Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos

Osvaldo Rettore Neto

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba 2011 Osvaldo Rettore Neto Engenheiro Agrícola

Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

Orientador: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba 2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Rettore Neto, Osvaldo

Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos / Osvaldo Rettore Neto. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - -Piracicaba, 2011. 95 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Elasticidade das estruturas 2. Irrigação 3. Modelos matemáticos 4. Perda de carga 5. Tubos flexíveis I. Título

> CDD 631.7 R439m

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico este trabalho

À minha mãe Maria das Graças Silva Rettore, uma pessoa dedicada, carinhosa e enérgica, que dedicou sua vida a minha criação e de meus irmãos; faltam-me palavras para expressar tanta gratidão e amor que sinto pela senhora;

Ao meu pai, Osvaldo Luiz Rettore, exemplo de uma pessoa íntegra, trabalhadora e honesta que sempre acreditou em mim, que sempre me incentivou e custeou meus estudos apesar das dificuldades, sempre querendo o melhor; meu amor e gratidão por tudo que faz por mim;

Ao meu filho, Osvaldo Luiz Rettore Neto, pelo carinho e compreensão durante esta árdua jornada que apesar da distância que nos separa meu coração não para de pensar em você um só instante; amo-te meu filho, hoje e para todo o sempre.

A minha esposa, Gisele Cristina Bercelino, pelo amor, carinho e compreensão que foram inspiração e energia para superar todas as dificuldades profissionais e pessoais durante a realização deste trabalho. Obrigado, querida.

A minha madrinha Maria Aparecida por todo o amor, carinho durante toda a minha vida; meu eterno amor e gratidão.

Ao meu estimado e querido tio, "Nureyev Lancaster", por todo o carinho, apoio e orientação de valor inestimado, ficando difícil resumir em palavras minha gratidão carinho e respeito a esta pessoa que é muito mais que tio, meu muito obrigado

Os meus avôs, Osvaldo Rettore e José Inácio da Silva, que infelizmente não estão mais entre nós, agradeço pelo carinho e amor que fizeram com que eu me torna-se o que sou hoje.

As minhas avós, Dolores Maria de Jesus e Juraci Ribeiro Cunha Rettore, pelo carinho e amor que fizeram com que eu me tornasse o que sou hoje.

Aos meus irmãos Herberth e Laila, que sempre me ajudaram, mesmo nas dificuldades e apesar da distância, sempre os tenho no coração.

A família RETTORE pelo carinho e atenção.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e coragem para superar todas as dificuldades e momentos difíceis durante a realização desse trabalho.

Ao Departamento de Engenharia de Biossoistemas pela oportunidade de realizar o curso de doutorado.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

À ESALQ/USP e ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pelo apoio para desenvolver este trabalho.

À empresa Plasnova Indústria e Comercio Ltda pela doação dos tubos de polietileno utilizados no trabalho.

Ao amigo e Prof. Tarlei Arriel Botrel, pelo apoio e orientação no decorrer do curso e na realização da tese.

Aos Professores do LEB pelo auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas.

Aos meus colegas e amigos, que tornaram o doutorado mais agradável, e a todos que de alguma forma estiveram comigo nesta caminhada.

Aos meus colegas do curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem.

Àquelas pessoas que de alguma forma direta ou indireta ajudaram-me na conclusão do meu trabalho.

" Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já têm a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos."

(Fernando Pessoa)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
1 INTRODUÇÃO	25
2 DESENVOLVIMENTO	27
2.1 Revisão Bibliográfica	27
2.1.1 A irrigação localizada	
2.1.3 Linhas laterais	
2.1.4 Perda de carga distribuída em linhas laterais	30
2.2 Material e métodos	35
2.2.1 Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos	35
2.2.2 Montagem da bancada de pressurização estática	39
2.2.3 Determinação do diâmetro externo do tubo pressurizado	
2.2.4 Determinação do módulo de elasticidade e características do tubo	43
2.2.5 Montagem da infraestrutura para determinação da perda de carga contínua	45
2.2.6. Metodologia para padronização do orifício e tomada de pressão	48
2.2.7 Medição da perda de carga contínua	49
2.2.8 Validação do modelo	51
2.3 Resultados e discussão	52
2.3.1 Módulo de elasticidade	52
2.3.2 Diâmetro externo dos tubos de polietileno e PVC flexível determinado	
experimentalmente	57
2.3.3 Diâmetro externo estimado pelo modelo	59
2.3.4 Diâmetro interno estimado pelo modelo	61
2.3.5 Perda de carga contínua observada	62
2.3.5.1 Perda de carga contínua observada versus estimada pela Equação Universal	62
2.3.5.2 Perda de carga contínua observada versus estimada pelo Modelo Elástico	73

2.4 Precisão, exatidão e índice de desempenho para a Equação Universal	
2.5 Precisão, exatidão e índice de desempenho para o Modelo Elástico	85
3 CONCLUSÕES	
REFERÊNCIAS	
ANEXOS	91

RESUMO

Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos

Nos projetos hidráulicos de irrigação são contabilizadas as perdas de carga totais, que seriam as perdas contínuas ou principais e as localizadas, objetivando maximizar a uniformidade de distribuição de água, caracterizando um conjunto motobomba adequado ao sistema de irrigação e com isso, minimizando os custos anuais e de implantação do projeto. Com o uso da informática, problemas de cálculos complexos são resolvidos com muita facilidade; desta forma pode-se aplicar modelos mais complexo para calculo da perda de carga nos sistemas de irrigação, resultando em valores mais próximos da realidade, com maiores riquezas de detalhes. A perda de carga representa a dissipação de energia da água em forma de calor, ao longo da tubulação, decorrente da resistência ao escoamento oferecida pela viscosidade do fluido e pela inércia das partículas. É variável de acordo com o tamanho das rugosidades da parede do tubo, diâmetro da tubulação e com a velocidade da água. A indústria de plásticos e seus derivados, com o auxilio da engenharia, tem aprimorado a qualidade dos materiais destinados à fabricação dos tubos, principalmente de polietileno. A utilização de tubos fabricados de matérias plásticos, de menor custo, destinados à irrigação tem aumentado nos últimos anos. A flexibilidade desses tubos traz como consequência o aumento do diâmetro interno com o aumento da pressão, fato este já observado em pesquisa e que não são levados em consideração pelos equacionamentos matemáticos utilizados para determinação da perda de carga. O presente trabalho propõe um modelo onde leva em consideração o módulo de elasticidade (E) do tubo para determinar a alteração do diâmetro em tubos elásticos provocada pela pressão, afetando assim a determinação da perda de carga contínua. Conhecer detalhadamente a causa da perda de energia, com intuito de cada vez mais otimizar a energia gasta por área irrigada no cenário brasileiro, passa a ser de fundamental importância. O Modelo Elástico proposto associado à Equação Universal, apresentou índice de desempenho médio de 0,9 sendo considerado com uma estimativa muito boa da realidade.

Palavras-chave: Perda de carga; Tubo elástico; Variação do diâmetro; Módulo de elasticidade

ABSTRACT

Model for determining the continuous head losses in elastic pipe

Total head losses are accounted in the irrigation hydraulic projects, that would be the continuous losses and the local head losses, aiming to maximize the uniformity of water distribution, characterizing an adequate pump set to the irrigation system e thus, minimizing the project implantation and annual costs. With informatics support, complex calculation problems are solved with ease, therefore it is possible to apply more complex models for head loss calculation in the irrigation system, resulting in values closer to the reality, with greater details. The head loss represents the water energy dissipation as heat, along the piping, due to the resistance to the flow offered by the fluid viscosity and by the particles inertia. It is variable according to the size of the rugosities of the pipe wall, piping diameter and the water velocity. plastic industry and its derivates, with engineering support, have improved the quality of the materials for the pipe manufacturing, mainly polyethylene. The usage of plastic material pipes for irrigation, of lowest cost, has risen in the latest years. The flexibility of these pipes leads to the internal diameter increase with pressure increase, fact already observed in research and that are not taken into account by mathematics equating used to determine the head loss. This paper proposes a model where it takes into account the elastic module (E) of the pipe to determine the diameter alteration in elastic pipes due to the pressure, affecting the determination of continuous head loss. Elastic Module proposed associated to Universal Equation, showed average performance rate of 0,9% being considered a extremely good estimative of reality.

Keywords: Head losses; Elastic pipe; Diameter variation; Elasticity modulus

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistemas de irrigação: Sistema Linear (A) e (B), Aspersão Convencional (C),
Autopropelido(D), Microirrigação (E) e (F)
Figura 2- Ilustração do tubo elástico submetido à pressão interna
Figura 3 – Visão geral da bancada de pressurização estática e sistema de aquisição de dados40
Figura 4 – Aferidor de manômetro (A), detalhe do êmbolo(B), sistema de acoplamento (C)
detalhes da fixação do tubo(D)41
Figura 5 – Detalhe da projeção do laser (A) e leitor do "scanner"(B)42
Figura 6 – Esquema de leitura do "scanner" a laser43
Figura 7 – Detalhamento da Máquina de tração universal (A) e (B), detalhe do corpo de prova e
sua fixação (C) e ensaio sendo realizado (D)44
Figura 8 – Ilustração do processo de medição do tubo (A) e Projetor de Perfil Starret HB 400
(B)45
Figura 09 – Visão geral dos laboratórios (A), Sistema de bombeamento e cuba de ensaio(B),
Medidor de vazão [I], válvula reguladora de pressão [ii] e manômetro diferencial [III]
(C), Manômetros Digital (D), Detalhes do tubo no laboratório de Hidráulica(E) e
Suporte para fixação do tubo no Laboratório de irrigação
(F)47
Figura 10 – Tubo de polietileno perfurado (A), Tomada de pressão de PVC (B) e (C)49
Figura 11 – Ensaio de tração no regime elástico do tubo de polietileno
Figura 12 – Ensaio de tração no regime elástico do tubo de PVC flexível (mangueira cristal)54
Figura 13 – Módulo de elasticidade do tubo de polietileno Plasnova
Figura 14 – Módulo de elasticidade do tubo de PVC flexível AFA
Figura 15 – Comparação entre a deformação do PVC flexível Alfa e do polietileno Plasnova55
Figura 16 – Ilustração da tendência de linhas sobreposta de maior extensão apresentadas pelo do
tubo de PVC flexível (A) e ilustração da tendência de linhas inclinadas de menor
comprimento apresentadas pelo tubo de polietileno(B)
Figura 17 – Variação do diâmetro externo do tubo em função da pressão para o tubo de
polietileno58

Figura 18 - Variação do diâmetro externo em função da pressão para o tubo de PVC flexível.....59

Figura 19 – Comparação entro o diâmetro interno determinado por Vilela et al. (2003) e o	
diâmetro interno estimado pelo Modelo Elástico6	1
Figura 20 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela	
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
(amostra 01)6	3
Figura 21 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela	
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
(amostra 02)6	3
Figura 22 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela	
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
(amostra 03)6	4
Figura 23 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda	
de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de	
comprimento e vazão correspondente a velocidade de 1,06 m s ⁻¹ 6	4
Figura 24 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela	
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
(amostra 01))6	5
Figura 25 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela	
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
(amostra 02)6	5
Figura 26 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela	
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
(amostra 03)6	6
Figura 27 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda	
de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de	
comprimento e vazão correspondente a velocidade de 1,57 m s ⁻¹ 6	6
Figura 28 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela	
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
(amostra 01)	7

Figura 29 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(amostra 02)67
Figura 30 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(amostra 03)68
Figura 31 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda
de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de
comprimento e vazão correspondente a velocidade de 1,87 m s ⁻¹ 68
Figura 32 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(amostra 01)69
Figura 33 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(amostra 02)69
Figura 34 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(amostra 03)70
Figura 35 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda
de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de
comprimento e vazão correspondente a velocidade de 2,64 m s ⁻¹ 70
Figura 36 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela
Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(amostra 01)

.

.

