

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

Rugosidade superficial interna de tubos para irrigação

Hermes Soares da Rocha

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2014**

Hermes Soares da Rocha
Engenheiro Agrícola

Rugosidade superficial interna de tubos para irrigação

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. **PATRICIA ANGÉLICA ALVES**
MARQUES

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2014

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

Rocha, Hermes Soares da
Rugosidade superficial interna de tubos para irrigação / Hermes Soares da Rocha. --
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. -- Piracicaba, 2014.
75 p. : il.

Dissertação (Mestrado) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.
Bibliografia.

1. Fator de atrito 2. Equação de Darcy-Weisbach 3. Perda de carga 4. Camada
limite 5. Rugosímetro I. Título

CDD 631.7
R672r

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

Aos meus pais, em retribuição aos ensinamentos, orientação, carinho e apoio incondicional que recebi durante minha caminhada; e

aos meus irmãos, para que sirva de exemplo e incentivo a batalharem pelos seus objetivos com dedicação, esforço e humildade,

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me dar forças para enfrentar os obstáculos e dificuldades.

A toda a minha família, parentes e amigos da minha terra natal, no município de São Francisco-MG, pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, por oferecer a estrutura e o suporte técnico necessários à realização da pesquisa.

À professora Patricia A. A. Marques, pela orientação, contribuição, apoio acadêmico, amizade e confiança em mim depositada.

Ao MCT, CNPq e FAPESP pela concessão de bolsa e apoio financeiro à realização desta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCT-EI). Ao Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI) pelo apoio e suporte à pesquisa.

Ao professor José Antônio Frizzzone, pelas sugestões, recomendações e dicas, além da confiança em mim depositada para utilização da infraestrutura necessária à condução do trabalho.

Aos colegas e amigos de pós-graduação, pelos bons momentos vividos e pelo auxílio durante o curso.

Aos colegas de república, pela paciência e boa convivência neste período.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB), pelo auxílio, disponibilidade e dedicação.

Aos técnicos do LEB, em especial a Antonio Pires de Camargo, pelas sugestões e auxílio na montagem e condução dos ensaios, além da revisão deste texto.

Aos colegas, professores e amigos da UFRRJ, onde comecei a me envolver com atividades de pesquisa junto ao Grupo de Pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas, sob a orientação do prof. Daniel Carvalho, por quem tenho grande admiração e respeito.

Por fim, meu muito obrigado a todos que de alguma forma e em algum momento contribuíram para a minha formação não só acadêmica, mas também como cidadão.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	7
RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Escoamento em condutos forçados.....	21
2.2 Modelos para estimativa de perda de carga.....	22
2.3 Fator de atrito (f).....	24
2.4 Rugosidade superficial e processos de fabricação.....	27
2.5 Rugosímetros	29
2.6 Parâmetros de rugosidade.....	30
2.7 Normalização, medição e processo de filtragem do perfil de rugosidade	31
2.8 Controle de qualidade das medições.....	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Material avaliado	35
3.2 Ensaio de perda de carga.....	35
3.2.1 Instalações e equipamentos	35
3.2.2 Perda de carga estimada e indicadores de desempenho	38
3.3 Determinação da rugosidade.....	40
3.3.1 Corpos de prova.....	40
3.3.2 Equipamento e ambiente de testes.....	40
3.3.3 Cartas de controle de Shewhart e erro absoluto na aferição do instrumento	43
3.3.4 Parâmetros avaliados.....	44
3.4 Análise de sensibilidade da perda de carga à rugosidade.....	44
3.5 Espessura da camada limite	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Rugosidade.....	47
4.1.1 Rotina de aferição e verificação da estabilidade do rugosímetro.....	47

4.1.2	Rugosidade da superfície interna dos tubos.....	49
4.2	Perda contínua de carga nos tubos de PVC.....	50
4.3	Perda contínua de carga nos tubos de PEBDL.....	54
4.3.1	Relação vazão-perda de carga.....	54
4.4	Análise de sensibilidade	60
4.5	Espessura da camada limite.....	61
4.6	Coefficientes das fórmulas empíricas.....	62
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS.....	67
	ANEXOS	73

RESUMO

Rugosidade superficial interna de tubos para irrigação

O dimensionamento hidráulico de sistemas de irrigação requer a quantificação da perda distribuída de carga ao longo da tubulação, sendo que este parâmetro depende de características do escoamento e da tubulação. A rugosidade da superfície interna de tubos é um parâmetro importante nas estimativas de perda de carga, entretanto os valores tabelados de rugosidade foram obtidos há muito tempo e podem não refletir com precisão a rugosidade da parede interna dos tubos comerciais atuais. Alterações no material e nos processos de fabricação dos tubos, associados à ausência de dados atualizados de rugosidade, podem implicar em estimativas incorretas de perda de carga. Supõe-se que a rugosidade média da superfície de tubos comerciais utilizados em irrigação pode ser determinada em laboratório utilizando rugosímetro de bancada, desde que os parâmetros de amplitude das irregularidades da superfície do tubo sejam conhecidos. O presente estudo visou estabelecer os parâmetros e procedimentos para a representação da rugosidade da superfície de tubos plásticos para irrigação mediante utilização de um rugosímetro de bancada. A avaliação consistiu da determinação dos parâmetros de rugosidade R_a , R_c , R_q , R_y , R_t e P_{cu} em 25 corpos de prova por diâmetro para PVC e 20 corpos de prova por diâmetro de polietileno estudado, com medições feitas na direção longitudinal e transversal do tubo, totalizando 400 medições de perfil. Foram realizadas estimativas de perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach, com fator de atrito (f) calculado a partir da equação de Swamee. A rugosidade da superfície interna de tubos de PVC e PEBDL utilizados em irrigação foi determinada satisfatoriamente utilizando rugosímetro de bancada. Evidenciou-se diferença significativa dos parâmetros de rugosidade (R_a , R_q , R_c e R_y) entre os diâmetros nominais dos tubos de PEBDL, e portanto, entende-se que a adoção de valores de rugosidade específicos para cada diâmetro contribui para a qualidade das estimativas de perda de carga. Os parâmetros R_c e R_a destacaram-se como a melhor opção para representar a rugosidade de tubos de PVC e PEBDL, respectivamente. A rugosidade média para tubos de PVC e PEBDL foi de 4,431 μm e 3,143 μm , respectivamente.

Palavras-chave: Fator de atrito; Equação de Darcy-Weisbach; Perda de carga; Camada limite; Rugosímetro

ABSTRACT

Internal surface roughness of irrigation pipes

The friction head loss along pipelines is required to the hydraulic design of irrigation systems and that parameter relies on the flow conditions and pipe's characteristics. The internal surface roughness of pipes is an essential parameter to estimate head losses. However, the reference values of roughness were obtained long ago and may not represent properly the surface roughness of the current materials. Changes in material and manufacturing processes of pipes combined to outdated data may result in wrong values of head loss. Rugosimeters are measuring instruments that can be used to determine the surface roughness of irrigation pipes, but there is a challenge to select the proper parameter to represent the roughness of each surface. The best choice depends on several aspects and must be studied according to each situation. This study aims to define a protocol for determining the internal surface roughness of polyethylene and PVC pipes based on the use of a rugosimeter. Since several output parameters can be used to represent the roughness, the best parameters to represent the roughness of each material must be specified. The following output parameters were studied Ra , Rc , Rq , Ry , Rt e Pcu . Twenty-five samples of PVC and twenty samples of polyethylene were assessed, both in longitudinal and transversal directions, thus 400 measurements were accomplished. The Darcy-Weisbach equation was employed to estimate friction head loss and the Swamee equation to the friction head loss coefficient (f). The internal surface roughness of PVC and polyethylene pipes was properly determined by the rugosimeter. The rugosimeter's output parameters (Ra , Rq , Rc and Ry) varied according to the diameter of polyethylene pipes, hence a single value of roughness should not be used for different diameters of polyethylene pipes. The Rc and Ra were the best parameters to represent the roughness of PVC and polyethylene pipes, respectively. The mean roughness of the PVC and polyethylene pipes were 4.431 and 3.143 μm , respectively.

Keywords: Friction factor; Darcy-Weisbach equation; Head loss; Boundary layer; Rugosimeter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do erro de forma (rugosidade + ondulação) de uma superfície. Adaptado de MITUTOYO (2012).....	31
Figura 2 – Esquema do processo de filtragem do perfil primário. Adaptado de MITUTOYO (2012).....	32
Figura 3 – Croqui da estrutura utilizada nos ensaios de perda de carga.....	36
Figura 4 – Projetor ótico de perfil Starret – modelo HB 400 com interface computacional para visualização (a) e anéis utilizados na projeção do perfil para medição do diâmetro do tubo (b).....	37
Figura 5 – Ângulo e raio da ponta da agulha utilizada (a), processo de escaneamento e medição da superfície interna do tubo (b), rugosímetro de bancada Surfrest SV-624 (Série 600)/Mitutoyo® (c), placa padrão de calibração e agulhas para medição do perfil de rugosidade (d).....	41
Figura 6 – Exemplos de perfis constituintes da textura da superfície interna dos tubos.....	42
Figura 7 – Exemplo das amplitudes de rugosidade nos cinco comprimentos de “cut-off” que compõe o comprimento de medição l_m	42
Figura 8 – Erro absoluto encontrado na aferição do rugosímetro com placa padrão ($R_a = 2,94 \mu m$), na primeira e segunda leituras.....	47
Figura 9 – Cartas de controle de valores individuais para a rugosidade média (R_a) obtida na placa padrão nos testes para aferição.....	48
Figura 10 – Box-Plot da rugosidade média – R_a (a); da raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios a partir da linha média – R_q (b); da maior amplitude das irregularidades dentro do “cut-off” – R_y (c); e da média aritmética da altura de irregularidades no perfil – R_c (d), com indicação no diagrama do valor médio obtido de cada parâmetro para os respectivos diâmetros nominais de 10, 13, 16, 20 e 26 mm para tubos de PEBDL; e 35, 50 e 75 mm para os tubos de PVC.....	49
Figura 11 – Erro relativo das estimativas de perda de carga em função dos parâmetros medidos (a) e frequência de ocorrência do erro na estimativa de perda de carga utilizando o parâmetro R_c para PVC (b).....	52
Figura 12 – Perda de carga observada por Vilaça (2012) em função da perda de carga estimada utilizando a equação de Darcy-Weisbach para tubos de PVC de 35 mm, 50 mm e 75 mm, com R_c medido nas direções longitudinal (a) e transversal (b) ao fluxo para rugosidade (ϵ) na equação de Swamee (1993).....	53
Figura 13 – Perda contínua de carga no tubo de PEBDL em função da vazão para pressão de entrada na linha de 196 kPa.....	54
Figura 14 – Média do erro relativo das estimativas de perda de carga em função dos parâmetros medidos (a) e frequência de ocorrência do erro na estimativa de perda de carga utilizando o parâmetro R_a para PEBDL (b).....	57
Figura 15 – Perda de carga observada nos ensaios em função da perda de carga estimada utilizando a equação de Darcy-Weisbach para tubos de PEBDL de 10 mm, 13 mm, 16 mm, 20 mm e 26 mm, com R_a medido nas direções longitudinal (a) e transversal (b) ao fluxo para rugosidade (ϵ) na equação de Swamee (1993).....	59
Figura 16 – Análise de sensibilidade da perda de carga às variações de rugosidade.....	60

Figura 17 – Espessura da camada limite para fator f calculado a partir dos valores de Ra medidos no rugosímetro para tubos de PEBDL.....	61
Figura 18 – Espessura da camada limite para fator f calculado a partir dos valores de Rc medidos no rugosímetro para tubos de PVC.....	62
Figura 19 – Coeficientes de atrito das equações de Hazen-Williams e Flamant em função do número de Reynolds para os três diâmetros de PVC e cinco de PEBDL	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de “cut-off” em função da rugosidade média para filtragem de perfil aperiódico (ABNT NBR ISO 4287, 2002)	33
Tabela 2 – Diâmetro nominal (DN), diâmetro interno (D_i), espessura da parede do tubo (e), desvio padrão (σ_{D_i}), coeficiente de variação (CV_{D_i}) e teste de normalidade para diâmetro interno dos tubos de polietileno avaliados.....	37
Tabela 3 – Equações de perda contínua de carga, em m, para tubos de PVC, em função da vazão, em $m^3 s^{-1}$, conforme Vilaça (2012)	38
Tabela 4 – Critérios para interpretação do índice “ c ”	39
Tabela 5 – Índices concordância de Willmott (d), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice desempenho de Camargo e Sentelhas (c) para comparação entre a perda contínua de carga estimada por Darcy-Weisbach, com f calculado a partir dos parâmetros R_a , R_q , R_y e R_c no lugar da rugosidade ε da equação de Swamee (1993), e a perda de carga observada por Vilaça (2012) em tubos de PVC	51
Tabela 6 – Índices concordância de Willmott (d), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice desempenho de Camargo e Sentelhas (c) para comparação entre a perda contínua de carga estimada por Darcy-Weisbach, com f calculado a partir dos parâmetros R_a , R_q , R_y e R_c no lugar da rugosidade ε da equação de Swamee (1993), e a perda de carga observada nos ensaios com tubos de PEBDL	56

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{X} – Média do processo;

\int - Operador matemático de integração;

b – Coeficiente de atrito para equação de Flamant;

C – Coeficiente de atrito para equação de Hazen-Williams;

c – Índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997);

c' – Constante determinada experimentalmente para equação de Blasius para f ;

d – Índice de concordância de Willmott (1985);

D – Diâmetro do tubo;

e – Espessura da parede do tubo;

E – Módulo de elasticidade do tubo;

f – Fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach para perda de carga;

g – Aceleração da gravidade para a localidade;

hf – Perda contínua de carga;

k_l – Constante determinada experimentalmente para equação de Swamee para f ;

L – Comprimento do tubo;

LC – Linha central, correspondente à média;

le – Comprimento de avaliação, correspondente ao nível de “cut-off”;

LIC – Limite inferior de controle;

lm – Comprimento de medição, igual a $n le$;

lo – Comprimento inicial da amostra;

LSC – Limite superior de controle;

m – Constante determinada experimentalmente para equação de Blasius para f ;

n – número de comprimentos de “cut-off” para compor o comprimento de medição lm ;

P – Pressão de ensaio;

p_1 – Constante determinada experimentalmente para equação de Swamee para f ;

p_2 – Constante determinada experimentalmente para equação de Swamee para f ;

P_{cu} – Parâmetro para contagem de picos no perfil a partir de um nível de corte;

r – coeficiente de correlação linear de Pearson;

R_a – Rugosidade média (média aritmética dos desvios do perfil);

R_c – Altura média das irregularidades no perfil de rugosidade;

Re – Número de Reynolds;

$R_{máx}$ – Soma das máximas altura de picos e profundidade de vales no perfil de rugosidade;

R_q – Raiz quadrada da média dos desvios quadráticos do perfil;

R_t – Soma das máximas altura de picos e profundidade de vales no perfil de rugosidade;

R_y – Máxima altura de rugosidade entre os cinco comprimentos de avaliação;

V – Velocidade de escoamento da água;

δ – Espessura da camada limite;

ε – Rugosidade;

λ – Comprimento de onda de corte ou valor ou de “cut-off”;

ν – Viscosidade cinemática;

σ – Desvio padrão do processo.

1 INTRODUÇÃO

Os estudos e pesquisas sobre escoamento de fluidos em condutos forçados são de grande relevância devido à aplicação em diversos segmentos da engenharia moderna, como sistemas de drenagem, irrigação, redes de esgoto e abastecimento urbano, energia, indústria e mineração (SCHRODER, 2011).

