

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão
de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros**

Gabriel Greco de Guimarães Cardoso

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Gabriel Greco de Guimarães Cardoso
Tecnólogo em Irrigação e Drenagem

**Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores
sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2007

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Cardoso, Gabriel Greco de Guimarães

Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros / Gabriel Greco de Guimarães Cardoso. - - Piracicaba, 2007.

64 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Agricultura de precisão 2. escoamento 3. Irrigação 4. Perda de carga 5. Tubulação
6. Turbulência I. Título

CDD 631.7

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

DEDICO

Toda obra científica está sujeita ao esquecimento e abandono nas prateleiras, algumas vezes empoeiradas, das bibliotecas de pesquisa. Certamente vez ou outra, alguém há de fazer uma pesquisa e lá encontra a obra, quase esquecida no tempo, e foliando-a descobre, numa singela e espremida dedicatória, o personagem da consagrada obra. Personagem este essencialmente subjetivo, mas que dedicou seu tempo, seu esforço, atenção e tantas outras coisas, em pró da ciência acadêmica, deixando, muitas vezes, a companheira do lar, os filhos, confraternizações com os amigos, num segundo plano.

Portanto dedico esta obra a minha querida companheira Maria Rosária, que tantas vezes compreendeu minhas ausências ou presença parcial; a meu amado filho Gaspar, pelos seus gestos de carinho, me dizendo o quanto sou importante à ele; a meu filho que ainda não nasceu, mas que aguardamos com a mão no coração, certos de que virá para alegrar ainda mais a nossa família. Dedico também a meus pais, Antônio Reinaldo e Elisabetta, por terem me proporcionado melhores condições materiais para cursar a pós-graduação e a meus irmãos, Leopoldo e Emanuella, por me darem força e incentivo para continuar, mesmo nos momentos mais adversos.

OFEREÇO

A todos os profissionais, técnicos e estudantes que fazem uso das técnicas de irrigação agrícola como meio transformador da relação homem-natureza. Que este trabalho sirva a estas pessoas não somente como referências a outros trabalhos que virão, mas que traga efetivamente um entendimento àqueles que buscam compreender, na tentativa de mensurar, a dinâmica das interações energéticas que ocorre num projeto hidráulico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por conceber a sabedoria e inteligência em Seus filhos;

À coordenação do programa de pós-graduação em Irrigação e Drenagem, por ter me dado a oportunidade de vivenciar uma experiência científica;

Ao professor Dr. José Antônio Frizzone, pela orientação, companheirismo e credibilidade para comigo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo fomento desta pesquisa;

Aos professores, colegas e funcionários do Departamento de Engenharia Rural, pelas dicas, amizade e confiança depositadas em mim.

A busca pela verdade

*“Aqueles que buscam a verdade nas letras,
aprenderão a conjugar o verbo amar;
Aqueles que a buscam nos números,
certamente aprenderão a somar;
Aqueles que nada buscam,
a verdade há de se mostrar;
Porque a verdade é assim, está em todo lugar,
basta que se tenha olhos para enxergar.”*

Gabriel G. G. Cardoso

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE SÍMBOLOS.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Linhas laterais.....	13
2.2 Perda de carga distribuída em linhas laterais.....	14
2.3 Emissores.....	19
2.4 Conexão de emissores.....	20
2.5 Perda de carga localizada em conexão de emissores.....	22
3 MATERIAL MÉTODOS.....	26
3.1 Descrição geral do experimento.....	26
3.2 Determinação da perda de carga distribuída nos tubos e do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.....	28
3.3 Determinação da perda de carga nos tubos com emissores e acréscimo de perda de carga.....	30
3.4 Determinação da perda de carga localizada e do coeficiente de carga cinética.....	30
3.5 Determinação do índice de obstrução.....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Perda de carga distribuída nos tubos.....	34
4.2 Fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.....	37
4.3 Perda de carga nos tubos com emissores e acréscimo de perda de carga.....	42
4.4 Perda de carga localizada nas conexões dos emissores.....	45
4.4.1 Coeficiente de carga cinética.....	45
4.4.2 Índice de obstrução.....	48
4.4.3 Aplicações.....	50
5 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXOS.....	57

RESUMO

Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros

O procedimento de dimensionamento de uma linha lateral de microirrigação necessita avaliar com precisão as perdas de carga distribuídas na tubulação e as perdas de carga localizadas nas inserções dos emissores com os tubos. Estas perdas localizadas podem ser significativas quando comparadas com as perdas de carga totais, devido ao grande número de emissores instalados ao longo da linha lateral. Este trabalho reporta os resultados de um experimento sobre perda de carga distribuída, fator de atrito e perda de carga localizada em conexões de emissores “on-line” em tubos de polietileno de pequeno diâmetro. Foram utilizados cinco tubos com diâmetros internos de 10,0 mm, 13,0 mm, 16,3 mm, 17,4 mm e 19,7 mm. O experimento foi conduzido para números de Reynolds no intervalo de 5000 a 68000, obtidos pela variação da vazão nos tubos, a uma temperatura média da água de 20 ± 2 °C. Os resultados foram analisados e concluiu-se que o fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach pode ser estimado com $c = 0,300$ e $m = 0,25$. A equação de Blasius com $c = 0,316$ e $m = 0,25$ mostrou-se conservadora na estimativa do fator de atrito, porém esse fato não constitui limitação para sua utilização em projetos de microirrigação. As análises mostraram que as duas equações proporcionam estimativas de f com pequeno desvio médio (5,1%). Para um dado conjunto tubo-conexão o coeficiente de carga cinética (K_L) foi praticamente independente do número de Reynolds, para $R > 20000$, sugerindo que cada conjunto tubo-conexão pode ser caracterizado por um valor médio de K_L . Para desenvolver um procedimento de estimativa de K_L , a geometria da conexão entre o emissor e o tubo foi caracterizada por um índice de obstrução IO , que depende da razão (r) entre a área da seção transversal do tubo, onde o conector está localizado, e a área da seção transversal do tubo fora do conector. Uma função potência foi ajustada aos pares experimentais (IO , K_L). A seleção do modelo é consistente com o fenômeno físico uma vez que $K_L = 0$ para $r = 1$ (nenhuma obstrução dentro do tubo). Para $5000 < R < 68000$ a relação foi $K_L = 1,23 (IO)^{0,51}$ com $R^2 = 0,9556$ e erro padrão do ajuste igual a 0,04245. As diferenças entre os valores de K_L estimados e observados são normalmente distribuídas.

Palavras-chave: Fator de perda de carga; escoamento turbulento; Tubos lisos, Índice de obstrução, Perda de carga localizada

ABSTRACT

Geometrical Index in the determination of head losses located in connection of emitters on polyethylene pipes of small diameters

Microirrigation lateral design procedure needs to accurate evaluation of both the pipe head losses and the local losses that are due to the protrusion of emitter barbs into the flow. These local losses, in fact (in relation to the high number of emitters located along the line) can become significant compared to the overall energy loss. On this paper, the results of an experimental study on the pipe head losses, friction factor and head local losses for small-diameters polyethylene pipes are reported. The experiment was carried out using a range of Reynolds number between 5000 to 68000, obtained by varying discharge at 20 ± 2 °C water temperature, with a internal diameter pipes of 10,0 mm, 13,0 mm, 16,3 mm, 17,4 mm and 19,7 mm. According to the results analysis and experimental conditions the friction factor (f) of the Darcy-Weisbach equation can be estimated with $c = 0,300$ and $m = 0,25$. The Blasius equation ($c = 0,316$ and $m = 0,25$) gives a conservative estimative of f , although this fact is non restrictive for microirrigation-system design. The analysis shows that both the Blasius and the adjusted equation parameters allow accurate friction factor estimate, characterized by low mean error (5,1%). For a given pipe-connection system, the fraction K_L of kinetic head was practically independent of the Reynolds number, for $R > 20000$, which suggested that each system can be characterized by the mean value of K_L . To derive an estimating procedure of K_L , the geometry of the connection between the emitter and the pipe was characterized by the obstruction index IO , which is dependent on the ratio (r) between the pipe cross-section area corresponding to the section in which the emitter is located, and the pipe cross-section area. A power relationship was then fitted to the experimental IO , K_L data pairs. The selection form of the relationship is consistent with the physical phenomenon since it estimates $K_L = 0$ for $r = 1$ (no obstruction into the pipe). For $5000 < R < 68000$ the relationship was $K_L = 1,23 (IO)^{0,51}$ with $R^2 = 0,9556$ and standard fit error equal to 0,04245. The differences between K_L observed values and the calculated ones are normally distributed.

Keywords: Friction factor; Turbulent flow; Smooth pipes; Obstruction index, Local head losses

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_c – área de passagem do fluido pelo tubo com emissor inserido (L^2);
- A – área de passagem do fluido pelo tubo sem emissor (L^2);
- β – coeficiente de ajuste da equação característica de emissores;
- c – coeficiente da equação de Blasius;
- d – índice de concordância de Willmoth;
- D – Diâmetro do tubo (L);
- ΔZ – desnível da linha lateral (L);
- ε – altura das rugosidades do tubo (L);
- f – fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach;
- F_n – fator de redução de perda de carga;
- g – aceleração da gravidade ($L T^{-2}$);
- H – pressão nominal do emissor (Kpa);
- H_f – perda de carga distribuída (L);
- hf_L – perda de carga localizada (L);
- $H_{máx}$ – pressão na entrada da linha lateral (mca);
- $H_{mín}$ – pressão no final da linha lateral (mca);
- IO – índice de obstrução;
- J – perda de carga unitária no tubo ($L L^{-1}$);
- J' – perda de carga unitária no tubo com emissores vedados ($L L^{-1}$);
- K – coeficiente da equação de Darcy-Weisbach com f de Blasius;
- k – coeficiente da equação de perda de carga unitária em função da vazão;
- k' – coeficiente da equação de perda de carga unitária no tubo com emissores vedados em função da vazão;
- K_L – coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil;
- L – comprimento do tubo (L);
- Le – espaçamento entre emissores (L);
- m – expoente da equação de Blasius;
- N – número de emissores na linha lateral;
- n – expoente da equação de perda de carga unitária;

- n_o – número de observações da correlação de Pearson;
 n' – expoente da equação de perda de carga unitária no tubo com emissores vedados;
 O_i – valores de J e f observados do índice de ajuste de Willmott;
 \bar{O} – média dos valores de J e f observados do índice de ajuste de Willmott;
 P_i – valores de J e f estimados pela equação de Darcy-Weisbach com f de Blasius;
 P_c – pressão no tubo no momento em que o fluido passa pelo conector (mca);
 P – pressão no tubo logo após o conector (mca);
 Q – vazão de escoamento ($L^3 T^{-1}$);
 q – vazão do emissor ($L T^{-1}$);
 R – Número de Reynolds;
 r – coeficiente de correlação de Pearson;
 V_o – velocidade média de aproximação da corrente fluida ($L T^{-1}$);
 V_c – velocidade de passagem do fluido através do conector ($L T^{-1}$);
 V – velocidade de passagem do fluido logo após o conector ($L T^{-1}$);
 ν – viscosidade cinemática da água ($L^2 T^{-1}$);
 x – coeficiente do regime de escoamento do emissor.

1 INTRODUÇÃO

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 moto-bomba adequado ao sistema de irrigação e com isso, minimizando os custos anuais e de implantação do projeto. É muito comum contabilizar as perdas localizadas acrescentando uma porcentagem, em torno de 5%, sobre as perdas principais no intuito de facilitar os cálculos que conseqüentemente estes trariam. Porém, com uso da informática, problemas de cálculos são resolvidos com muita facilidade, o que não justifica estimar e sim calcular os valores destas perdas locais, resultando em valores mais reais, com maiores riquezas de detalhes.

Na irrigação localizada, o uso de gotejadores ou mesmo microaspersores requerem conexões, que são encaixes introduzidos dentro da linha lateral e lá permanecem ocupando uma área interna desta linha, provocando assim uma perda de carga localizada. Segundo Keller e Karmeli (1974), as preposições in (na), on (sobre) são usadas como forma de estabelecer o lugar ocupado pelo conector na linha lateral. A posição on-line ocorre quando a conexão obstrui extensa área da linha, pois são fixadas sobre ela e in-line quando a obstrução é minimizada pelo tipo de posicionamento ocupado pelo emissor acoplado no interior da linha.

Tentando generalizar os critérios para estimativa das perdas localizadas nos conectores, emissores geralmente são classificados pelos pesquisadores como tipos comerciais e caracterizados pelo tamanho geométrico das saliências (AL-AMOUD, 1995).

As linhas laterais, que são tubos de polietileno de diâmetros variáveis, têm a função de conduzir a água até o ponto de descarga, que é justamente nos conectores dos emissores, que por sua vez conduzirá a água ao emissor, aplicando-a nas proximidades das plantas. Este processo porém, para que seja efetivo, deve obedecer a critérios de fabricação. Cada tipo de emissor trabalha com uma faixa de pressão e vazão pré-estabelecida, devendo o projetista estar atento a estes critérios. A escolha do diâmetro da linha e do tipo de emissor a ser usado em um sistema de irrigação, determinará o sucesso relativo do projeto, uma vez que algumas culturas exigem uma maior lâmina de água que outras, e também o comprimento da linha influenciará nesta escolha.

O termo sucesso relativo foi usado porque, uma vez que a escolha do tipo de linha e de emissor tenha sido adequada, a parte mais onerosa do projeto estará bem dimensionada. Porém,

para que o sucesso seja total, é necessário, que no projeto hidráulico, a contabilidade das perdas totais seja bem precisa, no intuito de caracterizar o conjunto moto-bomba ideal para o sistema.

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de dar suporte ao cálculo das perdas de carga localizadas em conexões de emissores “on-line”. Os objetivos da pesquisa foram:

- a) Propor uma equação do tipo potência semelhante à de Blasius, para estimar o fator de atrito dos tubos usados nesta pesquisa;
- b) Determinar as perdas de carga localizada na conexão dos emissores selecionados;
- c) Propor um índice geométrico que quantifique o coeficiente de carga cinética, da equação de perda de carga localizada, a partir da relação entre a área transversal do conector e a perda de carga que este provoca na linha lateral.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Linhas laterais

As linhas laterais em um sistema de irrigação são tubulações que recebem a água de outras linhas de maior diâmetro na malha do sistema e distribuem-na, ao longo de seu comprimento através de emissores. Segundo Bernardo; Soares e Mantovani (2005), linha lateral é a linha na qual estão inseridos os emissores. São constituídas de material plástico flexível, PVC ou polietileno, com diâmetros inferiores a 25 mm, sendo mais comuns os de 13, 16, 18, 22 mm.

Os sistemas de microirrigação distribuem água diretamente nas proximidades das plantas, por gotejamento ou por microaspersão, utilizando dispositivos dissipadores de energia, denominados emissores, instalados em tubos de polietileno de diâmetros relativamente pequenos, em espaçamentos definidos, possibilitando o aumento da eficiência no uso de água, revelando-se de grande interesse para uso nas regiões caracterizadas por limitada disponibilidade de recursos hídricos.

O dimensionamento hidráulico do sistema deve ser realizado com cautela requerendo conhecimentos técnicos sobre emissores, tubulações, sistemas 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 de pressão, a uniformidade de emissão de vazão ao longo da linha lateral depende da variação de pressão decorrente da perda de carga na tubulação, da diferença de elevação do terreno, do coeficiente de variação de fabricação do emissor, do número de emissor por ponto de emissão, da temperatura da água e do grau de obstrução dos emissores (WU, 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004).

A dilatação das linhas laterais, após o uso prolongado, é algo comum de ocorrer, já que sua flexibilidade permite esta alteração do diâmetro. Este tipo de deformação é provocado pela pressão que o fluido exerce em sua parede. Assim, os projetistas devem estar atentos a estas deformações, uma vez que o diâmetro na equação universal de perda de carga, usando o fator de atrito de Blasius, é elevado a uma potência de 4,75, o que majora bastante o erro para um pequeno acréscimo no diâmetro.