Figura 39 – Cor	mparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda
de c	carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de
con	nprimento e vazão correspondente à velocidade de 2,90 m s ⁻¹ 72
Figura 40 – Rep	presentação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo
Mo	delo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(an	nostra 01)74
Figura 41 – Rep	presentação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo
Mo	delo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(an	nostra 02)74
Figura 42 – Rep	presentação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo
Mo	delo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(an	nostra 03)75
Figura 43 - Cor	mparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de
carg	ga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento
e va	azão correspondente à velocidade de 1,06 m s ⁻¹ 75
Figura 44 – Rep	presentação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo
Мо	delo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(an	nostra 01)76
Figura 45 – Rep	presentação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo
Мо	delo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(an	nostra 02)76
Figura 46 – Rep	presentação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo
Mo	delo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(an	nostra 03)77
Figura 47 – Cor	mparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de
carg	ga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento
e va	azão correspondente à velocidade de 1,57 m s ⁻¹ 77
Figura 48 – Rep	presentação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo
Mo	delo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros
(an	nostra 01)78

Figura 49 –	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 02)7	8
Figura 50 –	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 03)7	9
Figura 51 –	Comparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de	;
	carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento)
	e vazão correspondente a velocidade de 1,87 m s ⁻¹ 7	9
Figura 52 –	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 01)	0
Figura 53 –	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 02)	0
Figura 54 –	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 03)	1
Figura 55 –	Comparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de	•
	carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento)
	e vazão correspondente a velocidade de 2,64 m s ⁻¹	1
Figura 56 –	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 01)	2
Figura 57 –	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 02)	2
Figura 58 - 1	Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo	
	Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros	
	(amostra 03)	3

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos tubos ensaiados	42
Tabela 2 - Classificação do índice de confiança ou de desempenho (C) proposto por Camarg	go e
Sentelhas (1997)	52
Tabela 3 - Análise de variância da regressão da força em função da deformação e intervalo c	de
confiança para o tubo de polietileno	52
Tabela 4 - Análise de variância da regressão da força em função da deformação e intervalo o	de
confiança para o tubo de PVC flexível (mangueira cristal)	53
Tabela 5 - Análise de variância da regressão da pressão interna em função do diâmetro exter	rno e
intervalo de confiança para o tubo de polietileno	57
Tabela 6 - Análise de variância da regressão da pressão interna em função do diâmetro exter	rno e
intervalo de confiança para o tubo de PVC flexível	58
Tabela 7 - Variação em função da pressão do diâmetro estimado e observado para o tubo de	:
polietileno	60
Tabela 8 - Variação em função da pressão do diâmetro estimado e observado para o tubo de	PVC
flexível	60
Tabela 9 - Erro de estimativa da Equação Universal em função do acréscimo de pressão para	a o
tubo de polietileno	73
Tabela 10 - Erro de estimativa do Modelo Elástico em função do acréscimo de pressão para	0
tubo de polietileno	84
Tabela 11 - Indicadores do desempenho estatístico para estimativa da perda de carga contínu	ua em
tubos elásticos utilizando a Equação Universal	85
Tabela 12 - Indicadores do desempenho estatístico para estimativa da perda de carga contínu	ua em
tubos elásticos utilizando o Modelo Elástico	86

LISTA DE SÍMBOLOS

 $A - \text{Área}(L^2);$

- D_E Diâmetro externo do tubo (L);
- D_I Diâmetro interno do tubo (L);
- D_N Diâmetro do tubo pressurizado (L);
- D_{Ni} Diâmetro interno do tubo pressurizado (L);
- D_0 Diâmetro original do tubo (L);
- D_{0i} Diâmetro interno original do tubo sem pressão (L);
- E Módulo de elasticidade (M L⁻¹T⁻²)
- e Espessura da parede do tubo (L);

F – Força (M L T⁻²);

- f Fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach (adimensional);
- g Aceleração da gravidade (L T⁻²)
- *hf* Perda de carga distribuída (L)
- K Constante elástica (adimensional);
- L Comprimento (L);
- *l* Segmento do tubo (L);
- l_0 Comprimento da amostra (L)
- P Pressão no tubo (M L⁻¹T⁻²);
- P_0 Perímetro original (L);
- ΔP_0 Variação do perímetro original (L);
- V Velocidade do fluido dentro do tubo (L T⁻¹)
- v Volume de material (L⁻³)
- X Deformação (L)

1 INTRODUÇÃO

Essencial à vida, a água é um elemento necessário a diversas atividades humanas como geração de energia elétrica, abastecimento doméstico e industrial, irrigação, navegação, recreação, turismo, piscicultura, pesca e, ainda, assimilação e condução de esgoto.

A quantidade de água potável existente na natureza é finita e sua disponibilidade diminui gradativamente devido ao crescimento populacional, à expansão das fronteiras agrícolas e à degradação do meio ambiente. Sendo a água um recurso indispensável à vida, é de fundamental importância a discussão das relações entre o homem e a água, uma vez que a sobrevivência das gerações futuras depende diretamente das decisões que hoje estão sendo tomadas.

Com o crescimento populacional, a humanidade se vê compelida a usar a maior quantidade possível de solo agricultável, o que vem impulsionando o uso da irrigação, não só para complementar as necessidades hídricas das regiões úmidas, como para tornar produtivas as áreas áridas e semi-áridas do globo.

O surgimento da irrigação foi fundamental ao florescimento da civilização, e os ganhos de produtividade agrícola permitidos por ela são, em grande parte, os responsáveis pela viabilidade da alimentação da população mundial. Ela é uma técnica utilizada na agricultura que tem por objetivo o fornecimento controlado de água para as plantas em quantidade suficiente e no momento certo, assegurando a produtividade e a sobrevivência da cultura.

Nos projetos hidráulicos de irrigação são contabilizadas as perdas de carga totais, que são as perdas contínuas ou principais e as localizadas, objetivando maximizar a uniformidade de distribuição de água, caracterizando um conjunto moto-bomba adequado ao sistema de irrigação e com isso, minimizando os custos anuais e de implantação do projeto. Com o uso da informática, problemas de cálculos complexos são resolvidos com muita facilidade; desta forma pode-se aplicar modelos mais complexos para cálculo da perda de carga nos sistemas de irrigação, resultando em valores próximos da realidade, com maiores detalhes.

A perda de carga contínua representa a dissipação de energia da água em forma de calor, ao longo da tubulação, decorrente da resistência ao escoamento oferecida pela viscosidade do fluido e pela inércia das partículas, sendo variável de acordo com o tamanho das rugosidades da parede do tubo, diâmetro da tubulação e com a velocidade da água. A indústria de plásticos e seus derivados, com o auxilio da engenharia, tem aprimorado a qualidade dos materiais destinados à fabricação dos tubos, principalmente os de polietileno. Os tubos flexíveis têm sido empregados nos sistemas de irrigação para condução e distribuição da água até o ponto de interesse. O custo de implantação é um dos fatores que tem contribuído para o crescimento da utilização deste material.

Os equacionamentos utilizados para cálculos da perda de carga distribuída não consideram a capacidade elástica do material podendo provocar uma superestimativa da perda de energia. Esta perda provoca um aumento da altura manométrica total superestimando a potência necessária no sistema causando um consumo desnecessário de energia. Alem do consumo energético, pode ocorrer uma sobrepressão nas linhas laterais podendo resultar maior aplicação de água.

A produção de alimentos com irrigação é hoje a maior consumidora de água no mundo, e como a matriz energética brasileira está baseada na produção de energia hidroelétrica, há necessidade de constantes aprimoramentos técnicos e científicos para maximizar o uso da água e racionalizar o consumo energético de forma que possamos aumentar as áreas de produção agrícolas com os recursos naturais disponíveis.

Diante do exposto, essa pesquisa teve como objetivo, propor uma metodologia para determinação da perda de carga contínua em tubos flexíveis, mediante a formulação de um modelo matemático que considera o modulo de elasticidade do material utilizado para fabricação de tubos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 A irrigação localizada

Os principais sistemas de irrigação localizada compreendem o gotejamento e a microaspersão. Particularmente, o sistema de gotejamento foi desenvolvido para aplicar água e nutrientes de forma pontual, ou em faixas molhadas, diretamente no volume de solo que contém as raízes das plantas, em baixo volume e alta freqüência, de forma a manter um ajustado balanço entre a oferta e o consumo de água por evapotranspiração.

A aplicação de água por gotejamento pode ser feita de duas formas: por tubos gotejadores e por fitas gotejadoras. Os tubos gotejadores podem ser classificados quanto à fixação do emissor no tubo em "on-line", "in-line" e integrados (coaxiais e não coaxiais). Já nas fitas gotejadoras, os emissores são impressos nas paredes dos tubos na forma de labirinto de longo percurso, cuja função e dissipar a energia de pressão e permitir a aplicação da vazão na forma de gotas.

A irrigação por gotejamento, em sua forma atual, foi iniciada nos anos 40, mas, nos anos 60, com a introdução do polietileno começou a ganhar reconhecimento como um sistema eficiente, com potencial para aumenta a produtividade das culturas, reduzir o consumo de água e as perdas por percolação de fertilizantes e outras substâncias químicas. Segundo Coelho (2007) não existe consenso técnico sobre o local de origem da irrigação por gotejamento no mundo; ao que tudo indica, ela surgiu simultaneamente em 4 países: Alemanha, Inglaterra, Estados Unidos e Israel. É inegável admitir que os israelenses sejam os que mais se dedicam ao desenvolvimento e divulgação desta tecnologia.

Podem-se ressaltar algumas das principais contribuições para a irrigação localizada. Simcha Blass, um engenheiro de água israelense, dedicou-se a fazer o deserto florescer. Blass, em 1930, observou uma cerca viva com um arbusto notoriamente mais saudável e mais alto que os outros. Cavando debaixo da superfície aparentemente seca da terra, descobriu que existia uma pequena área molhada em forma de uma "cebola" provocada por um vazamento, em uma tubulação que expandia alcançando as raízes desta arvore em particular. Chapin Watermatics, em 1950, foi quem utilizou tubos de polietileno para fornecer água a plantas e flores em estufas. Davis Esterlino, em 1963, instalou a primeira experiência em campo com microirrigação na superfície do solo em limões e laranjas. Norman Smith, em 1964, foi um dos inventores da fita gotejadora chamada de "mangueira de orvalho". Em 1969, Bernarr começou a realizar tentativas que usavam a irrigação por gotejamento na superfície do solo, em morangos e tomates, juntamente com "mulches" de plástico, próximo a San Diego, Califórnia. A tecnologia da irrigação por gotejamento foi amplamente comercializada nos anos 80 por empresas nos Estados Unidos e Israel. A década de 90 pode ser vista como a que utilizou a engenharia para a melhoria dos dispositivos de irrigação existentes. Além do desenvolvimento tecnológico, a última década foi um período onde as companhias expandiram-se ao redor do mundo e também houve a entrada de novos fabricantes no seguimento.

2.1.3 Linhas laterais

As linhas laterais em um sistema de irrigação localizada são tubulações que recebem a água das linhas de derivação, que possuem maior diâmetro, e as distribuem ao longo de seu comprimento, pelos emissores. Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2005), linha lateral é aquela na qual estão inseridos os emissores. São constituídas de material plástico elástico, PVC ou polietileno, com diâmetros inferiores a 25 mm, sendo mais comuns os de 13, 16, 18, 22 mm.

O dimensionamento hidráulico do sistema deve ser realizado com cautela, requerendo características técnicas sobre os emissores, as tubulações, o sistema de filtragem e acessórios diversos, a serem utilizados, para possibilitar a redução de custos e maximização do lucro na atividade agrícola. Particularmente, o dimensionamento de uma linha lateral deve seguir critérios que permitam atingir alta uniformidade de distribuição de água. Para os emissores não compensados, a uniformidade de emissão de vazão ao longo da linha lateral depende da variação de pressão devida à perda de carga na tubulação, à variação da topografia da área irrigada, do coeficiente de variação de fabricação do emissores (WU, 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004).

A alteração do diâmetro das linhas laterais é algo comum de ocorrer, já que sua flexibilidade permite esta alteração. Este tipo de deformação é provocado pela pressão que o fluido exerce em sua parede interna. Assim, os projetistas devem estar atentos a este fenômeno, uma vez que o diâmetro na Equação Universal de perda de carga, utilizando o fator de atrito de Blasius, é elevado à potência 4,75, o que eleva bastante o erro para um pequeno acréscimo no diâmetro. Na Figura 1 ilustra-se os sistemas de irrigação que utilizam tubulações flexíveis para distribuição e condução de água.





2.1.4 Perda de carga distribuída em linhas laterais

Perda de carga nas tubulações é um fator importante para os projetos de engenharia de irrigação, pois afeta o custo total e o balanço hidráulico do sistema (KAMAND, 1988). O diâmetro dos tubos da rede de distribuição de água depende da perda de carga admitida no sistema pelo projetista. O custo operacional é afetado inversamente pelo diâmetro dos tubos; com o aumento do diâmetro, para uma determinada vazão, a perda de carga por unidade de comprimento diminui, reduzindo a energia de bombeamento requerida, porém proporciona aumento do capital necessário para aquisição dos tubos. Neste caso, o projetista deve determinar o sistema ótimo econômico.

Por simplicidade matemática, muitos projetistas de sistemas de irrigação preferem utilizar equações empíricas, como as de Hazen-Williams, Manning e Scobey, para determinar as perdas de carga, em vez de utilizar a equação teórica de Darcy-Weisbach. Entretanto, uma importante limitação dessas equações empíricas é que um fator de rugosidade constante é assumido para todos os diâmetros e velocidades de escoamento (KAMAND, 1988). Em decorrência dessa suposição a perda de carga calculada pelas equações empíricas pode diferir significativamente daquela calculada pela equação de Darcy-Weisbach, na qual o fator de atrito varia com as condições de escoamento (BOMBARDELLI; GARCÍA, 2003). Isto pode influenciar na seleção dos diâmetros dos tubos e, consequentemente, na estimativa da energia requerida.

Existe um predomínio de material plástico nas tubulações das redes de distribuição de água de sistemas de irrigação localizada; isto porque, para tubulações de pequenos diâmetros, que transportam pequenas vazões, os tubos de plásticos fabricados em polietileno de baixa densidade são economicamente mais competitivos que os tubos dos demais materiais disponíveis no mercado. Em razão desses tubos serem produzidos com material plástico, seus diâmetros podem variar em decorrência das variações na pressão de operação. Isso pode influenciar na perda de carga real, o que resultaria em alterações nas condições hidráulicas do projeto. Andrade (1990), estudando as características hidráulicas de um tubo de polietileno perfurado, com espessura de parede de 200 µm, verificou para um acréscimo de pressão de 90%, dentro da faixa de operação recomendada pelo fabricante, um aumento de 10,67% no diâmetro interno da tubulação. Considerando que, para uma vazão constante, a perda de carga é inversamente proporcional à quinta potência do diâmetro do tubo, os acréscimos máximos de diâmetros ocasionados pelo aumento da pressão verificados no experimento de Andrade (1990) reduziriam a perda de carga

de 15 % chegando até a 60,24%, o que poderia alterar sensivelmente as condições hidráulicas e elétricas de um projeto de irrigação localizada.

