0,018	0,39	6644	0,0340	0,0350	0,0335
2,7	0,061	0,82	14055	0,0257	0,0290	0,0277
4,8	0,108	1,11	19166	0,0245	0,0269	0,0257
12,0	0,269	1,84	31687	0,0224	0,0237	0,0226

Os valores das duas primeiras linhas das Tabelas A4.1.2 e A4.2.2 foram descartados por estarem fora da faixa definida para a curva de Blasius.

ANEXO 5

**Levantamento A5 com tubo D20, manômetros de Bourdon e sensores de pressão
S1 e S4, sem gotejadores, para o Teste 4.**

Instalação de acordo com a planta da Figura 3.28.

Comprimento do trecho com manômetros de Bourdon - 44,6 m

Comprimento do trecho entre os sensores S1 e S4 – 43,1 m

*Tabela A5.1 – Valores de carga de pressão nos manômetros, nos sensores e a medida
de vazão no medidor eletromagnético.*

<i>Carga em M(mH₂O)</i>	<i>Carga em MF(mH₂O)</i>	<i>Carga em S4(mH₂O)</i>	<i>Carga em S1(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,3	14,5	14,460	14,479	0
14,3	14,5	14,410	14,468	0
13,8	14,4	14,036	14,382	0,20
13,8	14,3	14,029	14,375	0,21
12,4	14,2	12,407	14,054	0,51
12,4	14,1	12,403	14,049	0,48
11,0	13,8	11,144	13,764	0,67
11,0	13,8	11,142	13,760	0,65
9,3	13,5	9,285	13,393	0,85
9,3	13,5	9,282	13,392	0,84
7,6	13,3	7,693	13,038	0,99
7,6	13,3	7,686	13,034	0,97
7,3	13,3	7,116	12,913	1,03
7,2	13,2	7,114	12,914	1,01
4,0	12,5	3,980	12,249	1,26
4,0	12,5	3,976	12,243	1,24
2,5	12,3	2,320	11,886	1,37
2,5	12,3	2,313	11,884	1,34
0,5	12,0	0,637	11,532	1,47
0,5	12,0	0,630	11,540	1,46

Tabela A5.2 - Dados utilizados para construção dos Gráficos 3.6 e 3.12.

<i>hf(m)</i>	<i>J(m/m)</i>	<i>v(m/s)</i>	<i>Rey</i>	<i>f exp</i>	<i>f Blasius</i>	<i>f Bagarello</i>
0,3	0,006					
0,3	0,006					
0,6	0,013	0,26				
0,5	0,011	0,28				
1,8	0,040	0,67	12262	0,0289	0,0300	0,0287
1,7	0,038	0,63	11541	0,0308	0,0305	0,0291
2,8	0,063	0,88	16109	0,0260	0,0280	0,0268
2,8	0,063	0,85	15628	0,0276	0,0283	0,0270
4,3	0,095	1,12	20436	0,0245	0,0264	0,0253
4,3	0,095	1,10	20196	0,0251	0,0265	0,0253
5,7	0,128	1,30	23802	0,0243	0,0254	0,0243
5,7	0,128	1,28	23321	0,0253	0,0256	0,0244
6,0	0,135	1,35	24764	0,0236	0,0252	0,0241
6,0	0,135	1,33	24283	0,0245	0,0253	0,0242
8,5	0,191	1,66	30294	0,0223	0,0240	0,0229
8,5	0,191	1,63	29813	0,0231	0,0240	0,0230
9,8	0,220	1,80	32939	0,0218	0,0235	0,0224
9,8	0,220	1,76	32217	0,0228	0,0236	0,0225
11,5	0,258	1,93	35343	0,0222	0,0230	0,0220
11,5	0,258	1,92	35102	0,0225	0,0231	0,0221

Tabela A5.3 - Dados utilizados para construção dos Gráficos 3.7 e 3.13.

<i>hf(m)</i>	<i>J(m/m)</i>	<i>v(m/s)</i>	<i>Rey</i>	<i>f exp</i>	<i>f Blasius</i>	<i>f Bagarello</i>
0,019	0,0004					
0,058	0,0013					
0,346	0,0080	0,26	4809	0,0373	0,0379	0,0363
0,346	0,0080	0,28	5049	0,0339	0,0375	0,0358
1,647	0,0382	0,67	12262	0,0273	0,0300	0,0287
1,646	0,0382	0,63	11541	0,0308	0,0305	0,0291
2,620	0,0608	0,88	16109	0,0252	0,0280	0,0268
2,618	0,0607	0,85	15628	0,0268	0,0283	0,0270
4,108	0,0953	1,12	20436	0,0245	0,0264	0,0253
4,110	0,0954	1,10	20196	0,0251	0,0265	0,0253
5,345	0,1240	1,30	23802	0,0235	0,0254	0,0243
5,348	0,1241	1,28	23321	0,0245	0,0256	0,0244
5,797	0,1345	1,35	24764	0,0236	0,0252	0,0241
5,800	0,1346	1,33	24283	0,0245	0,0253	0,0242
8,269	0,1919	1,66	30294	0,0225	0,0240	0,0229
8,267	0,1918	1,63	29813	0,0232	0,0240	0,0230
9,566	0,2219	1,80	32939	0,0220	0,0235	0,0224
9,571	0,2221	1,76	32217	0,0230	0,0236	0,0225
10,895	0,2528	1,93	35343	0,0218	0,0230	0,0220
10,910	0,2531	1,92	35102	0,0221	0,0231	0,0221

ANEXO 6

Levantamento A6 com tubo D16 e piezômetros para o Teste 5.

Os dados apresentados referem-se às cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 instaladas de acordo com a planta da Figura 3.29.

Tabela A6.1 – Cargas piezométricas e vazão

Cargas em TP1(mH ₂ O)	Cargas em TP2(mH ₂ O)	Cargas em TP3(mH ₂ O)	Cargas em TP4(mH ₂ O)	Vazão Q(m ³ /h)
14,513	14,494	14,501	14,440	0
14,400	14,020	13,860	13,246	0,23
14,125	13,046	12,550	10,465	0,44
13,870	12,041	11,170	8,023	0,59
13,595	10,905	9,690	5,200	0,72
13,345	10,000	8,495	2,830	0,82
13,061	8,944	7,185	0,360	0,92

Tabela A6.2 - Dados para construção do Gráfico 3.14, $f \times \text{Rey}$. Trecho reto A, de comprimento 14,10 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,019	0,0013	0,000				
0,380	0,0270	0,462	7625	0,0329	0,0338	0,0323
1,079	0,0765	0,884	14586	0,0255	0,0288	0,0275
1,829	0,1297	1,185	19559	0,0240	0,0267	0,0255
2,690	0,1908	1,446	23869	0,0238	0,0254	0,0243
3,345	0,2372	1,647	27184	0,0228	0,0246	0,0235
4,117	0,2920	1,848	30499	0,0223	0,0239	0,0229

Tabela A6.3 – Dados para construção do Gráfico 3.15, $f \times \text{Rey}$. Trecho curvo B, de comprimento 5,85 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
-0,007	-0,0012	0,000				
0,160	0,0274	0,462	7625	0,0334	0,0338	0,0323
0,496	0,0848	0,884	14586	0,0283	0,0288	0,0275
0,871	0,1489	1,185	19559	0,0276	0,0267	0,0255
1,215	0,2077	1,446	23869	0,0259	0,0254	0,0243
1,505	0,2573	1,647	27184	0,0247	0,0246	0,0235
1,759	0,3007	1,848	30499	0,0229	0,0239	0,0229

Tabela A6.4 - Dados para construção do Gráfico 3.16, $f \times \text{Rey}$. Trecho C, de comprimento 22,85 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,061	0,0027	0,000				
0,614	0,0269	0,462	7625	0,0328	0,0338	0,0323
2,085	0,0912	0,884	14586	0,0304	0,0288	0,0275
3,147	0,1377	1,185	19559	0,0255	0,0267	0,0255
4,490	0,1965	1,446	23869	0,0245	0,0254	0,0243
5,665	0,2479	1,647	27184	0,0238	0,0246	0,0235
6,825	0,2987	1,848	30499	0,0228	0,0239	0,0229

Tabela A6.5 - Dados para construção do Gráfico 3.17, $f \times \text{Rey}$. Trecho total, de comprimento 42,80 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,073	0,0017	0,000				
1,154	0,0270	0,462	7625	0,0329	0,0338	0,0323
3,660	0,0855	0,884	14586	0,0285	0,0288	0,0275
5,847	0,1366	1,185	19559	0,0253	0,0267	0,0255
8,395	0,1961	1,446	23869	0,0244	0,0254	0,0243
10,515	0,2457	1,647	27184	0,0236	0,0246	0,0235
12,701	0,2968	1,848	30499	0,0226	0,0239	0,0229

ANEXO 7

Os dados apresentados referem-se às cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 e às leituras de vazão no medidor eletromagnético, todos instalados de acordo com a Figura 3.30.