Em projetos hidráulicos de sistemas de irrigação são contabilizadas a perda contínua e as perdas localizadas de carga, objetivando-se maximizar a uniformidade de distribuição de água, caracterizar o conjunto motobomba adequado ao sistema de irrigação e com isso, minimizar os custos de implantação e operação do projeto (RETTORE NETO et al., 2012).

As superfícies geradas nos processos de fabricação de peças não são perfeitas, com detalhes que somente podem ser analisados quando ampliadas várias vezes em relação ao tamanho original (OLIVEIRA, 2004). As irregularidades presentes na superfície real de uma peça compõe o que se chama de perfil composto da superfície medida, o qual se subdivide no perfil de rugosidade e perfil de ondulação, sendo o perfil efetivo a representação da superfície real quando mensurada por algum instrumento de medição (BORYCZKO, 2010).

A rugosidade, também chamada de textura de uma superfície, é entendida como sendo o estado de asperezas da mesma, sendo determinada pelo processo e ferramenta de fabricação, caracterizada por protuberâncias e irregularidades existentes na superfície. Se estas divergências forem grandes e em alta frequência, a superfície é considerada áspera; e se as divergências são pequenas considera-se que a superfície é lisa.

Para o caso de tubulações, o tempo de uso pode influenciar na perda de carga devido ao acúmulo de materiais em suspensão presentes no fluido escoante, como argila por exemplo, devido à susceptibilidade à oxidação no caso de tubos metálicos, desenvolvimento de biofilme por deposição de partículas sob reduzida velocidade de escoamento ou abrasão por partículas grosseiras, como areia, quando em velocidades elevadas e dependendo do material da parede do tubo.

Ao longo do tempo, foram desenvolvidos diversos métodos de mensurar a textura superficial através de parametrizações específicas, sendo que cada parâmetro se comporta como uma função matemática de acordo com o perfil analisado (STOUT et al., 1990 apud OLIVEIRA, 2004), medido por meio de equipamentos chamados rugosímetros. No relatório emitido pelo rugosímetro diversos parâmetros podem ser adotados para se expressar a rugosidade da superfície, sendo que o parâmetro a ser adotado depende da aplicação a que se destina a peça avaliada, assim como configurações de norma e sistema de medição adotados.

Para aplicações envolvendo escoamento em tubulações de sistemas de irrigação não há um procedimento definido que permita identificar qual dos parâmetros deve ser adotado, sendo normalmente adotadas tabelas para obtenção da altura das asperezas da superfície interna dos tubos em função do tipo de material (AZEVEDO NETTO et al., 1998; PORTO, 2006; BERNARDO, SOARES; MANTOVANNI, 2006).

Os valores tabelados de rugosidade em tubos, embasados nas experiências de *Johann Nikuradse* (NIKURADSE, 1933 apud HAGER; LIIV, 2008), foram obtidos há muito tempo e podem não refletir com precisão a rugosidade da parede interna dos tubos comerciais atuais, haja vista as alterações no material e nos processos de fabricação dos tubos e a ausência de determinações reais da rugosidade para tubulações específicas para sistemas de irrigação.

A hipótese deste trabalho é que a rugosidade média da superfície de tubos comerciais para fins de cálculo da perda de carga pode ser determinada em laboratório utilizando rugosímetro de bancada, desde que possam ser conhecidos os parâmetros de amplitude das irregularidades da superfície do tubo.

O objetivo geral desta pesquisa foi a avaliação dos parâmetros adequados para determinação da rugosidade de tubos e proposição de procedimento para tal, com foco em tubos plásticos utilizados para fins de irrigação.

Além disso, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) elaboração de um procedimento para determinação da rugosidade da superfície interna de tubos de cloreto de polivinila (PVC) e polietileno, baseado na utilização de um rugosímetro de bancada;
- b) determinação dos parâmetros mais adequados para representar a rugosidade da superfície de tubos de irrigação; e
- c) determinação da rugosidade da superfície interna de tubos de PVC e polietileno, a fim de se apresentar valores atualizados para uso nas estimativas de perda de carga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Escoamento em condutos forçados

Um dos principais aspectos físicos dos condutos que afeta diretamente o dimensionamento de projetos hidráulicos é o tipo de material que é constituído, proporcionando particularidades na textura ou rugosidade superficial destes condutos. Em condições de escoamento turbulento, tal propriedade física modificará as condições de escoamento gerando perda de carga (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

O conhecimento preciso da dissipação de energia que ocorre durante o escoamento é fundamental para o correto dimensionamento de sistemas de irrigação. Propriedades e dimensões físicas dos componentes do sistema apresentam variabilidade natural inerente ao próprio processo de fabricação, influenciando na uniformidade de distribuição (ZITTERELL et al., 2009), assim como as características hidráulicas de operação, como pressão de escoamento e perda de carga em tubulações, peças acessórias e emissores (PROVENZANO; PUMO, 2004), influenciando na obtenção dos diâmetros e comprimentos considerados ideais sob os pontos de vista técnico e econômico para as linhas laterais (CARRIÓN et al., 2013).

A perda de carga é fator limitante para os projetos de engenharia de irrigação, pois afeta o custo total e o balanço hidráulico do sistema (KAMAND, 1988), sendo o diâmetro dos tubos dependente da máxima perda de carga admitida ao longo da rede hidráulica pelo projetista, enquanto que para linhas laterais de irrigação adota-se como critério a máxima variação de vazão que permita a uniformidade de aplicação desejada, resultando em perda de carga máxima na lateral como critério secundário e indireto de dimensionamento. A pressão disponível na saída dos emissores da microirrigação é afetada pela dissipação de energia devida ao atrito durante o escoamento, causando variações de vazão ao longo das linhas laterais, principalmente no caso de emissores não regulados (JUANA; RODRIGUES-SINOBAS; LOSADA, 2002; LAPERUTA NETO et al., 2011). Provenzano e Pumo (2004) atribuem à variação de vazão dos emissores ao longo da linha lateral a redução de pressão devida à perda de carga e ao desnível geométrico, a variabilidade de fabricação e obstrução dos emissores e as oscilações de temperatura da água.

Com o desenvolvimento do plástico, é crescente a adoção de tubos constituídos destes polímeros em sistemas de irrigação, existindo um predomínio de material plástico nas tubulações das redes de distribuição de água em sistemas de microirrigação (RETTORE

NETO, 2011). Partículas de um fluido em contato com a parede do tubo possuem velocidade nula, sendo que na camada delgada adjacente à parede, chamada de camada limite ou subcamada viscosa, a flutuação de velocidade não atinge os mesmos patamares que nas regiões distantes. Por outro lado, a partir desta camada, desenvolve-se pequena zona de transição e o núcleo de turbulência do regime de escoamento, que ocupa toda a área central da seção circular do tubo (VENNARD; STREET, 1978; PORTO, 2006).

A perda contínua de carga é decorrente da resistência ao escoamento oferecida pela viscosidade do fluido e pela inércia das partículas, sendo variável com a rugosidade da parede do tubo, diâmetro da tubulação e com a velocidade de escoamento. Os modelos existentes para predição da perda de carga em condutos sob pressão são constituídos por variáveis referentes a algumas propriedades físicas do fluido, como a viscosidade cinemática e velocidade de escoamento; e por variáveis referentes às dimensões e características do tubo pelo qual o fluido escoar, como diâmetro, comprimento, presença de peças especiais causadoras de perdas localizadas de carga e do estado de asperezas da superfície de escoamento, representado pela rugosidade do material constituinte do tubo (PORTO, 2006), além das propriedades implícitas na composição das acima citadas.

2.2 Modelos para estimativa de perda de carga

A Fórmula Universal ou equação teórica de Darcy-Weisbach (eq. 1) é recomendada para o cálculo das perdas de carga na tubulação por ser mais precisa, sendo que considera fator de atrito variável em função da condição de rugosidade da superfície interna do tubo e o número de Reynolds do escoamento (ALLEN, 1996).

$$hf = \frac{fLV^2}{2gD} \quad (1)$$

em que: hf – perda de carga no tubo (m); f – fator de atrito ou de resistência (adimensional); L – comprimento do tubo (m); V – velocidade da água (m s^{-1}); g – aceleração da gravidade para a localidade (m s^{-2}); e D – diâmetro interno do tubo (m).

Por outro lado, muitos projetistas adotam equações empíricas, como as de Hazen-Williams (eq. 2) e Flamant (eq. 3), as quais constituem formulações empíricas para predição da perda contínua de carga, sendo recomendadas por seus autores para aplicação em domínios

restritos de diâmetros, além de utilizarem coeficientes de atrito que dependem da rugosidade do conduto e não dependem, pelo menos explicitamente, do regime de escoamento que se estabelece no conduto (ASSY, 1977).

$$hf = 10,646 \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852}} \frac{L}{D^{4,87}} \quad (2)$$

em que: hf – perda de carga no tubo (m); Q – vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); C – coeficiente de atrito de Hazen-Williams para perda de carga (adimensional); L – comprimento do tubo (m); e D – diâmetro interno do tubo (m).

$$hf = 6,107 b \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} L \quad (3)$$

em que: hf – perda de carga no tubo (m); b – coeficiente de atrito de Flamant para perda de carga (adimensional); Q – vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); L – comprimento do tubo (m); e D – diâmetro interno do tubo (m).

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; ALLEN, 1996; RETTORE NETO, 2011; FRIZZONE et al., 2012). Por outro lado, para o dimensionamento efetuado por meio da equação de Darcy-Weisbach, o fator de atrito varia com as condições de escoamento (BOMBARDELLI; GARCÍA, 2003). Frizzone et al. (1998) descrevem que o fator de atrito desta equação varia com o número de Reynolds (Re) e a rugosidade relativa do tubo, o que influencia por sua vez, na seleção dos diâmetros e estimativa da energia requerida (RETTORRE NETO, 2011). Este autor propôs uma modificação na equação de Darcy-Weisbach a fim de considerar a variação de diâmetro que tubos elásticos sofrem em função de alterações da pressão de operação (eq. 4). Além dos parâmetros considerados pela equação de Darcy-Weisbach, esta equação considera o módulo de elasticidade (E) do material do tubo, a espessura da parede e a pressão exercida internamente na parede do tubo.

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \left(\frac{PD}{1 - eE} \right) \quad (4)$$

em que: hf – perda de carga (m); f – fator de atrito de perda de carga (adimensional); L – comprimento do tubo (m); V – velocidade da água (m s^{-1}); g – aceleração da gravidade para a localidade (m s^{-2}); D – diâmetro interno (m); P – Pressão interna (MPa); e – espessura da parede do tubo (m); e E – Módulo de elasticidade do material do tubo (MPa).

Porto (2006) sugere a adoção da fórmula de Hazen-Williams com restrições, pois o coeficiente C além de depender do diâmetro e do estado das asperezas internas, é afetado pelo grau de turbulência, não caracterizando uma categoria de tubos como especificado nas tabelas que acompanham a fórmula.

Para $Re \geq 5 \times 10^5$ o valor do coeficiente C de Hazen-Williams é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa, podendo ocorrer erros relativamente importantes quando da adoção de único valor de C para grande variedade de diâmetros e considerando apenas a rugosidade (ALLEN, 1996). Por outro lado, para tubos hidraulicamente lisos e número de Reynolds não superiores a 10^5 , a fórmula de Flamant revelou-se particularmente exata em estudo realizado por Assy (1977) sobre o emprego da equação de Darcy-Weisbach para perda contínua de carga e as limitações destas fórmulas empíricas.

2.3 Fator de atrito (f)

Considerando-se a equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito é essencial para a predição da perda contínua de carga, sendo normalmente a tarefa mais difícil para a aplicação da equação (VIANNA, 1997; AZEVEDO NETTO et al., 1998; ANDRADE; CARVALHO, 2001).

No escoamento turbulento, o fator de atrito depende do Re e da rugosidade relativa dos tubos (ϵ/D), de modo que o escoamento pode ser tido como hidraulicamente liso, hidraulicamente rugoso ou de turbulência completa. No escoamento hidraulicamente liso a camada limite cobre totalmente as irregularidades na parede interna do tubo. Por outro lado, no escoamento rugoso a espessura da camada limite é menor do que a rugosidade interna do tubo, a qual influencia a velocidade de escoamento e aumenta a turbulência (YANG; JOSEPH, 2009).

A rugosidade superficial interna do tubo é fator determinante do regime de escoamento, uma vez que dependendo da viscosidade e velocidade do fluido, maior ou menor será a espessura da subcamada viscosa, definindo se o tubo opera em escoamento laminar

($Re < 2000$), de transição ($2000 \leq Re \leq 4000$) hidraulicamente liso ($4000 \leq Re \leq 10^5$) ou rugoso ($Re \geq 10^5$) (PORTO, 2006). Esta condição de operação, por sua vez, definida pelo número de Reynolds, é utilizada para definição da equação empírica a ser adotada para cálculo de f , uma vez que só podem ser aplicadas para o regime de escoamento em que foram ensaiadas (NEVES, 1989; ANDRADE; CARVALHO, 2001).

No regime laminar, o fator de atrito independe da rugosidade do tubo e pode ser estimado por uma função somente de Re , conforme equação de Hagen-Poiseuille (eq. 5), devido ao efeito da maior espessura da subcamada viscosa (ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; PROVENZANO; PUMO, 2004; VILAÇA, 2012).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

em que: Re – Número de Reynolds (adimensional).

Para a transição entre o escoamento laminar e escoamento turbulento, o fator f não fica bem caracterizado, sendo por isso considerada região crítica (CHENG, 2008; YOUNG HUI et al., 2011).

Generalizando, no caso do escoamento turbulento, seja conduto liso ou rugoso, o fator de atrito pode ser estimado com boa precisão pela equação de Colebrook-White (eq. 6), a qual pode ser entendida como a combinação empírica entre as formulações de Prandtl, para escoamento turbulento uniforme em tubos lisos, e von Kármán, para tubos rugosos; tendo estas duas bases teóricas e sendo válida para ($2000 \leq Re \leq 10^8$) e ($0 \leq \varepsilon/D \leq 0,005$) (ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; YOO; SINGH, 2005; SONNAD; GOUDAR, 2006; PORTO, 2006; CARDOSO; FRIZZONE; REZENDE, 2008).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 D} + \frac{2,52}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

em que: ε – rugosidade da superfície interna da tubulação (mm).

A equação de Colebrook-White apresenta como desvantagem a necessidade da aplicação de métodos iterativos de cálculo para sua resolução, uma vez que é implícita para o fator f , porém tem se tornado cada dia mais adotada em função do advento de programas computacionais.

Porto (2006) ressalta que para tubos rugosos o modelo de Colebrook-White se resume à equação de Prandtl (eq. 7), de modo que o fator de atrito independe do número de Reynolds, sendo escrito como uma função da rugosidade relativa (ε/D). Por outro lado, no caso de escoamento uniforme em tubos lisos, no qual o tamanho das asperezas não influi sobre a turbulência do escoamento e o coeficiente f independe da rugosidade do conduto, tal modelo fica resumido somente à formulação proposta por Prandtl-von Kármán (eq. 8).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \frac{\varepsilon}{3,71 D} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,52}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (8)$$

Diante da complexidade da aplicação da equação de Colebrook-White, alguns modelos foram apresentados de forma explícita para o fator de atrito. Recentemente apresentada por Swamee, a eq. (9) permite o cálculo explícito do fator f (SWAMEE, 1993; PORTO, 2006). No entanto, Andrade e Carvalho (2001) recomendam seu uso com cautela, uma vez que encontraram maiores desvios de f em relação às equações de Colebrook-White, Prandtl-Colebrook, Moody, Nikuradse, Blasius e Prandtl-von Kármán à medida que se aumenta a rugosidade e diminuição com o aumento de Re .