O acréscimo no diâmetro do tubo de polietileno, em função da pressão de operação, também foi observado por Frizzone, Vieira e Paz (1998), ao analisar um tubo gotejador com paredes de 225 µm de espessura. Vilela et al. (2003) trabalhando com tubos de polietileno, com espessuras de paredes de 1325 µm e 1050 µm, observaram influência significativa da pressão de operação no diâmetro dos tubos e relataram que alterações nos diâmetros internos, em virtude de variações na pressão de operação, podem ocasionar variações nas perdas de carga superiores a 20%. Para o tubo DN12, houve uma relação linear entre a pressão e o diâmetro. Para o tubo DN20, cuja classe de pressão é superior ao DN12, a relação foi potencial, representando maior variação de diâmetro interno com as pressões.

Os resultados encontrados por Vilela et al. (2003) contrariam a suposição de que tubos com paredes de menor espessura apresentariam maior deformação com a pressão de operação. Para explicar este efeito, além da espessura da parede e do coeficiente de elasticidade do material, outro componente a considerar é a força de deformação que atua nas paredes internas do tubo, que é diretamente proporcional ao diâmetro; portanto, para um comprimento unitário, pressão constante, e mesmo material, no tubo de maior diâmetro atuará maior força na parede interna o que resultará em maior deformação.

O escoamento em tubos está sempre sujeito à resistência hidráulica e à dissipação de energia. A dissipação de energia, representada pela perda de carga, em escoamentos permanentes e turbulentos de fluidos reais, através de tubos de seção cilíndrica, pode ser calculada por diferentes equações, apresentadas na literatura básica de hidráulica (PORTO, 1998). A contribuição mais importante é expressa pela equação de Darcy-Weisbach (KAMAND, 1988; VON BERNUTH, 1990; BAGARELLO et al., 1995; ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006), cuja forma é expressa pela equ. (1):

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \tag{1}$$

em que: hf – perda de carga (L); L – comprimento do tubo (L); D – diâmetro do tubo (L); V – velocidade média do escoamento (L T⁻¹); g – aceleração da gravidade (L T⁻²); f – fator de atrito,

dependente do número de Reynolds (R) e do tamanho das asperezas da parede do tubo (\mathcal{E}). Outra forma comum de expressar a perda de carga é por unidade de comprimento de tubo, conforme eq. (2):

$$J = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} \tag{2}$$

sendo: J a perda de carga unitária (L L⁻¹).

A resistência hidráulica, expressa como um fator de atrito (f) constitui a informação básica necessária ao projeto hidráulico. Desde as contribuições pioneiras de Weisbach, em 1845, de Darcy, em 1857, de Boussinesq, em 1877 e de Reynolds em 1895 ambos citados no trabalho de Yoo e Singh (2005), a resistência ao escoamento hidráulico tem sido objeto de muito interesse e estudo. Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito (f) é essencial para o cálculo da perda de carga em redes de tubulações. Para escoamento laminar (R < 2000), o cálculo do fator de atrito é feito pela equação de Hagen-Poiseuille (f = 64/R), sendo apenas uma função do número de Reynolds (R), o qual depende exclusivamente das propriedades do fluido, do diâmetro do tubo e da velocidade do escoamento. Porém, para escoamento permanente turbulento, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois f é uma função da rugosidade relativa das paredes do tubo (\mathcal{E}/D) e do número de Reynolds (ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para o escoamento turbulento uniforme em tubos comerciais rugosos, a equação de Colebrook-White é a mais utilizada para calcular *f* (PORTO, 1988; ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006), sendo válida para 2000<R<10⁸ e $0 \le \frac{\varepsilon}{D}$ $\le 0,05$. Esta equação relaciona o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds conforme a eq. (3):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,52}{R\sqrt{f}}\right)$$
(3)

sendo: \mathcal{E} a altura das rugosidades do tubo (L). Esta equação é válida também para o caso limite de tubos lisos ($\mathcal{E} = 0$) e escoamento completamente turbulento.

Para escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, o tamanho das asperezas não influi sobre a turbulência do escoamento, e o coeficiente *f* independe da rugosidade do conduto e a eq. (3) pode ser reescrita como uma relação funcional entre *f* e *R*, denominada equação de von Karman, da seguinte forma (eq. 4): (PORTO, 1998)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log\left(R\sqrt{f}\right) - 0.8\tag{4}$$

válida para R entre 4000 e $3,4 \times 10^{6}$.

As Eqs. (3) e (4) são implícitas em f e requerem soluções por métodos numéricos iterativos como o de Newton-Raphson. Embora o trabalho computacional seja trivial no contexto da capacidade dos atuais computadores, a estimativa de f por métodos iterativos pode aumentar significativamente o trabalho computacional para redes de tubulações complexas onde é necessário o cálculo de múltiplos fatores de atrito. Além disso, o valor inicial atribuído a f e o critério de convergência para as iterações deverão ser selecionados cuidadosamente para se obter exatidão na estimativa. Reconhecendo estas dificuldades, vários autores propuseram aproximações explícitas para as Eqs. (3) e (4), tornando-as convenientes para implementações computacionais (SWAMEE; JANE, 1976; ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para tubos lisos e $4000 \le R \le 10^5$ o fator de atrito pode ser estimado por uma equação simples proposta por Blasius (VON BERNUTH, 1990). A equação de Blasius é uma função somente do número de Reynolds sendo apresentada pela eq. (5):

$$f = \frac{c}{R^m} \tag{5}$$

Blasius, ao propor esta equação para estimar f, determinou m como sendo uma constante de valor igual a 0,25 enquanto que o coeficiente c seria outra constante de valor igual a 0,316. Para von Bernuth (1990) a inserção do fator de atrito de Blasius na equação de Darcy-Weisbach resulta em uma equação combinada com as seguintes vantagens: (a) é teoricamente perfeita e dimensionalmente homogênea. Tanto a equação de Darcy-Weisbach quanto a de Blasius têm bases teóricas; (b) tem bom grau de exatidão para tubos plásticos quando o $4000 \le R \le 10^5$. O número de Reynoldos limite não é restritivo para sistemas de irrigação que usam tubos com diâmetros inferiores a 80 mm; (c) pode ser facilmente corrigida para variações na viscosidade da água. Von Bernuth (1990) salienta que para *R* menor que 4000 a equação de Blasius superestima os valores de *f*.

Considerando-se os coeficientes da equação de Blasius, a eq. (2) pode ser reescrita da seguinte forma eq.(6):

$$J = K \ \eta^{0.25} Q^{1.75} D^{-4.75} \tag{6}$$

sendo: η – viscosidade cinemática da água (1,01x10⁻⁶ m² s⁻¹ à 20°C); $K = 2,458 \times 10^{-2}$ para o sistema internacional de unidades; Q – vazão (m³ s⁻¹); D – diâmetro interno do tubo (m).

A determinação dos coeficientes da equação de Blasius também foi alvo de estudo de Bagarello et al. (1995). Estes autores, trabalhando com tubos de diâmetros nominais de 16, 20 e 25 mm, variaram o número de Reynolds pela mudança da viscosidade do fluido (R entre 3.037 e 31.373), ao se alterar a temperatura, obtendo c = 0,302 para m = 0,25. O valor do coeficiente c foi dado por uma constante que representou a média dos valores para os diâmetros experimentados. Por outro lado, ao fazerem uma análise semi-teórica do fator de atrito, estudando o perfil de distribuição da velocidade em uma seção da tubulação, concluíram que o coeficiente c pode variar bastante, sendo possível correlacioná-lo com R, propondo uma equação da seguinte forma:

$$c = \frac{6,152}{R^{0,183}} \tag{7}$$

enquanto que o valor do expoente *m* pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$m = \frac{2}{8 - \frac{12.4}{R^{0.157}}}\tag{8}$$

Alternativas empíricas para determinar f, por ensaios de laboratório, satisfazem a expectativa de se obter resultados satisfatórios, já que alguns autores (VON BERNUTH, 1990; BAGARELLO et al., 1995; HATHOOT; AL-AMOUD; MOHAMMAD, 1993) obtiveram bons resultados usando equações do tipo potência, semelhante a de Blasius. Alves (2000) mostrou que no regime de escoamento turbulento em tubos lisos, com R entre 7.000 e 40.000, a equação de Blasius é uma forma cuidadosa para determinar o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos

Os equacionamentos utilizados para determinação da perda de carga contínua foram desenvolvidos para serem aplicados em materiais rígidos como aço, ferro fundido, concreto, entre outros. Estes materiais eram utilizados, na época, em grande escala para condução e distribuição de água em diversas atividades. Porém, com a invenção do plástico e com seu aprimoramento, diversos ramos de atividades substituiriam os materiais rígidos pelo plástico. Este fato se deve principalmente ao custo de implantação e manutenção, tornando o plástico um material competitivo no mercado.

Os tubos confeccionados com plásticos são mais elásticos, como por exemplo os de polietileno, apresentam como característica a possibilidade de alterarem mais seu diâmetro quando submetidos à variação da pressão interna. Esta variação está relacionada com a elasticidade do material, que não é considerada nos modelos matemáticos de perda de carga contínua. A Figura 2 ilustra que no inicio da tubulação existe uma pressão interna P₁ e que em função desta pressão tem-se um diâmetro D₁ maior que o diâmetro especificado pelo fabricante. A pressão P₁ diminuiu na extensão do tubo devido à perda de carga, chegando ao final de seu comprimento com uma pressão P₂ resultando um diâmetro D₂.

A proposta do modelo é considerar o módulo de elasticidade (E) do tubo para determinar a alteração do diâmetro em tubos elásticos provocada pela pressão, afetando assim a determinação da perda de carga contínua. A seguir demonstra-se passo a passo o desenvolvimento do modelo.


Figura 2- Ilustração do tubo elástico submetido à pressão interna

Iniciando a modelagem, tem-se que o perímetro do tubo com pressão interna nula (P_0) é calculado pela eq.(9)

$$P_0 = \pi D_0 \tag{9}$$

sendo: D_0 - diâmetro do tubo (L)

Após o tubo ser pressurizado, o perímetro do tubo sofre uma alteração ΔP_0 provocada pela pressão interna no tubo, assim o diâmetro do tubo pressurizado (D_N) é calculado pela da eq. (10)

$$P_0 + \Delta P_0 = D_N \pi \tag{10}$$

Pela lei de Hooke temos:

$$F = K X \tag{11}$$

onde: F - força ; K - constante elástica e X - deformação.

considerando $X = \Delta P_0$ tem-se:

$$\Delta P_0 = \frac{F}{K} \tag{12}$$

Como a variação do perímetro do tubo elástico pressurizado é uma deformação, pode-se substituir a eq.(12) na eq. (10):

$$P_0 + \frac{F}{K} = D_N \pi \tag{13}$$

Para um tubo elástico pressurizado, a força interna exercida nas paredes pode ser descrita pela equação a seguir:

$$F = P D_N L \tag{14}$$

sendo: P - pressão (M $L^{-1}T^{-2}$); D_N – diâmetro do tubo pressurizado (L) e L - comprimento (L).

Substituindo-se a eq.(14) na eq. (13) e isolando P_0 , tem-se:

$$P_0 + \frac{P D_N L}{K} = D_N \pi \tag{15}$$

$$P_0 = D_N \pi - \frac{P D_N L}{K} \tag{16}$$

$$P_0 = D_N \left(\pi - \frac{P L}{K} \right) \tag{17}$$

O módulo de elasticidade (*E*) pode ser escrito da forma apresentada abaixo:

$$E = \frac{F}{A} \frac{l_0}{X} \tag{18}$$

sendo: F - força (M L T⁻²); A - área (L²); l_0 - comprimento da amostra (L) e X - deformação (L).

Reescrevendo a eq. (18) e isolando F tem-se:

$$F = \frac{A X E}{l_0} \tag{19}$$

Substituindo a área (A) pela área do tubo que recebe a força (F) e l_0 pelo perímetro do tubo, obtem-se:

$$F = \frac{L \ e \ E}{\pi \ D_0} \ X \tag{20}$$

Portanto, pela Lei Hooke, eq. (12) a constante elástica (K) para tubos elásticos pode ser descrita como:

$$K = \frac{L \ e \ E}{\pi \ D_0} \tag{21}$$

Substituindo-se a eq. (21) na eq. (17), tem-se:

$$P_0 = D_N \left(\pi - \frac{P \ L}{\frac{L \ e \ E}{\pi \ D_0}} \right) \tag{22}$$

Reescrevendo-se a eq.(22), temos:

$$P_0 = D_N \left(\pi - \frac{P \ L \pi \ D_0}{L \ e \ E} \right) \tag{23}$$

$$P_0 = D_N \pi \left(1 - \frac{P D_0}{e E} \right) \tag{24}$$

Isolando o termo D_N na eq. (23)

$$D_N \pi = \frac{P_0}{\left(1 - \frac{P D_0}{e E}\right)}$$
(25)

$$D_N \pi = \frac{\pi D_0}{\left(1 - \frac{P D_0}{e E}\right)} \tag{26}$$

Portanto, a equação para determinação do novo diâmetro interno (D_{Ni}) do tudo elástico pressurizado pode ser expressa como:

$$D_{Ni} = \frac{D_{0i}}{\left(1 - \frac{P D_{0i}}{e E}\right)}$$
(27)

sendo: D_{oi} – diâmetro interno original do tubo (L), P – Pressão interna no tubo (F L⁻¹ T⁻²), e – espessura da parede do tubo (L) e E – módulo de elasticidade do tubo (M L⁻¹ T⁻²).