Levantamento A7

Tubo D16 – Sem gotejadores – 3 corridas.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,96 m

Tabela A7.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,506	14,501	14,503	14,449	0,00
14,474	14,391	14,290	14,174	0,11
14,412	14,134	13,790	13,526	0,20
14,314	13,741	13,014	12,529	0,30
14,184	13,251	12,050	11,289	0,40
14,037	12,671	10,913	9,819	0,50
13,842	11,931	9,455	7,948	0,60
13,657	11,206	8,027	6,102	0,69
13,415	10,276	6,181	3,729	0,80
13,069	8,965	3,574	0,369	0,93
14,502	14,491	14,494	14,439	0,00
14,467	14,399	14,300	14,184	0,10
14,402	14,121	13,775	13,509	0,20
14,309	13,751	13,050	12,574	0,30
14,167	13,221	12,005	11,239	0,41
14,037	12,713	11,000	9,944	0,50
13,827	11,911	9,418	7,914	0,62
13,637	11,201	8,021	6,104	0,70
13,407	10,313	6,270	3,854	0,80
13,056	8,954	3,565	0,369	0,94
14,492	14,482	14,485	14,433	0,00
14,447	14,334	14,199	14,064	0,12
14,393	14,116	13,775	13,514	0,20
14,291	13,715	12,975	12,489	0,31
14,162	13,236	12,045	11,290	0,41
14,014	12,653	10,900	9,809	0,50
13,827	11,961	9,525	8,054	0,60
13,657	11,291	8,200	6,354	0,69
13,409	10,361	6,377	3,996	0,80
13,034	8,945	3,561	0,374	0,94

Tabela A7.2 – Perdas de carga na linha (h_L) nos trechos A, B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{L1-2} em (mH_2O)	h_{L2-3} em (mH_2O)	h_{L3-4} em (mH_2O)	h_{L1-4} em (mH_2O)
0,00	0,005	-0,002	0,054	0,057
0,11	0,083	0,101	0,116	0,300
0,20	0,278	0,344	0,264	0,886
0,30	0,573	0,727	0,485	1,785
0,40	0,933	1,201	0,761	2,895
0,50	1,366	1,758	1,094	4,218
0,60	1,911	2,476	1,507	5,894
0,69	2,451	3,179	1,925	7,555
0,80	3,139	4,095	2,452	9,686
0,93	4,104	5,391	3,205	12,700
0,00	0,011	-0,003	0,055	0,063
0,10	0,068	0,099	0,116	0,283
0,20	0,281	0,346	0,266	0,893
0,30	0,558	0,701	0,476	1,735
0,41	0,946	1,216	0,766	2,928
0,50	1,324	1,713	1,056	4,093
0,62	1,916	2,493	1,504	5,913
0,70	2,436	3,180	1,917	7,533
0,80	3,094	4,043	2,416	9,553
0,94	4,102	5,389	3,196	12,687
0,00	0,010	-0,003	0,052	0,059
0,12	0,113	0,135	0,135	0,383
0,20	0,277	0,341	0,261	0,879
0,31	0,576	0,740	0,486	1,802
0,41	0,926	1,191	0,755	2,872
0,50	1,361	1,753	1,091	4,205
0,60	1,866	2,436	1,471	5,773
0,69	2,366	3,091	1,846	7,303
0,80	3,048	3,984	2,381	9,413
0,94	4,089	5,384	3,187	12,660

Tabela A7.3 – Dados para construção do Gráfico $f \times \text{Rey}$ com Tubo D16
 Comprimento total = 42,96 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,057	0,0013	0,00				
0,300	0,0070	0,21	3481	0,0409	0,0411	0,0393
0,886	0,0206	0,40	6630	0,0333	0,0350	0,0335
1,785	0,0416	0,60	9945	0,0298	0,0316	0,0302
2,895	0,0674	0,80	13260	0,0272	0,0294	0,0281
4,218	0,0982	0,99	16410	0,0259	0,0279	0,0267
5,894	0,1372	1,20	19725	0,0250	0,0267	0,0255
7,555	0,1759	1,38	22708	0,0242	0,0257	0,0246
9,686	0,2255	1,60	26355	0,0230	0,0248	0,0237
12,700	0,2956	1,86	30664	0,0223	0,0239	0,0228
0,063	0,0015	0,00				
0,283	0,0066	0,20	3315	0,0425	0,0416	0,0398
0,893	0,0208	0,39	6464	0,0353	0,0352	0,0337
1,735	0,0404	0,59	9779	0,0300	0,0318	0,0304
2,928	0,0682	0,81	13426	0,0268	0,0294	0,0281
4,093	0,0953	0,99	16410	0,0251	0,0279	0,0267
5,913	0,1376	1,24	20388	0,0235	0,0264	0,0253
7,533	0,1753	1,40	23040	0,0234	0,0256	0,0245
9,553	0,2224	1,60	26355	0,0227	0,0248	0,0237
12,687	0,2953	1,88	30996	0,0218	0,0238	0,0228
0,059	0,0014	0,00				
0,383	0,0089	0,24	3978	0,0400	0,0398	0,0380
0,879	0,0205	0,40	6630	0,0330	0,0350	0,0335
1,802	0,0419	0,61	10111	0,0291	0,0315	0,0301
2,872	0,0669	0,81	13426	0,0263	0,0294	0,0281
4,205	0,0979	0,99	16410	0,0258	0,0279	0,0267
5,773	0,1344	1,21	19890	0,0241	0,0266	0,0254
7,303	0,1700	1,38	22708	0,0234	0,0257	0,0246
9,413	0,2191	1,61	26521	0,0221	0,0248	0,0237
12,660	0,2947	1,89	31162	0,0215	0,0238	0,0227

Levantamento A7G

Tubo D16 – Com gotejadores – 3 corridas.

Gotejador G2 instalado no trecho A entre TP1 e TP2 com 14,09 m

Gotejador G1 instalado no trecho C entre TP3 e TP4 com 10,87 m

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,96 m

Tabela A7G.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,487	14,480	14,483	14,429	0,00
14,449	14,333	14,220	14,064	0,12
14,387	14,061	13,731	13,374	0,20
14,287	13,591	12,885	12,164	0,31
14,165	13,041	11,905	10,759	0,41
14,000	12,296	10,570	8,817	0,50
13,829	11,513	9,185	6,812	0,60
13,632	10,576	7,520	4,269	0,70
13,314	9,071	4,845	0,332	0,83
14,494	14,489	14,493	14,439	0,00
14,457	14,335	14,215	14,059	0,12
14,397	14,033	13,678	13,284	0,21
14,299	13,606	12,920	12,214	0,30
14,167	13,039	11,920	10,789	0,40
14,008	12,311	10,640	8,941	0,50
13,822	11,461	9,135	6,754	0,60
13,639	10,591	7,610	4,504	0,69
13,302	9,009	4,815	0,334	0,83
14,492	14,488	14,492	14,438	0,00
14,457	14,366	14,281	14,146	0,10
14,371	14,021	13,675	13,299	0,20
14,254	13,541	12,825	12,095	0,30
14,112	12,899	11,691	10,467	0,42
13,960	12,190	10,435	8,654	0,51
13,796	11,409	9,055	6,644	0,61
13,602	10,510	7,476	4,332	0,69
13,284	8,986	4,794	0,339	0,83

Tabela A7G.2 – Perdas de carga total (h_T) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{T1-2} em (mH₂O)	h_{T2-3} em (mH₂O)	h_{T3-4} em (mH₂O)	h_{T1-4} em (mH₂O)
0,00	0,007	-0,003	0,054	0,058
0,12	0,116	0,113	0,156	0,385
0,20	0,326	0,330	0,357	1,013
0,31	0,696	0,706	0,721	2,123
0,41	1,124	1,136	1,146	3,406
0,50	1,704	1,726	1,753	5,183
0,60	2,316	2,328	2,373	7,017
0,70	3,056	3,056	3,251	9,363
0,83	4,243	4,226	4,513	12,982
0,00	0,005	-0,004	0,054	0,055
0,12	0,122	0,120	0,156	0,398
0,21	0,364	0,355	0,394	1,113
0,30	0,693	0,686	0,706	2,085
0,40	1,128	1,119	1,131	3,378
0,50	1,697	1,671	1,699	5,067
0,60	2,361	2,326	2,381	7,068
0,69	3,048	2,981	3,106	9,135
0,83	4,293	4,194	4,481	12,968
0,00	0,004	-0,004	0,054	0,054
0,10	0,091	0,085	0,135	0,311
0,20	0,350	0,346	0,376	1,072
0,30	0,713	0,716	0,730	2,159
0,42	1,213	1,208	1,224	3,645
0,51	1,770	1,755	1,781	5,306
0,61	2,387	2,354	2,411	7,152
0,69	3,092	3,034	3,144	9,270
0,83	4,298	4,192	4,455	12,945

Gráfico A7 – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A7.2
para os trechos A e C.

Gráfico A7G – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A7G.2
para os trechos A e C

Tabela A7G.3 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G1 a partir da diferença hf_{3-4} entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A7 e A7G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	$v^2 / 2g$ (m)	h_{T3-4} (G) (m)	h_{L3-4} (m)	01 gotej. h_f (m)
0	0,00	0,000	0,060	0,033	0,002
0,1	0,20	0,002	0,146	0,126	0,001
0,2	0,40	0,008	0,356	0,278	0,005
0,3	0,60	0,019	0,690	0,489	0,013
0,4	0,80	0,033	1,147	0,760	0,026
0,5	1,00	0,051	1,727	1,090	0,042
0,6	1,21	0,074	2,431	1,479	0,063
0,7	1,41	0,101	3,258	1,928	0,089
0,8	1,61	0,132	4,209	2,436	0,118

Tabela A7G.4 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G2 a partir da diferença hf_{1-2} entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A7 e A7G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	$v^2 / 2g$ (m)	h_{T1-2} (G) (m)	h_{L1-2} (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	-0,009	-0,026	0,0011
0,10	0,20	0,002	0,113	0,099	0,0009
0,20	0,40	0,008	0,345	0,301	0,0029
0,30	0,60	0,019	0,686	0,579	0,0071
0,40	0,80	0,033	1,137	0,934	0,0136
0,50	1,00	0,051	1,698	1,365	0,0222
0,60	1,21	0,074	2,368	1,872	0,0331
0,70	1,41	0,101	3,148	2,456	0,0462
0,80	1,61	0,132	4,038	3,117	0,0614

ANEXO 8

Os dados apresentados referem-se às cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 e às leituras de vazão no medidor eletromagnético, todos instalados de acordo com a Figura 3.30.