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^{1/p_1} + 1,325^{1/p_1} \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{k_1}{Re} \right)^{P_2} \right]^{-2/p_1} \right\}^{p_1} \quad (9)$$

em que: $p_1 = 0,125$, $k_1 = 2500$ e $P_2 = 6$ são constantes determinadas experimentalmente e apresentadas por Swamee (1993).

A fórmula de Blasius (eq. 10), a despeito da sua simplicidade, ajusta-se bem a resultados experimentais para tubos hidraulicamente lisos, com $4000 \leq Re \leq 10^5$, como os de PVC (PORTO, 2006).

$$f = \frac{c'}{Re^m} \quad (10)$$

em que: $c' \cong 0,316$ e $m \cong 0,25$.

Cardoso, Frizzone e Rezende (2008), obtiveram os valores de 0,300 e 0,25 para os coeficientes c' e m , respectivamente, em estudo realizado com tubos de polietileno de pequenos diâmetros; relatando ainda que apesar da fórmula de Blasius superestimar o fator f , ela pode ser utilizada em concomitância com a equação de Colebrook-White em projetos de irrigação. Bagarello et al. (1995) atribuem a variação do coeficiente de atrito obtido experimentalmente ao fato de os tubos atuais de polietileno serem mais lisos que os utilizados por Blasius para propor os coeficientes da equação. Variações na pressão de ensaio durante testes de perda conduzem a erros nas estimativas do fator de atrito, uma vez que menores perdas de carga observadas em relação à perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, com f de Blasius, foram atribuídas por Frizzone et al. (1998) ao aumento de diâmetro dos tubos de polietileno quando pressurizados. Alterações no diâmetro interno devidas à pressão de operação em tubo de polietileno provocaram variações na perda de carga superiores a 20% (VILELA et al., 2003).

2.4 Rugosidade superficial e processos de fabricação

O produto final do dimensionamento de sistemas hidráulicos é a escolha do conjunto motobomba, que requer a estimativa correta da perda de carga a partir das dimensões do tubo, velocidade do fluido e do fator de atrito para o regime de escoamento, sendo este último dependente do estado de asperezas da superfície dos tubos (SCHRODER, 2011).

Tal autor alerta sobre a necessidade de medições reais das superfícies para garantir melhor confiabilidade aos profissionais envolvidos na elaboração de projetos de bombeamento. Além disso, questiona inúmeras referências publicadas que embora contribuam para os cálculos de perda de carga, merecem melhor atenção quanto aos métodos e campo de aplicabilidade, principalmente no que diz respeito aos impactos técnicos e econômicos, observando-se as divergências existentes entre valores obtidos em superfícies de tubos comerciais e os deduzidos por formulações teóricas ou ensaios de rugosidade criada por elementos artificiais.

Os valores de rugosidade normalmente utilizados por projetistas, técnicos e especialistas que trabalham com escoamento em tubulações, são oriundos dos trabalhos de *Johann Nikuradse* (NIKURADSE, 1933 apud HAGER; LIIV, 2008), nos quais foi simulada uma textura da superfície de escoamento por meio da rugosidade (ϵ), composta por grãos de areia colados na parede interna dos tubos. Segundo Schroder (2011), nos últimos anos têm surgido diversas publicações acerca da rugosidade superficial de tubos em várias partes do

mundo, porém a maioria dos trabalhos não é conclusiva, apesar de fundamentação analítica e realização de experimentos; tendo sugerido a realização de novos trabalhos para esclarecimentos sobre as divergências encontradas entre ensaios de laboratório e determinações práticas.

A rugosidade, de difícil determinação prática, deveria ser fornecida pelo fabricante do conduto, entretanto, raramente se encontram informações técnicas a este respeito para a maioria dos tubos comerciais; além disso, os valores da rugosidade encontrados em bibliografias técnicas são bastante variáveis, apresentando para um mesmo tipo de material, ampla faixa de valores, causando dúvidas e dificultando a tomada de decisão pelo técnico projetista (ANDRADE; CARVALHO, 2001).

Processos mecânicos e químicos de fabricação produzem rugosidade aleatória em superfícies reais, sendo o que ocorre na maioria das situações de engenharia (REN et al., 2011). Asperezas acentuadas da superfície interna do tubo acabado são indesejáveis e difíceis de controlar durante a fabricação, que ocorre por extrusão hidrostática do polímero termoplástico que os constitui, de modo que as estrias e sulcos na superfície interna do tubo, causados pelo cabeçote da extrusora, normalmente se orientam na direção perpendicular ao fluxo da água.

A extrusão hidrostática, também chamada de fluido a fluido, ocorre a pressões da ordem de $1,5 \times 10^6$ kPa, tendo normalmente como meio fluido óleos vegetais. Diminuindo-se as asperezas de uma superfície, normalmente implica no aumento exponencial dos seus custos de fabricação. Isto resulta frequentemente em um intercâmbio entre o custo industrial de um componente e seu desempenho em aplicação. Ressalta-se que os polímeros não são uniformes quando se considera a sua composição química, peso molecular e estrutura (LEITE, 1994).

A qualidade da superfície interna de tubos é diferenciada em termos da sua rugosidade, representando as irregularidades de pequena escala da superfície deixadas pelas ferramentas durante o processo de produção; da ondulação refletida pela sobreposição da rugosidade e resultante de vibrações, tensões, deflexão e causas externas; e em termos do erro de forma, tidos como a medida dos desvios de forma de uma superfície de sua forma ideal cilíndrica. Desse modo, a ondulação da superfície se associaria então aos desvios em escala intermediária entre a rugosidade e o erro de forma (SHERRINGTON; SMITH, 1986; HUTCHINGS, 1992; FACCIO, 2002).

2.5 Rugosímetros

Os perfis medidos com rugosímetros são obtidos por meio do contato direto de uma ponta apalpadora, constituída de diamante, com raio e ângulo de ponta variando de 1 μm a 5 μm e de 60° a 90°, respectivamente. As características desta ponta do apalpador, assim como a pressão com que a mesma se desloca sobre a superfície, podem interferir no processo de medição e interpretação do resultado. Percebe-se o efeito do raio da ponta quando se imagina as dimensões das deformações pelas quais a mesma passará, sendo que vários trabalhos já foram desenvolvidos para investigar este efeito (DEVRIES, 1985; McCOOL, 1984; O'DONNELL, 1993; WHITEHOUSE, 2002 apud LEACH; HAITJEMA, 2010; RADHAKRISHNAN, 1970). Por outro lado, pressões elevadas podem fazer com que o apalpador provoque ranhuras na superfície avaliada. Faccio (2002) comenta que equipamentos óticos podem evitar estas interferências, como microscópios de varredura eletrônica ou interferômetros óticos. Além disso, apenas a seleção de pontas com dimensões mais sutis já é suficiente para a obtenção de resultados confiáveis, de acordo com o nível de detalhamento da peça (POON; BHUSHAN, 1995).

Faria et al. (2010), utilizando rugosímetro de bancada com precisão microgeométrica, concluíram que o equipamento mostrou-se satisfatório para a avaliação da rugosidade média (R_a) de tubos de polietileno, utilizando apalpador de 2,0 μm e 60° para o raio e ângulo de ponta, respectivamente. Neste trabalho, os resultados obtidos foram condizentes com as referências encontradas em tabelas resultantes de trabalhos experimentais baseados nas experiências de *Nikuradse*. Vale ressaltar que a rugosidade foi avaliada em termos de apenas um parâmetro, não sendo abordados os demais parâmetros de rugosidade possíveis de serem estudados com o equipamento utilizado.

Diante do exposto, tecnologias de medição direta da rugosidade com comprovada eficiência de caracterização da superfície real dos tubos são fundamentais para determinação da rugosidade em tubulações comerciais, cujos materiais e processos estão em contínua evolução; devendo-se ainda substituir a utilização de elementos artificiais para simulação de rugosidade por varreduras de superfície em situações práticas, para esclarecimentos das verdadeiras correlações embutidas nos cálculos de perdas de carga (SCHRODER, 2011), bem como reduzir os custos de investimento e operação das instalações hidráulicas do sistema de irrigação.

2.6 Parâmetros de rugosidade

Geralmente o perfil de rugosidade é representado em escalas de ampliação distintas para as direções vertical e horizontal. Isto é devido ao interesse de se evidenciar as mudanças no perfil na direção perpendicular à superfície (FACCIO, 2002).

As funções de parametrização da rugosidade referem-se à amplitude ou espaçamento das irregularidades (profundidades e distâncias de vales e picos no perfil), podendo ser de natureza híbrida em alguns casos. Essas funções matemáticas estão bem caracterizadas nos instrumentos de medição de rugosidade, restringindo-se o número de parâmetros possíveis de serem avaliados ao nível de sofisticação e tipo do aparelho. Em laboratórios normalmente se utilizam rugosímetros de bancada, com softwares para visualização dos parâmetros medidos e sua representação gráfica. Por outro lado, em chão de fábrica são utilizados rugosímetros portáteis, práticos, porém com limitação de recursos visuais.

A definição do tipo de parâmetro que deve ser adotado para a caracterização e melhor representação das superfícies deve levar em consideração as características dimensionais da peça e a função para a qual foi projetada. Infere-se que tubulações sejam bem caracterizadas por parâmetros que reproduzam o efeito das deformações da superfície interna do tubo sobre o regime de escoamento (FARSHAD; RIEKE; GARBER, 2001).

Por serem valores numéricos resultantes de integrações ou operações matemáticas simples dos perfis amostrais da superfície, os parâmetros podem estar sujeitos a diversos erros de medição e interpretação. Contudo, é extremamente útil dispor dos mesmos para comparação e análise de superfícies, seja resumindo informações contidas em uma superfície tridimensional, ou para separar e classificar superfícies distintas, geradas por diferentes processos de fabricação (FACCIO, 2002).

A rugosidade média (R_a) é o parâmetro clássico para representação de rugosidade adotado na maioria das situações (GADELMAWLA et al., 2002), correspondendo à altura de um retângulo, cuja área seja igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média dentro de comprimento de avaliação l_m , de modo que a área de picos relativa à linha média seja igual à área de vales no perfil medido. O parâmetro R_q representa a raiz quadrada do somatório de desvios ao quadrado, sendo, portanto maior que o R_a . Por outro lado, o parâmetro R_c diz respeito à amplitude média das alturas das irregularidades no perfil, sendo representado pela média dos cinco valores de “cut-off”, enquanto o R_y é a altura máxima de picos e vales dentre estes cinco valores (Anexo A). Outro parâmetro primitivo de interesse é o R_t , que faz referência à rugosidade total, obtido com o

resultado da soma da máxima altura de pico com a máxima profundidade de vales no perfil, conforme se apresenta no Anexo A.

2.7 Normalização, medição e processo de filtragem do perfil de rugosidade

A fabricação de tubos no Brasil é baseada no sistema de normas ISO (International Organization for Standardization), o qual reúne normas de institutos de padronização de 164 países, sendo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) a entidade responsável pela representação perante a ISO (MARIANI, 2006).

Os conceitos de medição de rugosidade e ondulação de uma superfície real são ilustrados na Figura 1. Verifica-se que para os comprimentos de amostragem le_1 e le_2 , definidos como valor ou nível de “cut-off” na linguagem técnica dos aparelhos de medição, tem-se os respectivos valores de $H1$ e $H2$ para amplitude da rugosidade, sendo que este último incorpora também o efeito da ondulação sobre o erro de forma da superfície.

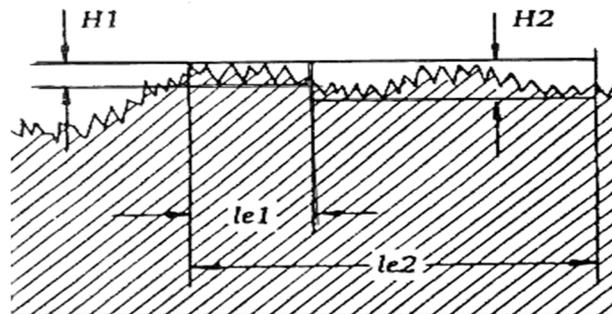


Figura 1 – Representação do erro de forma (rugosidade + ondulação) de uma superfície. Adaptado de MITUTOYO (2012)

A noção de rugosidade em termos de geometria de superfície refere-se às menores alturas de irregularidades, com pequenos comprimentos de picos e vales, definindo limites de bandas estreitas. Irregularidades com maiores comprimentos definem a ondulação e o erro de forma, sendo essencial a distinção dos mesmos para melhor caracterização e avaliação da qualidade da superfície real do perfil analisado (BORYCZKO, 2010).

A separação dos comprimentos de onda relativos à rugosidade daqueles que se referem à ondulação é chamada de filtragem, sendo que o perfil de rugosidade é obtido pelo processamento dos sinais a que correspondem o perfil, removendo-se o efeito da ondulação e erro de forma pela definição do comprimento de onda de corte ou “cut-off” (LINGADURAI; SHUNMUGAM, 2006). Diversos trabalhos foram realizados para estudo e desenvolvimento

desses filtros, que podem ser analógicos, digitais e mais recentemente a filtragem por meio da aplicação de funções matemáticas ao perfil efetivo (CHEN; YANG; LI, 1999; RAJA; MURALIKRISHNAN; FU, 2002; LINGADURAI; SHUNMUGAM, 2006; DOBRZĄŃSKI; PAWLUS, 2013), sendo o filtro gaussiano o mais adotado (ZENG; JIANG; SCOTT, 2011).

A filtragem mecânica ou analógica não é normalizada atualmente e permite filtrar apenas a rugosidade; sendo que o uso dos filtros digitais ou elétricos tende a diminuir por naturalmente apresentarem defasagem na transferência do sinal. Esses filtros podem ser do tipo passa-alta, utilizados para remover comprimentos de onda longos e filtrar a rugosidade, ou do tipo passa-baixa (Figura 2), que removem os comprimentos de onda menores que o comprimento de amostragem, tecnicamente chamado de valor de “cut-off” ou comprimento de onda de corte, e filtram a ondulação (RAJA; RADHAKRISHNAN, 1979).