Após o desenvolvimento do modelo para determinação da variação do diâmetro interno em função da pressão interna, propõe-se que a Equação Universal de Darcy-Weisbach (Eq. 01) seja reescrita alterando o diâmetro interno do tubo (D) pelo diâmetro do tubo pressurizado (D_{Ni}) e o comprimento L (comprimento da linha lateral) pelo l (comprimento do segmento da tubulação lateral).

Portanto, a equação para determinação da perda de carga contínua (hf) em tubos elásticos pode ser expressa pelo somatório das perdas de carga em cada segmento de tubo, sendo calculada da seguinte forma:

$$hf_{l} = f \frac{l}{\frac{D_{0i}}{\left(1 - \frac{P}{e} \frac{D_{0i}}{E}\right)}} \frac{V^{2}}{2g}$$
(28)

onde: hf_l – perda de carga distribuída no segmento de tubo (L), f – fator de atrito (admensional), l – comprimento do segmento da tubulação (L), V – velocidade do líquido dentro do tubo (L T⁻¹), g – aceleração da gravidade (L T⁻²), D_{oi} – diâmetro interno original do tubo (L), P – Pressão interna no tubo (M L⁻¹ T⁻²), e – espessura da parede do tubo (L) e E – módulo de elasticidade do tubo (M L⁻¹ T⁻²).

A perda de carga deve ser determinada trecho a trecho. O comprimento de segmento de tubo deve estar entre 0 e 1 metro, assim a estimativa do modelo estará próximo do real. Hoje com a informática este cálculo trecho a trecho pode ser facilmente feito, utilizando-se o software Excel ou similar, tornado a metodologia de cálculo fácil e rápida. No anexo A apresenta-se a ilustração da planilha de cálculo que foi utilizada nas simulações para estimar a perda de carga contínua no tubo ensaiado.

2.2.2 Montagem da bancada de pressurização estática

A etapa experimental de pressurização estática do tubo elástico foi conduzida no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biossistemas - ESALQ/USP, Piracicaba-SP. Construiu-se uma bancada de ensaio para pressurização em regime estático do fluido(água), que facilitou o controle, monitoramento e aquisição dos dados necessários para desenvolvimento do trabalho (Figura 3).



Figura 3 - Visão geral da bancada de pressurização estática e sistema de aquisição de dados

Utilizou-se um aferidor de manômetro com cilindro hidráulico e bombeamento manual para efetuar a pressurização da amostra de tubo. O aferidor de manômetro consiste em um sistema hidráulico com reservatório de óleo e sistema de pressurização com dois vasos comunicantes. Na extremidade do primeiro vaso existe um êmbolo conectado a uma plataforma circular onde adiciona-se o peso referente à pressão que se deseja. No segundo vaso comunicante conecta-se o manômetro para ser aferido. Para iniciar o processo de aferição, coloca-se um peso já predeterminado e calibrado na plataforma, e efetua-se o bombeamento até que o êmbolo com o peso atinja uma altura determinada no êmbolo, a qual refere-se à pressão real. Assim relaciona-se a pressão do peso calibrado com a pressão do manômetro a ser calibrado. Para efetuar a pressurização em regime estático conectou-se a amostra do tubo no segundo vaso comunicante e efetuou-se o procedimento de aferição, ou seja, colocou-se a massa referente à pressão de interesse, iniciou-se o bombeamento até que o êmbolo com o peso atingisse o ponto de referência. Como havia expansão do tubo o processo de estabilização não ocorria instantaneamente, sendo necessário um maior tempo para equilíbrio do sistema. As Figuras 4A e 4B ilustram o aferidor de manômetro e o detalhe do êmbolo.

A amostra de um metro do tubo a ser ensaiado era retirada de uma bobina. O tubo era conectado através de adaptadores internos com abraçadeiras externas a registros, e todo o conjunto era acondicionado em um suporte construído de madeira para deixar o segmento de tubo de forma linear e com altura suficiente para receber o "scanner" a laser. O tubo já fixado na estrutura era colocado na vertical e cheio lentamente, para não formar bolhas de ar, com óleo especificado pelo fabricante do aferidor de manômetro. Após o tubo estar completamente cheio o

registro da extremidade era fechado e o conjunto era posicionado na horizontal e conectado através de uma luva de união à tubulação do aferidor de manômetro. Utilizou-se óleo como fluído de pressurização devido às partes internas do aferidor de manômetro serem feitas de ligas metálicas e a substituição do óleo por água poderia danificar o equipamento. Como os ensaios foram realizados em condição estática a diferença de viscosidade não interferiu nos resultados.

A tubulação do aferidor foi montada de forma que possibilitava o reabastecimento da tubulação com óleo e a retirada de bolhas de ar. Após as duas partes do sistema estarem cheias, ambas foram unidas através de uma luva de união e o registro da tubulação do aferidor era aberto. Como o espaço interno da luva de união não estava cheio com óleo, necessitava-se adicionar mais óleo na tubulação. Após a tubulação estar completamente cheia, fechava-se a tomada de reabastecimento e abre-se o registro da mangueira deixando o sistema pronto para iniciar a pressurização. As Figuras 4C e 4D, ilustram o sistema de acoplamento e os detalhes de fixação.



Figura 4 – Aferidor de manômetro (A), detalhe do êmbolo(B), sistema de acoplamento (C) detalhes da fixação do tubo (D)

2.2.3 Determinação do diâmetro externo do tubo pressurizado

O diâmetro externo do tubo pressurizado foi determinado através de um Micrômetro de Varredura à Laser, modelo LSM 503 S. O funcionamento do Micrômetro consiste em um emissor de feixes de raio laser, que é projetado em um receptor localizado do lado oposto. Para efetuar a leitura é necessário introduzir o objeto entre o emissor e o receptor. O objeto impede que parte dos raios cheguem ao receptor; essa ausência é interpretada pelo processador acoplado ao "scanner" que transforma as informações em medidas. As Figuras 5A e 5B ilustra o "scanner" a Laser LSM 503 S, fabricado pela Mitutoyo.



Figura 5 – Detalhe da projeção do laser (A) e leitor do "scanner" (B)

Utilizaram-se dois tipos de tubos, sendo um feito de polietileno e outro feito de PVC flexível (mangueira transparente). Para a determinação da variação do diâmetro do tubo pressurizado uma amostra de um metro de comprimento de tubo foi retirada de uma bobina e acoplada no sistema de pressurização descrito no item 2.2.2. Para cada tipo de tubo foram realizadas 5 repetições. Na Tabela 1 apresentam-se as características técnicas dos tubos.

Para a determinação da alteração do diâmetro, as amostras dos tubos foram pressurizadas de 98,1 kPa a 588,4 kPa com variação de 49,05 kPa totalizando 11 pontos de pressão, além da medição realizada sem pressão.

Tabela 1 – Características	s dos tubos	ensaiados
----------------------------	-------------	-----------

Fabricante	Diâm. Interno (mm)	Espessura da parede (mm)	Material
Plasnova Ind. Com. Ltda	15,759	0,996	Polietileno
AFA Plásticos Ltda	12,039	2,199	PVC flexível

* O uso de produtos ou marcas registradas tem a finalidade de facilitar a compreensão.

Para cada amostra de tubo pressurizada foram efetuadas três leituras, sendo a primeira realizada a 0,25 m da extremidade (L₁), a segunda a 0,5 m (L₂) e a terceira a 0,75 m (L₃). Devido às amostras dos tubos não serem perfeitamente circulares foram realizadas medidas com o "scanner" na posição horizontal (D₁) e na posição vertical (D₂), conforme ilustrado na Figura 6. Todo procedimento de medição foi repetido para cada ponto de pressão. Para certificar que o "scanner" estava perfeitamente perpendicular ao tubo, utilizou-se um esquadro de 90 graus para garantir a perfeita posição de medida.



Figura 6 – Esquema de leitura do "scanner" a laser

2.2.4 Determinação do módulo de elasticidade e características do tubo

A elasticidade é o ramo da física que estuda o comportamento de corpos materiais que se deformam ao serem submetidos a ações externas (forças devidas ao contato com outros corpos, ação gravitacional agindo sobre sua massa, pressão, etc.), retornando à sua forma original quando a ação externa é removida. Até um certo limite, dependente do material e temperatura, as tensões aplicadas são aproximadamente proporcionais às deformações. A constante de proporcionalidade entre elas é chamada módulo de elasticidade ou módulo de Young. Quanto maior esse módulo, maior a tensão necessária para o mesmo grau de deformação, e portanto mais rígido é o material. A relação linear entre essas grandezas é conhecida como lei de Hooke.

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados dois tubos de matérias primas distintas. O primeiro tubo era de polietileno com tratamento para torná-lo resistente aos raios UV, fabricado pela Plasnova Ind. e Com. Ltda, utilizado nos projetos de irrigação como linha lateral. O segundo tubo era fabricado a partir de PVC flexível (mangueira cristal) pela AFA Plásticos Ltda utilizado para transporte de líquidos em geral.

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada a partir de ensaios de tração realizada na máquina de tração universal. Ela é um equipamento hidráulico, movido pela pressão de óleo, e está ligada a um dinamômetro que mede a força aplicada ao corpo de prova. Fixa-se o corpo de prova na máquina por suas extremidades, numa posição que permite ao equipamento aplicar-lhe uma força axial, de modo a aumentar seu comprimento. Os corpos de prova foram fixados nas garras de fixação e travados com pinos de aço de forma a evitar o escorregamento da amostra durante o ensaio. Foram realizadas 3 repetições com no mínimo 20 valores de tração. As Figuras 7A e 7B ilustram a máquina de tração e as Figuras 7C e 7D detalham o corpo de prova, sua fixação e o ensaio em andamento.







Figura 7 – Detalhamento da Máquina de tração universal (A) e (B), detalhe do corpo de prova e sua fixação (C) e ensaio sendo realizado (D)

Para a determinação das características dimensionais (diâmetro interno e espessura da parede) do tubo, utilizou-se o projetor ótico Starrett modelo HB 400. Este equipamento projeta um feixe de luz sobre o objeto passando posteriormente por uma lente de aumento, incidindo sua imagem vertical sobre uma superfície que contém o sensor ótico (figura 8A). A plataforma onde é fixado o objeto permite a realização de movimento na direção vertical e horizontal, permitindo que toda a extensão do objeto seja detectada pelo sensor.

O projetor ótico está acoplado a um micro-computador com "software" QC 4000 desenvolvido pela Metronics, que interpreta os sinais enviados pelo sensor. Com o sistema de medição integrado, projetor ótico e "software" QC 4000 e pelas funções de medição é possível a determinação de ponto, reta, diâmetro, distância, ângulo e semicírculos.

Para a determinação do diâmetro interno do tubo utilizou-se lente de aumento de 10 vezes e ferramenta de medição de diâmetro. Para cada tubo foram realizadas 10 repetições. Na Figura 8B ilustra-se o Projetor de Perfil.



Figura 8 – Ilustração do processo de medição do tubo (A) e Projetor de Perfil Starret HB 400 (B) * O uso de produtos ou marcas registradas tem a finalidade de facilitar a compreensão

2.2.5 Montagem da infraestrutura para determinação da perda de carga contínua

A etapa experimental de pressurização dinâmica do tubo elástico foi conduzida nos Laboratórios de Irrigação e de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biossistemas -ESALQ/USP, Piracicaba-SP. Montou-se uma bancada de ensaio em circuito fechado para pressurização em regime dinâmico do fluido (água), que facilitou o controle, monitoramento e aquisição dos dados necessários para desenvolvimento do trabalho

Utilizou-se o reservatório do laboratório de Irrigação com capacidade de 28.000 litros e uma motobomba de 2 CV, com vazão de 0 a $5,5x10^{-4}$ m³ s⁻¹ e pressão de 0 a 784,6 kPa. No recalque foram instalados dois registros de gaveta e uma válvula reguladora de pressão de diafragma para controlar a pressão de entrada no tubo.

A condução da água do sistema de bombeamento e controle até o início da linha a ser ensaiada (tubo elástico) foi feita através de mangueiras de alta pressão com diâmetro de 1". A conexão entre as mangueiras (alta pressão e a de polietileno) foi feita através de adaptadores internos e abraçadeiras e conexões hidráulicas (luva de união e bucha de redução).

O tubo utilizado para determinação da perda de carga contínua foi instalado no piso do Laboratório de Hidráulica sendo disposto de forma linear em nível. No final do laboratório instalou-se cantoneiras tipo L no mesmo alinhamento do piso, adentrando 15 metros no laboratório de irrigação que está em anexo, para que fosse possível realizar a determinação da perda de carga em 40 metros de tubos, pois o comprimento do laboratório de hidráulica é de 27 metros. As cantoneiras foram fixadas na bancada de gotejamento multiobjetiva garantindo, que não houve diferença de nível em todo o comprimento do tubo ensaiado.