Levantamento A8

Tubo D16 – Sem gotejadores – 2 corridas.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,86 m

Tabela A8.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,506	14,498	14,497	14,450	0,00
14,481	14,395	14,297	14,183	0,09
14,417	14,130	13,785	13,533	0,20
14,341	13,821	13,190	12,758	0,28
14,170	13,182	11,951	11,167	0,41
14,023	12,609	10,841	9,724	0,50
13,853	11,958	9,591	8,124	0,60
13,628	11,112	7,954	6,005	0,69
13,350	10,054	5,882	3,325	0,81
13,034	8,871	3,590	0,363	0,92
14,503	14,496	14,496	14,449	0,00
14,474	14,377	14,261	14,148	0,10
14,412	14,123	13,776	13,517	0,20
14,316	13,740	13,035	12,559	0,30
14,193	13,271	12,128	11,393	0,41
14,035	12,681	10,985	9,910	0,50
13,838	11,923	9,520	8,028	0,62
13,649	11,229	8,171	6,295	0,70
13,416	10,354	6,481	4,110	0,80
13,005	8,866	3,581	0,363	0,94

Tabela A8.2 – Perdas de carga na linha (h_L) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{L1-2} em (mH_2O)	h_{L2-3} em (mH_2O)	h_{L3-4} em (mH_2O)	h_{L1-4} em (mH_2O)
0,00	0,008	0,001	0,047	0,056
0,09	0,086	0,098	0,114	0,298
0,20	0,287	0,345	0,252	0,884
0,28	0,520	0,631	0,432	1,583
0,41	0,988	1,231	0,784	3,003
0,50	1,414	1,768	1,117	4,299
0,60	1,895	2,367	1,467	5,729
0,69	2,516	3,158	1,949	7,623
0,81	3,296	4,172	2,557	10,025
0,92	4,163	5,281	3,227	12,671
0,00	0,007	0,000	0,047	0,054
0,10	0,097	0,116	0,113	0,326
0,20	0,289	0,347	0,259	0,895
0,30	0,576	0,705	0,476	1,757
0,41	0,922	1,143	0,735	2,800
0,50	1,354	1,696	1,075	4,125
0,62	1,915	2,403	1,492	5,810
0,70	2,420	3,058	1,876	7,354
0,80	3,062	3,873	2,371	9,306
0,94	4,139	5,285	3,218	12,642

Tabela A8.3 – Dados para construção do gráfico $f \times \text{Rey}$ do Tubo D16

Comprimento total = 42,86 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,056	0,0013	0,00				
0,298	0,0070	0,18	2984	0,0554	0,0428	0,0409
0,884	0,0206	0,40	6630	0,0333	0,0350	0,0335
1,583	0,0369	0,56	9282	0,0304	0,0322	0,0308
3,003	0,0701	0,82	13592	0,0269	0,0293	0,0280
4,299	0,1003	0,99	16410	0,0264	0,0279	0,0267
5,729	0,1337	1,20	19725	0,0244	0,0267	0,0255
7,623	0,1779	1,39	22874	0,0241	0,0257	0,0246
10,025	0,2339	1,63	26852	0,0230	0,0247	0,0236
12,671	0,2956	1,84	30333	0,0228	0,0239	0,0229
0,054	0,0013	0,00				
0,326	0,0076	0,20	3315	0,0491	0,0416	0,0398
0,895	0,0209	0,39	6464	0,0354	0,0352	0,0337
1,757	0,0410	0,59	9779	0,0304	0,0318	0,0304
2,800	0,0653	0,81	13426	0,0257	0,0294	0,0281
4,125	0,0962	0,99	16410	0,0253	0,0279	0,0267
5,810	0,1356	1,24	20388	0,0231	0,0264	0,0253
7,354	0,1716	1,40	23040	0,0229	0,0256	0,0245
9,306	0,2171	1,60	26355	0,0222	0,0248	0,0237
12,642	0,2950	1,88	30996	0,0218	0,0238	0,0228

Levantamento A8G

Tubo D16 – Com gotejadores – 3 corridas.

Gotejador G4 instalado no trecho A entre TP1 e TP2 com 14,06 m

Gotejador G3 instalado no trecho C entre TP3 e TP4 com 10,87 m

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,86 m

Tabela A8G.1 – Cargas piezométricas e vazão.

Cargas em TP1(mH ₂ O)	Cargas em TP2(mH ₂ O)	Cargas em TP3(mH ₂ O)	Cargas em TP4(mH ₂ O)	Vazão Q(m ³ /h)
14,489	14,484	14,483	14,435	0,00
14,476	14,403	14,364	14,275	0,07
14,413	13,976	13,666	13,365	0,20
14,313	13,331	12,636	12,015	0,30
14,176	12,491	11,321	10,298	0,40
14,000	11,386	9,601	8,035	0,52
13,823	10,251	7,841	5,715	0,61
13,578	8,711	5,451	2,505	0,72
13,416	7,662	3,806	0,320	0,78
14,489	14,484	14,483	14,436	0,00
14,464	14,348	14,264	14,148	0,09
14,392	13,945	13,621	13,309	0,20
14,303	13,414	12,781	12,219	0,29
14,148	12,536	11,399	10,420	0,41
13,988	11,590	9,931	8,485	0,50
13,777	10,345	7,994	5,930	0,61
13,536	8,911	5,760	2,950	0,72
13,323	7,651	3,789	0,320	0,80
14,490	14,484	14,484	14,436	0,00
14,462	14,328	14,226	14,104	0,10
14,395	13,951	13,632	13,325	0,20
14,280	13,301	12,602	11,987	0,31
14,153	12,581	11,461	10,505	0,41
14,001	11,693	10,078	8,688	0,50
13,812	10,604	8,383	6,467	0,59
13,586	9,264	6,290	3,688	0,70
13,313	7,656	3,776	0,320	0,81

Tabela A8G.2 – Perdas de carga total (h_T) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

<i>Vazão</i> <i>Q(m³/h)</i>	<i>h_{T1-2} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T2-3} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T3-4} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T1-4} em</i> <i>(mH₂O)</i>
0,00	0,005	0,001	0,048	0,054
0,07	0,073	0,039	0,089	0,201
0,20	0,437	0,310	0,301	1,048
0,30	0,982	0,695	0,621	2,298
0,40	1,685	1,170	1,023	3,878
0,52	2,614	1,785	1,566	5,965
0,61	3,572	2,410	2,126	8,108
0,72	4,867	3,260	2,946	11,073
0,78	5,754	3,856	3,486	13,096
0,00	0,005	0,001	0,047	0,053
0,09	0,116	0,084	0,116	0,316
0,20	0,447	0,324	0,312	1,083
0,29	0,889	0,633	0,562	2,084
0,41	1,612	1,137	0,979	3,728
0,50	2,398	1,659	1,446	5,503
0,61	3,432	2,351	2,064	7,847
0,72	4,625	3,151	2,810	10,586
0,80	5,672	3,862	3,469	13,003
0,00	0,006	0,000	0,048	0,054
0,10	0,134	0,102	0,122	0,358
0,20	0,444	0,319	0,307	1,070
0,31	0,979	0,699	0,615	2,293
0,41	1,572	1,120	0,956	3,648
0,50	2,308	1,615	1,390	5,313
0,59	3,208	2,221	1,916	7,345
0,70	4,322	2,974	2,602	9,898
0,81	5,657	3,880	3,456	12,993

Gráfico A8 – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A8.2
para os trechos A e C.

Gráfico A8G – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A8G.2
para os trechos A e C.

Tabela A8G.3 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G3 a partir da diferença $h_{f\ 3-4}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A8 e A8G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	$v^2 / 2 g$ (m)	$h_{T\ 3-4}$ (G) (m)	$h_{L\ 3-4}$ (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	0,048	0,042	0,000
0,10	0,20	0,002	0,129	0,124	0,000
0,20	0,40	0,008	0,310	0,268	0,003
0,30	0,60	0,019	0,592	0,476	0,008
0,40	0,80	0,033	0,975	0,748	0,015
0,50	1,00	0,051	1,459	1,082	0,025
0,60	1,21	0,074	2,044	1,480	0,038
0,70	1,41	0,101	2,729	1,941	0,053
0,80	1,61	0,132	3,516	2,466	0,070

Tabela A8G.4 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G4 a partir da diferença $h_{f\ 1-2}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A8 e A8G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	$v^2 / 2 g$ (m)	$h_{T\ 1-2}$ (G) (m)	$h_{L\ 1-2}$ (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	-0,017	-0,005	-0,001
0,10	0,20	0,002	0,149	0,110	0,003
0,20	0,40	0,008	0,474	0,305	0,011
0,30	0,60	0,019	0,960	0,582	0,025
0,40	0,80	0,033	1,606	0,939	0,044
0,50	1,00	0,051	2,413	1,378	0,069
0,60	1,21	0,074	3,380	1,897	0,099
0,70	1,41	0,101	4,507	2,497	0,134
0,80	1,61	0,132	5,794	3,178	0,174

ANEXO 9

Os dados apresentados referem-se as cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 e vazão no medidor eletromagnético instalados de acordo com a Figura 3.30.