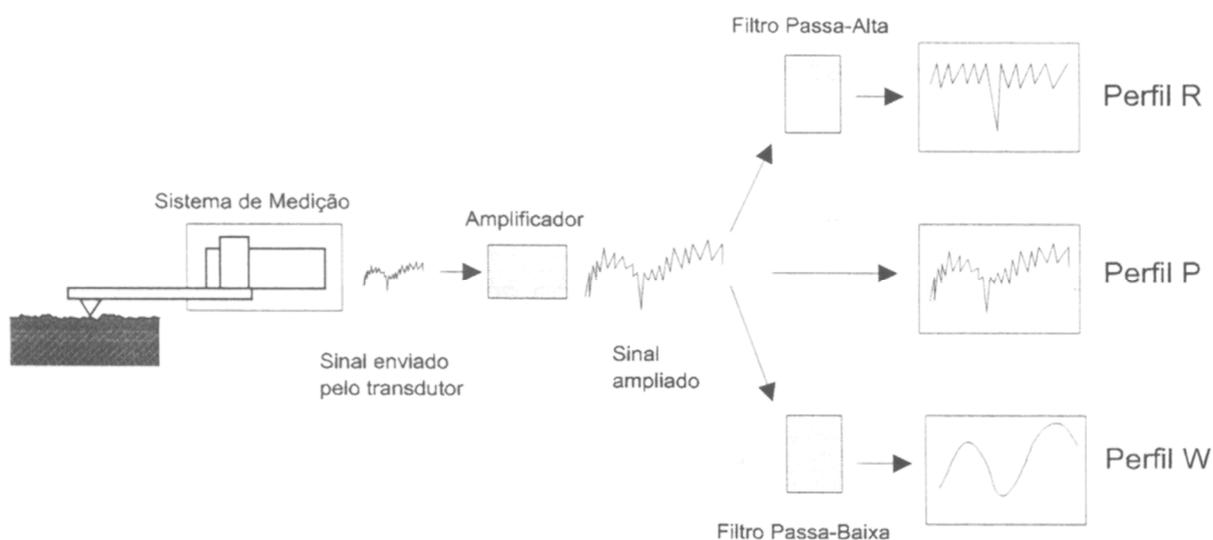


Figura 2 – Esquema do processo de filtragem do perfil primário. Adaptado de MITUTOYO (2012)

Por outro lado, tem sido crescente a adoção de filtros matemáticos, os quais avaliam a rugosidade e ondulação, filtrando-as por meio de uma função gaussiana ponderada em cada ponto medido no comprimento de amostragem e suprimindo valor equivalente a 50% desse comprimento no início e ao final do comprimento de avaliação (RAJA; MURALIKRISHNAN; FU, 2002).

De acordo com a norma ISO 4288, o perfil de rugosidade é derivado do perfil primário através da retenção de componentes de comprimentos de onda curtos quando se aplica o filtro em tal perfil (KRISTEK, 1996). Descrito na ASME B46.1 e ISO 11562, o filtro gaussiano é o amplamente mais utilizado atualmente, sendo que a função de ponderação do filtro tem a

forma de uma função de densidade de probabilidade de Gauss, com valores de “cut-off” recomendados de 0,08; 0,25; 0,8; 2,5 e 8 mm (RAJA; MURALIKRISHNAN; FU, 2002; LINGADURAI; SHUNMUGAM, 2006; JIANG E WHITEHOUSE, 2012; PIRATELLI-FILHO; STERNADT; ARENCIBIA, 2012).

O filtro possui uma função interpoladora, ou seja, ele ameniza a amplitude do sinal, dando mais suavidade aos contornos da superfície (WHITEHOUSE, 1994; OLIVEIRA, 2004), sendo a média dos valores do perfil normalmente distribuída. Os filtros elétricos requerem maior espaço para armazenamento e apresentam velocidade de processamento computacional reduzida, mas ainda permanecem descritos na ASME B46.1, enquanto que a ISO já os eliminou de suas normas (RAJA; MURALIKRISHNAN; FU, 2002).

Desta forma, para a segregação da rugosidade de ondulação, superpostas no perfil efetivo composto, é necessário estabelecer um valor de “cut-off” adequado por ocasião da aplicação do filtro, o qual deverá ser maior que o comprimento mínimo de ondulação no perfil filtrado. Este comprimento de onda limite, ou valor de “cut-off” (λ), tem a função de filtrar e excluir a influência da ondulação na determinação do perfil de rugosidade, e deve ser definido na aplicação do filtro em função do valor de rugosidade média (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores de “cut-off” em função da rugosidade média para filtragem de perfil aperiódico (ABNT NBR ISO 4287, 2002)

Rugosidade média – Ra (μm)	$R_{\text{máx}}$ (μm)	“cut-off” (mm)	l_m (mm)
$Ra \leq 0,1$	$R_{\text{máx}} \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,1 \leq Ra \leq 2$	$0,5 \leq R_{\text{máx}} \leq 10$	0,80	4,00
$2 \leq Ra \leq 10$	$10 \leq R_{\text{máx}} \leq 50$	2,50	12,50
$Ra \geq 10$	$R_{\text{máx}} \geq 50$	8,00	40,00

2.8 Controle de qualidade das medições

Sistemas de medição e equipamentos utilizados em ensaios laboratoriais devem ser rigorosamente controlados objetivando-se reduzir as incertezas nas medições realizadas. Assim, ferramentas de Controle Estatístico de Processos (CEP) surgem como alternativas para a avaliação da qualidade das medições, sendo que o mesmo possibilita o diagnóstico rápido e eficaz na prevenção e detecção de problemas. As técnicas de controle estatístico de qualidade foram desenvolvidas para avaliar a variabilidade de processos de produção ou sistemas de medição a curto e a longo prazos, sendo que as cartas de controle de Shewhart figuram como apenas uma das chamadas “sete ferramentas” da qualidade (MONTGOMERY, 2009). O CEP,

ou controle de qualidade, tem como objetivo detectar rapidamente alterações dos parâmetros de determinados processos para que os problemas possam ser corrigidos antes que muitos itens não conformes sejam produzidos (MINGOTI; FIDELIS, 2001; SILVA et al., 2008), ou dados não confiáveis sejam coletados por equipamentos em sistemas de medição.

Para Noronha et al. (2011), qualidade pode ser entendida como redução da variabilidade, podendo ser analisada por meio do CEP, de modo que deve-se assegurar que as variações estejam dentro de limites que assegurem a qualidade dos resultados dos ensaios. Em termos de sistemas de medição, essa redução refere-se à influência de causas externas na obtenção das medidas das características de qualidade do processo, sendo que o pressuposto inicial para a aplicação das cartas de controle é a normalidade da variável característica aferida.

Um processo é dito estável quando a variabilidade do mesmo se mantém dentro dos limites de controle, sem padrões indicativos cíclicos, tendências ou não aleatoriedade dos dados. Na análise de estabilidade podem ser adotadas cartas para controle de média (*média – X* e *amplitude móvel – IM*), e dispersão (*amplitude – R* e *desvio padrão – S*) dos dados.

A interpretação das cartas de controle requer a compreensão e capacidade de identificação da ocorrência (ou não) de padrões de não aleatoriedade. Segundo Werkema (1995), citado por Nomelini et al. (2009), tais padrões podem ser identificados por alguns fenômenos como pontos fora de controle, mistura, descolamento no nível do processo, padrões cíclicos, tendência e estratificação. Pontos fora dos limites de controle constituem a indicação mais evidente da ausência de controle do processo, associando-se a erros de medição, instrumentos descalibrados, erros de operador ou defeitos em equipamentos. Mistura caracteriza-se por poucos pontos próximos à linha central (*LC*) e associa-se à segregação dos dados conforme duas ou mais distribuições de probabilidade superpostas. O deslocamento no nível do processo geralmente está associado a inovações metodológicas e técnicas capazes de causar deslocamento na média das observações do processo. Tendência refere-se ao movimento contínuo dos valores em uma direção e pode ser ocasionada em função do desgaste de instrumentos, condições ambientais e fadiga de operador. Padrões cíclicos são caracterizados pela sucessão de grupos de observações dispostos acima e abaixo da linha central das cartas de controle, assemelhando-se a uma senóide. Estratificação caracteriza-se pela acentuada ausência de variabilidade nas observações, havendo agrupamento dos dados em torno da linha central e distância relativamente grande em relação aos limites de controle. Este fenômeno tem como possível causa o cálculo incorreto dos limites superior e inferior de controle (MONTGOMERY, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Materiais de Irrigação (LEMI), vinculado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Engenharia da Irrigação (INCT-EI) e localizado no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em Piracicaba-SP. O Laboratório está acreditado junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) para a realização de ensaios certificados de material de irrigação, dispondo de equipamento específico para medição da rugosidade. Esta, por sua vez, foi utilizada como valor de entrada para ε na equação de Swamee (1993) para fator de atrito f . Em seguida, obteve-se a perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach, a qual foi comparada à perda de carga observada nos ensaios realizados com tubos de cloreto de polivinila (PVC) e de polietileno de baixa densidade linear (PEBDL). As análises foram realizadas utilizando o programa estatístico Minitab 16.1[®].

3.1 Material avaliado

Foram avaliados tubos de PVC de 35, 50 e 75 mm e de polietileno de 10, 13, 16, 20 e 26 mm de diâmetro nominal, os quais constituem maior parte das tubulações utilizadas em sistemas de irrigação por aspersão convencional e microirrigação, sendo mantido o mesmo fabricante para cada material e utilizadas cinco repetições para cada diâmetro.

3.2 Ensaio de perda de carga

3.2.1 Instalações e equipamentos

Previamente à avaliação da rugosidade (ε) dos tubos, foram realizados ensaios para determinação da relação vazão-perda de carga nos tubos de PEBDL. Para tal, foi utilizada uma motobomba de 2 cv, registros tipo agulha no início e fim da linha de recalque para ajuste de vazão e pressão de ensaio, a qual foi mantida em 196 kPa na entrada da linha (Figura 3), monitorada por manômetro digital (faixa de medição de 0 a 500 kPa, resolução de 1 kPa e incerteza expandida de 0,26%). A incerteza expandida é fornecida pelo órgão oficialmente credenciado para calibração dos instrumentos utilizados, e refere-se a uma faixa de valores que a grandeza pode assumir sem que haja comprometimento da qualidade da medida

realizada, sendo obtida a partir da multiplicação da incerteza padrão do instrumento por um fator abrangência “*k*”, tabelado em função do nível de confiança requerido para o intervalo de valores (ISO GUM, 2008).

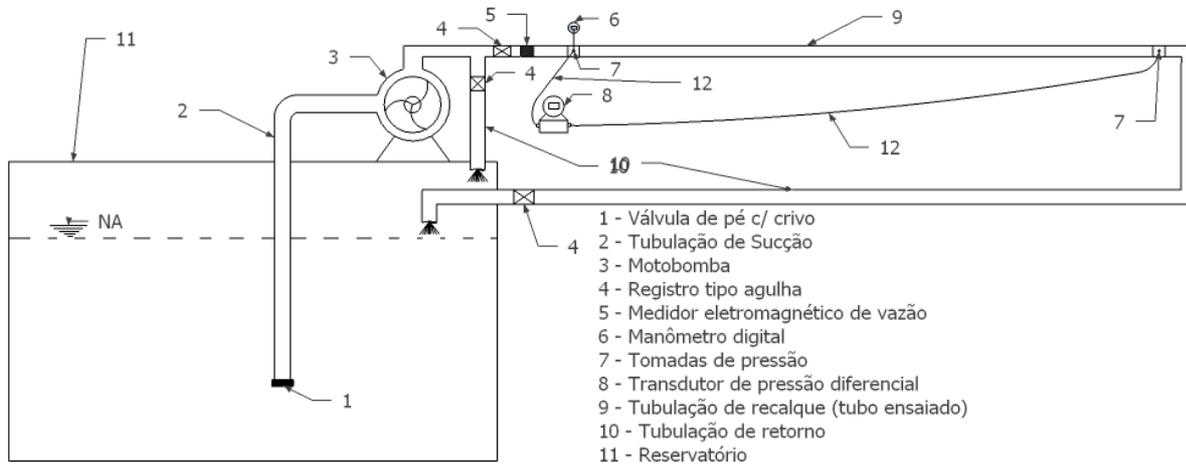


Figura 3 – Croqui da estrutura utilizada nos ensaios de perda de carga

Tomadas de pressão foram instaladas no início e final da linha, de modo que o comprimento útil do tubo foi de 21 m para os tubos de 13, 16, 20 e 26 mm; e de 15 m para o tubo de 10 mm devido à perda de carga ser superior à pressão de ensaio disponível por ocasião das maiores vazões de ensaio a serem recalçadas pelo conjunto motobomba.

A temperatura da água foi monitorada durante os ensaios para obtenção da viscosidade cinemática da água. Utilizou-se termômetro de mercúrio com faixa de medição de 0 a 100 °C, resolução de 1 °C e incerteza expandida de 1,08 °C.

A vazão foi ajustada manualmente por meio de um registro tipo agulha instalado no final da linha, as leituras foram realizadas com medidor eletromagnético apto a operar na faixa de medição de 0 a 4 m³ h⁻¹, com resolução de 0,001 m³ h⁻¹ e incerteza expandida de medição de 0,5%, sendo utilizados 15 valores de vazão de ensaio com intervalos determinados obedecendo-se os critérios de $Re \geq 3000$ e velocidade de escoamento não superior a 3 m s⁻¹.

Diante dos riscos e inconvenientes de se trabalhar com manômetro diferencial de mercúrio, ainda que em laboratório, utilizou-se um transdutor de pressão diferencial por leitura capacitiva para mensurar a perda de carga ao longo do comprimento total do tubo. Este instrumento de medição opera na faixa de 0 a 250 kPa, apresentando resolução de 1 kPa e incerteza expandida de 0,25%.

O comprimento útil para avaliação da perda de carga foi medido com trena e o diâmetro interno determinado por meio de projetor óptico de perfil, modelo Starrett HB 400 (Figura 4), assim como a espessura da parede dos tubos.



Figura 4 – Projetor óptico de perfil Starrett – modelo HB 400 com interface computacional para visualização (a) e anéis utilizados na projeção do perfil para medição do diâmetro do tubo (b)

O método de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para testar a aderência dos dados das medições de diâmetro interno à distribuição normal (Tabela 2).

Tabela 2 – Diâmetro nominal (DN), diâmetro interno (D_i), espessura da parede do tubo (e), desvio padrão (σ_{D_i}), coeficiente de variação (CV_{D_i}) e teste de normalidade para diâmetro interno dos tubos de polietileno avaliados

DN	D_i	e	σ_{D_i}	CV_{D_i}	Kolmogorov-Smirnov	
-----mm-----				%	P-valor	Normalidade
10	9,554	1,156	0,090	0,944	0,861265	Sim
13	13,120	1,086	0,121	0,924	0,673106	Sim
16	16,818	0,951	0,086	0,510	0,465738	Sim
20	20,720	1,148	0,171	0,824	0,394787	Sim
26	27,241	1,587	0,164	0,602	0,086475	Sim

3.2.2 Perda de carga estimada e indicadores de desempenho

A partir das equações de Swamee (1993) para fator de atrito e de Darcy-Weisbach obteve-se a perda contínua de carga estimada considerando os valores medidos de rugosidade por perfilometria no rugosímetro de bancada. Estas estimativas foram realizadas mantendo os intervalos de vazão adotados nos ensaios para determinação da perda de carga observada diretamente por Vilaça (2012) para PVC e para perda de carga verificada em transdutor de pressão diferencial para tubos de PEBDL, as quais foram consideradas de referência para as comparações posteriores.

Para os tubos de PVC foram utilizadas as relações vazão-perda de carga apresentadas por VILAÇA (2012), uma vez que fora considerado que alterações no diâmetro em função das variações de pressão de ensaio não são pertinentes a tubos rígidos. Tais relações são apresentadas na Tabela 3 e foram utilizadas neste estudo para obtenção dos valores de referência para perda de carga observada e posterior comparação com os valores calculados a partir da rugosidade determinada no rugosímetro.

Tabela 3 – Equações de perda contínua de carga, em m, para tubos de PVC, em função da vazão, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, conforme Vilaça (2012)

DN	Equação	r^2
35	$hf = 98780,6526 Q^{1,75533901}$	0,9959
50	$hf = 29089,1936 Q^{1,7806301}$	0,9998
75	$hf = 4543,9903 Q^{1,8113782}$	0,9979

O ajustamento das estimativas de perda de carga realizadas considerando o fator de atrito de Swamee (1993), obtido a partir dos valores de rugosidade medidos no rugosímetro como valor de entrada para ε , foi avaliado pelos índices de concordância de Willmott “ d ”, e de desempenho de Camargo e Sentelhas “ c ”, por retas 1:1 e pela distribuição de frequência do erro em relação à perda de carga observada nos ensaios.