2.2 Perda de carga distribuída em linhas laterais

Perda de carga em tubulações é um fator importante para os projetos de engenharia de irrigação, pois afeta o custo total do sistema bem como o balanço hidráulico do sistema (KAMAND, 1988). O diâmetro dos tubos da rede de distribuição de água depende da magnitude da perda de carga admissível no sistema pelo projetista. O custo operacional é afetado inversamente pelo diâmetro dos tubos. Com o aumento do diâmetro, para uma dada vazão, a perda de carga por unidade de comprimento diminui, reduzindo a energia de bombeamento requerida.

Por simplicidade matemática, muitos projetistas de sistemas de irrigação preferem utilizar equações empíricas, como as de Hazens-Williams, Manning e Scobey, para determinar as perdas de carga, em vez de utilizar a equação teórica de Darcy-Weibach. 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, conseqüentemente, na estimativa da energia requerida.

Existe um predomínio de material plástico nas tubulações das redes de distribuição de água de sistemas de microirrigação. 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) reduziram a perda de carga

em até 60,24%, o que poderia alterar sensivelmente as condições hidráulicas de um projeto de microirrigação.

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 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. Além da espessura da parede e do coeficiente de elasticidade do material, outro componente que contribui para explicar esse efeito 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 ser expressa pela Eq. (1):

$$H_f = f \frac{L V_0^2}{D 2g} \quad (1)$$

em que: H_f – perda de carga (L); L – comprimento do tubo (L); D – Diâmetro do tubo (L); V_0 – 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.

Outra forma comum de expressar a perda de carga é por unidade de comprimento de tubo, conforme equação (2):

$$J = f \frac{1}{D} \frac{V_0^2}{2g} \quad (2)$$

sendo J a perda de carga unitária ($L L^{-1}$).

A resistência hidráulica, freqüentemente 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 investigação. 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 (ε/D) e do número de Reynolds (ROMEIO; 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; ROMEIO; ROYO; MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006), sendo válida para $2000 < R < 10^8$ e $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$. Esta equação relaciona o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds conforme a Eq. (3):

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

sendo ε a altura das rugosidades do tubo (L). Esta equação é válida também para o caso limite de tubos lisos ($\varepsilon = 0$) 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 (PORTO, 1998):

$$\frac{I}{\sqrt{f}} = 2 \log (R \sqrt{f}) - 0,8 \quad (4)$$

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; JAIN, 1976; SERGHIDES, 1984; ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006).

Para tubos lisos e $4000 \leq R \leq 10^5$ 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):

$$f = \frac{c}{R^m} \quad (5)$$

Blasius, ao propor esta equação para estimar f , determinou o 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 homogenia. Tanto a equação de Darcy-Weisbach quanto a de Blasius têm bases teóricas; (b) tem bom grau de exatidão para tubos plásticos quando o $4000 \leq R \leq 10^5$. O número de Reynolds 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 inferior a 4000 a equação de Blasius superestima os valores de f .

Considerando os coeficientes da equação de Blasius, a Eq. (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J = K \nu^{0,25} Q^{1,75} D^{-4,75} \quad (6)$$

sendo: ν – viscosidade cinemática da água ($1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ à 20°C); $K = 2,458 \times 10^{-2}$ para o sistema internacional de unidades; Q – vazão ($\text{L}^3 \text{ T}^{-1}$); D – diâmetro interno do tubo (L).

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 3037 e 31373), 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:

$$c = \frac{6,152}{R^{0,183}} \quad (7)$$

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

$$m = \frac{2}{\left(8 - \frac{12,4}{R^{0,157}}\right)} \quad (8)$$

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 7000 e 40000, a equação de Blasius é uma forma acurada para determinar o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

2.3 Emissores

Emissores são peças que têm a função de permitir a passagem de fluido da linha lateral para o meio externo, de uma forma controlada. São as principais partes de um sistema de irrigação. Existem dois tipos de emissores, os gotejadores, que trabalham com uma faixa de vazão de 2 a 20 L/h, e os microaspersores, com vazões variando de 20 a 140 L/h (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005).

Os emissores são fabricados para trabalhar em uma faixa de pressão adequada, chamada de pressão de serviço (PS), sendo que a quantidade de fluido aplicado dependerá de uma relação numérica envolvendo a pressão usada. Existem os que trabalham com vazões constantes sobre uma faixa bem ampla de pressão, que é uma característica bastante desejável, pois permite uma distribuição uniforme de lâmina de água ao longo da linha e outro com uma maior variação de vazão para uma mesma faixa de pressão. A relação algébrica entre pressão e vazão de um emissor, que o caracteriza, sendo denominada equação característica do emissor, é representada desta forma:

$$q = \beta(H)^x \quad (9)$$

sendo que: q – vazão do emissor vazão ($L T^{-1}$); β – coeficiente de ajuste; H – pressão de operação do emissor (KPa); x – coeficiente do regime de escoamento.

Cada tipo de emissor tem uma equação específica que o identifica. Segundo Pizarro (1990) um emissor perfeito teria o expoente $x = 0$ (autocompensante), os de regime laminar $x = 1$ e nos de regime turbulento $x < 1$; já Keller e Karmeli (1974) consideram de regime laminar os emissores com expoente $x = 1$ e de regime turbulento com $x = 0,5$.

Na Figura 1, observa-se os três tipos de emissores comercialmente disponíveis. Nos emissores tipo labirinto e helicoidal, o trajeto que o fluido percorre dentro do emissor antes de ser exteriorizado, é tanto maior quanto menor a vazão desejada. Esse trajeto, em forma de espiral ou de labirintos, é um recurso adotado para evitar a diminuição da seção transversal de passagem do fluido, evitando assim entupimentos. Para os gotejadores auto-compensados ou auto-regulados, o

princípio regulador é por meio de membranas internas de silicone, que ao ser vencida por uma pressão mínima, promove uma vazão uniforme, independente do labirinto do gotejador.

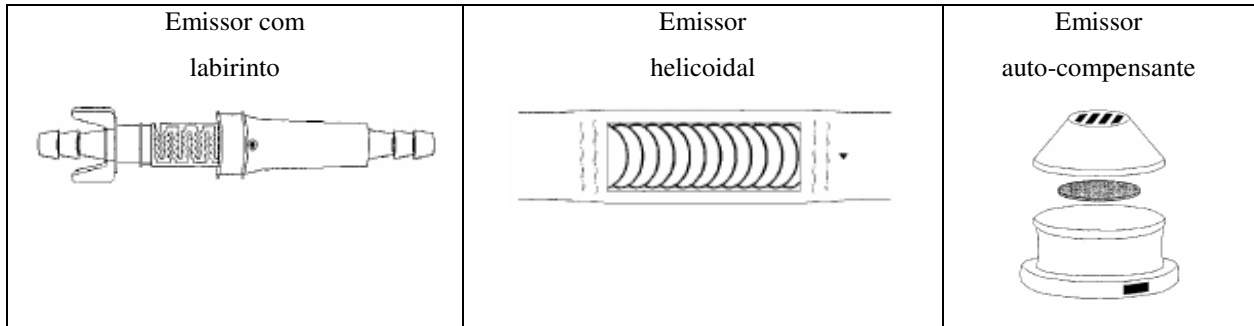


Figura 1 - Tipo de emissores utilizados na irrigação localizada
Fonte: adaptado de Rodrigues-Sinobas; Juana e Losada (1999)

2.4 Conexão de emissores

Os conectores são prolongamentos dos emissores que tem como objetivo transportar o fluido do interior da linha lateral para o emissor. Por terem esta função, eles são conectados diretamente na linha lateral e lá permanecem como parte integrante desta linha. São constituídos de material plástico rígido, geralmente do mesmo material que o emissor, quando este é acoplado àquele.

Os conectores são classificados pelo tipo de posição que assumem na tubulação, podendo ser in-line, on-line e integrados, conforme são ilustrados pelas Figuras 2, 3 e 4. (JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002 b; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

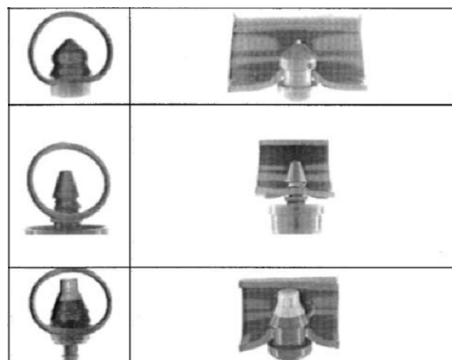


Figura 2 – Emissores de Conexões on-line
Fonte: adaptado de Juana; Rodrigues-Sinobas e Losada (2002 b)

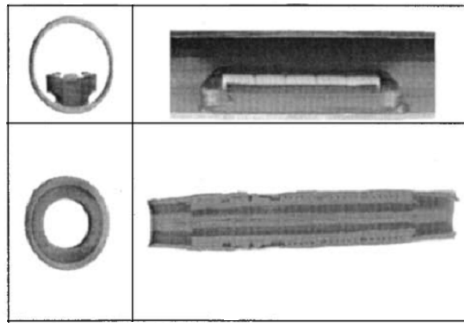


Figura 3 – Emissores de Conexões integrada
 Fonte: adaptado de Juana; Rodrigues-Sinobas e Losada (2002 b)

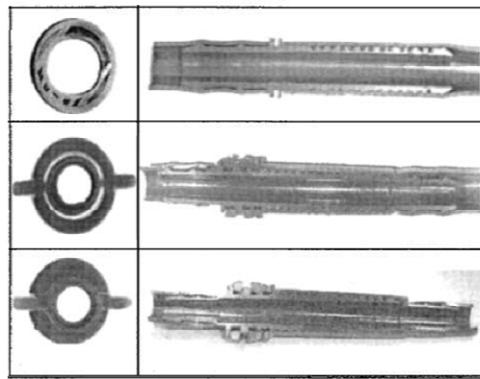


Figura 4 – Emissores de Conexões in-line
 Fonte: adaptado de Juana; Rodrigues-Sinobas e Losada (2002 b)

Bagarello et al., (1997) sugerem que a caracterização de um conector seja estabelecida pelo comprimento geométrico da haste e do elemento truncado de cone, da seguinte forma:

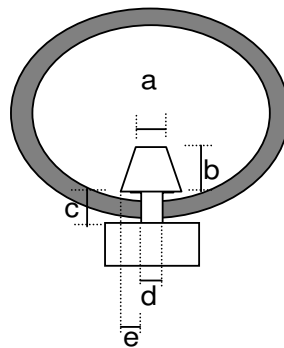


Figura 5 – Dimensões características de um conector

Muitos autores reconhecem que as turbulências são geradas pelas contração que as conexões do emissor provocam na linha lateral, diminuindo o diâmetro para a passagem da água. A introdução de emissores ao longo da linha lateral modifica o curso das linhas de fluxo,

causando turbulência local que resulta em perdas de carga adicionais às perdas distribuídas no tubo. A turbulência é consequência da presença de um elemento na parede interna do tubo que causa um grau de obstrução na seção de escoamento e, nos emissores “on-line”, uma contração do tubo no local da inserção, diminuindo o diâmetro de escoamento (AL-AMOUD, 1995; BAGARELLO et al, 1997; JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002 a,b; PROVENZANO; PUMO, 2004; PROVENZANO; PUMO; DIDIO, 2005; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

2.5 Perda de carga localizada em conexão de emissores

As perdas de carga localizadas nos conectores ocorrem devido à contração e subsequente ampliação do trajeto do fluido, causado pela obstrução que o conector provoca na passagem do fluido.

Para determinar com exatidão as perdas de carga totais nas linhas laterais, as perdas de carga distribuídas e as perdas de carga localizadas devem ser consideradas. Numerosas pesquisas têm sido publicadas para analisar o escoamento permanente e turbulento, espacialmente variado, em linhas laterais de microirrigação (WU; GITLIN, 1975; VON BERNUTH, 1990; WU, 1992; KANG; NISHIYAMA; CHEN, 1996; ZAYANI et al., 2001). Recentemente, tem-se reconhecido a importância das perdas de carga em conexão de emissores, o que estimulou o desenvolvimento de modelos matemáticos para estimá-las, por parte dos pesquisadores (BAGARELLO et al., 1997; JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002 a,b; PROVENZANO; PUMO, 2004; PROVENZANO; PUMO; DIDIO, 2005; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

A perda de carga localizada (hf_L) na inserção de um gotejador sobre a linha lateral (Figura 6) deve-se à resistência a movimentação da corrente fluída oferecida pela protrusão da conexão no interior do tubo, sendo expressa pela forma clássica como uma fração K_L da carga cinética, obtida pelo princípio da similaridade de Reynolds (Eq. 10):

$$hf_L = K_L \frac{V_o^2}{2g} \quad (10)$$

sendo: hf_L – perda de carga localizada (L); V_o – velocidade média de aproximação da corrente fluida ($L T^{-1}$); K_L – coeficiente de carga cinética ou de resistência de perfil, g – aceleração da gravidade ($L T^{-2}$). Aumentando-se a velocidade de escoamento, maiores serão as perdas localizadas, uma vez que a turbulência do fluido na passagem entre o elemento obstrutor e a parede do tubo tende a aumentar.

O coeficiente K_L depende das características geométricas da inserção do emissor e do Número de Reynolds, R . Para uma dada seção do tubo (A), vazão transportada (Q) e para uma conexão com dimensões definidas, o valor de K_L reduz-se com o aumento de R até certo limite a partir do qual mantém-se aproximadamente constante (BAGARELLO et al., 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004). Na prática, o efeito das forças viscosas é negligenciado a partir de certo valor de R (JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002 a), podendo-se relacionar K_L apenas com a geometria do elemento obstrutor, uma vez que se observa aumento de seu valor com o aumento da seção transversal obstruída (BAGARELLO et al. 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004; PALAU-SALVADOR et al., 2006).

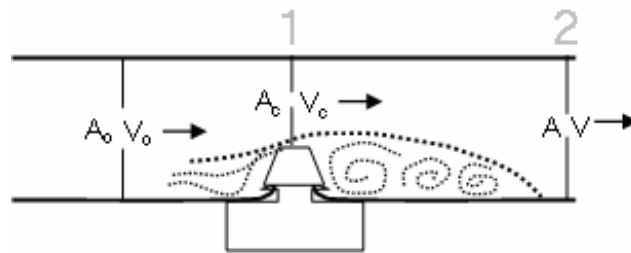


Figura 6 - Diagrama típico de uma seção longitudinal de uma tubulação contendo um emissor on-line, mostrando a Contração (seção 1) e a expansão (seção 2) do fluxo

À semelhança das análises de perda de carga localizada em alargamento brusco de tubulações (MORRIS; WIGGER, 1972) podem-se estudar as perdas localizadas nos conectores dos emissores “on-line” aplicando-se a equação de Bélanger, uma vez que ocorre uma contração e subsequente ampliação do trajeto do fluido após a conexão, induzindo turbulência local e conseqüente transformação de energia. Na Figura 6 esquematiza-se um típico modelo de contração após a seção de constrição A_c ($A_c = r A_o$), sendo os pontos 1 e 2 as respectivas seções e r a razão de obstrução.

Na Figura 6, A_c representa a área de passagem do fluido pela tubulação com emissor inserido e A representa a área de passagem do fluido pelo tubo sem emissor. Da mesma forma V_c

e V representam a velocidade. Aplicando-se os teoremas da conservação da energia e da conservação da massa entre as seções A_c e A chega-se à equação de Bélanger (Eq. 11):

$$hf_L = \frac{(V_c - V)^2}{2g} = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

Comparando-se as Eqs. (10) e (11) verifica-se que são correspondentes, pois, as velocidades V_o e V são iguais. Na Eq. (11) o fator geométrico é denominado índice de obstrução (IO):

$$IO = \left(\frac{A}{A_c} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1-r}{r} \right)^2 \quad (12)$$

sendo r a razão de obstrução ($r = A_c/A$). Uma função matemática $K = f(IO)$ pode ser ajustada de forma que o coeficiente de redução de carga cinética K_L , para cada conjunto tubo-conexão, pode ser estimado a partir da razão de obstrução. Bagarello et al. (1997) propôs uma relação matemática do tipo $K = \lambda (IO)^n$.