Levantamento A9

Tubo D18 – Sem gotejadores – 2 corridas.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,87 m

Tabela A9.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,485	14,474	14,478	14,427	0,00
14,332	14,091	13,794	13,558	0,30
14,163	13,658	13,015	12,588	0,45
13,931	13,077	11,993	11,292	0,62
13,672	12,458	10,895	9,908	0,74
13,319	11,587	9,355	7,973	0,92
12,871	10,513	7,618	5,568	1,09
12,436	9,451	5,560	3,188	1,24
11,952	8,290	3,494	0,573	1,38
14,488	14,483	14,489	14,434	0,00
14,336	14,083	13,770	13,528	0,30
14,176	13,683	13,070	12,648	0,45
13,918	13,053	11,954	11,243	0,60
13,676	12,458	10,899	9,918	0,75
13,326	11,615	9,420	8,058	0,91
12,891	10,563	7,550	5,698	1,08
12,455	9,508	5,690	3,343	1,23
11,939	8,278	3,490	0,568	1,39

Tabela A9.2 – Perdas de carga na linha (h_L) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{L1-2} em (mH2O)	h_{L2-3} em (mH2O)	h_{L3-4} em (mH2O)	h_{L1-4} em (mH2O)
0,00	0,011	-0,004	0,051	0,058
0,30	0,241	0,297	0,236	0,774
0,45	0,505	0,643	0,427	1,575
0,62	0,854	1,084	0,701	2,639
0,74	1,214	1,563	0,987	3,764
0,92	1,732	2,232	1,382	5,346
1,09	2,358	2,895	2,05	7,303
1,24	2,985	3,891	2,372	9,248
1,38	3,662	4,796	2,921	11,379
0,00	0,005	-0,006	0,055	0,054
0,30	0,253	0,313	0,242	0,808
0,45	0,493	0,613	0,422	1,528
0,60	0,865	1,099	0,711	2,675
0,75	1,218	1,559	0,981	3,758
0,91	1,711	2,195	1,362	5,268
1,08	2,328	3,013	1,852	7,193
1,23	2,947	3,818	2,347	9,112
1,39	3,661	4,788	2,922	11,371

Tabela A9.3 – Dados para construção do gráfico $f \times$ Rey do Tubo D18
Comprimento total = 42,87 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	f_{exp}	$f_{Blasius}$	$f_{Bagarello}$
0,058	0,0014	0,000				
0,774	0,0181	0,429	8395	0,0302	0,0330	0,0315
1,575	0,0367	0,644	12593	0,0273	0,0298	0,0285
2,639	0,0616	0,880	17210	0,0245	0,0276	0,0264
3,764	0,0878	1,059	20708	0,0241	0,0263	0,0252
5,346	0,1247	1,310	25605	0,0224	0,0250	0,0239
7,303	0,1704	1,553	30363	0,0218	0,0239	0,0229
9,248	0,2157	1,775	34700	0,0211	0,0232	0,0221
11,379	0,2654	1,975	38618	0,0210	0,0225	0,0215
0,054	0,0013	0,000				
0,808	0,0188	0,429	8395	0,0315	0,0330	0,0315
1,528	0,0356	0,637	12453	0,0271	0,0299	0,0286
2,675	0,0624	0,859	16790	0,0261	0,0278	0,0265
3,758	0,0877	1,073	20988	0,0235	0,0263	0,0251
5,268	0,1229	1,295	25326	0,0226	0,0250	0,0239
7,193	0,1678	1,546	30223	0,0217	0,0240	0,0229
9,112	0,2125	1,753	34281	0,0213	0,0232	0,0222
11,371	0,2652	1,989	38898	0,0207	0,0225	0,0215

Levantamento A9G

Tubo D18 – Com gotejadores – 3 corridas.

Gotejador G4 instalado no trecho C entre TP3 e TP4 com 10,87 m.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,87 m

Tabela A9G.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,494	14,484	14,490	14,437	0,00
14,331	13,994	13,671	13,303	0,31
14,144	13,453	12,770	12,051	0,46
13,926	12,813	11,712	10,564	0,60
13,629	12,028	10,292	8,558	0,75
13,278	10,928	8,610	6,150	0,91
12,821	9,608	6,432	2,997	1,08
12,461	8,571	4,734	0,498	1,21
14,493	14,483	14,485	14,432	0,00
14,328	14,008	13,697	13,348	0,30
14,141	13,466	12,795	12,093	0,46
13,902	12,773	11,660	10,498	0,61
13,641	12,020	10,411	8,728	0,75
13,296	11,040	8,800	6,448	0,91
12,791	9,578	6,394	2,963	1,10
12,441	8,563	4,720	0,498	1,22
14,488	14,483	14,488	14,435	0,00
14,316	13,993	13,669	13,318	0,32
14,146	13,488	12,833	12,153	0,45
13,913	12,756	11,745	10,618	0,59
13,631	12,025	10,415	8,758	0,75
13,331	11,168	9,005	6,753	0,90
12,824	9,708	6,595	3,293	1,11
12,416	8,548	4,700	0,503	1,24

Tabela A9G.2 – Perdas de carga total (h_T) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

<i>Vazão</i> <i>Q(m³/h)</i>	<i>h_{T1-2} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T2-3} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T3-4} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T1-4} em</i> <i>(mH₂O)</i>
0,00	0,010	-0,006	0,053	0,057
0,31	0,337	0,323	0,368	1,028
0,46	0,691	0,683	0,719	2,093
0,60	1,113	1,101	1,148	3,362
0,75	1,601	1,736	1,734	5,071
0,91	2,350	2,318	2,460	7,128
1,08	3,213	3,176	3,435	9,824
1,21	3,890	3,837	4,236	11,963
0,00	0,010	-0,002	0,053	0,061
0,30	0,320	0,311	0,349	0,980
0,46	0,675	0,671	0,702	2,048
0,61	1,129	1,113	1,162	3,404
0,75	1,621	1,609	1,683	4,913
0,91	2,256	2,240	2,352	6,848
1,10	3,213	3,184	3,431	9,828
1,22	3,878	3,843	4,222	11,943
0,00	0,005	-0,005	0,053	0,053
0,32	0,323	0,324	0,351	0,998
0,45	0,658	0,655	0,680	1,993
0,59	1,157	1,011	1,127	3,295
0,75	1,606	1,610	1,657	4,873
0,90	2,163	2,163	2,252	6,578
1,11	3,116	3,113	3,302	9,531
1,24	3,868	3,848	4,197	11,913

Gráfico A9 – Curva ajustada por regressão com os dados da Tabela A9.2 para o trecho C.

Gráfico A9G – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A9G.2 para o trecho C.

Tabela A9G.3 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G4 a partir da diferença hf_{3-4} entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A9 e A9G.

Vazão (m³/h)	v (m/s)	$v^2 / 2g$ (m)	$h_{T\ 3-4}$ (G) (m)	h_{L3-4} (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	-0,017	-0,005	-0,001
0,10	0,20	0,002	0,149	0,110	0,003
0,20	0,40	0,008	0,474	0,305	0,011
0,30	0,60	0,019	0,960	0,582	0,025
0,40	0,80	0,033	1,606	0,939	0,044
0,50	1,00	0,051	2,413	1,378	0,069
0,60	1,21	0,074	3,380	1,897	0,099
0,70	1,41	0,101	4,507	2,497	0,134
0,80	1,61	0,132	5,794	3,178	0,174

ANEXO 10

Os dados apresentados referem-se às cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 e às leituras de vazão no medidor eletromagnético, todos instalados de acordo com a Figura 3.30.

Levantamento A10

Tubo D18 – Sem gotejadores – 2 corridas.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,82 m

Tabela A10.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,503	14,490	14,486	14,456	0,00
14,358	14,140	13,889	13,709	0,27
14,193	13,746	13,209	12,853	0,40
13,944	13,130	12,145	11,512	0,58
13,686	12,504	11,060	10,145	0,71
13,355	11,693	9,647	8,179	0,87
13,029	10,898	8,267	6,629	1,00
12,623	9,924	6,581	4,483	1,15
11,888	8,144	3,471	0,546	1,38
14,495	14,483	14,478	14,446	0,00
14,306	14,030	13,710	13,488	0,31
14,123	13,595	12,949	12,526	0,46
13,873	12,982	11,899	11,207	0,61
13,586	12,275	10,677	9,668	0,76
13,276	11,540	9,395	8,055	0,91
12,767	10,291	7,235	5,334	1,09
12,350	9,305	5,536	3,171	1,23
11,859	8,122	3,466	0,553	1,38

Tabela A10.2 – Perdas de carga na linha(h_L) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{L1-2} em (mH_2O)	h_{L2-3} em (mH_2O)	h_{L3-4} em (mH_2O)	h_{L1-4} em (mH_2O)
0,00	0,013	0,004	0,030	0,047
0,27	0,218	0,251	0,180	0,649
0,40	0,447	0,537	0,356	1,340
0,58	0,814	0,985	0,633	2,432
0,71	1,182	1,444	0,915	3,541
0,87	1,662	2,046	1,468	5,176
1,00	2,131	2,631	1,638	6,400
1,15	2,699	3,343	2,098	8,140
1,38	3,744	4,673	2,925	11,342
0,00	0,012	0,005	0,032	0,049
0,31	0,276	0,320	0,222	0,818
0,46	0,528	0,646	0,423	1,597
0,61	0,891	1,083	0,692	2,666
0,76	1,311	1,598	1,009	3,918
0,91	1,736	2,145	1,340	5,221
1,09	2,476	3,056	1,901	7,433
1,23	3,045	3,769	2,365	9,179
1,38	3,737	4,656	2,913	11,306

Tabela A10.3 – Dados para construção do gráfico $f \times \text{Rey}$ do Tubo D18
Comprimento total = 42,82 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,047	0,0011	0,00				
0,649	0,0152	0,38	7416	0,0325	0,0341	0,0325
1,340	0,0313	0,57	11194	0,0294	0,0307	0,0294
2,432	0,0568	0,82	16091	0,0259	0,0281	0,0268
3,541	0,0827	1,02	19869	0,0247	0,0266	0,0254
5,176	0,1209	1,24	24206	0,0243	0,0253	0,0242
6,400	0,1495	1,42	27844	0,0227	0,0245	0,0234
8,140	0,1901	1,65	32182	0,0216	0,0236	0,0225
11,342	0,2649	1,98	38618	0,0209	0,0225	0,0215
0,049	0,0011	0,00				
0,818	0,0191	0,44	8535	0,0309	0,0329	0,0314
1,597	0,0373	0,65	12733	0,0271	0,0297	0,0284
2,666	0,0623	0,87	16930	0,0256	0,0277	0,0265
3,918	0,0915	1,08	21128	0,0242	0,0262	0,0250
5,221	0,1219	1,30	25326	0,0224	0,0250	0,0239
7,433	0,1736	1,56	30503	0,0220	0,0239	0,0229
9,179	0,2144	1,76	34420	0,0213	0,0232	0,0222
11,306	0,2640	1,98	38618	0,0209	0,0225	0,0215

Levantamento A10G

Tubo D18 – Com gotejadores – 3 corridas.