O grau de dispersão dos dados em relação à média, ou erro aleatório, é avaliado pelo coeficiente de correlação linear de Pearson (r) e reflete a precisão do modelo. O índice de Willmott (eq. 11) diz respeito à exatidão das estimativas, ou seja, refere-se ao afastamento dos valores estimados em relação aos dados medidos (WILLMOTT et al., 1985). Já o índice “ c ” refere-se à confiança ou desempenho do modelo usado para estimativa, conforme classes para sua interpretação apresentadas na Tabela 4, sendo composto pelo produto entre “ r ” e “ d ” (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (hf_e - hf_o)^2}{\sum_{i=1}^n [|hf_e - hf_m| + |hf_o - hf_m|]^2} \quad (11)$$

em que: hf_e – valores da perda de carga estimada (m); hf_o – valores da perda de carga observada (m); hf_m – média dos valores observados de perda de carga (m); n – número de observações.

Tabela 4 – Critérios para interpretação do índice “c”

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Ruim

A frequência de ocorrência do erro relativo foi avaliada pela curva de distribuição acumulada para o parâmetro de rugosidade que propiciou menor erro relativo médio (eq. 12) na comparação da perda de carga estimada com a perda de carga observada.

$$ER_{(\%)} = 100 \left| \frac{hf_e - hf_o}{hf_o} \right| \quad (12)$$

em que: $ER_{(\%)}$ – erro relativo porcentual.

Considerando-se as fórmulas práticas para o escoamento turbulento, como as de Hazen-Williams e Flamant, foram avaliados os coeficientes de rugosidade destas igualando-se as perdas de carga à formulação proposta pela equação de Darcy-Weisbach (eq. 1), explicitando-se os coeficientes de rugosidade de Hazen-Williams e Flamant, respectivamente, conforme eqs. 13 e 14 (ASSY, 1977; PORTO, 2006).

$$C = \frac{43}{f^{0,54} Re^{0,081} D^{0,011}} \quad (13)$$

$$b = \frac{f D^{0,5}}{2 g V^{1,5}} \quad (14)$$

Os valores obtidos da rugosidade superficial interna dos tubos foram confrontados com referências convencionais e empíricas de rugosidade (ϵ), tabeladas para os materiais avaliados. Esses valores variam de 0,0015 a 0,010 mm para tubos de cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral e tubos extrudados (PORTO, 2006).

3.3 Determinação da rugosidade

3.3.1 Corpos de prova

Os tubos foram recortados em pontos equidistantes para formar corpos de prova em formato cilíndrico ou semicilíndrico com comprimento de 5 cm, provenientes de tubos adquiridos aleatoriamente em lote comercial.

Para tubos de PVC a avaliação foi realizada mediante cinco determinações da rugosidade em posições diferentes e equidistantes de um mesmo tubo, desprezando-se 1,0 m no início e ao final, cujo comprimento padrão de fábrica é de seis metros, com cinco repetições. Desta maneira, foram utilizados 25 corpos de prova nas determinações para cada diâmetro, totalizando 100 determinações longitudinalmente e transversalmente à direção de escoamento da água. Para os tubos de polietileno, procedeu-se de forma semelhante, porém com espaçamento de 3,5 m entre pontos de retirada das amostras, desprezando-se 1,75 m no início e ao final da linha, com quatro repetições por diâmetro avaliado.

3.3.2 Equipamento e ambiente de testes

A avaliação dos perfis de rugosidade e ondulação foi realizada mediante utilização do rugosímetro de bancada que se encontra instalado nas dependências do LEMI e possui precisão microgeométrica.

O equipamento é composto basicamente por ponta apalpadora de diamante, cujo raio da seção transversal e ângulo de ponta são de 2,0 μm e 60°, respectivamente (Figura 5a). O rugosímetro foi configurado para se deslocar à velocidade constante de 0,1 mm s^{-1} sobre a superfície interna do tubo (Figura 5b), com cinco valores de “cut-off” igual a 2,5 mm,

resultando em 15 mm para o comprimento total de avaliação e 9600 pontos amostrados na superfície para traçar o perfil medido, sendo conectado a uma unidade computadorizada com software específico (Surftest SV-600/Mitutoyo®) para operação, leitura e interpretação das medições (Figura 5c), aferido diariamente com amostra padrão de rugosidade Ra conhecida igual a $2,94 \mu\text{m}$ (Figura 5d). A unidade de avanço permite posicionar o apalpador sobre o corpo de prova apoiado na morsa do equipamento por meio de deslocamentos vertical e horizontal sobre coluna de sustentação, sendo todo o conjunto apoiado em bancada estática.



a



b



c



d

Figura 5 – Ângulo e raio da ponta da agulha utilizada (a), processo de escaneamento e medição da superfície interna do tubo (b), rugosímetro de bancada Surftest SV-624 (Série 600)/Mitutoyo® (c), placa padrão de calibração e agulhas para medição do perfil de rugosidade (d)

O rugosímetro permite a avaliação dos perfis primários de rugosidade composto (Figura 6a) e filtrado (Figura 6b), além da ondulação (Figura 6c), constituintes das texturas primária e secundária de uma peça, respectivamente (BORYCZKO, 2010; BORYCZKO, 2013).

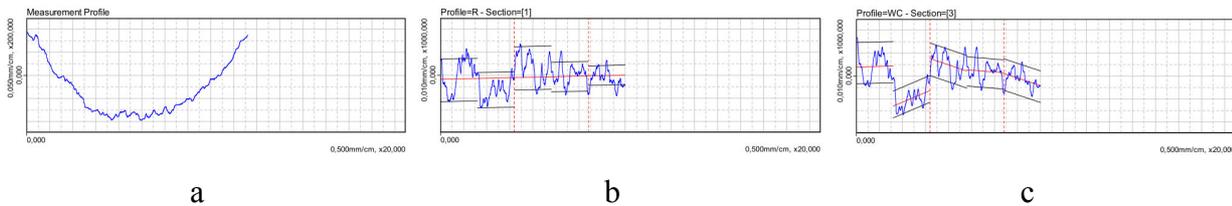


Figura 6 – Exemplos de perfis constituintes da textura da superfície interna dos tubos

Em processos industriais, o valor de “cut-off” é informado no desenho técnico da peça para ser respeitado durante o processo de fabricação a fim de atender ao estado de asperezas da superfície exigido para a função que a mesma é projetada. Não são conhecidos valores reais de rugosidade média de tubos para irrigação. Porém, sabe-se que processos de extrusão resultam em perfis de rugosidade aperiódicos. Desta forma, realizou-se testes prévios com a superfície interna dos tubos para aferição da faixa de rugosidade média que a mesma apresenta e definição do “cut-off”.

O filtro gaussiano utilizado desconsidera 50% do valor de “cut-off” para estabilização do apalpador no início e ao final do comprimento de medição l_m , composto pelos cinco valores de “cut-off” de 2,5 mm (Figura 7), conforme previsto na norma para termos, definições e parâmetros de rugosidade (ABNT NBR ISO 4287, 2002). Adotou-se o padrão específico fornecido pelo fabricante do equipamento que compõe lista dos parâmetros de amplitude e espaçamento possíveis de análise com o rugosímetro de bancada Surfrest SV-624.

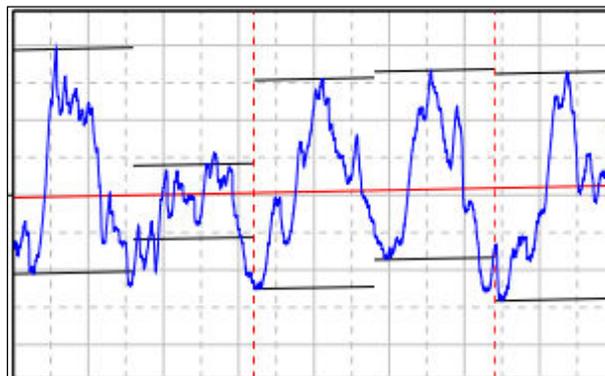


Figura 7 – Exemplo das amplitudes de rugosidade nos cinco comprimentos de “cut-off” que compõe o comprimento de medição l_m

As leituras foram realizadas em ambiente de acesso restrito e iniciadas diariamente após uma hora de condicionamento da umidade e temperatura do ar sob refrigeração a 21°C, visando minimizar a interferência do ambiente na qualidade das leituras e resultado da medição, além da possível influência de ruídos externos ou instabilidade da bancada de avaliação.

3.3.3 Cartas de controle de Shewhart e erro absoluto na aferição do instrumento

As cartas de controle de Shewhart foram utilizadas para avaliar a estabilidade do instrumento de medição na determinação da rugosidade superficial das amostras avaliadas. As cartas de controle para médias individuais do parâmetro Ra na amostra padrão de aferição do instrumento foram construídas com 75 leituras na placa, sendo as leituras realizadas diariamente antes do início dos testes com os tubos e os limites de controle estabelecidos conforme eqs. 15, 16 e 17 (MONTGOMERY, 2009).

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3\sigma \quad (15)$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad (16)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3\sigma \quad (17)$$

em que: LSC – Limite superior de controle para rugosidade média – Ra (μm);

$\bar{\bar{X}}$ – Média do processo de medição do parâmetro;

σ – Desvio padrão do processo de medição do parâmetro;

LC – Linha central para rugosidade média – Ra (μm); e

LIC – Limite inferior de controle para rugosidade média – Ra (μm).

O instrumento corrige automaticamente o valor de referência na segunda leitura da placa padrão, e por este motivo foram desenvolvidas as cartas de controle e calculado o erro absoluto para as duas leituras separadamente, com referência ao valor de rugosidade Ra igual a 2,94 μm .

3.3.4 Parâmetros avaliados

Devido ao fato do parâmetro Ra isolado não caracterizar bem situações em que se tenham vales e picos em grande frequência, também foram avaliados outros parâmetros fornecidos pelo equipamento, permitindo dar ênfase a maiores valores de picos e vales, além da forma das irregularidades.

Acredita-se que sejam relevantes na dinâmica do escoamento da água no interior do tubo, por exemplo, os parâmetros de amplitude Rq , Rc e Ry e Rt , os quais podem complementar a informação fornecida pela rugosidade média (Ra), assim como um parâmetro de contagem de picos Pcu . Farshad, Rieke e Garber (2001) adotaram os parâmetros Ra , Rq , Ry , R_{ZD} e R_{3Z} para estudar a rugosidade de tubos revestidos internamente utilizados na indústria petrolífera. Tais autores justificam ainda que estes parâmetros são mais susceptíveis de afetar o regime de escoamento nos tubos avaliados.

Visando avaliar a hipótese de igualdade das médias dos parâmetros de rugosidade entre os diâmetros de cada material, os dados foram submetidos ao teste de Tukey a 1% de probabilidade.

3.4 Análise de sensibilidade da perda de carga à rugosidade

Visando apoiar a escolha e identificação dos parâmetros para melhor representação da rugosidade da superfície, realizou-se análise de sensibilidade da perda de carga à rugosidade ϵ da equação de Swamee (1993) para fator de atrito f .

Para tal análise foi considerado um número de Reynolds fixo na faixa intermediária de vazões ensaiadas para os tubos. Este valor de referência foi representado pela média entre os parâmetros Ra e Ry , sendo estudada a sensibilidade da perda de carga para variações de rugosidade de $\pm 100\%$ em relação ao valor de referência. A análise de sensibilidade foi efetuada para cada um dos diâmetros estudados. A perda de carga como resposta à variação na rugosidade nos tubos de PEBDL foi obtida pela aplicação da equação de Darcy-Weisbach aos dados.

3.5 Espessura da camada limite

Considerando-se os parâmetros Ra para PEBDL e Rc para PVC como valor de entrada para rugosidade (ε) na equação de Swamee (1993), obteve-se a espessura média da camada limite δ (eq. 18), de modo que a mesma foi confrontada com o valor médio obtido para o parâmetro Rt . Este parâmetro representa a soma da máxima altura de picos com a máxima profundidade de vales em todo o comprimento de avaliação, conforme função matemática para sua obtenção e ilustração constantes no Anexo A.

$$\delta = \frac{32,81 \nu}{V\sqrt{f}} \quad (18)$$

em que: δ – espessura da camada limite (m);

ν – viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); e

V – velocidade da água (m s^{-1}).

A escolha do parâmetro Rt para esta comparação foi fundamentada no fato do mesmo ser representativo das maiores amplitudes de irregularidades no perfil medido, permitindo a classificação da condição de escoamento.

Além disso, averiguou-se a ocorrência de pontos causadores de turbulência no escoamento, sendo que foi avaliada a contagem de picos no perfil de rugosidade que ultrapassavam a espessura média da camada limite por meio do parâmetro Pcu . Este parâmetro se refere à contagem de picos a partir de um nível de corte no perfil de rugosidade medido, conforme ilustrado no Anexo A. O nível de corte foi estabelecido conforme a espessura média da camada limite obtida. Tal análise possibilitou confirmar a condição de escoamento em que foram realizados os ensaios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rugosidade

4.1.1 Rotina de aferição e verificação da estabilidade do rugosímetro

Durante a rotina de aferição, verificou-se maior erro no primeiro deslocamento da agulha sobre a superfície da amostra padrão (Figura 8), o que se justifica pelo ajuste interno do instrumento de medição para correção automática de valores. Porém, a segunda leitura apresentou menor variabilidade, o que é esperado devido ao mecanismo de auto-ajuste realizado pelo equipamento. Portanto, evidencia-se a necessidade de efetuar a aferição do rugosímetro sempre que o mesmo for utilizado.

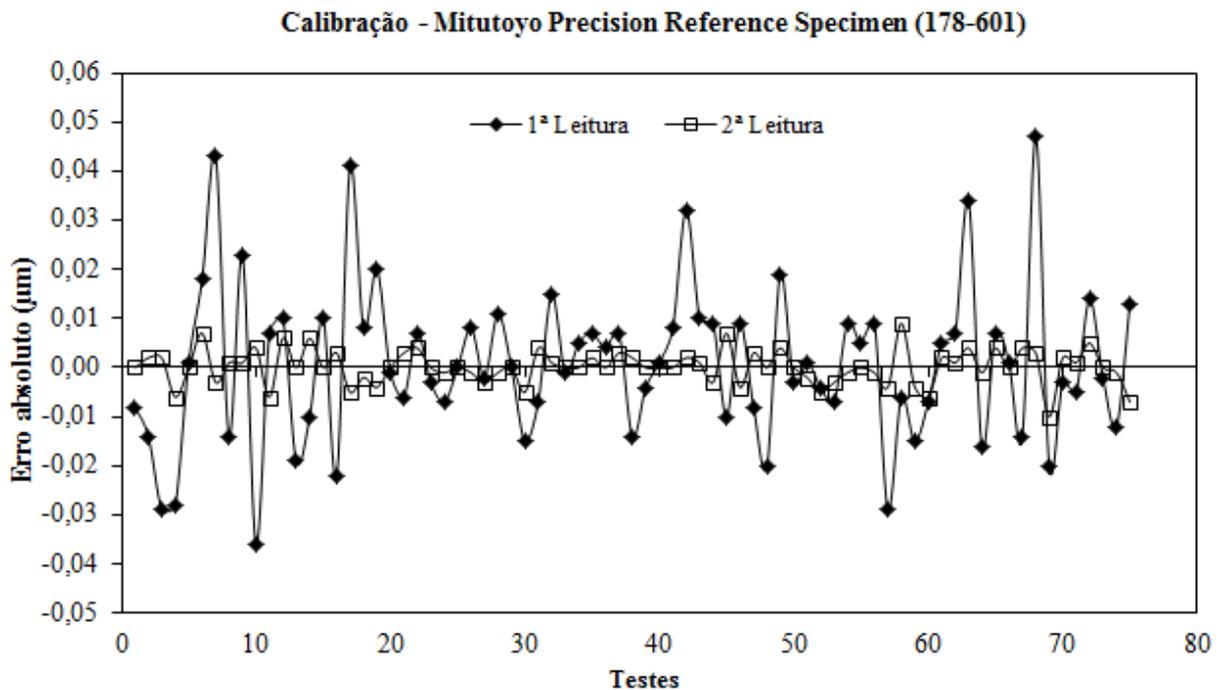


Figura 8 – Erro absoluto encontrado na aferição do rugosímetro com placa padrão ($Ra = 2,94 \mu m$), na primeira e segunda leituras

A média de todas as observações foi de 2,941 e 2,940 μm para o parâmetro Ra na primeira e segunda leitura, com erro relativo médio de 0,411 e 0,087%, respectivamente. Nielsen (1988) aborda a influência da forma da superfície sobre os resultados das medições de perfil, necessitando que se faça a calibração do equipamento previamente a partir de uma amostra padrão.