A vazão que passava pelo tubo foi medida por um medidor magnético indutivo de 1," devidamente calibrado em laboratório de calibração acreditados ao INMETRO, instalado no início da tubulação, com 0,5 % de precisão. No final do tubo elástico foi instalado uma mangueira de 1" para conduzir a água até uma cúpula de ensaios de aspersor. Na cúpula foi instalada uma válvula reguladora de pressão que manteve a pressão constante em um aspersor e consequentemente vazão constante independente da pressão de entrada no início do tubo. Com a variação do bocal do aspersor foi possível variar a vazão nos diferentes ensaios, obtendo velocidades de aproximadamente 1 a 3 m s⁻¹ com variação de 0,5 m s⁻¹. A perda de carga contínua foi medida por um manômetro diferencial. A Figura 09 ilustra a infra-estrutura utilizada para os ensaios de perda de carga contínua nos tubos ensaiados.



Figura 9 – Visão geral dos laboratórios (A), Sistema de bombeamento e cuba de ensaio (B), Manômetros Digital (C), Sistema de controle e medição (D), Detalhes do tubo no laboratório de Hidráulica (E) e Suporte para fixação do tubo no Laboratório de irrigação (F)

2.2.6. Metodologia para padronização do orifício e tomada de pressão

Para determinação da perda de carga no tubo foi necessária a solução de dois problemas: 1) Desenvolver uma metodologia para perfurar o tubo de forma que todos os furos ficassem padronizados, evitando-se a formação de rebarbas na parte interna do tubo, que poderiam comprometer os ensaios. 2) Confecção de uma tomada de pressão que não fosse necessário introduzir nenhum tipo de material no interior do tubo.

Para a confecção do gabarito de perfuração utilizou-se uma barra de aço inox com diâmetro de 2,4 mm e comprimento de 20 cm, sendo que em uma das extremidades foi feita uma ponta e a outra dobrada formando um círculo com a finalidade apenas de evitar acidente. Inicialmente era feito o furo a uma distância de 1,0 m da conexão de união entre o tubo ensaio e o tubo de alimentação, denominado de furo marcador. Após este furo o furador foi aquecido e novamente introduzido no furo marcador sendo necessário apenas uma leve pressão. A retirada do furador era realizada lentamente e com movimentos circulares (girando) para que o material proveniente do furo fosse aderindo ao furador e projetado para fora. Assim, a ocorrência de rebarba era pequena não interferindo nas leituras. Após esta etapa o material aderido ao furador era retirado com auxilio de uma lâmina de um estilete e lixado com uma lixa de ferro nº 120 para manter uma parte áspera, facilitando a aderência do material proveniente do furo. É importante ressaltar que no caso de tubos de polietileno, quando são apenas furados, o material do furo é projetado para o interior do tubo, a parte externa do furo fica com um aspecto satisfatório, porém ao pressurizar a tubulação o material que foi descolado para dentro volta à sua posição original, obstruindo parcialmente o orifício e prejudicando as medições.

Para a determinação da perda de carga contínua no de tubo utilizado, não seria possível utilizar nenhum tipo de conexão disponível no mercado, pois essa seria introduzida dentro do tubo aumentando assim a perda de carga. Alves (2002) utilizou uma conexão que envolvia o tubo de polietileno, e para realizar a vedação entre a conexão e o tubo foi utilizado um anel de vedação. Com as orientações obtidas nesse trabalho utilizou-se tarugos de PVC para a confecção das tomadas de pressão. Na Figura 10 apresenta-se o tubo perfurado e a ilustração da tomada de pressão.

49



Figura 10 – Tubo de polietileno perfurado (A), Tomada de pressão de PVC (B) e (C)

2.2.7 Medição da perda de carga contínua

O modelo proposto tem a finalidade de prever de forma mais precisa a perda de carga em tubos que tem a característica de expandirem com o aumento da pressão interna. Para verificar a reposta do modelo quando utilizado na prática determinou-se em laboratório a perda de carga contínua para os dois tubos elástico (PVC flexível e polietileno) com o propósito de comparar a perda de carga contínua estimada pelo modelo com a perda de carga contínua observada em ensaios de laboratório.

Para a medição da perda de carga utilizou-se um manômetro diferencial em "U" com coluna de vidro, com escala em mm (1000 – 0 – 1000) e líquido manométrico com massa específica de 13.600 kg m⁻³.

A perda de carga contínua foi determinada para ambos os tubos (Polietileno e PVC flexível) em 40 metros de tubo, sendo que as amostras foram retiradas da seguinte forma:

(a) Para o tubo de polietileno as 3 amostras de tubos, ambas com 42 metros, foram retiradas de uma bobina de tubo com 500 metros, sendo que a primeira amostra do tubo de polietileno foi retirada na parte inicial da bobina, a segunda, na parte central e a terceira, na parte final da bobina.

(b) Para o tubo de PVC flexível foram utilizadas 3 bobinas de 50 metros, sendo que ambas foram fabricadas no mesmo dia. Em cada bobina de 50 metros retirou-se os 4 metros inicias e os 4 metros finais resultando 42 metros de tubo.

O segmento de tubo a ser ensaio foi disposto linearmente dentro do laboratório de forma que a amostra ficou em nível em todo o seu comprimento. A amostra foi conectada ao sistema de pressurização em regime dinâmico conforme descrito no item 2.2.5. O tubo foi furado conforme

descrito no 2.2.6; após esta etapa acoplou-se a tomada de pressão de PVC conforme descrito no item 2.2.6. Os microtubos do manômetro diferencial em "U" foram conectados às tomadas de pressão instaladas no tubo, assim o sistema estava pronto para iniciar os ensaios.

Os ensaios foram realizados com vazão praticamente constate variando-se a pressão de entrada. A vazão inicial corresponde à velocidade de aproximadamente 1,0 m s⁻¹ sendo o incremento de 0,5 m s⁻¹ até a velocidade final de 3,0 m s⁻¹ aproximadamente. As pressões de entradas foram as seguintes:

- a) Para velocidade de 1, 0 m s⁻¹ foram de 147,1 kPa com incremento de 49,04 kPa até 588,4 kPa totalizando 10 pontos de pressão para a mesma vazão;
- b) Para velocidade de 1,5 m s⁻¹ foram de 196,1 kPa até 588,4 kPa com incremento de 49,04 kPa totalizando 9 pontos de pressão para a mesma vazão;
- c) Para velocidade de 2,0 m s⁻¹ foram de 196,1 kPa até 588,4 kPa com incremento de 49,04 kPa totalizando 9 pontos de pressão para a mesma vazão;
- d) Para velocidade de 2,5 m s⁻¹ foram de 245,2 kPa até 588,4 kPa com incremento de 49,04 kPa totalizando 8 pontos de pressão para a mesma vazão;
- e) Para velocidade de 3,0 m s⁻¹ foram de 294,2 kPa até 588,4 kPa com incremento de 49,04 kPa totalizando 7 pontos de pressão para a mesma vazão;

Com o aumento da vazão foi necessária aumentar a pressão, pois era preciso uma pressão mínima de 98,07 kPa no final da linha de alimentação para garantir o funcionamento da válvula reguladora de pressão utilizada para manter a vazão constante com o aumento da pressão.

Para o monitoramento da pressão no tubo foram utilizados dois manômetros digitais calibrados em laboratórios de calibração acreditados ao INMETRO, sendo que sua precisão era de 0,25%. Estes manômetros foram instalados no início e no final do tubo que era ensaiado, ou seja, o primeiro manômetro foi instalado no início do tubo e o segundo a 40 metros do início do tubo.

Durante os ensaios foi monitorada a temperatura da água, que variou entre 26 a 27 °C, sendo utilizada para corrigir a viscosidade cinemática da água nos cálculos da perda de carga.

2.2.8 Validação do modelo

Para avaliar o desempenho do processo de estimativa de perda de carga contínua no tubo elástico, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson eq.(29), o índice de concordância de Willmott eq. (30) e o Índice de confiança ou desempenho de Camargo eq.(31), sendo sua classificação apresentada na Tabela 2.

• Precisão – Coeficiente de correlação de Pearson (r)

$$r = \frac{N\left(\sum_{j=1}^{N} SjOj\right) - \left(\sum_{j=1}^{N} Sj\right)\left(\sum_{j=1}^{N} Oj\right)}{\sqrt{\left[\left(N\sum_{j=1}^{N} (Sj)^{2} - \left(\sum_{j=1}^{N} Sj\right)^{2}\right)\right]\left[\left(N\sum_{j=1}^{N} (Oj)^{2}\right) - \left(\sum_{j=1}^{N} Oj\right)^{2}\right]}}$$
(29)

• *Exatidão* – Índice de concordância de Willmott (*Id*) (Willmontt et al. 1985)

$$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N} (Sj - Oj)^2}{\sum \left(\left| Sj - \overline{O} \right| + \left| Oj - \overline{O} \right| \right)^2}$$
(30)

em que:

- Sj Variável simulada
- Oj Variável observada
- \overline{O} Média da variável observada
- Índice de confiança ou desempenho de Camargo (*C*)

$$C = r \times d \tag{31}$$

С	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
$\leq 0,30$	Péssimo

Tabela 2 – Classificação do índice de confiança ou de desempenho (C) proposto por Camargo e Sentelhas (1997)

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Módulo de elasticidade

Na Tabela 3 apresenta-se a estatística F, utilizada para testar a significância da regressão entre a força e a deformação para o tubo de polietileno (os resultados dos ensaios de laboratório estão apresentados no anexo B). Na Figura 11 são apresentadas as deformações em função da força de tração no regime elástico, obtidas em experimentos de laboratório utilizando tubo de polietileno, onde verificou-se que há relação linear entre força e deformação, obtendo-se $R^2 =$ 0,9764. Assim, 97,964% das variações da deformação podem ser explicados pela variação da força, utilizando-se para esta determinação 0,25 m de tubo de polietileno com diâmetro interno de 15,759 mm e espessura de parede de 0,996 mm.

Tabela 3 - Análise de variância da regressão da força em função da deformação e intervalo de confiança para o tubo de polietileno

ue pon	etheno				
Fonte de	Soma dos	Graus de	Quadrado	F	F critico (5%)
variação	quadrados	liberdade	médio		
Regressão	85,368555	1	85,368555	6750,73	3,84
Erro	2,0486243	162	0,012645829		
Total	87,417179	163			
Coeficiente	Valor	Erro padrão	Valor t	T _{critico (5%)}	Intervalo de
					confiança (95%)
a	0			1,96	
b	0,012438213	0,0000089587	138,84		0,012261 a 0,012615



Figura 11 – Ensaio de tração no regime elástico do tubo de polietileno

Na Tabela 4 apresenta-se a estatística F, utilizada para testar a significância da regressão entre a força e a deformação para o tubo de PVC flexível (os resultados dos ensaios de laboratório estão apresentados no anexo C). Na Figura 12 são apresentadas as deformações em função da força de tração no regime elástico, obtidas em experimentos de laboratório utilizando tubo de PVC flexível (mangueira cristal), onde verifica-se que há relação linear entre a força e deformação, obtendo-se $R^2 = 0.9723$. Assim, 97,23% das variações da deformação podem ser explicados pela variação da força, utilizando-se para esta determinação 0,25 m de tubo de tubo de PVC flexível com diâmetro interno de 12,039 mm e espessura de parede de 2,199 mm.

de PV0	C flexível (mangue	eira cristal)			
Fonte de	Soma dos	Graus de	Quadrado	F	F critico (5%)
variação	quadrados	liberdade	médio		
Regressão	128,17736	1	128,17736	1124,33	4,17
Erro	3,5340901	31	0,11400291		
Total	131,71145	32			
Coeficiente	Valor	Erro padrão	Valor t	T _{critico (5%)}	Intervalo de confiança
					(95%)
а				2,04	
b	0,061053775	0,000996011	61,30		0,05902 a 0,06308

Tabela 4 – Análise de variância da regressão da força em função da deformação e intervalo de confiança para o tubo de PVC flexível (mangueira cristal)



Figura 12 - Ensaio de tração no regime elástico do tubo de PVC flexível (mangueira cristal)

Na Figura 13 são apresentados os módulos de elasticidade (MPa), obtidos em experimentos de laboratório utilizando tubo de polietileno, em função da força de tração, onde verifica-se que há relação linear entre Força e o módulo de elasticidade, obtendo-se $R^2 = 1$. Assim, 100 % das variações do módulo de elasticidade podem ser explicados pela variação da força.



Figura 13 - Módulo de elasticidade do tubo de polietileno Plasnova

Na Figura 14 são apresentados os módulos de elasticidade (MPa), obtidos em experimentos de laboratório utilizando tubo de PVC flexível (mangueira cristal), em função da força de tração, onde verifica-se que há relação linear entre a força e o módulo de elasticidade,

obtendo-se $R^2 = 1$. Assim, 100% das variações do módulo de elasticidade podem ser explicados pela variação da força utilizando-se para de tubo de tubo de PVC flexível .



Figura 14 - Módulo de elasticidade do tubo de PVC flexível AFA

Observa-se que o tubo de polietileno apresentou uma menor variação de alongamento de aproximadamente 3,9 vezes menor do que o tubo de PVC flexível quando submetido à mesma força. Na Figura 15 apresenta-se a comparação entre o comportamento da deformação do tubo fabricado com PVC flexível e o tubo fabricado com polietileno.