Gotejador G1 instalado no trecho A entre TP1 e TP2 com 14,12 m.

Gotejador G3 instalado no trecho C entre TP3 e TP4 com 10,90 m.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,82 m

Tabela A10G.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,510	14,498	14,494	14,464	0,00
14,290	13,878	13,534	13,238	0,31
14,108	13,300	12,632	12,089	0,45
13,853	12,501	11,380	10,475	0,60
13,563	11,568	9,928	8,599	0,75
13,212	10,426	8,160	6,313	0,90
12,688	8,720	5,517	2,857	1,10
12,337	7,569	3,726	0,496	1,21
14,504	14,487	14,483	14,451	0,00
14,299	13,917	13,597	13,326	0,30
14,098	13,306	12,645	12,101	0,45
13,869	12,575	11,508	10,528	0,61
13,552	11,555	9,920	8,585	0,74
13,194	10,388	8,102	6,231	0,91
12,631	8,539	5,197	2,476	1,12
12,334	7,573	3,734	0,492	1,20
14,500	14,484	14,480	14,447	0,00
14,274	13,873	13,534	13,242	0,32
14,092	13,313	12,668	12,136	0,45
13,833	12,508	11,414	10,531	0,61
13,537	11,578	9,976	8,685	0,75
13,187	10,480	8,271	6,484	0,91
12,696	8,904	5,835	3,311	1,08
12,271	7,530	3,702	0,500	1,22

Tabela A10G.2 – Perdas de carga total (h_T) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{T1-2} em (mH_2O)	h_{T2-3} em (mH_2O)	h_{T3-4} em (mH_2O)	h_{T1-4} em (mH_2O)
0,00	0,012	0,004	0,030	0,046
0,31	0,412	0,344	0,296	1,052
0,45	0,808	0,668	0,543	2,019
0,60	1,352	1,121	0,905	3,378
0,75	1,995	1,640	1,329	4,964
0,90	2,786	2,266	1,847	6,899
1,10	3,968	3,203	2,660	9,831
1,21	4,768	3,843	3,230	11,841
0,00	0,017	0,004	0,032	0,053
0,30	0,382	0,320	0,271	0,973
0,45	0,792	0,661	0,544	1,997
0,61	1,294	1,067	0,980	3,341
0,74	1,997	1,635	1,335	4,967
0,91	2,806	2,286	1,871	6,963
1,12	4,092	3,342	2,721	10,155
1,20	4,761	3,839	3,242	11,842
0,00	0,016	0,004	0,033	0,053
0,32	0,401	0,339	0,292	1,032
0,45	0,779	0,645	0,532	1,956
0,61	1,325	1,094	0,883	3,302
0,75	1,959	1,602	1,291	4,852
0,91	2,707	2,209	1,787	6,703
1,08	3,792	3,069	2,524	9,385
1,22	4,741	3,828	3,202	11,771

Gráfico A10 – Curva ajustada por regressão com os dados da Tabela A10.2 para os trechos A e C.

Gráfico A10G – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A10G.2 para os trechos A e C.

Tabela A10G.3 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G1 a partir da diferença $h_{f\ 1-2}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A10 e A10G.

Vazão (m³/h)	v (m/s)	v² / 2 g (m)	h_{T 1-2} (G) (m)	h_{L 1-2} (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	0,004	-0,007	0,001
0,10	0,14	0,001	0,081	0,061	0,001
0,20	0,29	0,004	0,216	0,160	0,004
0,30	0,43	0,009	0,407	0,292	0,008
0,40	0,57	0,017	0,655	0,455	0,013
0,50	0,72	0,026	0,960	0,651	0,021
0,60	0,86	0,038	1,322	0,878	0,030
0,70	1,00	0,051	1,742	1,138	0,040
0,80	1,14	0,067	2,218	1,430	0,053
0,90	1,29	0,085	2,751	1,753	0,067
1,00	1,43	0,104	3,341	2,109	0,082
1,10	1,57	0,126	3,988	2,497	0,099
1,20	1,72	0,150	4,692	2,917	0,118
1,30	1,86	0,176	5,453	3,369	0,139

Tabela A10G.4 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G3 a partir da diferença $h_{f\ 3-4}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A10 e A10G.

Vazão (m³/h)	v (m/s)	v² / 2 g (m)	h_{T 3-4} (G) (m)	h_{L 3-4} (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	0,032	0,010	0,002
0,10	0,14	0,001	0,078	0,062	0,001
0,20	0,29	0,004	0,162	0,140	0,002
0,30	0,43	0,009	0,286	0,242	0,003
0,40	0,57	0,017	0,448	0,368	0,005
0,50	0,72	0,026	0,650	0,520	0,009
0,60	0,86	0,038	0,891	0,696	0,013
0,70	1,00	0,051	1,170	0,898	0,018
0,80	1,14	0,067	1,489	1,124	0,024
0,90	1,29	0,085	1,847	1,374	0,032
1,00	1,43	0,104	2,244	1,650	0,040
1,10	1,57	0,126	2,680	1,950	0,049
1,20	1,72	0,150	3,155	2,275	0,059
1,30	1,86	0,176	3,669	2,625	0,070

ANEXO 11

Os dados apresentados referem-se às cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 e às leituras da vazão no medidor eletromagnético, todos instalados de acordo com a Figura 3.30.

Levantamento A11

Tubo D18 – Sem gotejadores – 2 corridas.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,80 m

Tabela A11.1 – Cargas piezométricas e vazão.

Cargas em TP1(mH ₂ O)	Cargas em TP2(mH ₂ O)	Cargas em TP3(mH ₂ O)	Cargas em TP4(mH ₂ O)	Vazão Q(m ³ /h)
14,510	14,487	14,496	14,441	0,00
14,349	14,065	13,755	13,507	0,30
14,173	13,629	12,984	12,532	0,45
13,940	13,048	11,970	11,262	0,59
13,612	12,224	10,515	9,423	0,77
13,261	11,377	9,037	7,576	0,90
12,694	10,000	6,604	4,493	1,12
12,241	8,896	4,655	2,026	1,27
11,975	8,254	3,517	0,578	1,34
14,506	14,484	14,495	14,440	0,00
14,351	14,090	13,805	13,571	0,30
14,154	13,591	12,927	12,466	0,46
13,921	13,020	11,930	11,208	0,61
13,639	12,331	10,727	9,703	0,76
13,296	11,519	9,300	7,905	0,91
12,792	10,307	7,159	5,203	1,10
12,367	9,309	5,435	3,038	1,23
11,904	8,208	3,500	0,582	1,37

Tabela A11.2 – Perdas de carga na linha (h_L) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{L1-2} em (mH_2O)	h_{L2-3} em (mH_2O)	h_{L3-4} em (mH_2O)	h_{L1-4} em (mH_2O)
0,00	0,023	-0,009	0,055	0,069
0,30	0,284	0,310	0,248	0,842
0,45	0,544	0,645	0,452	1,641
0,59	0,892	1,078	0,708	2,678
0,77	1,388	1,709	1,092	4,189
0,90	1,884	2,340	1,461	5,685
1,12	2,694	3,396	2,111	8,201
1,27	3,345	4,241	2,629	10,215
1,34	3,721	4,737	2,939	11,397
0,00	0,022	-0,011	0,055	0,066
0,30	0,261	0,285	0,234	0,780
0,46	0,563	0,664	0,461	1,688
0,61	0,901	1,090	0,722	2,713
0,76	1,308	1,604	1,024	3,936
0,91	1,777	2,219	1,395	5,391
1,10	2,485	3,148	1,956	7,589
1,23	3,058	3,874	2,397	9,329
1,37	3,696	4,708	2,918	11,322

Tabela A11.3 – Dados para construção do gráfico $f \times \text{Rey}$ do Tubo D18

Comprimento total = 42,80 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,069	0,0016	0,00				
0,842	0,0197	0,43	8395	0,0329	0,0330	0,0315
1,641	0,0383	0,64	12453	0,0292	0,0299	0,0286
2,678	0,0626	0,84	16511	0,0271	0,0279	0,0266
4,189	0,0979	1,09	21408	0,0252	0,0261	0,0250
5,685	0,1328	1,29	25186	0,0247	0,0251	0,0240
8,201	0,1916	1,60	31202	0,0232	0,0238	0,0227
10,215	0,2387	1,81	35400	0,0225	0,0230	0,0220
11,397	0,2663	1,92	37499	0,0223	0,0227	0,0217
0,066	0,0015	0,00				
0,780	0,0182	0,42	8255	0,0315	0,0332	0,0317
1,688	0,0394	0,66	12873	0,0281	0,0297	0,0284
2,713	0,0634	0,87	16930	0,0261	0,0277	0,0265
3,936	0,0920	1,08	21128	0,0243	0,0262	0,0250
5,391	0,1260	1,30	25326	0,0232	0,0250	0,0239
7,589	0,1773	1,57	30643	0,0223	0,0239	0,0228
9,329	0,2180	1,76	34420	0,0217	0,0232	0,0222
11,322	0,2645	1,96	38338	0,0212	0,0226	0,0216

Levantamento A11G

Tubo D18 – Com gotejadores – 3 corridas.

Gotejador G2 instalado no trecho A entre TP1 e TP2 com 14,13 m.

Gotejador G4 instalado no trecho C entre TP3 e TP4 com 10,86 m.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 42,80 m

Tabela A11G.1 – Cargas piezométricas e vazão.