As cartas de controle para médias individuais mostram a estabilidade temporal das leituras do instrumento (Figura 9). Analogamente à distribuição do erro absoluto, nota-se que a amplitude de variação foi menor para a segunda varredura da superfície, sendo verificados os valores de 2,892 e 2,989 μm ; e 2,929 e 2,952 μm , para os limites inferior e superior de controle, na primeira (Figura 9a) e segunda (Figura 9b) leituras, respectivamente. Estes limites de controle estão localizados a ± 3 desvios padrão (σ) da média obtida no processo de medição, conforme princípios e pressupostos para aplicação de cartas de controle para avaliação da qualidade dos resultados de um sistema de medição (MONTGOMERY, 2009).

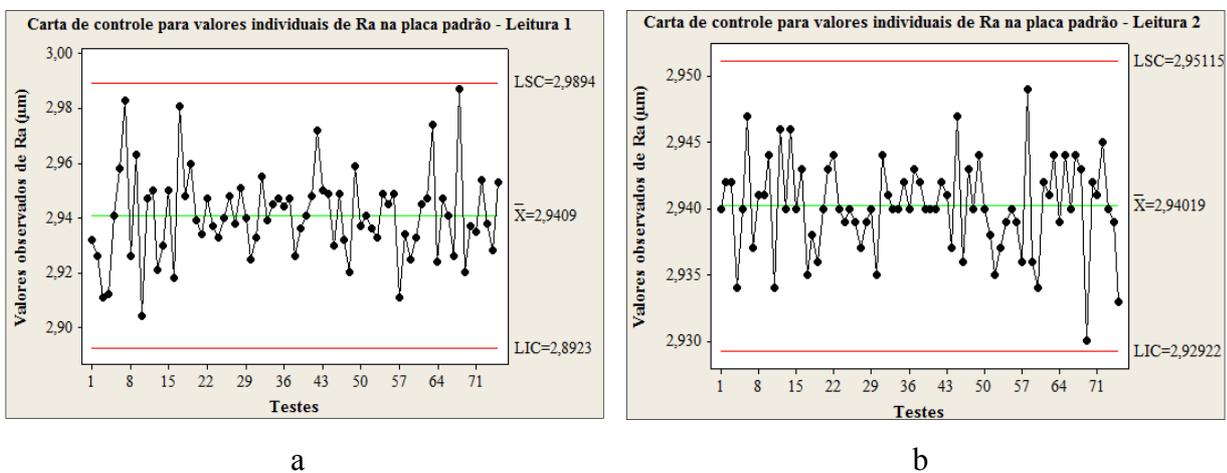


Figura 9 – Cartas de controle de valores individuais para a rugosidade média (Ra) obtida na placa padrão nos testes para afiação

Na Figura 9 verifica-se a ausência de pontos além dos limites superior e inferior de controle (LSC e LIC), demonstrando que o instrumento permaneceu estável e estatisticamente sob controle durante o estudo. Tal fato assegura a qualidade dos resultados obtidos nas medições de rugosidade realizadas. Caso ocorressem, padrões de variação não aleatória poderiam ser identificados por ocasião da avaliação da estabilidade do sistema de medição por meio das cartas de controle (WERKEMA, 1995 apud NOMELINI; FERREIRA; OLIVEIRA, 2009). A identificação desses padrões na interpretação das cartas permite implementar soluções para melhoria do sistema quando causas especiais de variação, como erros de medição, instrumentos descalibrados, erros de operador ou defeitos em equipamentos forem detectados, contribuindo para a redução da variabilidade e garantia da qualidade das medições realizadas (NORONHA et al., 2011).

4.1.2 Rugosidade da superfície interna dos tubos

Os valores médios obtidos dos parâmetros avaliados são apresentados na Figura 10, assim como o diagrama Box-Plot dos dados para cada diâmetro, sendo que não foram observadas diferenças entre as médias dos parâmetros avaliados para os tubos de PVC pelo teste de Tukey. Por outro lado, evidenciou-se diferença significativa dos parâmetros de rugosidade entre os diâmetros nominais dos tubos de PEBDL, e portanto, entende-se que a adoção de valores de rugosidade específicos para cada diâmetro contribui para a qualidade dos resultados relacionados a ensaios de perda de carga. Ressalta-se que tal diferença não se trata da resposta dos parâmetros a um tratamento, e sim da diferença de qualidade da superfície interna dos tubos, resultante do processo de fabricação dos mesmos.

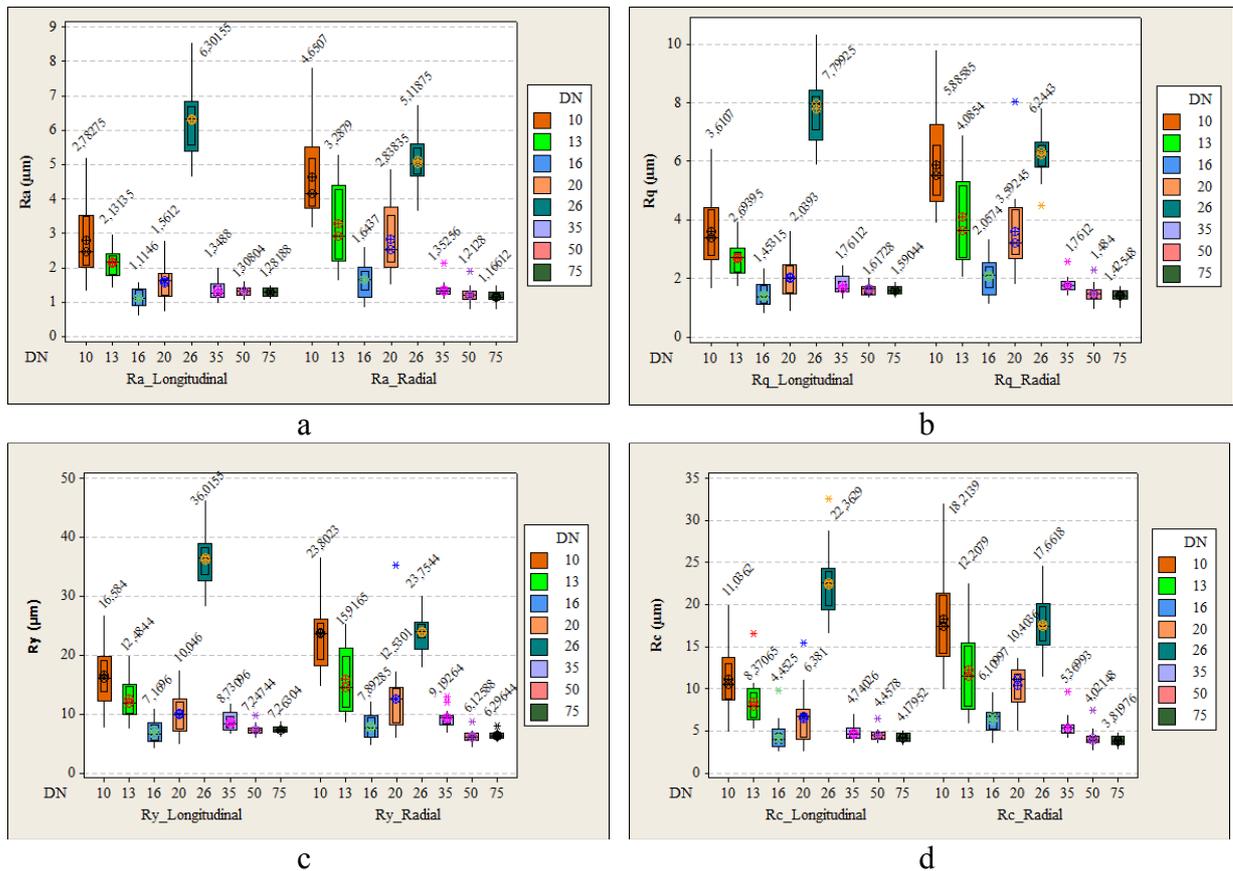


Figura 10 – Box-Plot da rugosidade média – Ra (a); da raiz quadrada da média aritmética do quadrado dos desvios a partir da linha média – Rq (b); da maior amplitude das irregularidades dentro do “cut-off” – Ry (c); e da média aritmética da altura de irregularidades no perfil – Rc (d), com indicação no diagrama do valor médio obtido de cada parâmetro para os respectivos diâmetros nominais de 10, 13, 16, 20 e 26 mm para tubos de PEBDL; e 35, 50 e 75 mm para os tubos de PVC

Tendência semelhante foi verificada para os parâmetros Ra , Rq , Ry e Rc , os quais diferem apenas na amplitude das irregularidades representadas por cada parâmetro, o que era

de se esperar por serem todos calculados a partir da referência da linha média no perfil efetivo (GADELMAWLA et al., 2002). Farshad, Rieke e Garber (2001) sugerem a adoção do parâmetro R_{ZD} , equivalente ao R_c apresentado no presente trabalho, para cálculo da perda de carga em gasodutos e oleodutos devido à sua capacidade de detectar protuberâncias mais prováveis de afetar o escoamento na tubulação, sendo desprezadas alturas de rugosidade que pouco influenciem no escoamento, principalmente para números de Reynolds reduzidos, quando o regime de escoamento encontra-se sob condição laminar ($Re \leq 2000$), de transição ($2000 \leq Re \leq 4000$) ou turbulento hidraulicamente liso ($4000 \leq Re \leq 10^5$ e $\frac{Re\sqrt{f}}{D/\epsilon} \leq 14,14$) (PORTO, 2006).

A variabilidade da rugosidade dos tubos foi menor nos tubos de PVC, oposto do ocorrido com os tubos de PEBDL, fato evidenciado pela maior amplitude interquartil dos valores no diagrama Box-Plot para PEBDL. Além disso, a presença de pontos discordantes ou “outliers”, destacados no diagrama Box-Plot dos parâmetros de rugosidade por asteriscos, foi maior para R_y e R_c , os quais são essencialmente mais sensíveis à detecção de maiores amplitudes das protuberâncias na parede do tubo. No caso dos parâmetros R_a e R_q , que consideram a integração dos desvios da superfície e a raiz quadrada da integração da função representativa desses desvios em relação à linha média do perfil medido elevada à segunda potência, respectivamente (Anexo A), a ocorrência de pontos discrepantes é menor devido constituírem, por definição, uma representação estatística dos pontos da superfície avaliada.

4.2 Perda contínua de carga nos tubos de PVC

Os índices de concordância de Willmott “ d ” (WILLMOTT et al., 1985) e de desempenho de Camargo e Sentelhas “ c ” (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) foram utilizados para avaliação do ajustamento das estimativas de perda de carga feitas a partir da equação de Darcy-Weisbach, conforme Tabela 5, com f calculado por Swamee (eq. 9). Os valores de referência foram confrontados com os valores de perda de carga obtidos a partir dos parâmetros R_a , R_q , R_y e R_c utilizados para representar a rugosidade na equação de Swamee (1993). Deve-se salientar que tais parâmetros foram medidos nas direções longitudinal e transversal (ou radial) ao fluxo.

Tabela 5 – Índices concordância de Willmott (d), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice desempenho de Camargo e Sentelhas (c) para comparação entre a perda contínua de carga estimada por Darcy-Weisbach, com f calculado a partir dos parâmetros Ra , Rq , Ry e Rc no lugar da rugosidade ε da equação de Swamee (1993), e a perda de carga observada por Vilaça (2012) em tubos de PVC

DN	Direção	Parâmetro para obter f_{Swamee} (μm)	r	d	c
35	Longitudinal	$Ra = 1,349$	1,000	1,000	1,000
		$Rq = 1,761$	1,000	1,000	1,000
		$Ry = 8,731$	1,000	0,999	0,999
		$Rc = 4,740$	1,000	1,000	1,000
	Transversal	$Ra = 1,353$	1,000	1,000	1,000
		$Rq = 1,761$	1,000	1,000	1,000
		$Ry = 6,193$	1,000	0,999	0,998
		$Rc = 5,370$	1,000	1,000	1,000
50	Longitudinal	$Ra = 1,308$	1,000	0,999	0,999
		$Rq = 1,617$	0,999	0,999	0,999
		$Ry = 7,247$	1,000	1,000	1,000
		$Rc = 4,458$	1,000	1,000	1,000
	Transversal	$Ra = 1,213$	1,000	0,999	0,999
		$Rq = 1,484$	1,000	0,999	0,999
		$Ry = 6,126$	1,000	1,000	1,000
		$Rc = 4,021$	1,000	1,000	1,000
75	Longitudinal	$Ra = 1,282$	1,000	1,000	1,000
		$Rq = 1,590$	1,000	1,000	1,000
		$Ry = 7,263$	1,000	1,000	0,999
		$Rc = 4,179$	1,000	1,000	1,000
	Transversal	$Ra = 1,166$	1,000	1,000	1,000
		$Rq = 1,425$	1,000	1,000	1,000
		$Ry = 6,296$	1,000	1,000	1,000
		$Rc = 3,820$	1,000	1,000	1,000

Segundo a Tabela 4 para interpretação do índice “ c ” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), todas as estimativas de perda de carga com os parâmetros de rugosidade avaliados mostraram ótimo desempenho. Nesse sentido, e visando distinguir qualitativamente a perda de carga estimada a partir dos diferentes parâmetros adotados no valor da rugosidade ε da equação de Swamee, procedeu-se à averiguação da distribuição de frequência de ocorrência do erro relativo médio, uma vez que baseado somente no índice “ c ”, todos os parâmetros resultariam numa mesma classe de desempenho.