Figura 15 - Comparação entre a deformação do PVC flexível Alfa e do polietileno Plasnova

Esta diferença de deformação entre os tubos deve-se à diferença de elasticidade da matéria prima utilizada na composição do material destinado a extrusão dos tubos utilizados.

A formação da estrutura das paredes do tubo, pode também auxiliar numa maior ou menor resistência à deformação. Observou-se que os resultados finais da extrusão dos tipos de tubos apresentaram diferença em sua estruturação.

O tubo fabricado de PVC flexível apresentou uma tendência de linha sobreposta de maior extensão, quando comparada com o polietileno, com tendência a formação de semicírculos. Este tipo de formação estrutural do tubo, associado à maior elasticidade da material utilizado para extrusão, provavelmente explica esta diferença.

O tubo fabricado de polietileno apresentou uma tendência de linha sobreposta inclinada de menor extensão, quando comparada com o PVC flexível, com tendência a formação de uma estrutura semelhante a escamas. Este tipo de formação estrutural do tubo, associado à menor elasticidade da material utilizado para extrusão, provavelmente, explica esta diferença.

Na Figura 16 ilustra-se a parede do tubo de PVC flexível e polietileno.



(A)

(B)

Figura 16 – Ilustração da tendência de linhas sobreposta de maior extensão apresentadas pelo do tubo de PVC flexível (A) e ilustração da tendência de linhas inclinadas de menor comprimento apresentadas pelo tubo de polietileno(B)

2.3.2 Diâmetro externo dos tubos de polietileno e PVC flexível determinado experimentalmente

Devido aos tubos não apresentarem forma cilíndrica perfeita, as leituras realizadas na posição horizontal (D_1) e na posição vertical (D_2), conforme descritos no item 2.2.3, foram transformadas em apenas um valor (D_E), obtido através da média aritmética entre D_1 e D_2 .

Na Tabela 5 apresenta-se a estatística F, utilizada para testar a significância da regressão entre a pressão interna e o diâmetro externo do tubo de polietileno. Na Figura 17 são apresentados os diâmetros externos médios (mm), obtidos em experimentos de laboratório para o tubo de polietileno, em função da pressão (kPa), verificando-se que há relação linear entre D_E e P, obtendo-se $R^2 = 0.9523$. Assim, 95,23% das variações do diâmetro externo podem ser explicados pela variação da pressão utilizando-se para esta determinação um metro de tubo.

Tabela 5 – Análise de variância da regressão da pressão interna em função do diâmetro externo e intervalo de confiança para o tubo de polietileno

E (1	<u>, 1</u>	<u> </u>	0 1 1	Г	Г
Fonte de	Soma dos	Graus de	Quadrado	F	$\mathbf{F}_{\text{critico}(5\%)}$
variação	quadrados	liberdade	médio		
Regressão	0,95202988	1	0,95202988	1101,53	4,04
Erro	0,04580666	53	0,00086428		
Total	0,99783654	54			
Coeficiente	Valor	Erro padrão	Valor t	$T_{critico (5\%)}$	Intervalo de
					confiança (95%)
а	17,64351	0,009628776	1832,37	2,01	17,62416 a 17,66283
b	0,000848	0,0000255646	31,19		0,000797 a 0,000899



Figura 17 - Variação do diâmetro externo do tubo em função da pressão para o tubo de polietileno

Na Tabela 6 apresenta-se a estatística F, utilizada para testar a significância da regressão entre a pressão interna e o diâmetro externo o tubo de PVC flexível. Na Figura 18 são apresentados os diâmetros externo médios (mm), obtidos em experimentos de laboratório para o tubo de PVC flexível, em função da pressão (kPa), verificando-se que há relação linear entre D_E e P, obtendo-se $R^2 = 0.9631$. Assim, 96,31% das variações do diâmetro externo podem ser explicados pela variação da pressão utilizando-se para esta determinação 1m de tubo.

Tabela 6 – Análise de variância da regressão da pressão interna em função do diâmetro externo e intervalo de confiança para o tubo de PVC flexível

Fonte de	Soma dos	Graus de	Quadrado	F	F critico (5%)
variação	quadrados	liberdade	médio		
Regressão	25,22535	1	25,22535	1568,05	4,01
Erro	0,93305	58	0,016087		
Total	26,15840	59			
Coeficiente	Valor	Erro padrão	Valor t	T	Intervalo de
Coefficiente	v aloi	Eno padrao	v alor t	L critico (5%)	Intervalo de
					confiança (95%)
а	16,117223	0,033514	480,90	2,01	16,05014 a 16,18431
b	0,003680	0,0000929	39,60		0,003494 a 0,003866



Figura 18 - Variação do diâmetro externo em função da pressão para o tubo de PVC flexível

2.3.3 Diâmetro externo estimado pelo modelo

Para uma análise inicial da previsão do modelo proposto, eq. (26), para determinação da variação do diâmetro interno em função da pressão para tubo elástico, comparou-se o diâmetro externo determinado em laboratório como o diâmetro externo estimado pelo modelo.

O diâmetro externo foi determinado através da associação do diâmetro interno estimado pelo modelo e a espessura da parede do tubo.

Para estimativa da espessura da parede do tubo pressurizado utilizou se a eq. (32) onde considerou-se que o volume de material da parede do tubo permanece inalterado independente da pressão.

$$e = \frac{2\nu}{\pi[(D_E - 2e) + D_E]}$$
(32)

onde: v – volume de material da parede do tubo (L³), e – espessura da parede do tubo (L) e D_E – diâmetro externo do tubo (L).

Na Tabela 7 apresenta-se a variação em porcentagem entre os valores estimados e observados para as diferentes pressões para o tubo de polietileno. Verificou-se que os erros aumentaram com a pressão, sendo que este fato pode ter ocorrido devido ao não comportamento perfeitamente elástico do material destinado à fabricação dos tubos associada ao erro operacional.

Observa-se que apesar de uma erro crescente com o acréscimo de pressão, observa-se que para a faixa de operação do tubo de polietileno, 0 a 392,3 kPa, apresentou um erro entre o diâmetro observado em experimentos de laboratório e o diâmetro estimado pelo modelo de no máximo de 0,36%.

Para o tubo de polietileno o modelo apresentou uma estimativa da variação do diâmetro em função da pressão sendo que o maior erro encontrado foi de 0,58%.

Na Tabela 8 apresenta-se a variação em porcentagem entre os valores estimados e observados para as diferentes pressões, para o tubo de PVC flexível (mangueira cristal). Observase que os erros foram crescentes em função da pressão, sendo que para esta condição o modelo também superestimou o valor do diâmetro. Este fato deve ter ocorrido devido à associação do comportamento não perfeitamente elástico do material destinado a fabricação de tubos com a estrutura da parede do tubo, já detalhada e comentada no item 2.3.3, ambos associados ao erro operacional.

Para o tubo de PVC flexível o modelo apresentou uma estimativa da variação do diâmetro em função da pressão, sendo que o maior erro encontrado foi de 2,62 %.

Pressão	D _E estimado	D_E observado	Erro	Pressão	D _E estimado	D _E observado	Erro
(kPa)	(mm)	(mm)	(%)	(kPa)	(mm)	(mm)	(%)
0,0	17,65	17,64	0,00	343,2	17,99	17,94	0,31
98,1	17,75	17,73	0,09	392,3	18,04	17,98	0,36
147,1	17,79	17,77	0,13	441,3	18,09	18,02	0,41
196,1	17,84	17,81	0,18	490,4	18,14	18,06	0,46
245,2	17,89	17,85	0,23	539,4	18,19	18,10	0,52
294,2	17,94	17,89	0,26	588,4	18,25	18,14	0,58

Tabela 7 - Variação em função da pressão do diâmetro estimado e observado para o tubo de polietileno

Tabela 8 – Variação em função da pressão do diâmetro estimado e observado para o tubo de PVC flexível

Pressão	D _E estimado	D _E observado	Erro	Pressão	D _E estimado	D _E observado	Erro
(kPa)	(mm)	(mm)	(%)	(kPa)	(mm)	(mm)	(%)
0,0	16,42	16,41	0,06	343,2	17,74	17,32	2,47
98,1	16,78	16,51	1,63	392,3	17,95	17,57	2,19
147,1	16,96	16,63	1,99	441,3	18,16	17,78	2,13
196,1	17,15	16,77	2,27	490,4	18,38	17,96	2,35
245,2	17,34	16,92	2,51	539,4	18,60	18,13	2,62
294,2	17,54	17,11	2,54	588,4	18,83	18,35	2,62

2.3.4 Diâmetro interno estimado pelo modelo

Para verificar a confiabilidade do modelo em determinar o diâmetro interno da tubulação, comparou-se os valores estimados com os valores apresentados no trabalho de Vilela et al. (2003). Neste trabalho foi determinado o diâmetro interno do tubo de polietileno de baixa densidade, fabricado pela empresa Carborundum S. A, com diâmetro interno de 12,48 mm e espessura da parede de 1,05 mm,. Este tubo não está disponível no mercado o que impossibilitou a determinação precisa do modulo de elasticidade para este tubo.

Para a aplicação do modelo há a necessidade da determinação do módulo de elasticidade e devido à impossibilidade de determiná-lo, buscou-se na literatura a faixa do módulo elasticidade para o polietileno de baixa densidade, utilizando-se o valor inicial da faixa (102 MPa).

Na Figura 19 observa-se que os valores do diâmetro interno estimados pelo modelo foram muito próximos dos apresentados por Vilela et al. (2003) o que reforça a estimativa do diâmetro interno dos tubos pressurizados, pela eq.(27).



* DI Vilela et al. △ DI estimado

Figura 19 – Comparação entro o diâmetro interno determinado por Vilela et al. (2003) e o diâmetro interno estimado pelo Modelo Elástico

2.3.5 Perda de carga contínua observada

Como a finalidade do modelo é a reformulação da Equação Universal com o objetivo de estimar com maior precisão a perda de carga contínua em tubos elásticos, determinou-se em laboratório a perda de carga contínua para o tubo de polietileno e para o tubo de PVC flexível, para verificar a precisão e confiabilidade entre o estimado e o real.

Durante os ensaios de perda de carga contínua no laboratório, com o tubo de PVC flexível, observou uma variação de diâmetro desuniforme ao logo dos 40 metros do tubo utilizado. Esta variação foi observada em todas as três amostras ensaiadas, o que comprometeu os resultados do ensaio. Como o objetivo era a validação do modelo, o comportamento heterogêneo do tubo ao longo de seu comprimento seria um fator não controlado comprometendo a análise. Por este motivo o tubo de PVC flexível foi abandonado a partir desta etapa do trabalho. Esta variação pode ter ocorrido devido à variação da matéria prima e /ou variação no processo de fabricação.

Durante os ensaios de pressurização com fluido em regime estático, a variação do material não foi detectada, pois o comprimento da amostra de tubo utilizada era de apenas 1 metro.

2.3.5.1 Perda de carga contínua observada versus estimada pela Equação Universal

Determinou-se em laboratório a perda de carga contínua para o tubo de polietileno com vazões corresponde a aproximadamente às velocidades de 1,0 m s⁻¹, 1,5 m s⁻¹ 2,0 m⁻¹, 2,5 m s⁻¹ e 3,0 m s⁻¹, sendo que para cada vazão foram feitos 9 pressões de operação. Após a determinação da perda de carga contínua estimou-se, para cada vazão, a perda de carga contínua utilizando-se a Equação Universal com coeficiente *c* igual a 0,296 (RETTORE NETO et al., 2009). Observou-se que ao comparar os valores estimados com os valores observados pela Equação Universal não estimou adequadamente a perda de carga contínua.

Nas Figuras 20 a 22 são apresentadas as perdas de cargas contínua observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal, com vazão média correspondente à velocidade de 1,06 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de tubo de polietileno foi de 0,751 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 69%. Para a segunda amostra de tubo 0,749 m³ h⁻¹ com variação de ± 2 , 80% e para a terceira amostra foi de 0,739 m³ h⁻¹ com

variação de $\pm 1,10\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a Equação Universal superestimou os valores, quando comparada como os valores observados em laboratório.



Figura 20 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



Figura 21 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)



Figura 22 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 23 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se sobre a linha, significando que a Equação Universal superestimou os valores de perda de carga. Verifica-se uma pequena dispersão nos dados que foi provocada pela variação de vazão entre as repetições.



Figura 23 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente a velocidade de 1,06 m s⁻¹

Nas Figuras 24 a 26 são apresentadas as perdas de cargas contínua observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal, com vazão média correspondente à velocidade de 1,57 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de

tubo de polietileno foi de 1,115 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 93%. Para a segunda amostra de tubo 1,101 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 65% e para a terceira amostra foi de 1,094 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 0,37\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a Equação Universal superestimou os valores, quando comparada como os valores observados em laboratório.



Figura 24 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



○Equação Universal △Observado em Laboratório

Figura 25 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)





Figura 26 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 27 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se sobre a linha, significando que a Equação Universal superestimou os valores de perda de carga. Verifica-se uma pequena dispersão nos dados que foi provocada pela pequena variação de vazão entre as repetições.



Figura 27 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente a velocidade de 1,57 m s⁻¹

Nas Figuras 28 a 30 são apresentadas as perdas de cargas contínua observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal, com vazão média

correspondente a velocidade de 1,87 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de polietileno foi de 1,332 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 07%. Para a segunda amostra de tubo 1,312 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 68% e para a terceira amostra foi de 1,300 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 0,90\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a Equação Universal superestimou os valores, quando comparada como os valores observados em laboratório.