Al-Amound (1995) apresentou um trabalho em que, usando oito tipos diferentes de conectores “on-line”, constatou acréscimo de perda de carga nas conexões dos emissores em relação ao tubo sem emissor, tendendo a crescer com o aumento das saliências dos conectores, podendo chegar a 32%, num espaçamento de 1m entre emissores. O autor propõe que os valores de hf_L possam ser encontrados experimentalmente da seguinte forma: mede-se a perda de carga unitária em uma linha lateral sem emissor (J) e, em seguida, faz-se a mesma medida de perda de carga na linha com emissores vedados (J'). As diferenças entre os valores de perdas de carga devem ser multiplicadas pelo comprimento da linha (L) e divididas pelo número de emissores (N) conectados a ela. O resultado é a perda de carga provocada por um emissor. Esse processo pode ser representado pela Eq. (13):

$$hf_L = \frac{J' - J}{N} L \quad (13)$$

As linhas laterais de microirrigação são de polietileno flexível de baixa densidade. Conseqüentemente, devem-se esperar variações geométricas ao longo do tubo. Isto pode dificultar a obtenção de medidas exatas, especialmente àquelas relativas ao índice de obstrução

decorrente da protrusão dos conectores. Portanto, a estimativa de r deve ser feita com base estatística, usando valores médios de A_c e A . Estes valores podem ser modificados pelo efeito da pressão de operação sobre o diâmetro interno do tubo, dependendo da elasticidade do polietileno (VILELA et al. 2003).

O coeficiente de carga cinética K_L depende do tamanho e da forma da protrusão do conector e, devido à variabilidade morfológica (forma e tamanho) de fabricação, os conectores de emissores comerciais requerem investigação experimental particular.

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Descrição geral do experimento

Este trabalho foi conduzido no laboratório de irrigação do Departamento de Engenharia Rural – ESALQ/USP. No experimento, foram utilizados tubos de polietileno de baixa densidade, com diâmetros internos de 10,0 mm; 13,0 mm; 16,3 mm; 17,4 mm e 19,7 mm, com 15 m de comprimento entre os pontos de medição de pressão e com a tubulação em nível.

Para a medição da pressão diferencial utilizou-se um manômetro diferencial com coluna de mercúrio e com menor divisão de escala de 1 mm de Hg. Durante os ensaios a pressão da água na entrada tubo variou entre 150 kPa e 300 kPa e a temperatura média foi de $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas as principais características dos tubos e conectores ensaiados.

Tabela 1- Principais características dos tubos utilizados no experimento

Diâmetro nominal (DN)	Pressão nominal (PN)	Fabricante ¹	Espessura da parede (mm)	Diâmetro interno (mm)	Geometria da seção	Superfície interna
12	20	Plasnova	0,826	10,00	levemente elíptica	Lisa e polida
15	40	Plasnova	1,180	13,0	elíptica	Lisa e polida
18	20	Plasnova	0,832	16,3	levemente elíptica	Lisa e polida
20	40	Plasnova	1,320	17,4	circular	Lisa e polida
22	40	Plasnova	1,540	19,7	circular	Lisa e polida

¹ O uso de produtos ou marcas registradas tem a finalidade exclusiva de facilitar a compreensão.

A vazão foi controlada por um registro de gaveta acoplado no final da tubulação e medida por um medidor de vazão eletromagnético, modelo KC1000, associado a um conversor de sinais IFC010, ambos fabricados pela Controles Automáticos Ltda (CONAUT). De acordo com as informações do fabricante, esse aparelho apresenta capacidade de leitura de $2,78 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (1L h^{-1}) e precisão de $\pm 0,14\%$ para vazões compreendidas entre $5,56 \times 10^{-5}$ e $5,56 \times 10^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (200 a 2000 L h^{-1}).

Uma bomba elétrica foi usada para impulsionar a água no circuito a partir de um reservatório subterrâneo existente no laboratório.

Tabela 2 - Característica dos emissores utilizados no experimento, conforme é apresentado pela Figura 5

Tipo - Modelo / Fabricante ¹	C ₁ - Spray Microjet / Plasnova	C ₂ - Conector para Microtubo / Amanco	C ₃ - Click Tif-PC / NaanDan	C ₄ -Katif / Plastro
a (mm)	3,932	3,368	3,006	2,142
b (mm)	3,186	5,070	6,125	5,187
c (mm)	3,254	4,949	3,499	2,636
d (mm)	4,360	4,417	4,989	6,505
e (mm)	1,627	1,525	1,129	0,962
Volume (mm ³)	61,893	86,980	89,250	122,778
Área Transversal (mm ²)	19,700	23,590	26,500	31,630

¹O uso de produtos ou marcas registradas tem a finalidade exclusiva de facilitar a compreensão.

Na figura 7, são representados na parte superior, da esquerda para a direita, os conectores C₁, C₂ e na parte inferior, da esquerda para a direita, os conectores C₃ e C₄, todos instalados num tubo de polietileno de diâmetro interno de 17,4 mm.

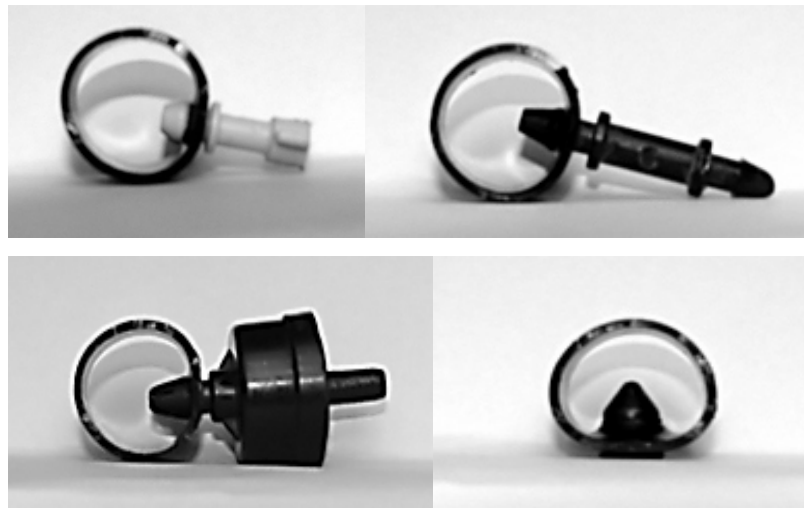


Figura 7 – Conectores C₁, C₂, C₃ e C₄ instalados num tubo de 17,4 mm de diâmetro

Os diâmetros internos dos tubos foram medidos pelo método volumétrico e conferidos com as medidas realizadas em projetor ótico, modelo HB400-2, fabricado pela Starret Precision Optical. A espessura da parede dos tubos, utilizando-se amostras de 10 anéis, e as dimensões características dos conectores, foram medidas no projetor de perfil ótico.

Para se caracterizar a geometria de um conector “on-line”, Bagarello et al. (1997) sugerem que sejam obtidas as dimensões da conexão como se apresenta na Figura 5.

Em cada vazão, a leitura de pressão diferencial foi feita ao final de 4 minutos após a estabilização da coluna de mercúrio. As medições de pressão diferencial foram realizadas com vazões crescentes. Foram catalogados os dados de vazão e pressão diferencial correspondentes à média de três leituras. Para a tubulação em nível, considerou-se a perda de carga no tubo como sendo a diferença de pressão entre as duas extremidades distantes de 15 m. Os emissores foram instalados com um espaçamento de 0,5 m, de tal forma que os 15 m de tubo, continham 29 emissores.

3.2 Determinação da perda de carga distribuída e do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach

Nesta primeira etapa, os testes laboratoriais foram realizados em tubulações sem emissores. A perda de carga observada foi analisada em função da vazão utilizando-se um modelo tipo potência, na forma da Eq. (14):

$$J = k Q^n \quad (14)$$

sendo J – perda de carga unitária ($L L^{-1}$); Q – vazão ($L^3 T^{-1}$); k e n constantes. Para facilitar a comparação com a equação de Darcy-Weisbach, com f calculado pela equação de Blasius, também foram ajustadas equações com $n = 1,75$.

Para a determinação do fator de atrito f foi utilizada a Eq. (2), explicitando-se f em função de J , $V_o^2/2g$ e D , que são quantidades conhecidas. Por análise de regressão ajustou-se uma equação potência semelhante à Eq. (5). Para facilitar a comparação dos valores de f obtidos experimentalmente com os obtidos pela equação de Blasius, foram ajustados valores da constante c para obter uma equação com $m = 0,25$. Um valor médio do expoente c foi obtido por análise de regressão linear entre os valores de f observados e $R^{-0,25}$.

Com a determinação do fator de atrito em função do número de Reynolds, obteve-se uma equação semelhante à Eq. (6) com o objetivo de generalizar uma equação de perda de carga distribuída para todos os diâmetros dos tubos experimentados.

Para aferir a concordância entre os valores de J e f observados com os valores estimados pela equação de Darcy-Weisbach e pela equação de Blasius, respectivamente, utilizou-se o índice de ajuste (d) proposto por Willmott (1981). Este é um índice de exatidão. As fórmulas utilizadas para o cálculo do índice d foram as seguintes:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_o} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_o} (|P_i^*| + |O_i^*|)^2} \quad (15)$$

$$P_i^* = P_i - O_i \quad (16)$$

$$O_i^* = O_i - \bar{O} \quad (17)$$

sendo: d – índice de concordância de Willmoth, adimensional, variando entre 0 e 1; o valor 1 denota completo ajustamento entre os valores de J e f observados e estimados e 0 a condição oposta; P_i – valores de J e f estimados pela equação de Darcy-Weisbach com f de Blasius; O_i – valores de J e f observados; \bar{O} – média dos valores de J e f observados, e n_o – número de observações.

Para inferir sobre a precisão das estimativas em relação aos valores observados, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) [Eq. (18)]. A hierarquização das estimativas foi feita com base nos valores do índice de confiança de Camargo (IC) conforme apresentado por Camargo e Sentelhas (1997), que consiste do produto entre d e r .

$$r = \frac{n_o \left(\sum_{i=1}^{n_o} S_i O_i \right) - \left(\sum_{i=1}^{n_o} S_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n_o} O_i \right)}{\left\{ \left[\left(n_o \sum_{i=1}^{n_o} S_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^{n_o} S_i \right)^2 \right] \left[\left(n_o \sum_{i=1}^{n_o} O_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^{n_o} O_i \right)^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (18)$$

3.3 Determinação da perda de carga no tubo com emissores e acréscimo de perda de carga

Nesta segunda etapa do experimento, inseriu-se emissores vedados nas tubulações e mediu-se as perdas de carga, que correspondem as perdas distribuídas nos tubos mais as localizadas nos emissores conectados.

A perda de carga observada foi analisada em função da vazão utilizando-se um modelo tipo potência, na forma da Eq. (19):

$$J' = k' Q^{n'} \quad (19)$$

sendo J' – perda de carga unitária no tubo com emissores vedados ($L L^{-1}$); Q – vazão ($L^3 T^{-1}$); k' e n' constantes. Todas as equações geradas nesta etapa do experimento foram ajustadas por regressão linear, com $n' = 1,75$, compatível com a equação de Darcy-Weisbach com f de Blasius, como se observa na Eq (6) .

Os acréscimos de perda de carga (%) foram obtidos na forma $\Delta J = [(J' - J)/J].100$, sendo J' a perda de carga no tubo com emissores vedados, obtido pela Eq. (19) e J a perda de carga distribuída no tubo sem emissores, obtido pelo valor da equação geral de perda de carga distribuída, semelhante à Eq (6), considerando a velocidade média de escoamento de $1,5 \text{ ms}^{-1}$.

3.4 Determinação da perda de carga localizada e do coeficiente de carga cinética

Utilizou-se a Eq (13), para determinar as perdas de carga localizadas, para todos os modelos de conectores.

O coeficiente de carga cinética (K_L) foi obtido através de regressão linear entre hf_L e $V_o^2/2g$, obteve-se a seguinte expressão:

$$hf_L = K_L \left(\frac{V_o^2}{2g} \right) \quad (20)$$

onde: hf_L – perda de carga localizada (L); K_L – coeficiente de carga cinética; V – velocidade média do fluido ($L.T^{-1}$); g – aceleração da gravidade ($L.T^{-2}$). Pela Eq. (20), K_L representa um valor médio da variação.

3.5 Determinação do índice de obstrução

Na Figura 6, tem-se uma representação de um emissor conectado sobre uma linha lateral, onde A_c , e V_c são, respectivamente, a área de passagem do fluido e a velocidade no momento que o fluido passa pelo conector e A , e V as mesmas variáveis quando o fluido passa pelo tubo sem conector.

Aplicação o teorema de Bernoulli ao escoamento ilustrado na Figura 6, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{V_c^2}{2g} + \frac{P_c}{\gamma} &= \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + hf_L \\ hf_L &= \frac{V_c^2}{2g} - \frac{V^2}{2g} + \frac{P_c}{\gamma} - \frac{P}{\gamma} \\ hf_L &= \frac{V_c^2}{2g} - \frac{V^2}{2g} - \left(\frac{P}{\gamma} - \frac{P_c}{\gamma} \right) \end{aligned} \quad (21 \text{ a})$$

Pela segunda lei de Newton, tem-se:

$$F = m.a$$

Como:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho.V$$

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta T} \Rightarrow \Delta V = Q.\Delta T$$

Então:

$$m = \rho Q \Delta T$$

Como a aceleração é dada por:

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

a segunda lei de Newton resulta em:

$$F = \rho Q \Delta T. \frac{\Delta V}{\Delta T} = \rho Q \Delta V \Rightarrow F = \rho Q (V_c - V) \quad (21 \text{ b})$$

A diferença de pressão que ocorre na passagem do fluido da secção 1 para a 2, conforme ilustra a Figura 6, é dada por:

$$P = \frac{F}{A} \Rightarrow F = (P - P_c).A$$

Portanto:

$$(P - P_c).A = \rho Q(V_c - V)$$

$$\frac{P - P_c}{\rho} = \frac{Q}{A}(V_c - V) \quad (21 \text{ c})$$

Dividindo os dois lados da Eq. (21 c) pela aceleração da gravidade e considerando a relação da equação da continuidade:

$$\frac{P - P_c}{\gamma} = \frac{2}{2g} V(V_c - V) \quad (21 \text{ d})$$

Substituindo-se a expressão (21 d) em (21 a) e (21 b), tem-se:

$$hf_L = \frac{V_c^2}{2g} - \frac{V^2}{2g} - \frac{2V}{2g}(V_c - V)$$

$$hf_L = \frac{V_c^2 - V^2 - 2V_c V + 2V^2}{2g}$$

$$hf_L = \frac{(V_c - V)^2}{2g} = \frac{(V_c - V)^2}{V^2} \frac{V^2}{2g} = \left(\frac{V_c - V}{V}\right)^2 \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$hf_L = \left(\frac{V_c}{V} - 1\right)^2 \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Pela equação da continuidade, tem-se:

Assim:

$$hf_L = \left(\frac{A}{A_c} - 1\right)^2 \cdot \frac{V_o^2}{2g}$$

Como:

$$r = \frac{A_c}{A} \Rightarrow \frac{A}{A_c} = \frac{1}{r}$$

Temos finalmente que:

$$hf_L = \left(\frac{1}{r} - 1\right)^2 \frac{V^2}{2g} = \left(\frac{1-r}{r}\right)^2 \frac{V^2}{2g}$$

Assim:

$$K_L = \left(\frac{1-r}{r}\right)^2 = IO$$

Sendo IO denominado índice de obstrução.

Para o cálculo do IO , mediu-se as áreas internas dos tubos e as áreas transversais dos conectores pelo projetor de perfil ótico, conforme são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

Relacionando-se os valores de K_L , de cada combinação tubo-conector, com os valores de IO referentes às mesmas combinações, a seguinte expressão pôde ser ajustada:

$$K_L = \lambda(IO)^7 \quad (22)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perdas de carga distribuídas nos tubos

Na Figura 8 estão apresentadas as perdas de carga observadas nos tubos de polietileno, obtidas em experimentos de laboratório, ajustadas em função da vazão. Para todos os tubos as equações apresentaram coeficientes de determinação da regressão superiores a 0,9995. Os resultados foram obtidos para números de Reynolds (R) entre 5000 e 6800 e velocidades média de escoamento entre 0,51 e 3,45 m s⁻¹.