A Figura 11 apresenta o erro relativo e a frequência acumulada dos erros da perda de carga estimada em relação àquela determinada pelas equações propostas por Vilaça (2012). As médias dos erros relativos para os parâmetros Ra , Rq , Rc e Ry determinados na direção longitudinal foram 3,19%, 3,00%, 2,14% e 2,73%, respectivamente. Do mesmo modo, transversalmente os erros foram 3,22%, 3,05%, 2,18% e 2,64%, respectivamente. O parâmetro Rc apresentou média geral de erros relativos igual a 2,16%, sendo que 10% dos dados apresentaram erro relativo superior a 3,84%. Visto que este parâmetro apresentou os menores erros, sugere-se sua utilização como parâmetro para representar a rugosidade de

tubos de PVC com diâmetro entre 35 e 75 mm. Andrade e Carvalho (2004) obtiveram os erros relativos de -11,7 e -18,6% para fator f calculado a partir de Swamee (1993), em comparação com f obtido pela equação de Colebrook-White, sob condição de escoamento turbulento de transição liso/rugoso e com ε igual a 0,05 e 0,5 mm, respectivamente. A adoção do parâmetro R_c , cuja média geral para todos os diâmetros de PVC foi de 4,431 μm , pode propiciar melhores resultados na estimativas do fator de atrito para estimativa da perda contínua de carga.

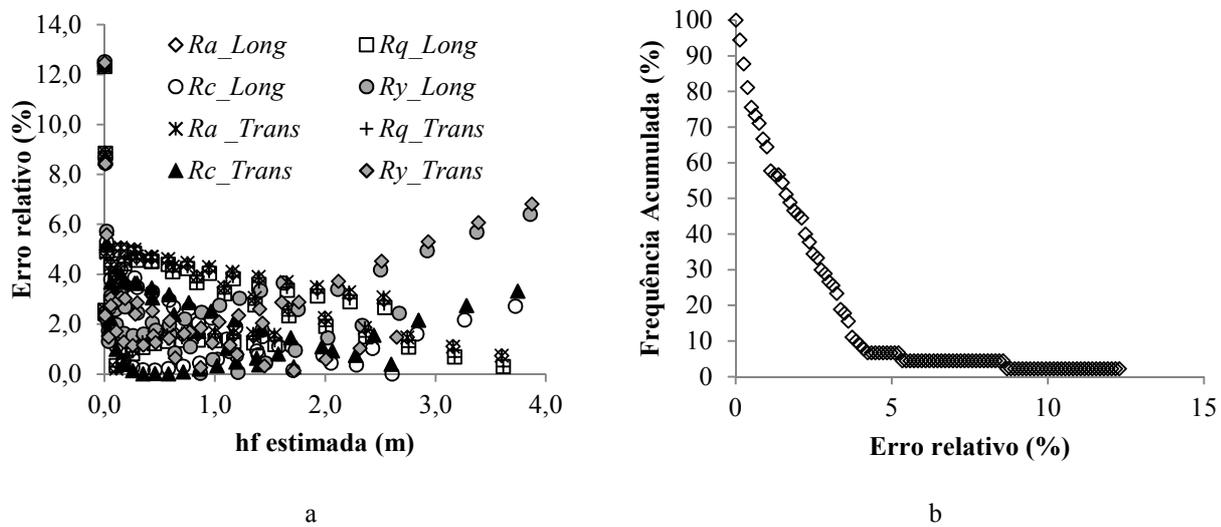


Figura 11 – Erro relativo das estimativas de perda de carga em função dos parâmetros medidos (a) e frequência de ocorrência do erro na estimativa de perda de carga utilizando o parâmetro R_c para PVC (b)

Observou-se tendência de aumento do erro relativo médio em função do aumento na perda de carga quando utilizado o parâmetro R_y como valor de entrada para ε na equação de Swamee (1993), principalmente no caso dos tubos de 35 e 50 mm, cujo Re verificado foi de 88261 e 140893, respectivamente, quando a perda de carga foi de aproximadamente 2,0 m. O parâmetro R_y avalia a maior amplitude das irregularidades parciais de cada valor de “cut-off” dentro do comprimento total de avaliação. Com base nisso, evidencia-se que este parâmetro é inadequado para condições de escoamento com número de Reynolds elevados.

O parâmetro R_c resulta da média dos cinco valores de profundidade das irregularidades no comprimento de avaliação, e foi considerado para construção dos gráficos apresentados na Figura 12, nos quais se verifica o ajuste da perda de carga calculada com a média de tal parâmetro como valor de entrada para ε na equação de Swamee (1993) para fator f da equação de Darcy-Weisbach. Os valores estimados foram confrontados com àqueles obtidos a partir da equação de Vilaça (2012).

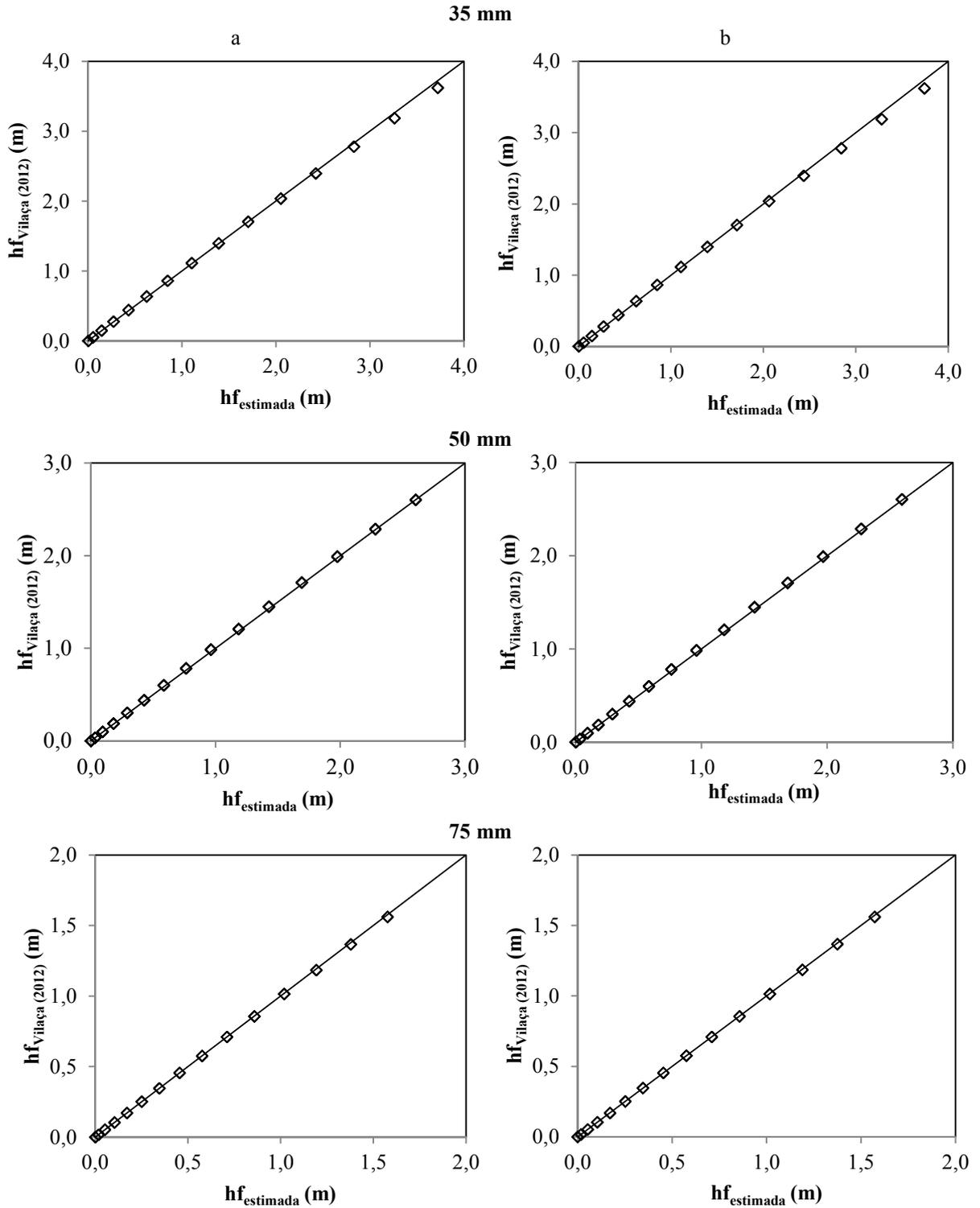


Figura 12 – Perda de carga observada por Vilaça (2012) em função da perda de carga estimada utilizando a equação de Darcy-Weisbach para tubos de PVC de 35 mm, 50 mm e 75 mm, com R_c medido nas direções longitudinal (a) e transversal (b) ao fluxo para rugosidade (ε) na equação de Swamee (1993)

4.3 Perda contínua de carga nos tubos de PEBDL

4.3.1 Relação vazão-perda de carga

Conforme esperado, os maiores valores de perda de carga foram verificadas nos tubos de menor diâmetro, sendo as equações para perda contínua de carga determinadas nos ensaios de laboratório para os tubos de diâmetros nominais de 10, 13, 16, 20 e 26 mm apresentadas na Figura 13.

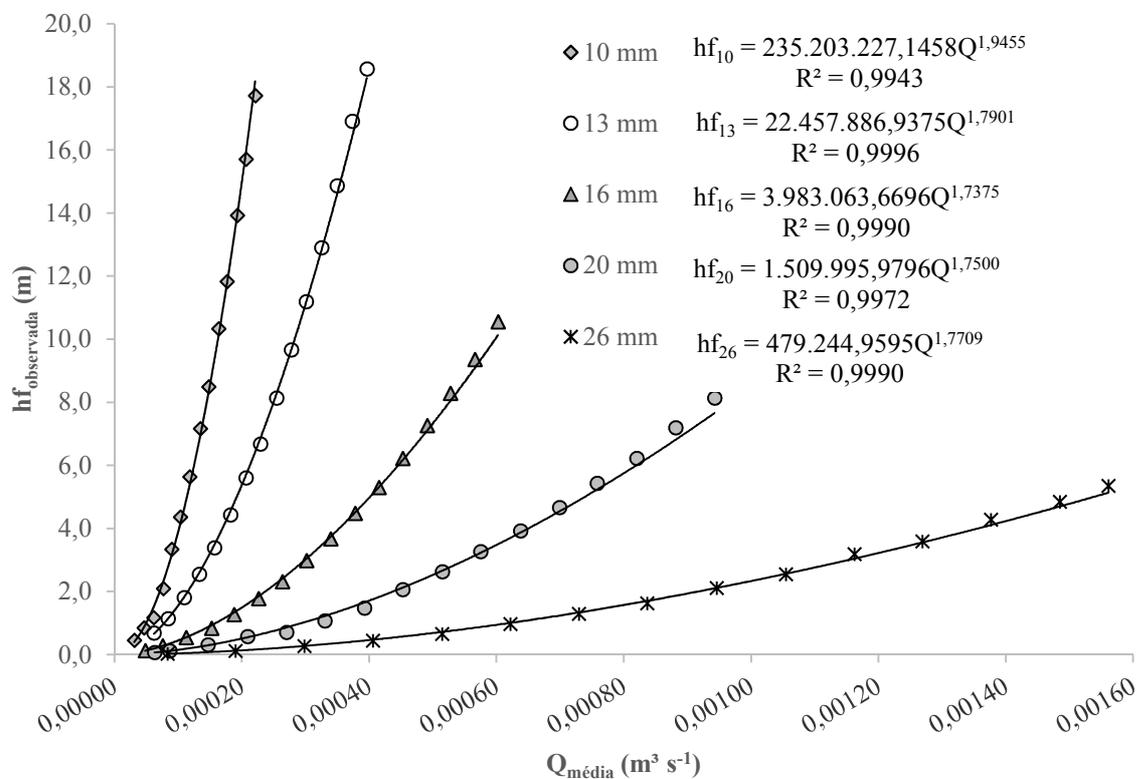


Figura 13 – Perda contínua de carga no tubo de PEBDL em função da vazão para pressão de entrada na linha de 196 kPa

Os expoentes da vazão nas equações variaram de 1,7375 a 1,9455, permanecendo entre 1,7 e 2,0 para a velocidade média, intervalo relatado por Streeter e Wylie (1982) e Caixeta (1991). Utilizando f calculado pela equação de Blasius associado à equação de Darcy-Weisbach para perda de carga este expoente é de 1,75. Melo, Silva e Faria (2000) obtiveram expoentes variando de 1,63 a 2,26 para a velocidade média na determinação da perda de carga em conectores utilizados na passagem da linha de derivação para linha lateral de

microirrigação. Vilaça (2012) obteve os valores de 1,769; 1,751; 1,754; 1,780 e 1,772 para os expoentes da vazão com diâmetros de 10, 13, 16, 20 e 26 mm, respectivamente.

Novamente, os índices de concordância de Willmott e de desempenho de Camargo e Sentelhas foram utilizados para avaliação do desempenho das estimativas de perda de carga a partir de Darcy-Weisbach (eq. 1), com f calculado pela equação de Swamee (Tabela 6). Os valores de referência para perda de carga foram determinados por observações experimentais e confrontados com os valores de perda de carga obtidos a partir dos parâmetros Ra , Rq , Ry e Rc utilizados para representar a rugosidade na equação de Swamee. A utilização dos diferentes parâmetros como variável de entrada para rugosidade na equação de Swamee (1993) resultou em ótimo desempenho e concordância dos dados com os valores médios obtidos nos ensaios de perda de carga realizados em laboratório. Porém, a análise de outros indicadores de desempenho, como o erro relativo, pode propiciar interpretação mais consistente, visto que podem ocorrer erros relativos elevados, ainda que em baixa frequência, como notado no caso dos tubos de PVC.

A média obtida para a rugosidade dos tubos de polietileno, representada pelo parâmetro Ra foi de 2,778 e 3,508 μm nas direções longitudinal e transversal ao fluxo da água, respectivamente, com média geral de 3,143 μm . Variações de amplitude da rugosidade podem ser visualmente encontradas para as duas direções de varredura com a agulha do rugosímetro sobre a superfície, visto que as irregularidades da superfície são aleatórias (REN et al., 2011).

Tabela 6 – Índices concordância de Willmott (d), coeficiente de correlação de Pearson (r) e índice desempenho de Camargo e Sentelhas (c) para comparação entre a perda contínua de carga estimada por Darcy-Weisbach, com f calculado a partir dos parâmetros Ra , Rq , Ry e Rc no lugar da rugosidade ε da equação de Swamee (1993), e a perda de carga observada nos ensaios com tubos de PEBDL

DN	Direção	Parâmetro para obter f_{Swamee} (μm)	r	d	c
10	Longitudinal	$Ra = 2,783$	0,999	0,999	0,998
		$Rq = 3,611$	0,999	0,999	0,998
		$Ry = 16,584$	0,999	0,992	0,991
		$Rc = 11,036$	0,999	0,996	0,994
	Transversal	$Ra = 4,651$	0,999	0,999	0,997
		$Rq = 5,886$	0,999	0,998	0,997
		$Ry = 23,802$	0,999	0,987	0,986
		$Rc = 18,214$	0,999	0,991	0,990
13	Longitudinal	$Ra = 2,131$	0,998	0,993	0,991
		$Rq = 2,694$	0,998	0,994	0,992
		$Ry = 12,484$	0,998	0,999	0,997
		$Rc = 8,371$	0,998	0,997	0,995
	Transversal	$Ra = 3,288$	0,998	0,994	0,992
		$Rq = 4,085$	0,998	0,995	0,993
		$Ry = 15,917$	0,998	1,000	0,998
		$Rc = 12,208$	0,998	0,999	0,997
16	Longitudinal	$Ra = 1,115$	0,999	0,999	0,998
		$Rq = 1,453$	0,999	1,000	0,998
		$Ry = 7,170$	0,999	1,000	0,999
		$Rc = 4,453$	0,999	1,000	0,999
	Transversal	$Ra = 1,644$	0,999	1,000	0,998
		$Rq = 2,057$	0,999	1,000	0,998
		$Ry = 7,983$	0,999	1,000	0,999
		$Rc = 6,110$	0,999	1,000	0,999
20	Longitudinal	$Ra = 1,561$	0,997	1,000	0,997
		$Rq = 2,039$	0,997	1,000	0,997
		$Ry = 10,046$	0,997	0,997	0,995
		$Rc = 6,381$	0,997	0,999	0,996
	Transversal	$Ra = 2,838$	0,997	0,999	0,997
		$Rq = 3,592$	0,997	0,999	0,997
		$Ry = 12,530$	0,997	0,996	0,994
		$Rc = 10,404$	0,997	0,997	0,995
26	Longitudinal	$Ra = 6,301$	0,998	0,998	0,996
		$Rq = 7,799$	0,998	0,998	0,996
		$Ry = 36,016$	0,998	0,985	0,930
		$Rc = 22,363$	0,998	0,992	0,990
	Transversal	$Ra = 5,119$	0,998	0,999	0,997
		$Rq = 6,244$	0,998	0,999	0,996
		$Ry = 23,754$	0,998	0,991	0,989
		$Rc = 17,262$	0,998	0,994	0,992

O erro relativo e a frequência acumulada de erros da perda de carga estimada em relação àquela determinada experimentalmente são apresentados na Figura 14, sendo possível inferir que o estudo isolado de desempenho das estimativas realizado apenas com base nos indicadores de precisão (r) e exatidão (d), não constitui análise concisa acerca do grau de confiança ou desempenho dos modelos utilizados para as estimativas.