Figura 28 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



Figura 29 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)



Figura 30 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 31 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se sobre a linha, significando que a Equação Universal superestimou os valores de perda de carga. Verifica-se uma pequena dispersão nos dados que foi provocada pela variação de vazão entre as repetições.



Figura 31 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente à velocidade de 1,87 m s⁻¹

Nas Figuras 32 a 34 são apresentadas as perdas de cargas contínua observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal, com vazão média

correspondente a velocidade de 2,64 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de tubo de polietileno foi de 1,883 m³ h⁻¹ com variação de ±1, 28%. Para a segunda amostra de tubo 1,844 m³ h⁻¹ com variação de ±0,93% e para a terceira amostra foi de 1,834 m³ h⁻¹ com variação de ±1,06%. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a Equação Universal superestimou os valores, quando comparada como os valores observados em laboratório.



Figura 32 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



○Equação Universal △Observado em Laboratório

Figura 33 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)



Figura 34 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 35 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se sobre a linha, significando que a Equação Universal superestimou os valores de perda de carga. Verifica-se uma pequena dispersão nos dados que foi provocada pela variação de vazão entre as repetições.



Figura 35 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente à velocidade de 2,64 m s⁻¹

Nas Figuras 36 a 38 são apresentadas as perdas de cargas contínua observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal, com vazão média

correspondente a velocidade de 2,90 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de tubo de polietileno foi de 2,061 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 1,72\%$. Para a segunda amostra de tubo 2,019 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 1,55\%$ e para a terceira amostra foi de 2,003 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 2,33\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a Equação Universal superestimou os valores, quando comparada como os valores observados em laboratório.



Figura 36 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



Figura 37 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)




Figura 38 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela Equação Universal) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 39 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se sobre a linha, significando que a Equação Universal superestimou os valores de perda de carga. Verifica-se uma pequena dispersão nos dados que foi provocada pela variação de vazão entre as repetições.



Figura 39 – Comparação entre a perda de carga estimada pela Equação Universal versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente à velocidade de 2,90 m s⁻¹

Na Tabela 9 apresenta-se o erro de previsão da Equação Universal quando utilizada para estimar a perda de carga contínua em tubo de polietileno com variação de pressão de entrada.

Observa que para faixa de pressão ensaiada (147,1 a 588,4 kPa) a estimativa foi superior ao valor observado sendo que com o aumento da pressão o erro também aumentou. Assim, verifica-se que para tubos com comportamento elástico (aumentam o diâmetro interno com o aumento da pressão) a pressão afeta a determinação da perda de carga contínua.

Vel. de. 1,06 m s ⁻¹		Vel. de. 1,57 m s ⁻¹		Vel. de 1,87 m s ⁻¹		Vel. de. 2,64 m s ⁻¹		Vel. de. 2,9 m s ⁻¹	
Pressão	Erro	Pressão	Erro	Pressão	Erro	Pressão	Erro	Pressão	Erro
(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)
147,1	10	147,1		147,1		147,1		147,1	
196,1	10	196,1	9	196,1	8	196,1		196,1	
245,2	10	245,2	10	245,2	9	245,2		245,2	
294,2	10	294,2	11	294,2	10	294,2	8	294,2	9
343,2	12	343,2	11	343,2	11	343,2	10	343,2	9
392,3	16	392,3	14	392,3	13	392,3	11	392,3	11
441,3	17	441,3	16	441,3	15	441,3	14	441,3	14
490,4	18	490,4	18	490,4	17	490,4	16	490,4	16
539,4	21	539,4	20	539,4	20	539,4	18	539,4	18
588,4	22	588,4	24	588,4	23	588,4	22	588,4	21

Tabela 9 – Erro de estimativa da Equação Universal em função do acréscimo de pressão para o tubo de polietileno

2.3.5.2 Perda de carga contínua observada versus estimada pelo Modelo Elástico

Determinou-se em laboratório a perda de carga contínua para o tubo de polietileno com vazões correspondes a aproximadamente as velocidades de 1,0 m s⁻¹, 1,5 m s⁻¹ 2,0 m⁻¹, 2,5 m s⁻¹ e 3,0 m s⁻¹, sendo que para cada vazão foram feitos 9 pressões de operação. Após a determinação da perda de carga contínua estimou, para cada vazão, a perda de carga contínua utilizando-se a o Modelo Elástico. Observou-se que ao comparar os valores estimados com os valores observados, o modelo estimou adequadamente a perda de carga contínua.

Nas Figuras 40 a 42 são apresentadas as perdas de cargas contínua observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico, com vazão média correspondente a velocidade de 1,06 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de tubo de polietileno foi de 0,751 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 69%. Para a segunda amostra de tubo 0,749 m³ h⁻¹ com variação de ± 2 , 80% e para a terceira amostra foi de 0,739 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 1,10\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu

com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando o Modelo Elástico foi próxima da observadas em laboratório.



* Modelo Elástico 🛛 🛆 Observado em Laboratório

Figura 40 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



Figura 41 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)



Figura 42 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 43 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se próximo à linha, significando que o Modelo Elástico estimou os valores de perda de carga adequadamente.



Figura 43 – Comparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente à velocidade de 1,06 m s⁻¹

Nas Figuras 44 a 46 são apresentadas as perdas de cargas contínuas observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico, com vazão média correspondente à velocidade de 1,57 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de tubo de polietileno foi de 1,115 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 93%. Para a segunda amostra de tubo 1,101 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 65% e para a terceira amostra foi de 1,094 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 0,37\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando o Modelo Elástico foi próxima da observada em laboratório.



Figura 44 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



Figura 45 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)



Figura 46 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 47 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pela Equação Universal e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se próximo à linha, significando que o Modelo Elástico estimou os valores de perda de carga adequadamente.



hf Observado (m)

Figura 47 – Comparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente à velocidade de 1,57 m s⁻¹

Nas Figuras 48 a 50 são apresentadas as perdas de cargas contínuas observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico, com vazão média correspondente a velocidade de 1,87 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de

tubo de polietileno foi de 1,332 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 07%. Para a segunda amostra de tubo 1,312 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 68% e para a terceira amostra foi de 1,300 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 0,90\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando o Modelo Elástico foi próxima da observadas em laboratório



Figura 48 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



Figura 49 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)



Figura 50 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 51 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se próximo a linha, significando que o Modelo Elástico estimou os valores de perda de carga adequadamente.



Figura 51 – Comparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente àvelocidade de 1,87 m s⁻¹

Nas Figuras 52 a 54 são apresentadas as perdas de cargas contínuas observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico, com vazão média correspondente a velocidade de 2,64 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de tubo de polietileno foi de 1,883 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 28%. Para a segunda amostra de tubo 1,844 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 0,93\%$ e para a terceira amostra foi de 1,834 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 1,06\%$. Observa-se que a perda de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a o Modelo Elástico foi próxima da observadas em laboratório



Figura 52 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



X Modelo Elástico △Observado em Laboratório

Figura 53 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 02)



Figura 54 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pela pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 55 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se próximo à linha, significando que o Modelo Elástico estimou os valores de perda de carga adequadamente.



Figura 55 – Comparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente a velocidade de 2,64 m s⁻¹

Nas Figuras 56 a 58 são apresentadas as perdas de cargas contínuas observadas em laboratório *versus* a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico, com vazão média correspondente a velocidade de 2,90 m s^{-1.} A vazão média para a primeira amostra de tubo de tubo de polietileno foi de 2,061 m³ h⁻¹ com variação de ± 1 , 72%. Para a segunda amostra de tubo 2,019 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 1,55\%$ e para a terceira amostra foi de 2,003 m³ h⁻¹ com variação de $\pm 2,33\%$. Observa-se que a perda a de carga contínua para uma mesma vazão reduziu com o aumento da pressão, e que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a o Modelo Elástico foi próxima da observada em laboratório



Figura 56 – Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 01)



Figura 57 - Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em



Figura 58 - Representação gráfica da perda de carga contínua (observada e calculada pelo Modelo Elástico) em função da pressão para o tubo de polietileno com 40 metros (amostra 03)

Na Figura 59 apresenta-se a comparação entre a perda de carga contínua estimada pelo Modelo Elástico e a perda de carga contínua observada em laboratório para as três amostras dos tubos de polietileno, ambas com 40 metros de comprimento. Observa-se que os resultados estimados encontram-se próximo à linha, significando que o Modelo Elástico estimou os valores de perda de carga adequadamente.



Figura 59 - Comparação entre a perda de carga estimada pelo Modelo Elástico versus a perda de carga observada em laboratório para o tubo de polietileno com 40 m de comprimento e vazão correspondente à velocidade de 2,90 m s⁻¹

Na Tabela 10 apresenta-se o erro de previsão do Modelo Elástico quando utilizada para estimar a perda de carga contínua em tubo de polietileno com variação de pressão de entrada. Observa que para faixa de pressão ensaiada (147,1 a 588,4 kPa).

Vel. de. 1,06 m s ⁻¹		Vel. de. 1,57 m s ⁻¹		Vel. de 1,87 m s ⁻¹		Vel. de. 2,64 m s ⁻¹		Vel. de. 2,9 m s ⁻¹	
Pressão	Erro	Pressão	Erro	Pressão	Erro	Pressão	Erro	Pressão	Erro
(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)	(kPa)	(%)
147,1	5	147,1		147,1		147,1		147,1	
196,1	4	196,1	3	196,1	3	196,1		196,1	
245,2	2	245,2	2	245,2	2	245,2		245,2	
294,2	0	294,2	2	294,2	1	294,2	1	294,2	2
343,2	0	343,2	0	343,2	0	343,2	1	343,2	1
392,3	2	392,3	1	392,3	1	392,3	0	392,3	0
441,3	2	441,3	1	441,3	1	441,3	1	441,3	1
490,4	0	490,4	1	490,4	1	490,4	1	490,4	1
539,4	2	539,4	2	539,4	1	539,4	1	539,4	1
588,4	1	588,4	2	588,4	3	588,4	2	588,4	3

Tabela 10 – Erro de estimativa do Modelo Elástico em função do acréscimo de pressão para o tubo de polietileno

2.4 Precisão, exatidão e índice de desempenho para a Equação Universal

Visando avaliar o desempenho do processo de estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos utilizando-se a Equação Universal, efetuou-se a simulação da perda de carga contínua para as vazões utilizadas na determinação da perda de carga contínua em laboratório.

Para tanto, utilizou-se os seguintes indicadores de desempenho estatístico: a) Precisão – Coeficiente de correlação de Pearson eq.(29); b) Exatidão – Índice de concordância de Willmott eq. (30) e c) Índice de confiança ou desempenho de Camargo & Sentelhas eq. (31), o qual constitui-se em um produto dos dois índices anteriores. Essa estratégia permite identificar o grau de exatidão e de precisão da estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos, obtida pela Equação Universal.

Na Tabela 11 observa-se que o indicador de precisão para vazão de 0,746 m³h⁻¹ e 1,103 m³h⁻¹apresentaram valores discrepantes da ordem de grandeza dos demais. Este comportamento pode ter ocorrido devido a alguma falha de material ou no processo de extrusão do tubo. O indicador de exatidão demonstra que com o aumento da vazão e consequentemente da perda de carga contínua a Equação Universal reduz a precisão. Este fato deve a variação do diâmetro do tubo que não é levado em consideração na Equação Universal. Ao analisar índice de desempenho de confiança eq.(31) verifica-se que a estimativa da perda de carga contínua utilizando a Equação Universal para o tubo com comportamento elástico deve desempenho de predição classificado de mau a péssimo.

Faixa de pressão de	1471 0 5991	106.1 0 599.1	106.1 0 599.1	204.2 0 588.1	204.2 0 588.1	
ensaio (kPa)	147,1 à 300,1	190,1 å 300,1	190,1 å 300,1	294,2 å 388,1	294,2 a 300,1	
Vazão ($m^3 h^{-1}$)	0,746	1,103	1,315	1,854	2,028	
Indicadores						
Precisão	0,803	0,4564	0,5734	0,6610	0,6035	
Exatidão	0,512	0,4117	0,4171	0,4052	0,3878	
Desempenho	0,411	0,1879	0,2391	0,2678	0,2340	

Tabela 11 - Indicadores do desempenho estatístico para estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos utilizando a Equação Universal

2.5 Precisão, exatidão e índice de desempenho para o Modelo Elástico

Visando avaliar o desempenho do processo de estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos utilizando-se o Modelo elástico, efetuou-se a simulação da perda de carga contínua para as vazões utilizadas na determinação da perda de carga contínua em laboratório.

Para tanto, utilizou-se os seguintes indicadores de desempenho estatístico: a) Precisão – Coeficiente de correlação de Pearson eq.(29); b) Exatidão – Índice de concordância de Willmott eq. (30) e c) Índice de confiança ou desempenho de Camargo & Sentelhas eq. (31), o qual constitui-se em um produto dos dois índices anteriores. Essa estratégia permite identificar o grau de exatidão e de precisão da estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos, obtida pelo Modelo Elástico associado Equação Universal.

Na Tabela 12 observa-se que o indicador de precisão e exatidão para todas as vazões foram superiores a 0,93 indicando que o Modelo Elástico teve ótimo desempenho. Ao analisar índice de confiança eq. (31) verifica-se que a estimativa da perda de carga contínua, utilizando o Modelo Elástico associado à Equação Universal, para o tubo com comportamento elástico teve desempenho de predição classificado de muito bom a ótimo.