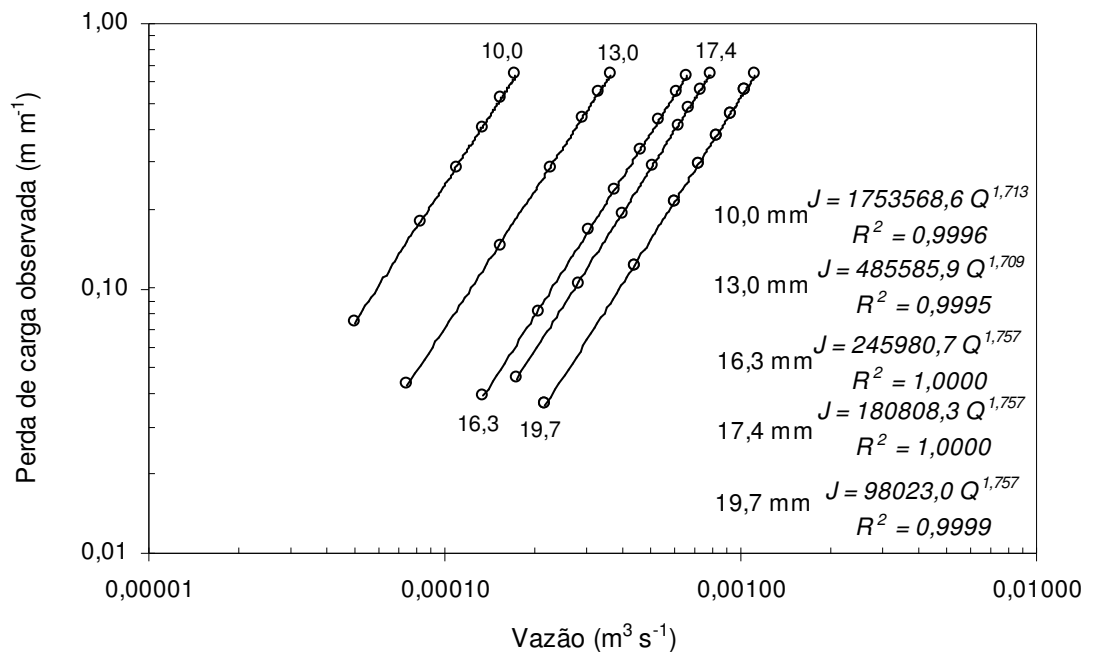


Figura 8 – Perda de carga distribuída nos tubos, obtidas em ensaios de laboratório, em função da vazão

Observa-se na Tabela 3 que as perdas de carga determinadas com os valores observados foram, em geral, menores que aquelas calculadas pela equação de Darcy-Wiesbach com f calculado pela equação de Blasius, exceto para o diâmetro de 10,0 mm. O maior desvio médio entre os valores experimentais e os calculados pela equação de Darcy-Wiesbach com f de Blasius foi 9,52%, para o diâmetro de 16,3 mm, e o menor -0,12% para o diâmetro de 10,0 mm, com média geral de 5,39%, sendo que 42% dos desvios foram inferiores a 5%. Esses desvios são

considerados aceitáveis por Von Bernuth e Wilson (1989), von Bernuth (1990), Bagarello et al. (1995) e Alves (2000). As menores perdas de carga observadas na maioria dos tubos analisados, em relação à perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, com f de Blasius, podem ser explicadas pelo aumento de diâmetro dos tubos de polietileno quando pressurizados, conforme mostram Frizzone; Vieira e Paz (1988) e Vilela et al. (2003). Bagarello et al. (1995) atribuem esse efeito também ao fato de as paredes internas dos atuais tubos de polietileno serem mais lisas que os tubos de Prandtl utilizados por Blasius quando propôs o coeficiente $c = 0,316$.

Tabela 3 - Diferenças médias percentuais entre as perdas de carga estimadas pelos resultados observados e as perdas de carga calculadas pela equação de Darcy-Weisbach e f por Blasius

Comparações ⁽¹⁾	Diâmetros internos (mm)					Média
	10,0	13,0	16,3	17,4	19,7	
	Variações percentuais em $J^{(2)}$					
J_{OBS} versus J_{DWB}	- 0,12	6,27	9,52	4,69	6,57	5,39
$J_{n=1,75}$ versus J_{DWB}	0,48	7,16	9,10	3,93	5,86	5,31

⁽¹⁾ J_{OBS} – perda de carga estimada pela equação ajustada com os dados observados; J_{DWB} – perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach com f calculado pela equação de Blasius; $J_{n=1,75}$ – perda de carga estimada pela equação ajustada com os dados experimentais utilizando $n = 1,75$.

⁽²⁾ Para J_{OBS} versus $J_{DWB} = (J_{DWB} - J_{OBS})/J_{DWB}$; Para $J_{n=1,75}$ versus $J_{DWB} = (J_{DWB} - J_{n=1,75})/J_{DWB}$.

Na figura 9 apresentam-se a perdas de carga nos tubos ajustadas com expoente da vazão $n = 1,75$, obtendo-se coeficientes de determinação da regressão superiores a 0,9996. O máximo desvio médio da perda de carga ajustada em relação à calculada por Darcy-Wiesbach com f de Blasius foi 9,10% (para o tubo de 16,3 mm) e o menor 0,48% (para o tubo de 10,0 mm), com média 5,31% (Tabela 3), sendo que 55% dos desvios foram inferiores a 5%. Nesse caso, a equação de Darcy-Weibach com f calculado por Blasius apresentou valores conservadores para todos os diâmetros analisados, entretanto as diferenças nas estimativas podem ser consideradas aceitáveis para os propósitos práticos.

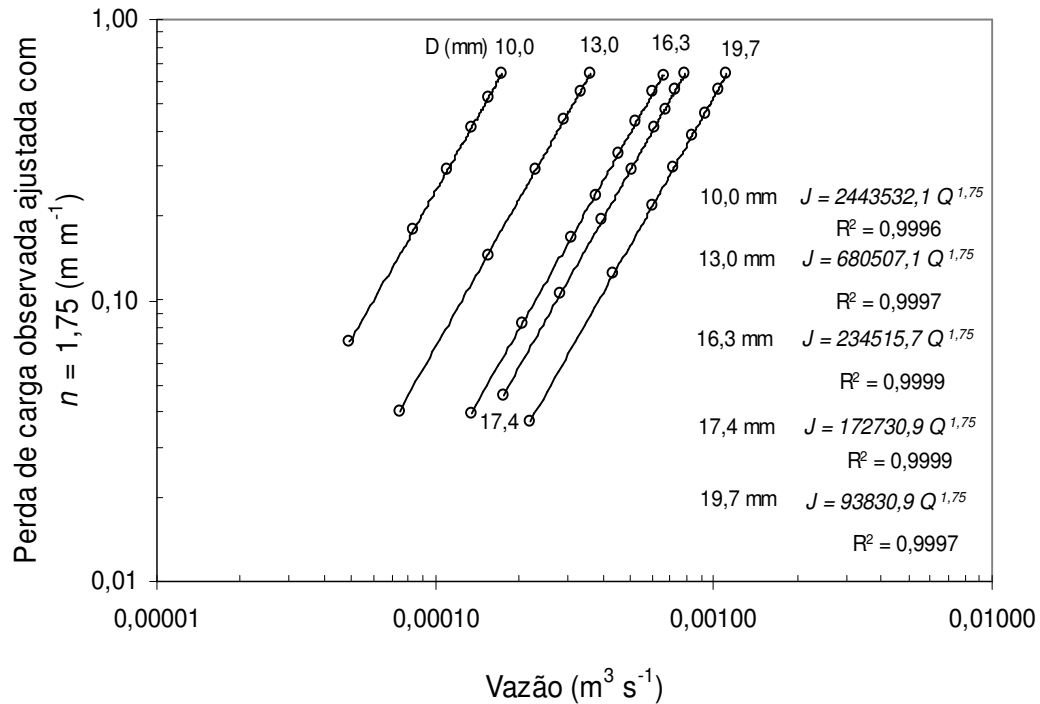


Figura 9 - Perda de carga observada, ajustada com $n = 1,75$, em função da vazão para os diferentes diâmetros de tubos

Na Figura 10 apresenta-se a concordância entre as perdas de carga calculadas pela equação de Darcy-Weibach com o fator de atrito (f) calculado pela equação de Blasius e as perdas de carga observadas ajustadas com $n = 1,75$. Verifica-se uma proximidade aceitável entre os valores de perda de carga. Um índice de desempenho estatístico superior a 0,85 é considerado “ótimo” segundo Camargo e Sentelhas (1997). O valor de $IC = 0,9850$ indica, portanto, excelente precisão e exatidão nas estimativas das perdas de carga, embora o modelo proposto por Darcy-Wiesbach com f de Blasius superestimou os valores para a maioria dos tubos estudados.

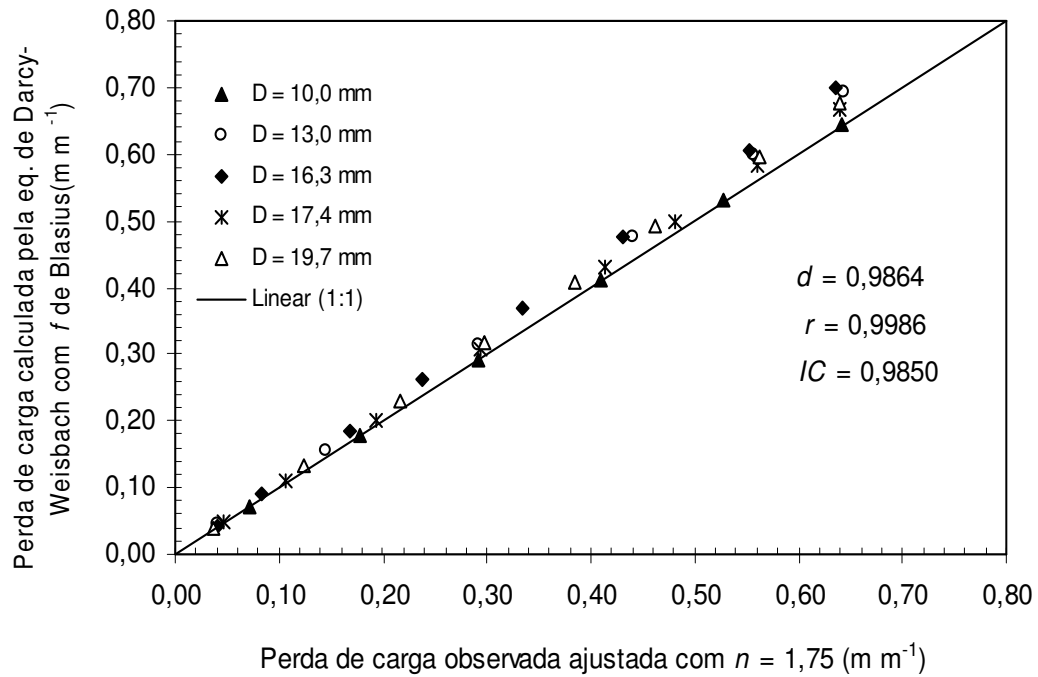


Figura 10 - Concordância entre a perda de carga observada, ajustada com $n = 1,75$, e a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando f calculado pela equação de Blasius

4.2 Fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach

Na Figura 11 está apresentada a curva de f em função de R para os dados experimentais. Considerando todos os diâmetros analisados, o valor de m foi 0,273, enquanto este valor é 0,25 na equação de Blasius, 0,25 na equação de Bagarello et al. (1995) e 0,2657 nos ajustes realizados por Alves (2000). O valor c foi 0,377 contra 0,316 na equação de Blasius, 0,302 na equação de Bagarello et al. (1995) e 0,3443 proposto por Alves (2000). Bagarello (1995) desenvolveu por um procedimento semi-teórico uma relação de c em função de R . Entretanto, os resultados deste experimento mostram que c praticamente independe do número de Reynolds (Figura 12), tendo-se obtido um valor médio de 0,377 e um coeficiente de variação (CV) de 3,32%.

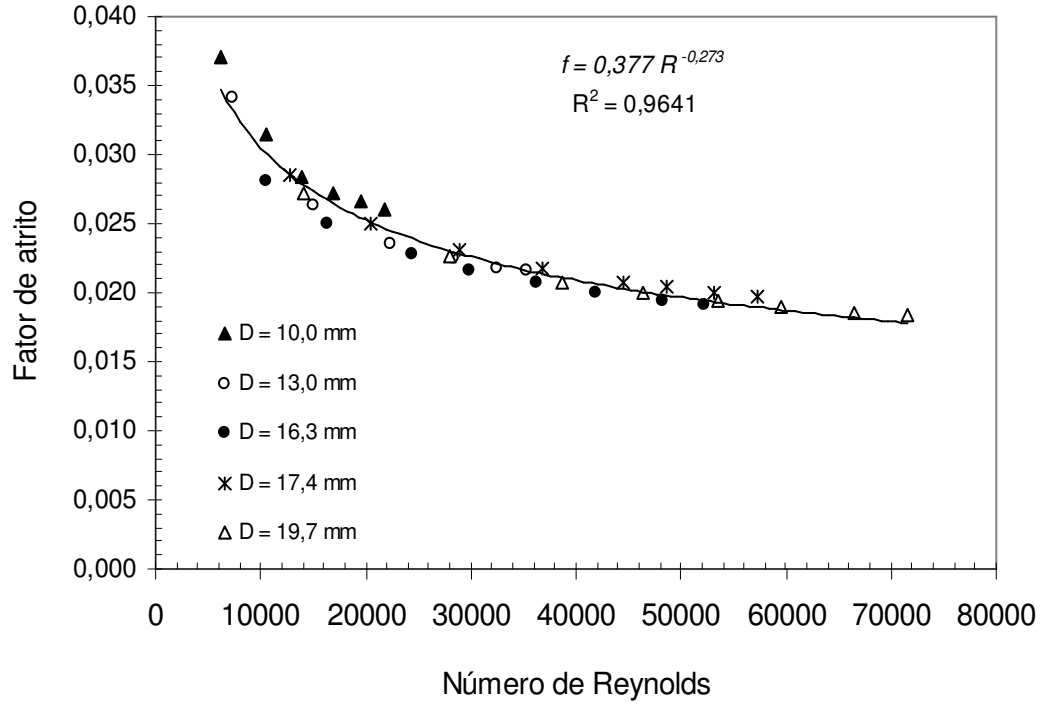


Figura 11 – Fator de atrito (f) ajustado em função do número de Reynolds (R)

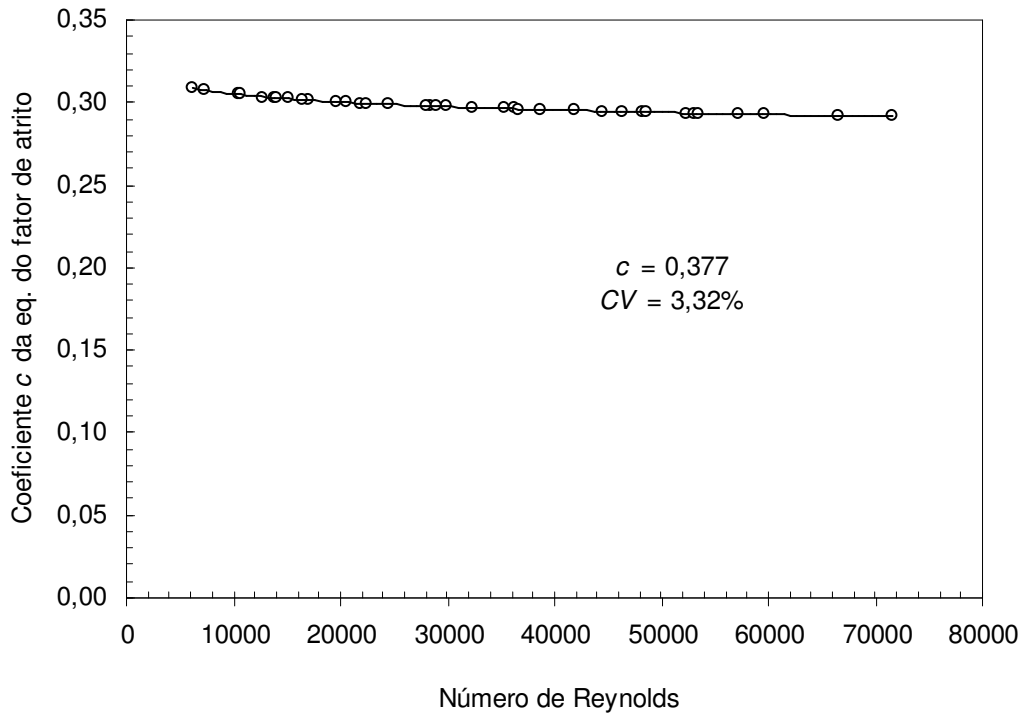


Figura 12 – Variação do coeficiente c em função do número de Reynolds (R)

Fixando-se o $m = 0,25$, determinou-se um valor de c igual a $0,300$ (Figura 13), enquanto Von Bernuth e Wilson (1989) encontraram um valor de $0,345$ para tubos de PVC, Alves (2000) um valor de $0,295$ para tubos de polietileno e Bagarello et al. (1995) $0,302$ também para tubos de polietileno contra $0,316$ utilizado na equação de Blasius. Todos os pares (R, f) das funções ajustadas localizam-se abaixo da curva de Blasius (Figura 13), concordando com as observações feitas por Bagarello et al. (1995) e Alves (2000). Este fato pode ser justificado pelo aumento de diâmetro dos tubos de polietileno quando submetidos à pressão (Vilela et al. 2003) e porque os atuais tubos de polietileno apresentam paredes internas mais lisas e polidas que os tubos utilizados por Blasius, conforme justificam Bagarello et al. (1995). Entretanto, há evidências de que a causa mais significativa seja o aumento do diâmetro dos tubos de polietileno de baixa densidade em função da pressão.