<i>Cargas em TP1(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP2(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP3(mH₂O)</i>	<i>Cargas em TP4(mH₂O)</i>	<i>Vazão Q(m³/h)</i>
14,508	14,485	14,496	14,453	0,00
14,340	14,016	13,718	13,385	0,30
14,150	13,480	12,844	12,175	0,45
13,903	12,769	11,666	10,526	0,61
13,595	11,890	10,230	8,510	0,77
13,251	10,909	8,625	6,216	0,91
12,709	9,351	6,075	2,560	1,12
12,410	8,500	4,675	0,528	1,22
14,508	14,485	14,496	14,453	0,00
14,314	13,944	13,600	13,227	0,33
14,135	13,442	12,873	12,077	0,47
13,918	12,828	11,770	10,691	0,61
13,624	12,010	10,430	8,805	0,75
13,277	11,032	8,831	6,562	0,91
12,754	9,569	6,444	3,157	1,10
12,362	8,474	4,655	0,531	1,23
14,495	14,472	14,482	14,441	0,00
14,380	14,159	13,966	13,734	0,24
14,227	13,731	13,263	12,767	0,39
13,900	12,807	11,741	10,684	0,60
13,649	12,101	10,591	9,021	0,74
13,303	11,134	9,010	6,792	0,89
12,681	9,389	6,160	2,704	1,12
12,354	8,482	4,672	0,531	1,22

Tabela A11G.2 – Perdas de carga total (h_T) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{T1-2} em (mH2O)	h_{T2-3} em (mH2O)	h_{T3-4} em (mH2O)	h_{T1-4} em (mH2O)
0,00	0,023	-0,011	0,043	0,055
0,30	0,324	0,298	0,333	0,955
0,45	0,670	0,636	0,669	1,975
0,61	1,134	1,103	1,140	3,377
0,77	1,705	1,660	1,720	5,085
0,91	2,342	2,284	2,409	7,035
1,12	3,358	3,276	3,515	10,149
1,22	3,910	3,825	4,147	11,882
0,00	0,023	-0,011	0,043	0,055
0,33	0,370	0,344	0,373	1,087
0,47	0,693	0,569	0,796	2,058
0,61	1,090	1,058	1,079	3,227
0,75	1,614	1,580	1,625	4,819
0,91	2,245	2,201	2,269	6,715
1,10	3,185	3,125	3,287	9,597
1,23	3,888	3,819	4,124	11,831
0,00	0,023	-0,010	0,041	0,054
0,24	0,221	0,193	0,232	0,646
0,39	0,496	0,468	0,496	1,460
0,60	1,093	1,066	1,057	3,216
0,74	1,548	1,510	1,570	4,628
0,89	2,169	2,124	2,218	6,511
1,12	3,292	3,229	3,456	9,977
1,22	3,872	3,810	4,141	11,823

Gráfico A11 – Curva ajustada por regressão com os dados da Tabela A11.2 para os trechos A e C.

Gráfico A11G – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A11G.2 para os trechos A e C.

Tabela A11G.3 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G2 a partir da diferença h_f 1-2 entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A11 e A11G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	v ² / 2 g (m)	h _T 1-2 (G) (m)	h _L 1-2 (m)	01 gotej. h _f (m)
0,00	0,00	0,000	0,004	-0,007	0,001
0,10	0,14	0,001	0,081	0,061	0,001
0,20	0,29	0,004	0,216	0,160	0,004
0,30	0,43	0,009	0,407	0,292	0,008
0,40	0,57	0,017	0,655	0,455	0,013
0,50	0,72	0,026	0,960	0,651	0,021
0,60	0,86	0,038	1,322	0,878	0,030
0,70	1,00	0,051	1,742	1,138	0,040
0,80	1,14	0,067	2,218	1,430	0,053
0,90	1,29	0,085	2,751	1,753	0,067
1,00	1,43	0,104	3,341	2,109	0,082
1,10	1,57	0,126	3,988	2,497	0,099
1,20	1,72	0,150	4,692	2,917	0,118
1,30	1,86	0,176	5,453	3,369	0,139

Tabela A11G.4 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G4 a partir da diferença h_f 3-4 entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A11 e A11G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	v ² / 2 g (m)	h _T 3-4 (G) (m)	h _L 3-4 (m)	01 gotej. h _f (m)
0,00	0,00	0,000	0,032	0,010	0,002
0,10	0,14	0,001	0,078	0,062	0,001
0,20	0,29	0,004	0,162	0,140	0,002
0,30	0,43	0,009	0,286	0,242	0,003
0,40	0,57	0,017	0,448	0,368	0,005
0,50	0,72	0,026	0,650	0,520	0,009
0,60	0,86	0,038	0,891	0,696	0,013
0,70	1,00	0,051	1,170	0,898	0,018
0,80	1,14	0,067	1,489	1,124	0,024
0,90	1,29	0,085	1,847	1,374	0,032
1,00	1,43	0,104	2,244	1,650	0,040
1,10	1,57	0,126	2,680	1,950	0,049
1,20	1,72	0,150	3,155	2,275	0,059
1,30	1,86	0,176	3,669	2,625	0,070

ANEXO 12

Os dados apresentados referem-se às cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 e às leituras de vazão no medidor eletromagnético, todos instalados de acordo com a Figura 3.31.

Levantamento A12

Tubo D20 – Sem gotejadores.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 39,23 m

Tabela A12.1 – Cargas piezométricas e vazão.

Cargas em TP1(mH ₂ O)	Cargas em TP2(mH ₂ O)	Cargas em TP3(mH ₂ O)	Cargas em TP4(mH ₂ O)	Vazão Q(m ³ /h)
14,489	14,492	14,496	14,467	0,00
14,427	14,384	14,308	14,242	0,16
14,286	14,124	13,854	13,693	0,30
14,118	13,840	13,353	13,098	0,41
13,792	13,240	12,294	11,824	0,59
13,427	12,584	11,130	10,449	0,75
13,021	11,870	9,875	8,939	0,89
12,594	11,105	8,534	7,328	1,03
12,022	10,100	6,750	5,193	1,20
11,406	8,994	4,795	2,861	1,37
10,877	8,061	3,144	0,879	1,49
14,487	14,491	14,495	14,466	0,00
14,428	14,380	14,309	14,235	0,16
14,260	14,080	13,774	13,599	0,31
14,054	13,715	13,128	12,827	0,46
13,747	13,160	12,158	11,669	0,62
13,457	12,654	11,257	10,585	0,74
13,002	11,842	9,832	8,893	0,91
12,532	11,022	8,390	7,162	1,07
12,022	10,112	6,795	5,259	1,22
11,532	9,256	5,277	3,441	1,33
10,842	8,041	3,137	0,885	1,51

Tabela A12.2 – Perdas de carga na linha (h_L) dos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{L1-2} em (mH_2O)	h_{L2-3} em (mH_2O)	h_{L3-4} em (mH_2O)	h_{L1-4} em (mH_2O)
0,00	-0,003	-0,004	0,029	0,022
0,16	0,043	0,076	0,066	0,185
0,30	0,162	0,270	0,161	0,593
0,41	0,278	0,487	0,255	1,020
0,59	0,552	0,946	0,470	1,968
0,75	0,843	1,454	0,681	2,978
0,89	1,151	1,995	0,936	4,082
1,03	1,489	2,571	1,206	5,266
1,20	1,922	3,350	1,557	6,829
1,37	2,412	4,199	1,934	8,545
1,49	2,816	4,917	2,265	9,998
0,00	-0,004	-0,004	0,029	0,021
0,16	0,048	0,071	0,074	0,193
0,31	0,180	0,306	0,175	0,661
0,46	0,339	0,587	0,301	1,227
0,62	0,587	1,002	0,489	2,078
0,74	0,803	1,397	0,672	2,872
0,91	1,160	2,010	0,939	4,109
1,07	1,510	2,632	1,228	5,370
1,22	1,910	3,317	1,536	6,763
1,33	2,276	3,979	1,836	8,091
1,51	2,801	4,904	2,252	9,957

Tabela A12.3 – Dados para construção do gráfico $f \times \text{Rey}$ do Tubo D20

Comprimento total = 39,23 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	$f \text{ exp}$	$f \text{ Blasius}$	$f \text{ Bagarello}$
0,022	0,0006	0,00				
0,185	0,0047	0,20	4158	0,0365	0,0394	0,0376
0,593	0,0151	0,39	7913	0,0323	0,0335	0,0320
1,020	0,0260	0,53	10864	0,0295	0,0310	0,0296
1,968	0,0502	0,78	15826	0,0268	0,0282	0,0269
2,978	0,0759	0,98	19984	0,0254	0,0266	0,0254
4,082	0,1041	1,17	23873	0,0244	0,0254	0,0243
5,266	0,1342	1,35	27629	0,0235	0,0245	0,0234
6,829	0,1741	1,58	32189	0,0225	0,0236	0,0225
8,545	0,2178	1,80	36749	0,0216	0,0228	0,0218
9,998	0,2549	1,95	39833	0,0215	0,0224	0,0214
0,021	0,0005	0,00				
0,193	0,0049	0,20	4158	0,0381	0,0394	0,0376
0,661	0,0168	0,41	8315	0,0326	0,0331	0,0316
1,227	0,0313	0,60	12205	0,0281	0,0301	0,0287
2,078	0,0530	0,82	16631	0,0256	0,0278	0,0266
2,872	0,0732	0,97	19850	0,0249	0,0266	0,0254
4,109	0,1047	1,19	24276	0,0238	0,0253	0,0242
5,370	0,1369	1,40	28567	0,0225	0,0243	0,0232
6,763	0,1724	1,60	32725	0,0216	0,0235	0,0225
8,091	0,2062	1,75	35676	0,0217	0,0230	0,0220
9,957	0,2538	1,98	40370	0,0209	0,0223	0,0213

Levantamento A12G

Tubo D20 – Com gotejadores – 2 corridas.