Faixa de pressão de ensaio (kPa)	147,1 a 588,1	196,1 a 588,1	196,1 a 588,1	294,2 a 588,1	294,2 a 588,1
Vazão ($m^3 h^{-1}$)	0,746	1,103	1,315	1,854	2,028
Indicadores					
Precisão	0,946	0,961	0,976	0,934	0,968
Exatidão	0,939	0,937	0,951	0,941	0,944
Desempenho	0,89	0,90	0,93	0,88	0,91

Tabela 12 - Indicadores do desempenho estatístico para estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos utilizando o Modelo Elástico

3 CONCLUSÕES

- Tubos elásticos apresentam variação do diâmetro com a pressão interna, que afeta a determinação da perda de carga.
- 2) A Equação Universal quando utilizada para determinação da perda de carga contínua em tubos que aumentam o diâmetro interno com o aumento da pressão, não estima adequadamente a perda de carga, uma vez que não considera a variação do diâmetro.
- O modelo para determinação da variação do diâmetro em função da pressão interna estimou de forma satisfatória a variação do diâmetro do tubo.
- 4) A associação do modelo proposto com a Equação Universal de Darcy e Weisbach resultou numa equação aprimorada sendo adequada para utilização na estimativa da perda de carga contínua em tubos elásticos como o polietileno, desde que associada à utilização da metodologia de cálculo trecho a trecho.

REFERÊNCIAS

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

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

ANDRADE, D.V. **Avaliação hidráulica de tubos flexíveis de polietileno perfurados a laser, utilizados na irrigação**. 1990. 147 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

BAGARELO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow resistance law for small-diameter plastic tipes. Journal of Irrigation and Drainage **Engineering**, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, 1995.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611 p.

BOMBARDELLI, F.A.; GARCÍA, H. Hydraulic design of large-diameter pipes. Journal of Hydraulics Engineering, New York, v. 129, n. 11, p. 839-846, 2003.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

COELHO, R.D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil.** 2007. 192 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FRIZZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, 1998.

HATHOOT, H.M.; AL-AMOUND, A.I.; MOHAMMAD, F.S. Analysis and design of trickle irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 119, n. 5, p. 756-767, 1993.

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

PORTO, R.M. Hidráulica básica. São Carlos: USP, EESC, 1998. 540 p.

PROVENZANO, G.; PUMO D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n. 4, p. 318-324, 2004.

RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Perda de carga localizadas em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p. 28-39, 2009

ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rouge and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 86, n. 3, p. 369-374, 2002.

SONNAD, J.R.; GOUDAR, C.T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. **Journal of Hydraulics Engineering,** New York, v. 132, n. 8, p. 863-867, 2006.

SWAMEE, P.K.; JAIN, A.K. Explicit equations for pipe-flow problems. Journal of Hydraulics Division, New York, v. 102, n. 5, p. 657-664, 1976.

VILELA, L.A.A.; SOCCOL, O.J.; GERVÁZIO, E.S.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Alteração no diâmetro de tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 182-185, 2003.

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

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES; J.D.R.; O'DONNELLAND, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985

WU, I.P. An assessment of hydraulics design of micro-irrigation systems. Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 275-284, 1997.

YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 131, n. 8, p. 694-704, 2005.

ANEXOS

							Dao	dos de er	ntrada								
Temp. da agua (°c) 26			c					0,296 Esp. da parede 0,996 mm				mm					
Diâme	tro Intern	o (mm)	15,758		Gravidade				9,81 compim. do seg. tubo (/)			1	m				
Va	azão(m3/	'n)	1,154		Pressão entrada (mca)			40.1									
Vicosid	lade agua	a (m²/s)		8,8E-07		Mod	ulo de el	aticidade	(Pa)	27622	4925						
														_	1 0 1	1 1 1	<u> </u>
	Equa	ação Univ	/ersal					Mo	delo Elás	stico	1				hf calcu	ilada pelo) L
L	V	R	f	<i>hf</i> (m)	L	1	Р	D	V	R	f	j	<i>hf</i> (m)	_	mode	elo p/ 1º	
		D ~		1 10	I									_	segi	mento	
		Pressao			0	1E-07	40,10	16,1962	1,55591	28637	0,02275	1,7E-08	1,73E-08				
		segmei	nto do tu	bo	1		▶ 40,10	16,1962	1,55591	28637	0,02275	0,17335	0,17	◀			
					2		► 39,93	16,1943	1,55628	28640	0,02275	0,17345	0,35				
		Pressão	no inici	o do 2º	3	/ 1	39,75	16,1924	1,55666	28644	0,02275	0,17354	0,52				
		segmen	to do tub	0002	4	1	39,58	16,1904	1,55703	28647	0,02275	0,17364	0,69				
	L	Segmen	no do tuc		5	1	39,41	16,1885	1,55741	28651	0,02275	0,17374	0,87				
		1.0	0.50		6	1	39,23	16,1865	1,55778	28654	0,02275	0,17384	1,04		38 88 -	(1 39-1 2	2)
		hf _{acum.} :	=0,52 m		7	1	39,06	16,1846	1,55816	28658	0,02275	0,1739 4	1,22		,0,00	(1,5) 1,2	
					8	1	38,88	16,1826	1,55853	28661	0,02275	0,17404	1,39				
hf =	0,17 m	hf =0,18	m hf	=0,17 m	9	1	38,71) 16,1807	1,55891	28665	0,02275	0,17414	1,56	-			
$\left(\right)$	7		Λ		10	1	38,54	16,1787	1,55928	28668	0,02275	0,17424	1,74	-			
$\left(\right)$			$() \rightarrow$		11	1	38,36	16,1767	1,55966	28671	0,02275	0,17434	1,91				
\searrow					12	1	38,19	16,1748	1,56004	28675	0,02275	0,1/444	2,09				
<u>1</u>	n	1		1	13	1	38,01	16,1728	1,56041	28678	0,02275	0,17454	2,26				
↓	•	• • <u>• </u>	• • 🛉 🔶 • •	1 m	14	1	37,84	16,1709	1,56079	28682	0,02275	0,1/464	2,44				
40,10	39,93				15	1	37,66	16,1689	1,56117	28685	0,02274	0,1/4/4	2,61				
, ¹	, i				16	1	37,49	16,167	1,56155	28689	0,02274	0,17484	2,79				
					1/	1	37,31	16,165	1,56192	28692	0,02274	0,17494	2,96				
	•	•			18	1	37,14	16,1631	1,5623	28696	0,02274	0,17504	3,14				
	- 39,93	- 39,75	5		19	1	36,96	16,1611	1,56268	28699	0,02274	0,17514	3,31				
					20	1	30,79	16 1572	1,50500	20705	0,02274	0,17524	3,49	H	hf ca	lculada e	-
			V		21	1	36,01	16 1552	1,50344	28700	0,02274	0,17535	3,00	f	acu	mulada	_
			39,75 —	- 39,41	22	1	36.26	16 1533	1,50502	28713	0,02274	0,17555	4 01				
			1 -	-	23	1	36.09	16 1513	1 56458	28717	0.02274	0,17565	4,01				
					25	1	35.91	16,1493	1.56496	28720	0.02274	0.17575	4.36		-		
					26	- 1	35 74	16 1474	1 56534	28724	0.02274	0 17585	4 54				
					27	1	35.56	16.1454	1.56572	28727	0.02274	0.17595	4.72				
					28	1	35.38	16,1435	1,5661	28731	0,02274	0,17606	4,89				
					29	1	35,21	16,1415	1,56648	28734	0,02273	0,17616	5,07				
					30	1	35,03	16,1395	1,56686	28738	0,02273	0,17626	5,24	1			
					31	1	34,86	16,1376	1,56725	28741	0,02273	0,17636	5,42				
					32	1	34,68	16,1356	1,56763	28745	0,02273	0,17646	5,60				
					33	1	34,50	16,1336	1,56801	28748	0,02273	0,17657	5,77	1			
					34	1	34,33	16,1317	1,56839	28752	0,02273	0,17667	5,95				
					35	1	34,15	16,1297	1,56877	28755	0,02273	0,17677	6,13	1			
					36	1	33,97	16,1277	1,56916	28759	0,02273	0,17687	6,30				
					37	1	33,80	16,1257	1,56954	28762	0,02273	0,17698	6,48				
					38	1	33,62	16,1238	1,56992	28766	0,02273	0,17708	6,66				
					39	1	33,44	16,1218	1,57031	28769	0,02273	0,17718	6,83				
40	1,64365	29433	0,0226	7,90	40	1	33,27	16,1198	1,57069	28773	0,02273	0,17728	7,01	l hj	Observ	vado (m)	6,88
						Erro Eq. 1	radicion	al %	14,82								
						Erro Mod	elo %		1,93								

Anexo A - Planilha de cálculo

Ensa	io 01	Ensa	io 02	Ensaio 03			
Forca	Deslocam.	Forca	Deslocam.	locam. Força Deslo			
N	mm	N	mm	N	mm		
2 31/	0.03	1 579	0.02	1 202	0.02		
4 550	0,03	3 315	0,02	3 570	0,02		
9,330	0,04	1 264	0,04	2 012	0,04		
10 220	0,00	5 925	0,00	5 257	0,00		
11,661	0,08	7 767	0,08	6,806	0,09		
12 896	0,03	11 217	0,10	8 620	0,12		
15,630	0,10	12 / 75	0,14	10 562	0,13		
15,032	0,12	15,475	0,10	12 112	0,17		
10,976	0,13	10,150	0,18	14,720	0,20		
19,369	0,15	18,153	0,21	14,730	0,22		
21,605	0,17	20,103	0,23	10,427	0,24		
23,978	0,19	22,134	0,25	17,927	0,20		
25,096	0,20	24,008	0,27	21,566	0,30		
26,214	0,21	26,479	0,30	27,567	0,36		
27,234	0,22	28,901	0,33	32,608	0,42		
28,538	0,23	30,814	0,35	35,825	0,46		
30,500	0,25	35,550	0,40	39,228	0,50		
32,736	0,27	40,169	0,45	43,425	0,55		
33,766	0,28	44,671	0,50	47,515	0,60		
35,747	0,30	48,908	0,55	51,967	0,66		
37,669	0,32	52,673	0,60	55,223	0,70		
39,601	0,34	56,871	0,65	63,304	0,80		
41,650	0,36	60,813	0,70	68,002	0,86		
43,504	0,38	64,836	0,75	70,316	0,90		
45,397	0,40	69,689	0,81	75,141	0,96		
48,084	0,43	76,632	0,90	78,240	1,00		
50,222	0,45	79,917	0,95	82,143	1,05		
56,469	0,52	87,400	1,05	85,909	1,10		
60,156	0,56	92,696	1,12	89,626	1,15		
65,315	0,62	95,716	1,16	93,461	1,20		
72,317	0,70	98,855	1,20	96,893	1,25		
77,505	0,76	102,385	1,25	100,522	1,30		
80,731	0,80	106,112	1,30	104,837	1,36		
85,007	0,85	110,231	1,36	107,583	1,40		
89,901	0,91	114,153	1,42	111,309	1,45		
93,049	0,95	119,940	1,50	115,625	1,51		
97,089	1,00	123,862	1,56	118,272	1,55		
101,110	1,05	128,079	1,62	121,607	1,60		
104,837	1,10	133,277	1,70	125,039	1,65		
108,563	1,15	136,513	1,75	128,668	1,70		
112,290	1,20	141,025	1,82	132,198	1,75		
116,115	1,25	146,026	1,90	135,533	1,80		
119,743	1,30	149,164	1,95	139,456	1,86		
123,470	1,35	152,401	2,00	143,476	1,92		
127,099	1,40	155,833	2,05	146,222	1,96		
130,727	1,45	158,971	2,10	148,870	2,00		
134,062	1,50	163,287	2,17	152,695	2,06		
137,690	1,55	168,288	2,25	155,343	2,10		
140,730	1,60	173,682	2,34	158,579	2,15		
144.261	1,65	176.036	2,39	161,717	2,20		
147.693	1,70	,	,	165,052	2,25		
151.518	1,76			168,092	2,30		
153.970	1,80			171,524	2,35		
157 402	1.85			174,467	2.40		
161 325	1.91			176,526	2.43		
164 660	1.96			1.0,020	_,+5		
167 209	2,00						
170 348	2,00						
173 192	2,05						
176 232	2 15						
1, 0,202	_,13						

Ensa	nio 01	Ensa	io 02	Ensaio 03			
Força	Deslocam.	Força	Deslocam.	Força	Deslocam.		
N	mm	Ν	mm	Ν	mm		
6,276	0,27	6,225	0,25	6,300	0,75		
11,082	0,51	11,278	0,6	10,297	0,43		
18,928	0,87	22,360	0,9	21,870	1,03		
27,165	1,41	30,206	1,45	33,932	1,75		
40,307	2,07	39,718	2,05	41,582	2,17		
49,035	2,67	49,231	2,89	50,016	2,71		
60,019	3,27	61,784	3,97	60,019	3,37		
70,022	3,93	69,728	4,51	68,649	4,09		
79,731	4,59	79,731	5,35	78,652	4,81		
89,538	5,25	90,028	6,07	88,165	5,59		
98,658	5,91	101,601	6,97	98,855	6,55		

Anexo C - Resultado dos ensaios de tração do tubo de PVC flexível