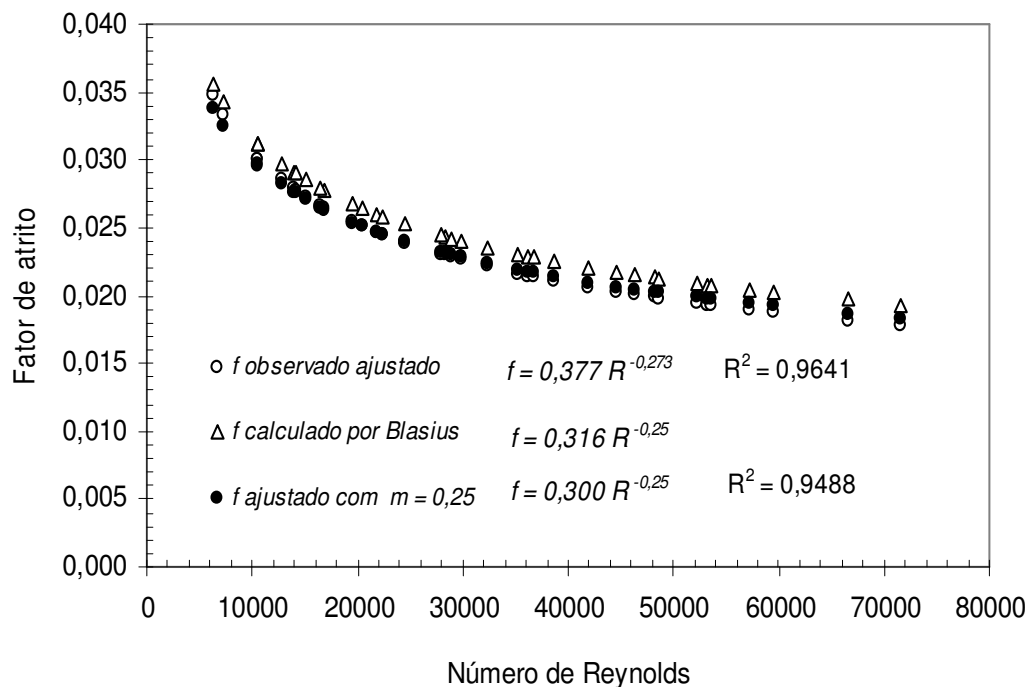


Figura 13 - Curvas do fator de atrito (f) em função do número de Reynolds (R), pelo ajuste aos dados experimentais, pela equação de Blasius e pelo ajuste aos dados experimentais com $m = 0,25$

Nas Figuras 14 e 15 mostra-se a concordância entre os valores de f calculados pela equação de Blasius e os valores experimentais e os ajustados com $m = 0,25$. Os valores observados estão distribuídos, na maioria dos casos, acima da reta 1:1, exceto para o diâmetro de $10,0$ mm (Figura 14), indicando que a equação de Blasius foi conservadora na estimativa dos valores de f para os

diâmetros superiores a 10,0 mm. Verifica-se também que os valores de f ajustados com $m = 0,25$ estão mais próximos daqueles calculados pela equação de Blasius, porém sempre inferiores a estes (Figura 15). A maior diferença percentual entre os valores de f observados e os valores de f de Blasius foi de 10,26% e a menor foi 0,20%, sendo em média 5,6%, e 42% das diferenças foram inferiores a 5%. Já, a diferença média entre os valores de f calculados por Blasius e f calculados pela equação ajustada com $m = 0,25$ foi 5,1%. Para ambos os casos o índice IC apresentou alto valor, indicando concordância estreita entre os valores de f observados e ajustados com $m = 0,25$ ao modelo de Blasius. Por estes resultados pode-se indicar como melhor alternativa para o cálculo do fator de atrito nos tubos analisados a equação: $f = 0,300 R^{-0,25}$, concordando com os estudos experimentais e semi-teóricos conduzidos por Bagarello et al. (1995) que os levaram a propor $c = 0,302$.

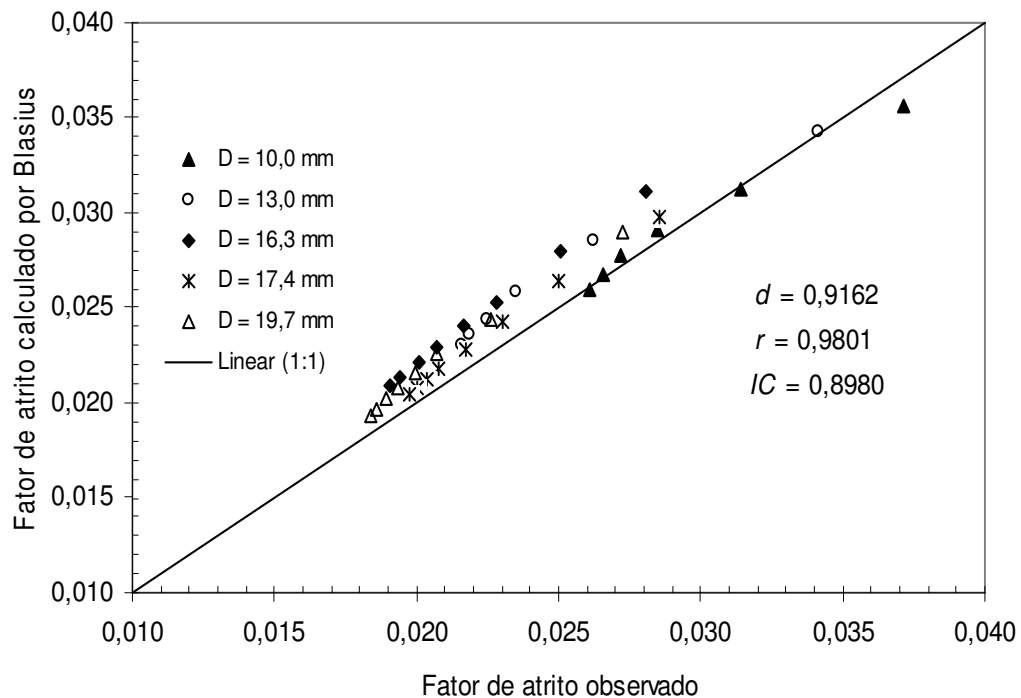


Figura 14 - Concordância entre os valores de f observados e os valores calculados pela equação de Blasius

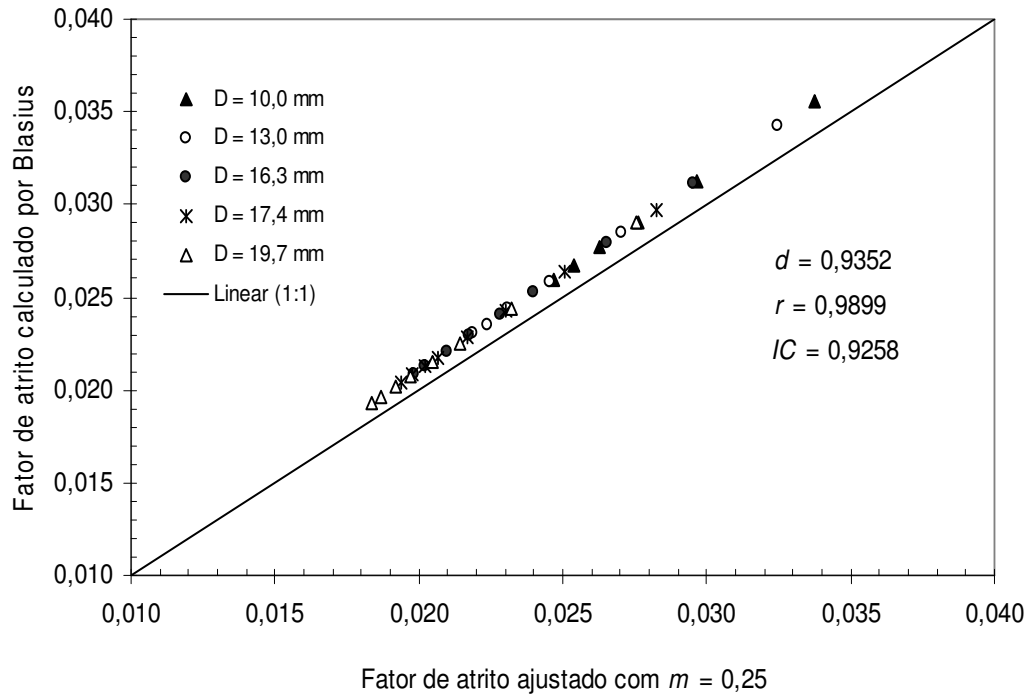


Figura 15 - Concordância entre os valores de f ajustados com $m = 0,25$ e os valores calculados pela equação de Blasius

Utilizando-se $c = 0,300$ e $m = 0,25$, o fator de atrito (f) pode ser determinado como $f = 0,300 R^{-0,25}$ e a equação de perda de carga distribuída de Darcy-Weisbach pode ser representada da seguinte forma:

$$J = 2,334 \cdot 10^{-2} \nu^{0,25} Q^{1,75} D^{-4,75} \quad (23)$$

sendo J a perda de carga distribuída no tubo (m m^{-1}), ν a viscosidade cinemática da água, como uma função da temperatura ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), Q a vazão escoada no tubo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e D o diâmetro interno do tubo (m). Comparando-se a constante da Eq. (23) com a constante da equação de Darcy-Wiesbach ($2,458 \times 10^{-2}$) utilizando f de Blasius, constata-se que a Eq. (23) fornece valores de perda de carga 5% menores.

4.3 Perda de carga no tubo com emissores vedados e acréscimo de perda de carga

Na Tabela 4 são apresentadas as perdas de carga unitárias, determinadas para os cinco diâmetros selecionados, combinados com os quatro modelos de conectores instalados nos tubos. Verifica-se que em todos os diâmetros prevalece a mesma tendência para a perda de carga e os tubos com conector C_4 apresentam maior perda de carga, sendo a seguinte ordem geral: $C_4 > C_3 > C_2 > C_1$. Essa ordenação está de acordo com as áreas dos conectores, confirmando que quanto maior a geometria de encaixe do emissor, maior é a perda de carga provocada pelo mesmo.

As equações de perdas de carga observadas cujos coeficientes são apresentados na Tabela 4, foram ajustadas para um expoente $n = 1,75$, mantendo-se a mesma característica da Eq. (23). A vazão está expressa em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e a perda de carga unitária em m m^{-1} .

O acréscimo de perda de carga provocada pela conexão dos emissores, em relação a tubulação sem emissores, para todas as combinações conector-tubo foi calculado para a velocidade de escoamento de $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Observa-se que para todos os diâmetros, os maiores acréscimos ocorreram para o conector C_4 , que possui maior área de protrusão ($31,63 \text{ mm}^2$). O menor acréscimo (10,5%) ocorreu para o diâmetro de 19,7 mm com o conector C_1 (área de protrusão = $19,70 \text{ mm}^2$).

Al-Amoud (1995) realizou um estudo utilizando oito tipos de emissores “on-line” inseridos com espaçamento de 1 m em cinco tubos de polietileno com diâmetros diferentes. Os resultados indicaram significativos acréscimos de perda de carga em função das áreas de protrusão das conexões. Um acréscimo de perda de carga superior a 32% foi verificado para o tubo de 13,0 mm de diâmetro com emissor cuja área de protrusão da conexão foi de $27,00 \text{ mm}^2$ e para um tubo de 18 mm com o mesmo emissor, o acréscimo foi superior a 13%.

Verifica-se, portanto, que a perda de carga localizada na protrusão dos conectores cresce em função do aumento do grau de obstrução que o conector causa na tubulação. Howell e Barinas (1980) também analisaram as perdas de carga localizadas em conexões de emissores sobre um tubo de 13,0 mm de diâmetro e sugeriram uma equação para estimar a perda de carga localizada em termos de comprimento equivalente, entretanto seus estudos foram baseados apenas em um diâmetro de 13,0 mm.

Acréscimos da perda de carga da ordem de grandeza daqueles apresentados na Tabela 4 são expressivos e não podem ser negligenciados nos projetos de microirrigação. Na Figura 16

representam-se os acréscimos de perda de carga nos tubos devidos aos conectores em função da área de protrusão para os cinco diâmetros analisados. Observa-se que para todos os diâmetros o acréscimo de perda de carga em função da área de protrusão aumentou aproximadamente segundo um modelo potencial. Mantendo-se a área de protrusão, o efeito relativo da conexão sobre o acréscimo de perda de carga também aumenta de forma potencial à medida que reduz o diâmetro do tubo, como ocorreu nas análises realizadas por Al-Amoud (1995).

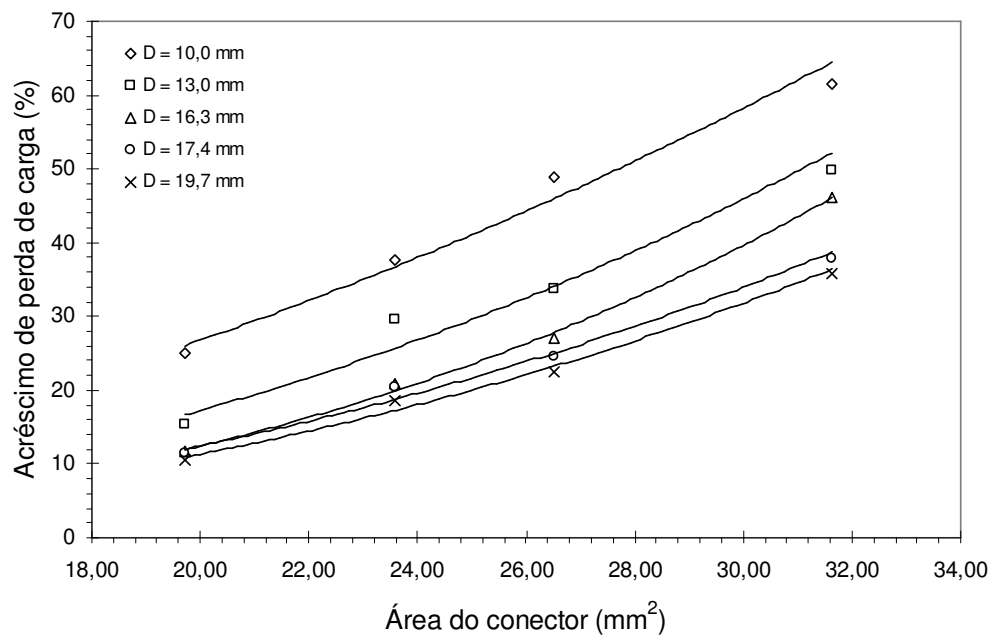


Figura 16 – Acréscimos de perda de carga em tubos com conectores de emissores inseridos em espaçamento de 0,5 m, em relação aos tubos sem conectores, em função da área de protrusão dos conectores, para uma velocidade média de escoamento de $1,5 \text{ m s}^{-1}$

No Anexo A, Figuras 22, 23, 24, 25 e 26 estão apresentados os gráficos de perda de carga observada, ajustados em função da vazão para $n' = 1,75$. Observa-se que todos os ajustes proporcionaram altos coeficientes de determinação para a regressão.