Gotejador G3 instalado no trecho A entre TP1 e TP2 com 11,15 m.

Gotejador G2 instalado no trecho B entre TP2 e TP3 com 8,30 m.

Gotejador G4 instalado no trecho C entre TP3 e TP4 com 8,93 m.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 39,23 m

Tabela A12G.1 – Cargas piezométricas e vazão.

Cargas em TP1(mH ₂ O)	Cargas em TP2(mH ₂ O)	Cargas em TP3(mH ₂ O)	Cargas em TP4(mH ₂ O)	Vazão Q(m ³ /h)
14,489	14,489	14,490	14,469	0,00
14,272	14,073	13,758	13,519	0,30
14,066	13,666	13,028	12,576	0,45
13,761	13,062	12,016	11,262	0,59
13,363	12,272	10,505	9,293	0,76
12,934	11,405	8,910	7,201	0,90
12,254	10,038	6,415	3,920	1,12
11,604	8,734	4,017	0,732	1,29
14,489	14,492	14,496	14,467	0,00
14,205	13,946	13,530	13,230	0,34
14,006	13,554	12,829	12,320	0,47
13,644	12,838	11,534	10,646	0,65
13,297	12,149	10,284	9,016	0,79
12,885	11,325	8,790	7,061	0,92
12,209	9,985	6,336	3,738	1,13
11,579	8,720	4,013	0,735	1,30

Tabela A12G.2 – Perdas de carga total (h_T) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{T1-2} em (mH_2O)	h_{T2-3} em (mH_2O)	h_{T3-4} em (mH_2O)	h_{T1-4} em (mH_2O)
0,00	0,000	-0,001	0,021	0,020
0,30	0,199	0,315	0,239	0,753
0,45	0,400	0,638	0,452	1,490
0,59	0,699	1,046	0,754	2,499
0,76	1,091	1,767	1,212	4,070
0,90	1,529	2,495	1,709	5,733
1,12	2,216	3,623	2,495	8,334
1,29	2,870	4,717	3,285	10,872
0,00	-0,003	-0,004	0,029	0,022
0,34	0,259	0,416	0,300	0,975
0,47	0,452	0,725	0,509	1,686
0,65	0,806	1,304	0,888	2,998
0,79	1,148	1,865	1,268	4,281
0,92	1,560	2,535	1,729	5,824
1,13	2,224	3,649	2,598	8,471
1,30	2,859	4,707	3,278	10,844

Gráfico A12 – Curva ajustada por regressão com os dados da Tabela A12.2

Gráfico A12G – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A12G.2

Tabela A12G.3 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G2 a partir da diferença $h_{f\ 2-3}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A12 e A12G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	v ² / 2 g (m)	h _{T 2-3} (G) (m)	h _{L 2-3} (m)	01 gotej. h _f (m)
0,00	0,00	0,000	-0,020	-0,042	0,001
0,10	0,13	0,001	0,050	0,037	0,001
0,20	0,26	0,004	0,170	0,153	0,001
0,30	0,39	0,008	0,340	0,305	0,002
0,40	0,53	0,014	0,560	0,493	0,004
0,50	0,66	0,022	0,829	0,717	0,007
0,60	0,79	0,032	1,149	0,978	0,011
0,70	0,92	0,043	1,517	1,274	0,016
0,80	1,05	0,056	1,936	1,607	0,022
0,90	1,18	0,071	2,404	1,976	0,029
1,00	1,32	0,088	2,922	2,381	0,036
1,10	1,45	0,107	3,490	2,822	0,045
1,20	1,58	0,127	4,108	3,300	0,054
1,30	1,71	0,149	4,775	3,813	0,064

Tabela A12G.4 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G3 a partir da diferença $h_{f\ 1-2}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A12 e A12G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	v ² / 2 g (m)	h _{T 1-2} (G) (m)	h _{L 1-2} (m)	01 gotej. h _f (m)
0,00	0,00	0,000	-0,015	-0,026	0,001
0,10	0,13	0,001	0,034	0,022	0,001
0,20	0,26	0,004	0,113	0,091	0,001
0,30	0,39	0,008	0,221	0,180	0,003
0,40	0,53	0,014	0,357	0,289	0,005
0,50	0,66	0,022	0,523	0,419	0,007
0,60	0,79	0,032	0,719	0,568	0,010
0,70	0,92	0,043	0,943	0,739	0,014
0,80	1,05	0,056	1,197	0,929	0,018
0,90	1,18	0,071	1,479	1,140	0,023
1,00	1,32	0,088	1,791	1,371	0,028
1,10	1,45	0,107	2,132	1,623	0,034
1,20	1,58	0,127	2,503	1,895	0,041
1,30	1,71	0,149	2,902	2,187	0,048

Tabela A12G.5 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G4 a partir da diferença $h_{f\ 3-4}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A12 e A12G.

Vazão (m ³ /h)	v (m/s)	$v^2 / 2g$ (m)	$h_{T\ 3-4}$ (G) (m)	$h_{L\ 3-4}$ (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	0,020	0,015	0,000
0,10	0,13	0,001	0,059	0,051	0,001
0,20	0,26	0,004	0,134	0,104	0,002
0,30	0,39	0,008	0,245	0,173	0,005
0,40	0,53	0,014	0,391	0,258	0,009
0,50	0,66	0,022	0,574	0,360	0,014
0,60	0,79	0,032	0,792	0,478	0,021
0,70	0,92	0,043	1,047	0,613	0,029
0,80	1,05	0,056	1,337	0,763	0,038
0,90	1,18	0,071	1,664	0,930	0,049
1,00	1,32	0,088	2,026	1,114	0,061
1,10	1,45	0,107	2,424	1,313	0,074
1,20	1,58	0,127	2,858	1,529	0,089
1,30	1,71	0,149	3,328	1,762	0,104

ANEXO 13

Os dados apresentados referem-se às cargas piezométricas nas tomadas de pressão TP1, TP2, TP3 e TP4 e às leituras de vazão no medidor eletromagnético, todos instalados de acordo com a Figura 3.31.

Levantamento A13

Tubo D22 – Sem gotejadores – 2 corridas.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 39,22 m

Tabela A13.1 – Cargas piezométricas e vazão.

Cargas em TP1(mH ₂ O)	Cargas em TP2(mH ₂ O)	Cargas em TP3(mH ₂ O)	Cargas em TP4(mH ₂ O)	Vazão Q(m ³ /h)
14,479	14,486	14,486	14,464	0,00
14,360	14,303	14,192	14,118	0,24
14,195	14,053	13,790	13,646	0,40
13,949	13,684	13,198	12,953	0,56
13,656	13,238	12,484	12,115	0,71
13,361	12,793	11,802	11,319	0,83
12,923	12,131	10,714	10,044	1,00
12,453	11,414	9,592	8,730	1,15
12,016	10,774	8,547	7,500	1,30
11,324	9,742	6,899	5,580	1,48
14,480	14,488	14,488	14,466	0,00
14,286	14,190	14,009	13,901	0,32
14,097	13,906	13,557	13,369	0,46
13,755	13,391	12,735	12,409	0,66
13,406	12,861	11,888	11,420	0,83
12,577	11,626	9,916	9,112	1,13
12,019	10,790	8,584	7,556	1,30
11,188	9,558	6,624	5,255	1,51

Tabela A13.2 – Perdas de carga na linha (h_L) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

Vazão $Q(m^3/h)$	h_{L1-2} em (mH_2O)	h_{L2-3} em (mH_2O)	h_{L3-4} em (mH_2O)	h_{L1-4} em (mH_2O)
0,00	-0,007	0,000	0,022	0,015
0,24	0,057	0,111	0,074	0,242
0,40	0,142	0,263	0,144	0,549
0,56	0,265	0,486	0,245	0,996
0,71	0,418	0,754	0,369	1,541
0,83	0,568	0,991	0,483	2,042
1,00	0,792	1,417	0,670	2,879
1,15	1,039	1,822	0,862	3,723
1,30	1,242	2,227	1,047	4,516
1,48	1,582	2,843	1,319	5,744
0,00	-0,008	0,000	0,022	0,014
0,32	0,096	0,181	0,108	0,385
0,46	0,191	0,349	0,188	0,728
0,66	0,364	0,656	0,326	1,346
0,83	0,545	0,973	0,468	1,986
1,13	0,951	1,710	0,804	3,465
1,30	1,229	2,206	1,028	4,463
1,51	1,630	2,934	1,369	5,933

Tabela A13.3 – Dados para construção do gráfico $f \times \text{Rey}$ do Tubo D20

Comprimento total = 39,22 m.

$h_L(m)$	$J(m/m)$	$v(m/s)$	Rey	f_{exp}	$f_{Blasius}$	$f_{Bagarello}$
0,015	0,00038	0,00				
0,242	0,00617	0,25	5718	0,0339	0,0363	0,0347
0,549	0,01400	0,43	9611	0,0273	0,0319	0,0305
0,996	0,02540	0,60	13504	0,0251	0,0293	0,0280
1,541	0,03929	0,77	17275	0,0237	0,0276	0,0263
2,042	0,05207	0,90	20195	0,0230	0,0265	0,0253
2,879	0,07341	1,08	24331	0,0223	0,0253	0,0242
3,723	0,09493	1,24	27981	0,0218	0,0244	0,0234
4,516	0,11515	1,40	31509	0,0209	0,0237	0,0227
5,744	0,14646	1,60	36010	0,0203	0,0229	0,0219
0,014	0,00036	0,00				
0,385	0,00982	0,34	7664	0,0301	0,0338	0,0323
0,728	0,01856	0,49	11071	0,0272	0,0308	0,0294
1,346	0,03432	0,71	15937	0,0243	0,0281	0,0269
1,986	0,05064	0,89	20073	0,0226	0,0265	0,0254
3,465	0,08835	1,22	27494	0,0210	0,0245	0,0235
4,463	0,11379	1,41	31631	0,0205	0,0237	0,0226
5,933	0,15127	1,63	36740	0,0202	0,0228	0,0218

Levantamento A13G

Tubo D22 – Com gotejadores – 2 corridas.