Tabela 4 - Coeficientes da equação de perda de carga unitária nos tubos de polietileno (J em m^{-1}) em função da vazão (Q em $m^3 s^{-1}$), com conectores instalados, considerando $n = 1,75$ e acréscimo de perda de carga em relação, ao tubo sem conectores

Diâmetros internos (mm)	Conectores	Área de protrusão (mm^2)	Parâmetro k' da eq. $J' = k' Q^{n'}$ ($n' = 1,75$)	R^2	Acréscimo de perda de carga (%)
$D_1 = 10,0$	C ₁	19,70	2925926,9	0,9997	25,1
	C ₂	23,59	3219434,7	0,9998	37,6
	C ₃	26,50	3479912,3	0,9996	48,8
	C ₄	31,63	3777489,2	0,9985	61,5
$D_2 = 13,0$	C ₁	19,70	778260,5	0,9994	15,3
	C ₂	23,59	874964,6	0,9976	29,6
	C ₃	26,50	903177,9	0,9977	33,8
	C ₄	31,63	930856,8	0,9972	49,7
$D_3 = 16,3$	C ₁	19,70	258896,1	0,9997	11,7
	C ₂	23,59	280262,7	0,9994	20,9
	C ₃	26,50	294403,8	0,9999	27,0
	C ₄	31,63	338598,0	0,9988	46,1
$D_4 = 17,4$	C ₁	19,70	190106,4	0,9996	11,5
	C ₂	23,59	205342,7	0,9991	20,4
	C ₃	26,50	212415,5	0,9993	24,6
	C ₄	31,63	235126,5	0,9993	37,9
$D_5 = 19,7$	C ₁	19,70	104464,1	0,9994	10,5
	C ₂	23,59	112235,9	0,9990	18,7
	C ₃	26,50	115890,1	0,9991	22,6
	C ₄	31,63	128464,7	0,9991	35,9

4.4 Perda de carga localizada nas conexões de emissores

4.4.1 Coeficiente de carga cinética

Na Tabela 5 estão apresentados os valores médios dos coeficientes de carga cinética (K_L) da equação geral de perda de carga localizada.

No Anexo B, as Figuras 27, 28, 29 e 30 estão apresentando os gráficos de perda de carga localizada em função da carga cinética, nos quatro modelos de conexões sobre cinco diâmetros de tubos. Os valores de K_L diminuem com o aumento do diâmetro interno do tubo para um mesmo modelo de conexão. Para um mesmo diâmetro, o valor de K_L aumenta com o aumento da área de protrusão do conector. O maior valor de K_L (0,8154) ocorreu para o conector C_4 (área de protrusão $31,63 \text{ mm}^2$) sobre o tubo de 10,0 mm de diâmetro. O menor valor (0,0533) ocorreu para o conector C_1 (área de protrusão $19,70 \text{ mm}^2$) sobre o tubo de 19,7 mm de diâmetro. Dessa forma, pode-se observar que o valor de K_L aumenta com o grau de obstrução que o conector causa na tubulação.

A perda de carga localizada para diferentes conjuntos tubo-conector foi determinada em função do número de Reynolds. Para cada conjunto estas perdas foram convertidas em coeficientes de carga cinética (K_L). Nas Figuras 17, 18, 19 e 20 são apresentados os valores de K_L em função do número de Reynolds. Observa-se que os valores de K_L diminuem com o aumento do número de Reynolds, entretanto, para R superior a aproximadamente 20000, para a maioria dos diâmetros analisados, o coeficiente de carga cinética variou muito pouco. Bagarello et al. (1997) verificaram que K_L foi praticamente independente do número de Reynolds, para valores de R superiores a 10000, para um dado sistema tubo-conector, sugerindo que K_L pode ser caracterizado por um valor médio.

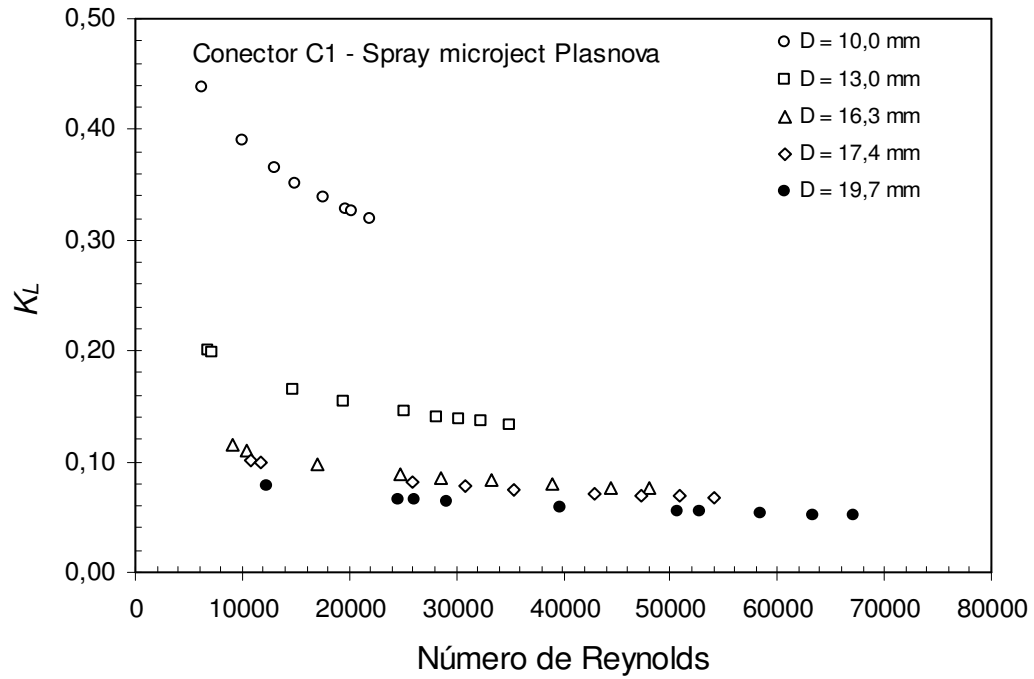


Figura 17 – Variação do coeficiente de carga cinética em função do número de Reynolds para o conector C₁

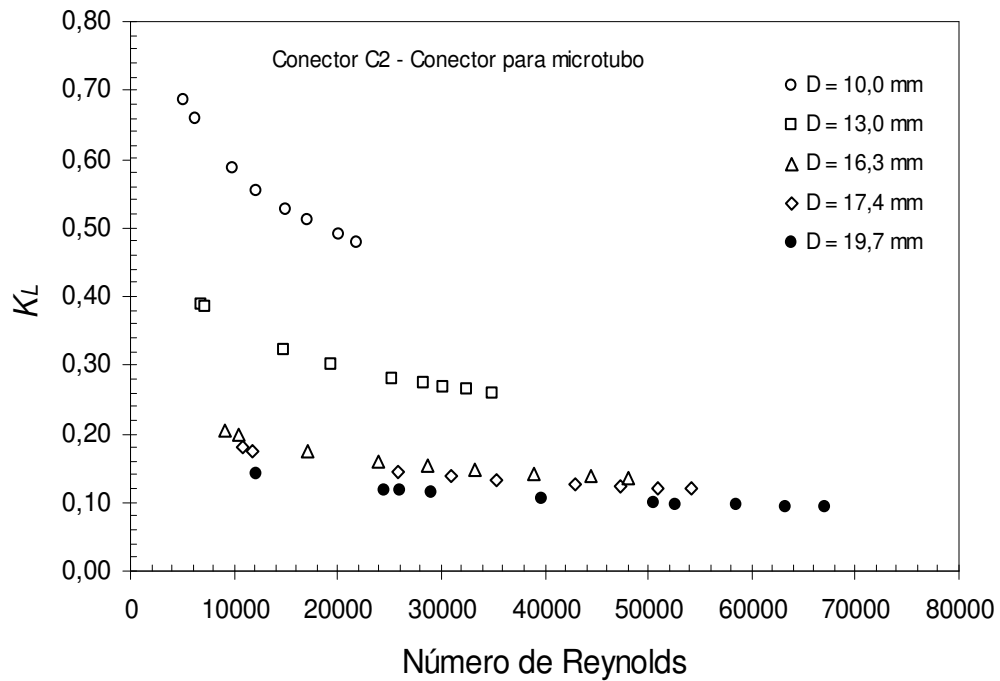


Figura 18 – Variação do coeficiente de carga cinética em função do número de Reynolds para o conector C₂

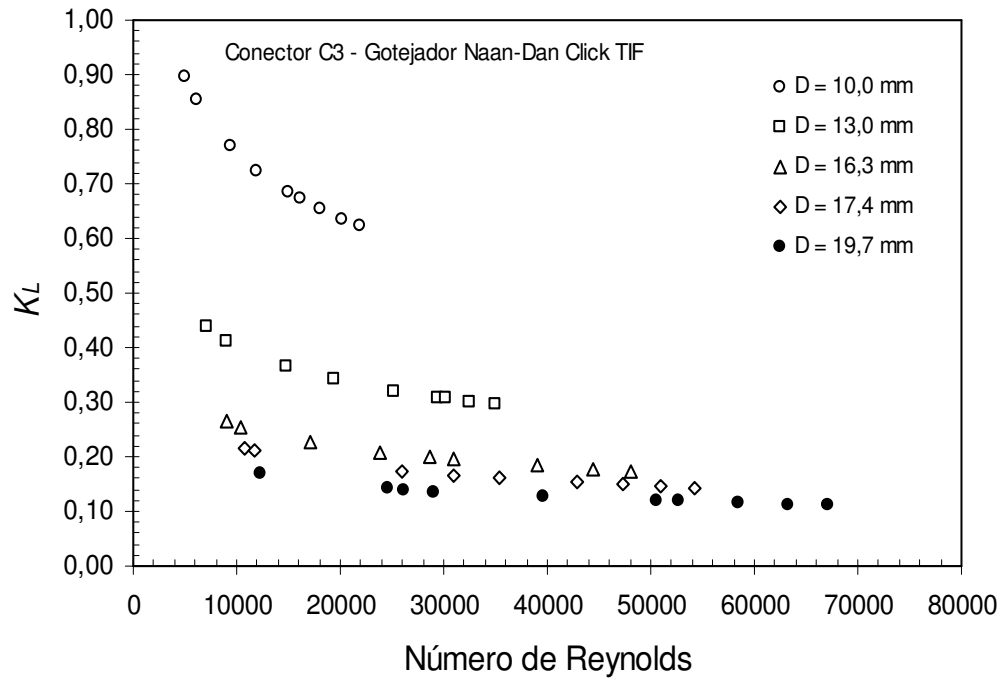


Figura 19 – Variação do coeficiente de carga cinética em função do número de Reynolds para o conector C₃

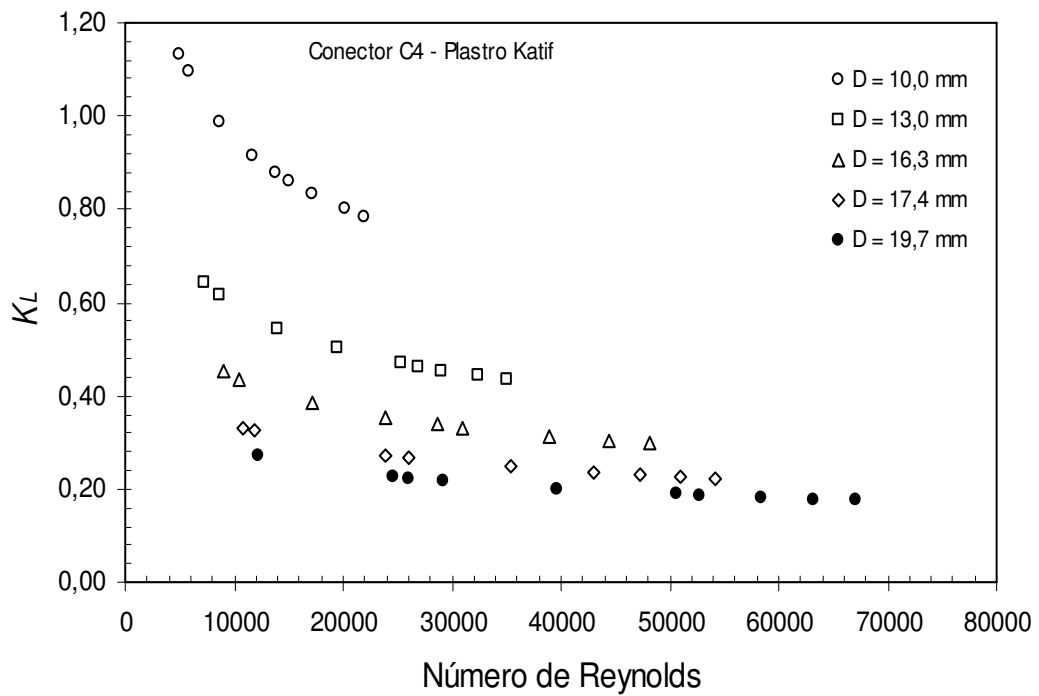


Figura 20 – Variação do coeficiente de carga cinética em função do número de Reynolds para o conector C₄

Tabela 5 – Coeficientes de carga cinética da equação geral de perda de carga localizada para quatro modelos conexões sobre cinco diâmetros de tubos de polietileno

Conector	Diâmetro interno (mm)	Coeficiente de carga cinética K_L	R^2
C ₁	10,0	0,3306	0,9913
	13,0	0,1378	0,9942
	16,3	0,0783	0,9926
	17,4	0,0695	0,9933
	19,7	0,0533	0,9925
C ₂	10,0	0,4971	0,9918
	13,0	0,2671	0,9942
	16,3	0,1398	0,9927
	17,4	0,1236	0,9933
	19,7	0,0951	0,9925
C ₃	10,0	0,6458	0,9920
	13,0	0,3045	0,9940
	16,3	0,1806	0,9923
	17,4	0,1488	0,9933
	19,7	0,1148	0,9925
C ₄	10,0	0,8154	0,9912
	13,0	0,4495	0,9933
	16,3	0,3079	0,9923
	17,4	0,2291	0,9937
	19,7	0,1823	0,9925

4.4.2 Índice de obstrução

Para desenvolver um procedimento de estimativa de K_L , a geometria da conexão entre o emissor e o tubo foi caracterizada por um índice de obstrução IO , que depende da razão entre a

área da seção transversal do tubo, onde o conector está localizado, e a área da seção transversal do tubo fora do conector. Uma função potência foi a que melhor se ajustou aos pares experimentais (IO , K_L). A seleção do modelo é consistente com o fenômeno físico uma vez que $K_L = 0$ para $r = 1$ (nenhuma obstrução). Na Figura 21 apresenta-se a relação entre K_L e IO para vinte pares de pontos que representam as combinações tubo-conector e $5000 < R < 68000$: $K_L = 1,23 (IO)^{0,51}$. Os valores de IO e K_L estão apresentados no Anexo C, Tabela 7.

O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9556$ mostra boa relação entre K_L e IO . O erro padrão do ajuste foi 0,04245 e as diferenças entre os valores de IO estimados e observados são normalmente distribuídos. Observa-se na Figura 21 as duas curvas que delimitam o intervalo de predição com 95% de confiança e que todos os pares de pontos experimentais estão contidos nesse intervalo. Também se verifica que os pares (IO , K_L) adaptados dos trabalhos de Alves e Porto (2002) e Bagarello et al. (1997) estão contidos nesse intervalo.

Propõe-se que a perda de carga localizada devido a conexão do emissor com o tubo possa ser determinada pela seguinte expressão: $hf_L = 1,23 (IO)^{0,51} V^2/2g$, para $5000 < R < 68000$, sendo hf_L expressa em m.c.a. e V em $m s^{-1}$.

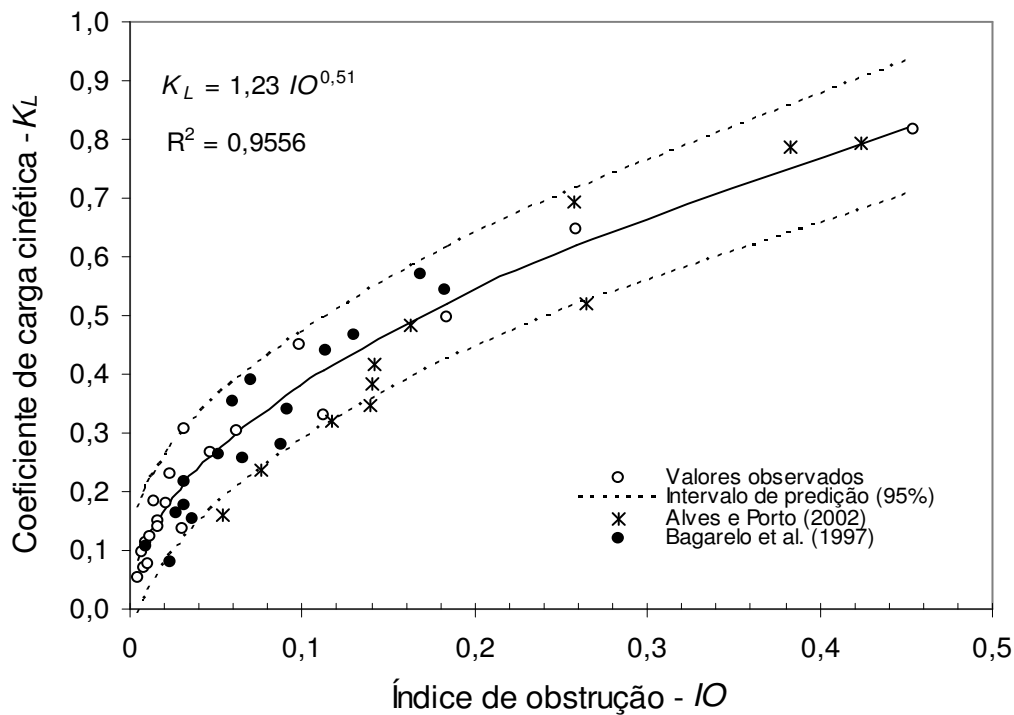


Figura 21 – Coeficiente de carga cinética em função do índice de obstrução

4.4.3 Aplicações

Para comprovar a praticidade e funcionalidade do modelo proposto, uma comparação com outro modelo de determinação de perda de carga localizada em conexão de emissores, modelo de distribuição de pressão, é apresentada. Para tal, usou-se o emissor Click Tif-PC 4.0 da NaanDan ($1,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), cuja área de protrusão é de $26,5 \text{ mm}^2$, instalado sobre um tubo de polietileno de diâmetro interno de $17,4 \text{ mm}$, espaçados em 1 m .

O modelo de distribuição de pressão é dado por:

$$hf_{eq.} = \frac{(Hmáx - Hmín) + \Delta Z}{Fn \cdot \left(\frac{KQ^m}{D^n} \right) \cdot N} - Le \quad (25)$$

Sendo $hf_{eq.}$ a perda de carga localizada expressa em comprimento equivalente (m); $Hmáx$ a pressão na entrada da linha lateral (mca); $Hmín$ a pressão no final da linha (mca); Fn o fator de redução de perda de carga; Q a vazão ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$); D o diâmetro do tubo (m); N o número de emissores; Le o espaçamento entre emissores (m); ΔZ o desnível da linha (m); m , n e K , constantes da equação de Darcy-Weisbach com f de Blasius.

Este modelo, também usado em simulações de perda de carga localizada, considera a perda de carga localizada na inserção do emissor, como sendo um comprimento equivalente de um perfil de distribuição de pressão em uma linha lateral em nível ou aclave.

Para alimentar o modelo de distribuição de pressão, faz-se necessários dados da tabela de características do emissor apresentado pelo fabricante. A tabela foi obtida no site oficial da NaanDan, de acordo com o endereço abaixo, estando também localizada no Anexo D (Tabela 8). (http://www.naandan.com/img/new_sys/catalog_product1/26_cp_file_1_260b2.pdf)

Com os dados da tabela, tem-se: $Hmáx = 30 \text{ mca}$; $Hmín = 5 \text{ mca}$; $N = 328$; $Q = 328 \cdot 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $Fn = 0,3651$; $D = 0,0174 \text{ m}$; $Le = 1 \text{ m}$; $\Delta Z = 0 \text{ m}$. Com os valores da equação de Darcy-Weisbach com f de Blasius, tem-se: $m = 1,75$; $n = 4,75$; $K = 0,00078$. Substituindo estes valores no modelo, tem-se a perda de carga em comprimento equivalente:

$$hf_{eq.} = \frac{(30 - 5) + 0}{0,3651 \cdot \left(\frac{0,00078 \cdot (1,11 \cdot 10^{-6} \cdot 328)^{1,75}}{0,0174^{4,75}} \right) \cdot 328} - 1 = 0,2248 \text{ m}$$

Assim, a perda de carga localizada em mca é dada por:

$$hf_L = 0,03771 \text{ mca}$$

No modelo geométrico, determinou-se a área do tubo com conector (A_c) e sem conector (A) de acordo com as Tabelas 1 e 2, calculando-se o índice de obstrução (IO), como segue:

As áreas são:

$$\begin{aligned} A &= 237,666 \text{ mm}^2 \\ A_c &= 211,166 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

O índice de obstrução é:

$$IO = \frac{\left(1 - \frac{A_c}{A}\right)^2}{\left(\frac{A_c}{A}\right)^2} = \frac{(1 - 0,8885)^2}{0,8885^2} = 0,01575$$

A velocidade média da água na tubulação é:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{328 \cdot 1,11 \cdot 10^{-6}}{0,000237666} = 1,5318 \text{ m s}^{-1}$$

Resultando na seguinte perda de carga localizada:

$$hf_L = 1,23 \cdot 0,01575^{0,51} \cdot \frac{1,5318^2}{2,9,81}$$

$$hf_L = 0,01771 \text{ mca}$$

Na Tabela 6 estão apresentados, para os dois modelos, os valores das perdas de carga localizada para um emissor e os acréscimos de perda de carga provocados em um metro de tubo de diâmetro interno de 17,4 mm. Observa-se que o modelo 2 tem valor de perda de carga

localizada 46,97% menor que o modelo 1 e que o acréscimo de perda de carga que um emissores provoca em um metro de tubo é 49,46% maior no modelo 1.

As observações de Al - Amoud (1995) credibiliza os valores encontrados pelo modelo 2, já que este encontrou um acréscimo de perda de carga de 13% na inserção de um emissor por metro de um tubo de 18 mm de diâmetro, cuja área de protrusão da conexão do emissor foi de 27,00 mm². Também, de acordo com os valores experimentais desta pesquisa, expostos na Tabela 4, vê-se que um acréscimo de 24,6% foi observado para dois emissores por metro de tubo de 17,4 mm, e que a metade deste valor (12,3%) se esperaria para um emissor por metro.

Tabela 6 - Comparação entre os valores de perda de carga localizada em mca e acréscimo de perda de carga, calculado por dois modelos, sendo 1 o modelo de distribuição de pressão e 2 o geométrico

Modelos	Perda de carga localizada (mca)	Acréscimos de perda de carga (%)
1	0,03771	22,14
2	0,01771	10,95

5 CONCLUSÕES

Para os tubos de polietileno estudados e de acordo com as condições experimentais, o fator de atrito f da equação de Darcy-Weisbach pode ser estimado com $c = 0,300$ e $m = 0,25$. A equação de Blasius mostrou-se conservadora na estimativa do fator de atrito, porém esse fato não constitui limitação para sua utilização em projetos de irrigação. As duas equações proporcionam estimativas de f com pequeno desvio médio (5,1%). Desenvolveu-se um procedimento de estimativa do coeficiente de carga cinética (K_L) da equação geral de perda de carga localizada, com base na geometria da conexão entre o emissor e o tubo caracterizada por um índice de obstrução IO , que depende da razão entre a área da seção transversal do tubo, onde o conector está localizado, e a área da seção transversal do tubo fora do conector. Uma função potência foi a que melhor se ajustou aos pares experimentais (IO , K_L). A seleção do modelo é consistente com o fenômeno físico uma vez que $K_L = 0$ para $r = 1$ (nenhuma obstrução): $K_L = 1,23 (IO)^{0,51}$ para $5000 < R < 68000$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9556$ mostrando boa relação entre K_L e IO . Todos os pares experimentais (IO , K_L) estão dentro do intervalo de predição com 95% de confiança. O erro padrão do ajuste foi 0,04245 e as diferenças entre os valores de IO estimados e observados são normalmente distribuídas.

REFERÊNCIAS

- AL-AMOUND, A. I. 'Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines'. **Journal of Agriculture Engineering Research**, Silsoe, v.60, n1, p.1-5, 1995.
- ALVES, P.R.V. **Análise de um coeficiente geométrico para estimativa de perdas de carga em linhas laterais de irrigação por gotejamento**. 2000. 163p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – 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. 147p. Dissertação (Mestrado em agronomia) – 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 tips. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.121, n.5, p.313-316, 1995.
- BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. "Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. **Journal of irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.123, n.1, p.1-7, 1997.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611p.
- 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.
- 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.
- HOWELL, T. A.; BARINAS, F. A. Pressure loss across trickle irrigation fitting and emitters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.23, n.4, p.67-72, 1980.

JEPPSON, R. W. **Analysis of flow in pipe networks**. 5th ed. Ann Arbor: Ann Arbor Science, 1977, p.173.

JUANA, L.; RODRIGUES-SINOBAS, L; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology.” **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.128, n.6, p.376-384, 2002a.

JUANA, L.; RODRIGUES-SINOBAS, L; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. II: Experimental study and validation.” **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.128, n.6, p.385-396, 2002b.

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.

KANG, Y.; NISHIYAMA, S.; CHEN, H. Design of microirrigation lateral on nonuniform slopes, **Irrigation Science**, Amsterdam, v.17, n.1, p.3-14, 1996.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.17, n.4, p.878-880, 1974.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1999, 463p.

MORRIS, H.M; WIGGERT, J.M. **Applied hydraulics in engineering**. 2. ed. New York: John Wiley, 1972, 629p.

PALAU-SALVADOR, G.; SANCHIS, L.H.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; ARVIZA-VALVERDE, J. real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.132, n.6, p.522-530, 2006.

PIZARRO, F. **Riego localizados de alta frecuencia: Geteo, microaspersion, exudacion**. 2. ed. Ediciones Mundi, Madri: 1990, 461 p.

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

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.

PROVENZANO, G.; PUMO, D.; Di Dio, P. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation lateral. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.131, n.6, p.525-532, 2005.

RODRIGUES-SINOBAS, L.; JUANA, L.; LOSADA, A. Effects of temperature changes on emitters discharge. **Journal of irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 125, n.2, Mar-April, p. 64-73, 1999.

- ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equation for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, v.86, n.3, p.369-374, 2002.
- SERGHIDES, T.K. Estimate friction factor accurately. **Chemical Engineering Journal**, v.91, n.5, p.63-64, 1984.
- 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. Discussion on Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 115, n.5, p.916-918, 1989.
- VON BERNUTH, R.D.; WILSON, T. Friction factors for small diameter plastic pipes. **Journal of Hydraulics Engineering**, New York, v.115, n.2, p.183-192, 1989.
- 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.
- YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. **Journal of Hydraulics Engineering**, v.131, n.8, p.694-704, 2005.
- WATTER, G. Z.; KELLER, J. Trickle irrigation tubing hydraulics. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph.(Paper, 2015), 1978, p.78.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n.2, p.184-195, 1981.
- WU, I.P. Energy gradient line for direct hydraulic calculation in drip irrigation design. **Irrigation Science**, Amsterdam, v.13, n.1, p.21-29, 1992.
- WU, I. P.; GITLIN, H. M. Energy gradient line for drip irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, New York, v.101, n.4, p.323-326, 1975.
- WU, I.P. An assessment of hydraulics design of micro-irrigation systems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.32, n.3, p.275-284, 1997.
- ZAYANI, K.; ALOUINI, A.; LEBDI, F.; LAMADDALENA, N. Design of drip irrigation systems using the energy drop ratio approach. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.44, n.5, p.1127-1133, 2001.

ANEXOS

Anexo A – Perda de carga nos tubos com emissores em função da vazão

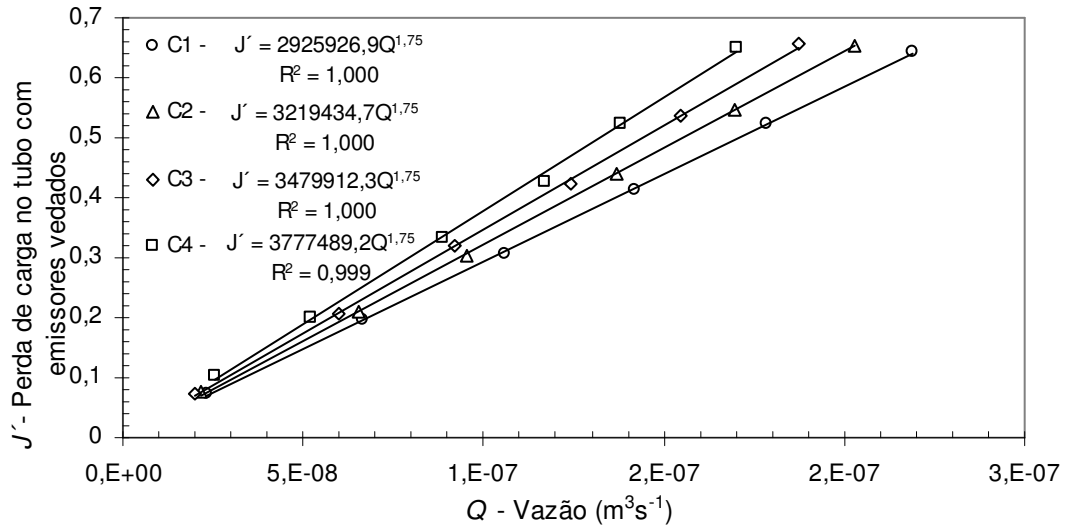


Figura 22 - Perda de carga observada em função da vazão nos 4 modelos de emissores, conectados na tubulação de 10,0 mm

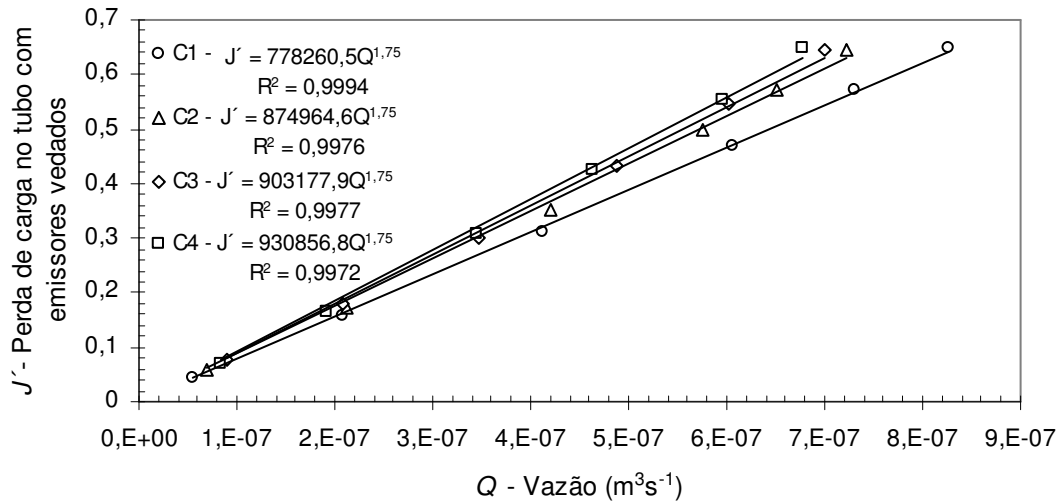


Figura 23 - Perda de carga observada em função da vazão nos 4 modelos de emissores, conectados na tubulação de 13,0 mm