Gotejador G3 instalado no trecho A entre TP1 e TP2 com 11,17 m.

Gotejador G2 instalado no trecho B entre TP2 e TP3 com 8,30 m.

Gotejador G4 instalado no trecho C entre TP3 e TP4 com 8,92 m.

Comprimento da tubulação entre TP1 e TP4 : 39,22 m

Tabela A13G.1 – Cargas piezométricas e vazão.

Cargas em TP1(mH ₂ O)	Cargas em TP2(mH ₂ O)	Cargas em TP3(mH ₂ O)	Cargas em TP4(mH ₂ O)	Vazão Q(m ³ /h)
14,479	14,486	14,486	14,463	0,00
14,309	14,216	14,041	13,907	0,30
14,154	13,966	13,630	13,390	0,42
13,876	13,516	12,895	12,466	0,60
13,604	13,077	12,167	11,527	0,73
13,211	12,456	11,140	10,245	0,90
12,635	11,524	9,589	8,266	1,11
11,926	10,379	7,687	5,834	1,32
11,222	9,246	5,810	3,405	1,51
14,479	14,486	14,486	14,463	0,00
14,241	14,102	13,867	13,684	0,36
14,016	13,746	13,275	12,949	0,52
13,426	12,804	11,722	10,991	0,82
12,944	12,028	10,440	9,377	1,00
12,306	11,013	8,761	7,247	1,21
11,619	9,904	6,920	4,897	1,41

Tabela A13G.2 – Perdas de carga total (h_T) nos trechos A,B e C, total e vazão correspondente.

<i>Vazão</i> <i>Q(m³/h)</i>	<i>h_{T1-2} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T2-3} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T3-4} em</i> <i>(mH₂O)</i>	<i>h_{T1-4} em</i> <i>(mH₂O)</i>
0,00	-0,007	0,000	0,023	0,016
0,30	0,093	0,175	0,134	0,402
0,42	0,188	0,336	0,240	0,764
0,60	0,360	0,621	0,429	1,410
0,73	0,527	0,910	0,640	2,077
0,90	0,755	1,316	0,895	2,966
1,11	1,111	1,935	1,323	4,369
1,32	1,547	2,692	1,853	6,092
1,51	1,976	3,436	2,405	7,817
0,00	-0,007	0,000	0,023	0,016
0,36	0,139	0,235	0,183	0,557
0,52	0,270	0,471	0,326	1,067
0,82	0,622	1,082	0,731	2,435
1,00	0,916	1,588	1,063	3,567
1,21	1,293	2,252	1,514	5,059
1,41	1,715	2,984	2,023	6,722

Gráfico A13 – Curva ajustada por regressão com os dados da Tabela A13.2

Gráfico A13G – Curvas ajustadas por regressão com os dados da Tabela A13G.2

Tabela A13G.3 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G2 a partir da diferença $h_{f\ 2-3}$ entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A13 e A13G.

Vazão (m³/h)	v (m/s)	v² / 2 g (m)	h_{T2-3} (G) (m)	h_{L 2-3} (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	-0,010	-0,010	0,000
0,10	0,11	0,001	0,031	0,030	0,000
0,20	0,22	0,002	0,098	0,092	0,000
0,30	0,32	0,005	0,192	0,177	0,001
0,40	0,43	0,010	0,312	0,283	0,002
0,50	0,54	0,015	0,460	0,411	0,003
0,60	0,65	0,021	0,633	0,562	0,005
0,70	0,76	0,029	0,834	0,734	0,007
0,80	0,86	0,038	1,061	0,929	0,009
0,90	0,97	0,048	1,314	1,146	0,011
1,00	1,08	0,060	1,595	1,385	0,014
1,10	1,19	0,072	1,901	1,646	0,017
1,20	1,30	0,086	2,235	1,928	0,020
1,30	1,41	0,101	2,595	2,234	0,024
1,40	1,51	0,117	2,982	2,561	0,028

Tabela A13G.4 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G3 a partir da diferença $h_{f\ 1-2}$ entre as equações, ajustadas por regressão nos Gráficos A13 e A13G.

Vazão (m³/h)	v (m/s)	v² / 2 g (m)	h_{T 1-2} (G) (m)	h_{L 1-2} (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	-0,013	-0,016	0,000
0,10	0,11	0,001	0,012	0,009	0,000
0,20	0,22	0,002	0,052	0,046	0,000
0,30	0,32	0,005	0,107	0,095	0,001
0,40	0,43	0,010	0,178	0,156	0,001
0,50	0,54	0,015	0,263	0,229	0,002
0,60	0,65	0,021	0,364	0,314	0,003
0,70	0,76	0,029	0,480	0,412	0,005
0,80	0,86	0,038	0,610	0,521	0,006
0,90	0,97	0,048	0,756	0,642	0,008
1,00	1,08	0,060	0,918	0,775	0,010
1,10	1,19	0,072	1,094	0,920	0,012
1,20	1,30	0,086	1,285	1,078	0,014
1,30	1,41	0,101	1,492	1,247	0,016
1,40	1,51	0,117	1,713	1,428	0,019

Tabela A13G.5 – Tabela para determinação do coeficiente α do gotejador G4 a partir da diferença h_f entre as equações ajustadas por regressão nos Gráficos A13 e A13G.

Vazão (m³/h)	v (m/s)	$v^2 / 2g$ (m)	$h_{T\ 3-4}$ (G) (m)	$h_{L\ 3-4}$ (m)	01 gotej. h_f (m)
0,00	0,00	0,000	0,025	0,018	0,000
0,10	0,11	0,001	0,045	0,037	0,001
0,20	0,22	0,002	0,084	0,066	0,001
0,30	0,32	0,005	0,142	0,105	0,002
0,40	0,43	0,010	0,220	0,154	0,004
0,50	0,54	0,015	0,316	0,213	0,007
0,60	0,65	0,021	0,432	0,282	0,010
0,70	0,76	0,029	0,567	0,361	0,014
0,80	0,86	0,038	0,721	0,450	0,018
0,90	0,97	0,048	0,895	0,549	0,023
1,00	1,08	0,060	1,087	0,658	0,029
1,10	1,19	0,072	1,299	0,777	0,035
1,20	1,30	0,086	1,530	0,906	0,042
1,30	1,41	0,101	1,780	1,046	0,049
1,40	1,51	0,117	2,049	1,195	0,057

ANEXO 14

Tabela A14 – Valores de r calculados com as médias das áreas com e sem gotejador, para cada cópia escaneada do conjunto tubo/gotejador, utilizando a equação 2.19.

<u>Tubo/Gotej.</u>	<u>r</u>	<u>Tubo/Gotej.</u>	<u>r</u>
D16-G1	0,5774	D18-G3	0,7250
D16-G1	0,5735	D18-G3	0,7291
D16-G2	0,6460	D18-G4	0,5790
D16-G2	0,6043	D18-G4	0,5901
D16-G2	0,6494	D18-G4	0,6387
D16-G2	0,6470	D18-G4	0,6149
D16-G2	0,6152	D20-G2	0,7276
D16-G3	0,6609	D20-G2	0,7251
D16-G3	0,6705	D20-G3	0,7447
D16-G3	0,6505	D20-G4	0,6634
D16-G4	0,5070	D22-G2	0,7683
D16-G4	0,4992	D22-G2	0,7986
D16-G4	0,5130	D22-G3	0,8118
D16-G4	0,5088	D22-G3	0,8106
D18-G1	0,6158	D22-G4	0,6961
D18-G1	0,6200	D22-G4	0,7285
D18-G2	0,7491		
D18-G2	0,7338		
D18-G2	0,7123		
D18-G2	0,7159

BIBLIOGRAFIA

AL – AMOUD, A . I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **J. Agric. Engng. Res.**, v. 60, p. 1–5, 1995.

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**, ASCE, v. 121, n. 5, p. 313–316, set./oct.1995.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 123, n. 1, p.1–7, jan./feb. 1997.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6.ed., Viçosa, MG : UFV, Imprensa Universitária, 1995. 657 p.

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

HOWELL, T. A.; HILER, E. A. Designing trickle irrigation laterals for uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v. 100, n. IR4, p. 443-454, Dec.1974.

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

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

MC ENROE, B. M. Discussion on Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 115, n. 5, p. 915-916, 1989.

MONIN, A. S.; YAGLOM, A. M. **Statistical fluid mechanics: mechanics of turbulence**. Cambridge, Mass : MIT Press, 1979. 769 p., v. 1.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 1.ed. São Carlos, SP : EESC/USP, 1998. 540 p.

SCHLICHTING, H. **Boundary layer theory**. New York, NY : McGraw-Hill Book Co. Inc., 1955.

SHAMES, I. H. **Mecânica dos Fluidos – Análise de escoamentos**. 1.ed. São Paulo, SP : Edit. Edgard Blücher Ltda., 1973. 533 p., v. 2.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. **Mecânica do Fluidos**. 7.ed. São Paulo, SP : McGraw Hill do Brasil, 1982. 585 p.

VON BERNUTH, R. D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 116, n. 2, p. 294-298, March / April 1990.

VON BERNUTH, R. D. Discussion on Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 115, n. 5, p. 916-918, 1989.

VON BERNUTH, R. D., e WILSON, T. Friction factor for small diameter plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 115, n. 2, p. 183-192, Feb. 1989.

WATTERS, G.Z.; KELLER, J. Trickle irrigation tubing hydraulics. **TRANSACTIONS of the ASAE**, v. 78, p. 1-8, June 1978.