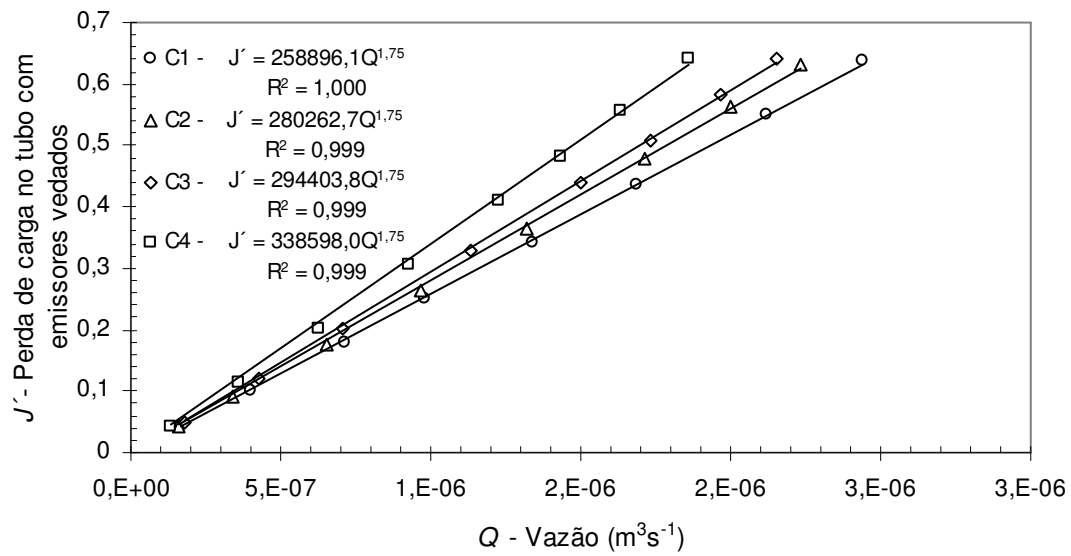


Figura 24 - Perda de carga observada em função da vazão nos 4 modelos de emissores, conectados na tubulação de 16,3 mm

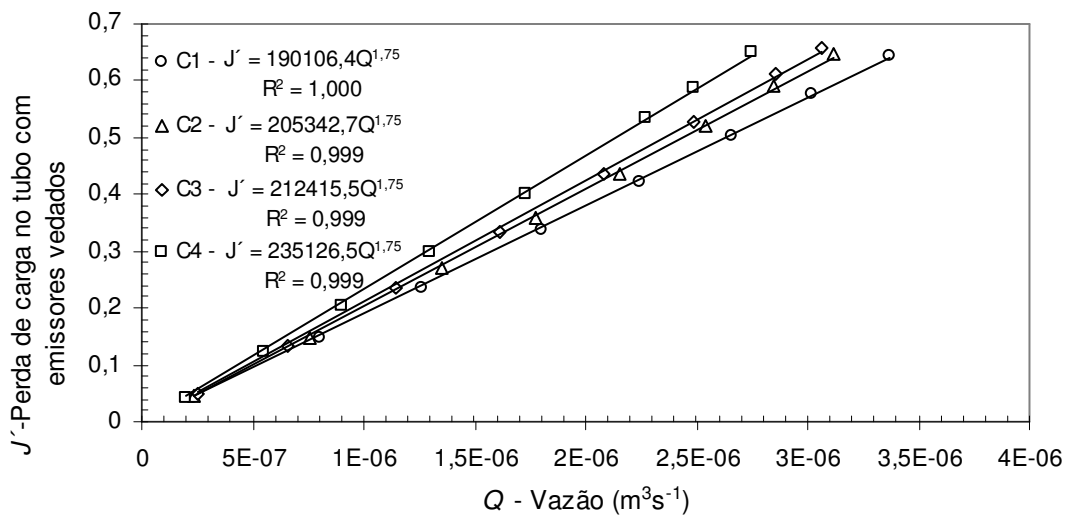


Figura 25 - Perda de carga observada em função da vazão nos 4 modelos de emissores, conectados na tubulação de 17,4 mm

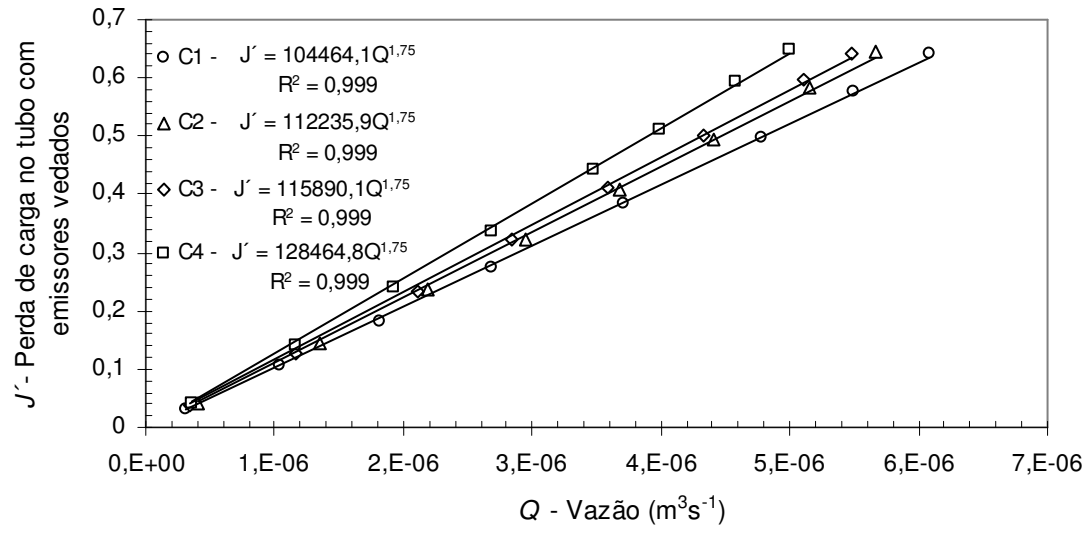


Figura 26 - Perda de carga observada em função da vazão nos 4 modelos de emissores, conectados na tubulação de 19,7 mm

Anexo B – Perda de carga localizada nas conexões dos emissores

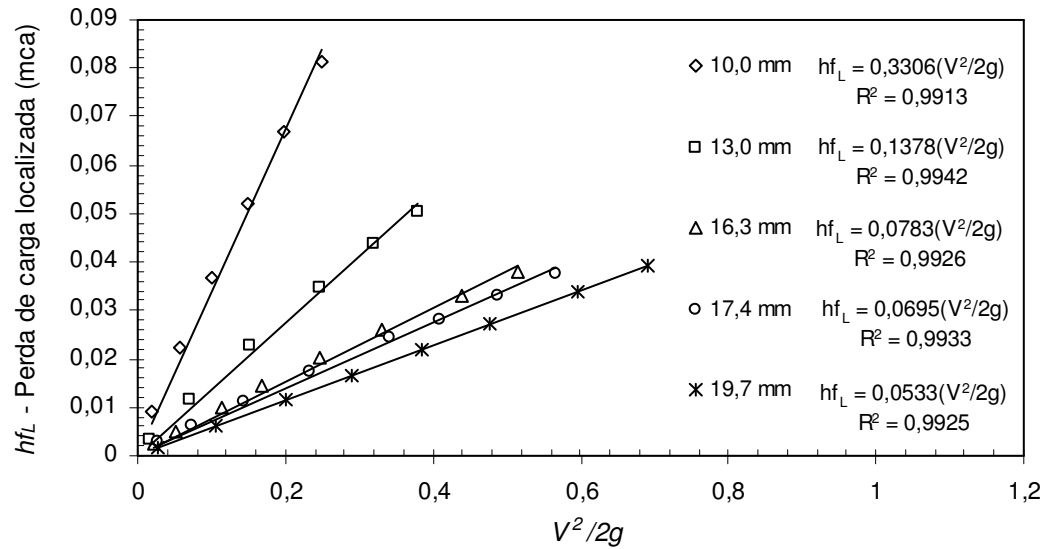


Figura 27 - Perda de carga localizada em função de $V^2/2g$, para o emissor Spray Microjet, nos 5 diâmetros considerados

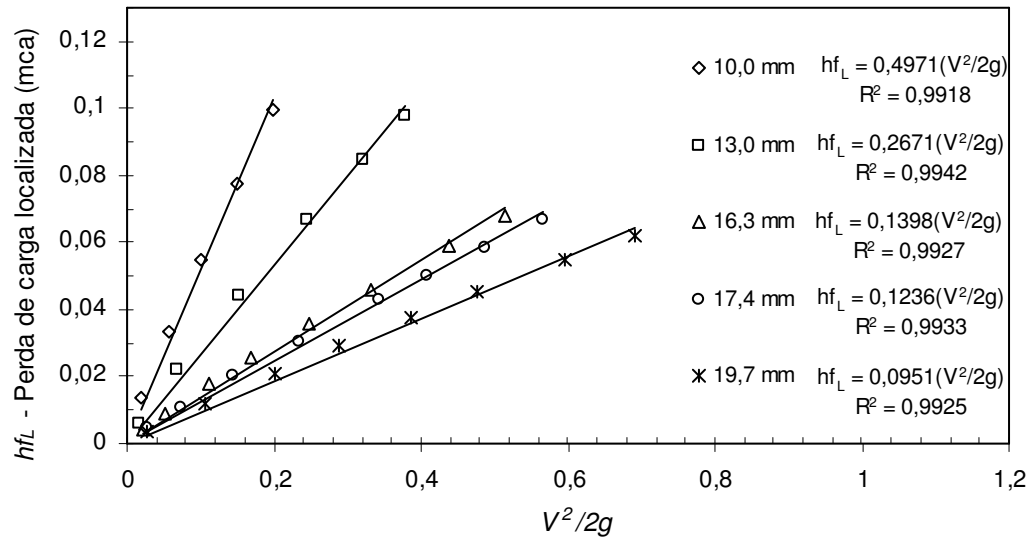


Figura 28 - Perda de carga localizada em função de $V^2/2g$, para o Conector de Microtubo, nos 5 diâmetros considerados

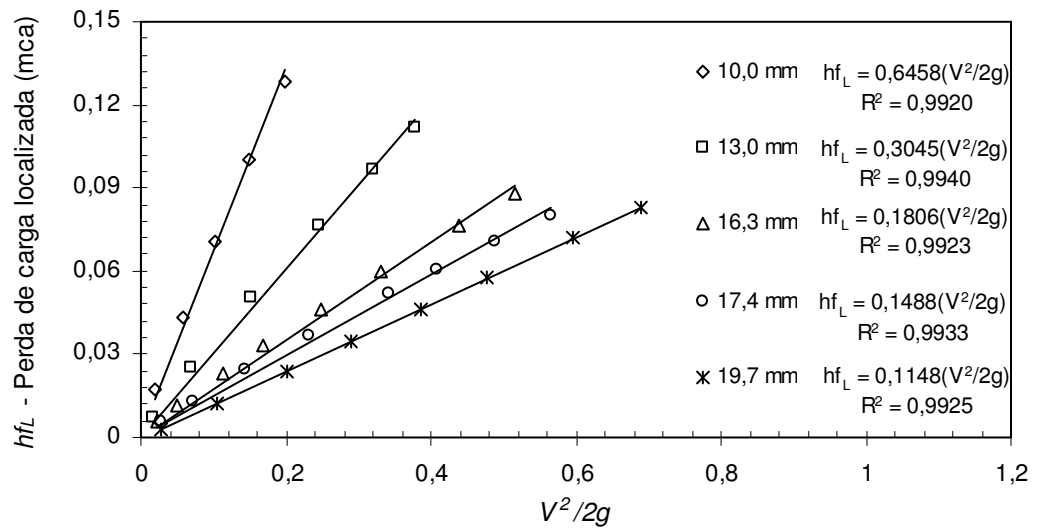


Figura 29 - Perda de carga localizada em função de $V^2/2g$, para o emissor Click Tif-PC, nos 5 diâmetros considerados

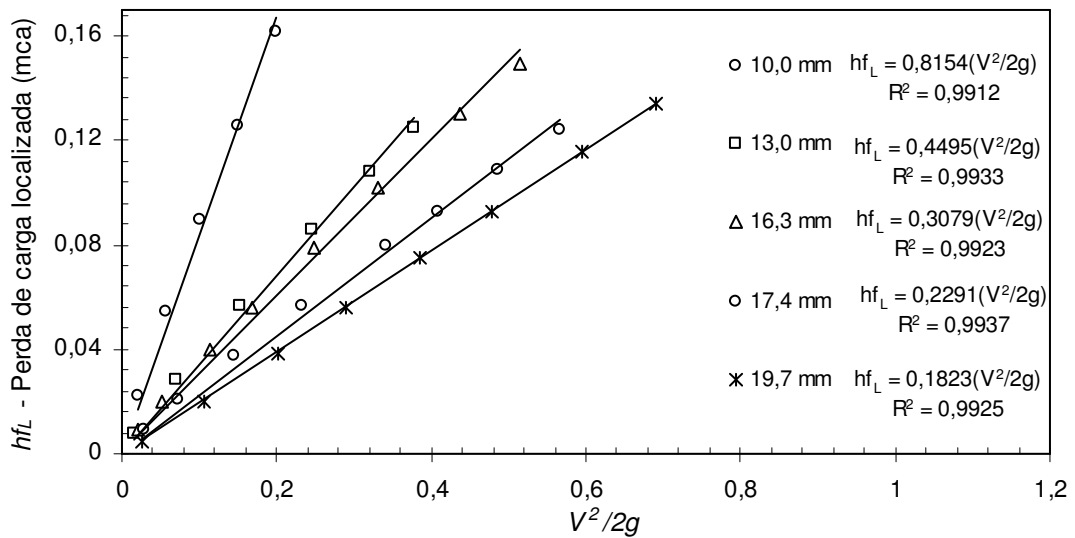


Figura 30 - Perda de carga localizada em função de $V^2/2g$, para o emissor Katif, nos 5 diâmetros considerados

Anexo C – Tabela contendo os valores do índice de obstrução e os coeficientes de carga cinética

Tabela 7 – Valores do coeficiente de carga cinética e do índice de obstrução para todas as combinações tubo-emissor

Conector (Tipo)	Diâmetro interno (mm)	Valores de K_L	Valores de IO
C ₁	10,0	0,3306	0,1121
	13,0	0,1378	0,0305
	16,3	0,0783	0,0110
	17,4	0,0695	0,0082
	19,7	0,0533	0,0048
C ₂	10,0	0,4971	0,1843
	13,0	0,2671	0,0469
	16,3	0,1398	0,0164
	17,4	0,1236	0,0123
	19,7	0,0951	0,0071
C ₃	10,0	0,6458	0,2593
	13,0	0,3045	0,0625
	16,3	0,1806	0,0213
	17,4	0,1488	0,0159
	19,7	0,1148	0,0092
C ₄	10,0	0,8154	0,4546
	13,0	0,4495	0,0983
	16,3	0,3079	0,0322
	17,4	0,2291	0,0238
	19,7	0,1823	0,0136

Anexo D – Tabela de ensaio apresentada pelo fabricante do emissor Click Tif - PC 4.0 da NaanDan para um tubo de polietileno de 17,4 mm de diâmetro interno

Tabela 8 – Comprimento máximo de linha lateral em nível, em função da pressão de entrada e do espaçamento entre emissores, para o emissor Click Tif - PC 4.0 da NaanDan

Comprimento máximo da lateral (m) em nível ($\Delta Z = 0$), com 10% de variação de vazão					
Espaçamento entre emissores (cm)					
Pressão de Entrada (mca)	30	40	50	75	100
15	97	112	131	174	211
20	121	140	165	218	265
25	140	161	189	251	306
30	150	172	203	269	328

A Pressão mínima no final da linha é de **5 mca**

Fonte: adaptado de http://www.naandan.com/img/new_sys/catalog_product1/26_cp_file_1_260b2.pdf

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)