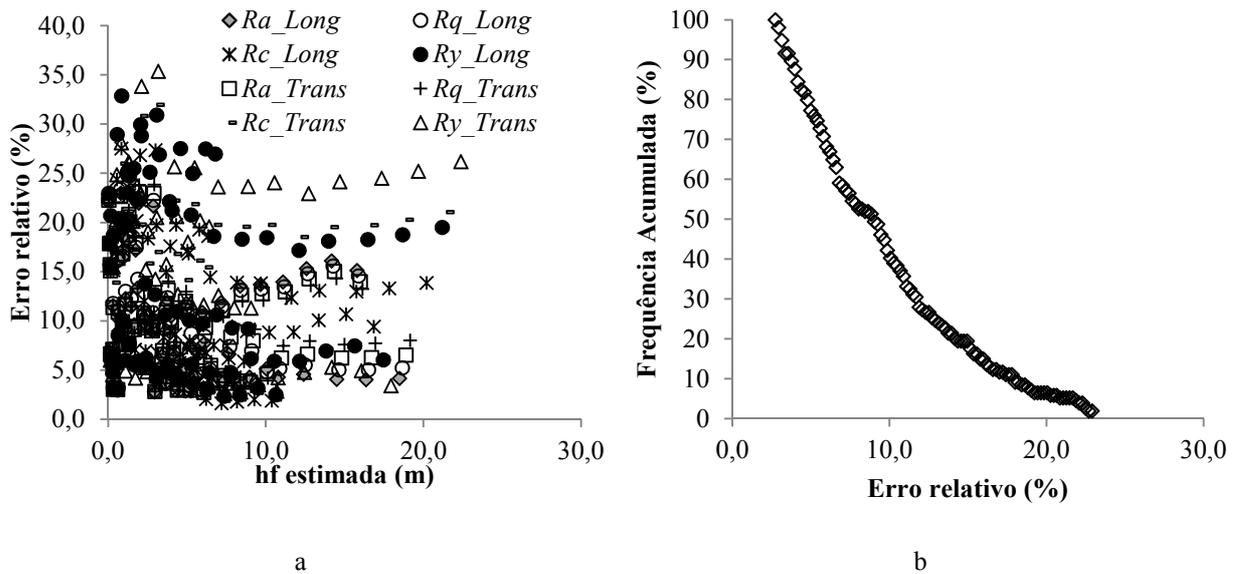


Figura 14 – Média do erro relativo das estimativas de perda de carga em função dos parâmetros medidos (a) e frequência de ocorrência do erro na estimativa de perda de carga utilizando o parâmetro Ra para PEBDL (b)

As médias dos erros relativos para os parâmetros Ra , Rq , Rc e Ry determinados na direção longitudinal foram 8,65%, 8,90%, 11,54% e 14,34%, respectivamente. Do mesmo modo, transversalmente os erros foram 8,55%, 8,77%, 11,64% e 13,11%, respectivamente. O parâmetro Ra apresentou média geral de erros relativos igual a 8,60%, sendo que 10% dos dados apresentaram erro relativo superior a 17,8%. Visto que este parâmetro apresentou os menores erros, sugere-se sua utilização como parâmetro para representar a rugosidade de tubos de PEBDL com diâmetro entre 10 e 26 mm, sendo recomendada a adoção do valor de 3,143 μm para a rugosidade da superfície interna de tais tubos para fins de cálculo do fator de atrito f .

Os erros relativos na estimativa da perda de carga em tubos de PEBDL foram superiores àqueles observados para os tubos de PVC, o que pode ser atribuído a influência da pressão de operação no diâmetro nos tubos de PEBDL. Conforme comprovado por Rettore Neto (2011), a perda de carga em tubos de polietileno é influenciada pela pressão de operação devido à elasticidade deste material. Utilizou-se a equação de Darcy-Weisbach para estimativa dos valores perda de carga apresentados na Figura 14 e, como esta não considera os efeitos de pressão e elasticidade, os erros observados foram elevados. Rettore Neto (2011) menciona que são esperados erros superiores a 20% na estimativa de perda de carga de tubos de polietileno, quando utilizada a equação de Darcy-Weisbach.

Sob regime de escoamento hidraulicamente liso, Andrade e Carvalho (2004) verificaram desvios de 1,9, 2,7 e 5% do fator f estimado pela equação de Swamee (1993) em

relação às equações de Blasius, von Karman-Prandtl e Nikuradse, respectivamente, sendo considerado 0,005 mm para o valor da rugosidade no estudo.

A Figura 15 confronta valores observados com valores estimados de perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach. Os valores estimados foram calculados utilizando-se o parâmetro Ra apresentados na Tabela 6 como valor de entrada para representar a rugosidade ϵ da equação de Swamee (1993).

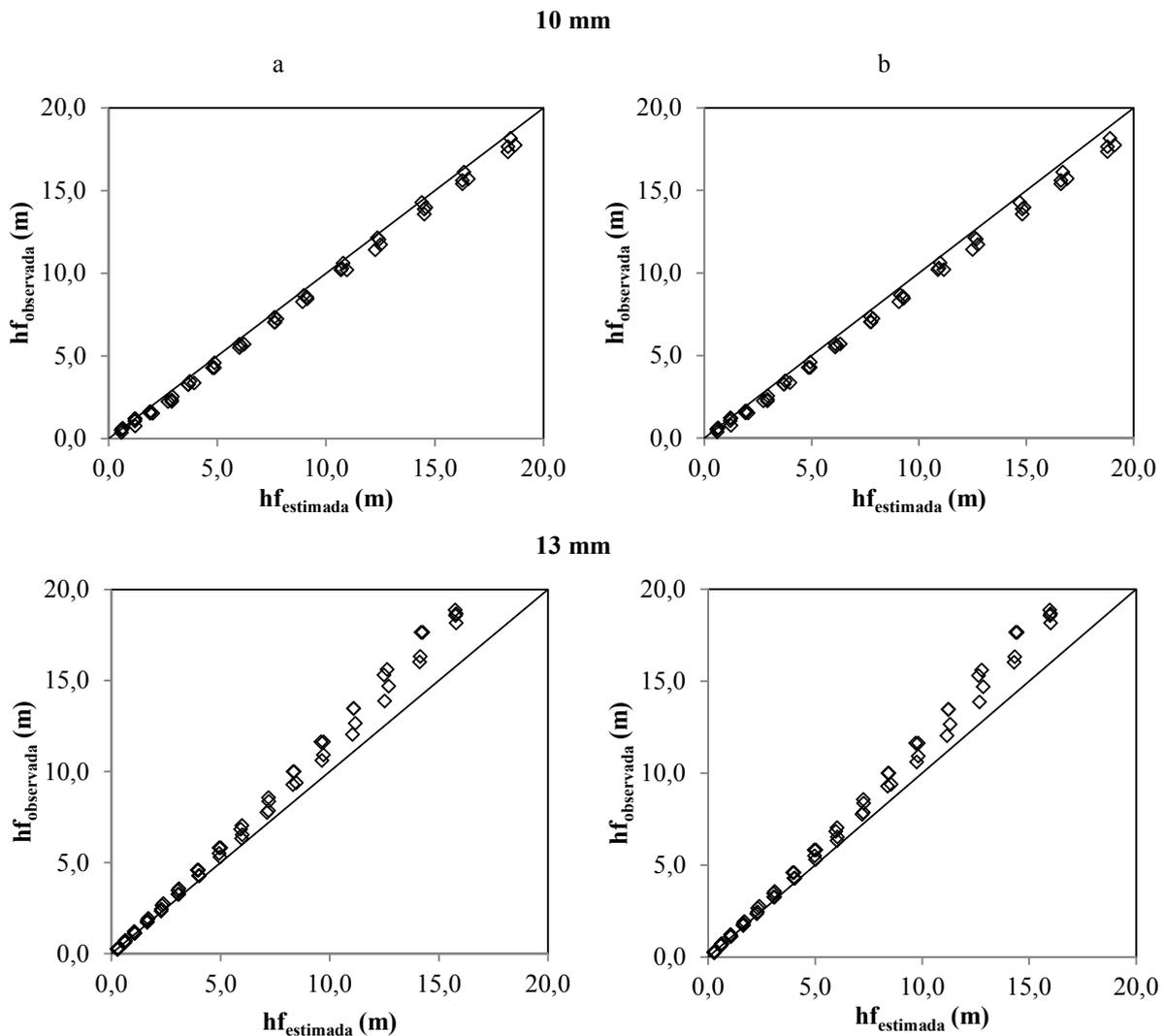


Figura 15 – Perda de carga observada nos ensaios em função da perda de carga estimada utilizando a equação de Darcy-Weisbach para tubos de PEBDL de 10 mm, 13 mm, 16 mm, 20 mm e 26 mm, com Ra medido nas direções longitudinal (a) e transversal (b) ao fluxo para rugosidade (ϵ) na equação de Swamee (1993)

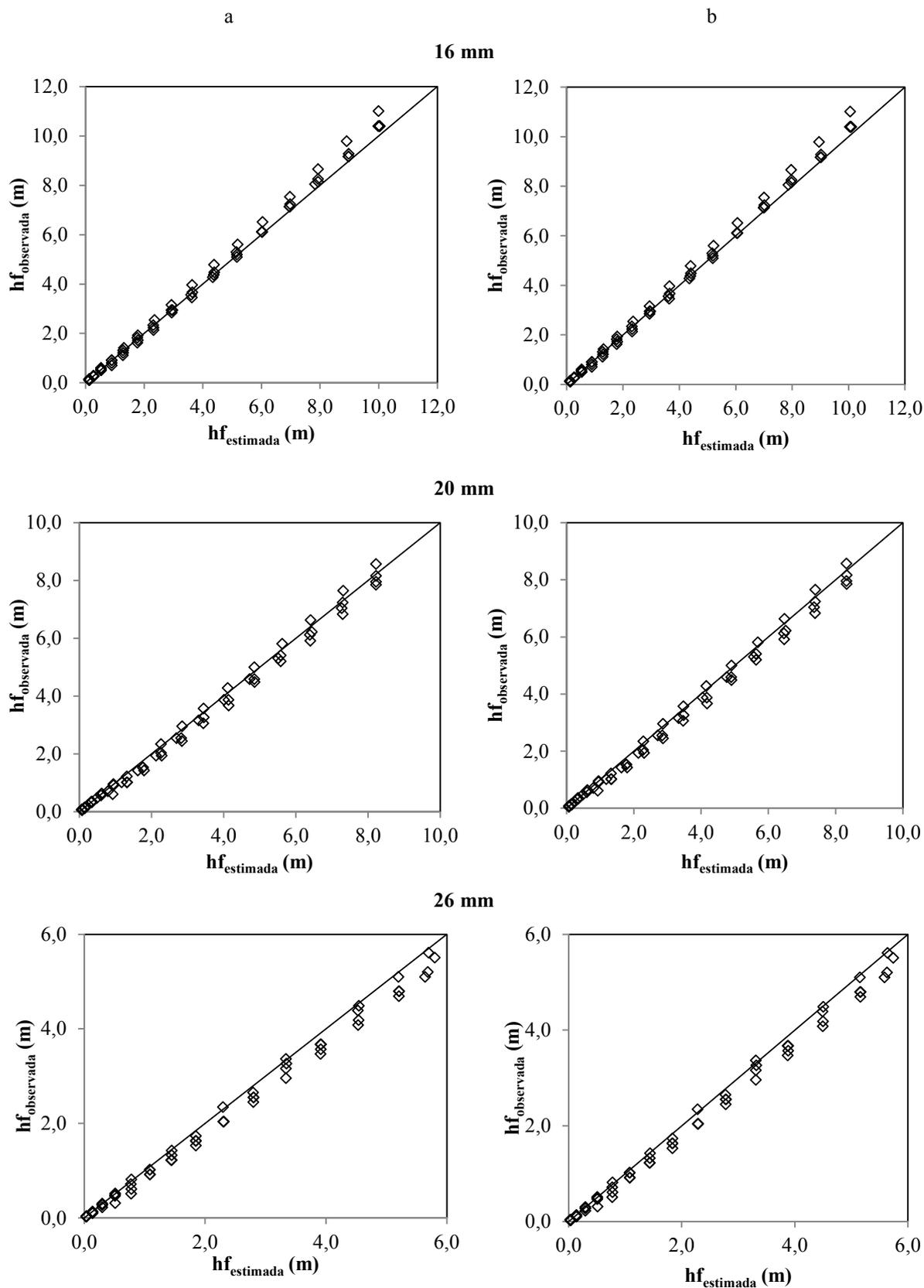


Figura 15 – Perda de carga observada nos ensaios em função da perda de carga estimada utilizando a equação de Darcy-Weisbach para tubos de PEBDL de 10 mm, 13 mm, 16 mm, 20 mm e 26 mm, com Ra medido nas direções longitudinal (a) e transversal (b) ao fluxo para rugosidade (ϵ) na equação de Swamee (1993)

4.4 Análise de sensibilidade

A sensibilidade da perda de carga a variação da rugosidade foi menor para os maiores diâmetros (Figura 16). Dado um valor de rugosidade (ϵ), na medida em que o diâmetro do tubo aumenta, a rugosidade relativa (ϵ/D) diminui e portanto a perda de carga torna-se menos influenciada pela rugosidade para diâmetros maiores. Verificou-se maior sensibilidade para os tubos de 10 mm de PEBDL, sendo que o incremento de 100% no valor de ϵ da equação de equação de Swamee (1993) foi responsável por 4,97% de aumento na perda de carga estimada, enquanto a redução em 100% do valor de ϵ produz 5,46% de diminuição nesta estimativa. Para o tubo de 75 mm, no qual a sensibilidade da perda de carga à variação da rugosidade foi menor, observou-se apenas 3,54% e 3,94% para as respectivas variações positiva e negativa de ϵ em 100%. É importante mencionar que as variações de $\pm 100\%$ na rugosidade visam representar os valores mínimos e máximos de rugosidade medidos experimentalmente utilizando-se o rugosímetro, e portanto, é possível quantificar a implicação da escolha incorreta do melhor parâmetro (Ra , Rq , Rc ou Ry) para representar a rugosidade do tubo.

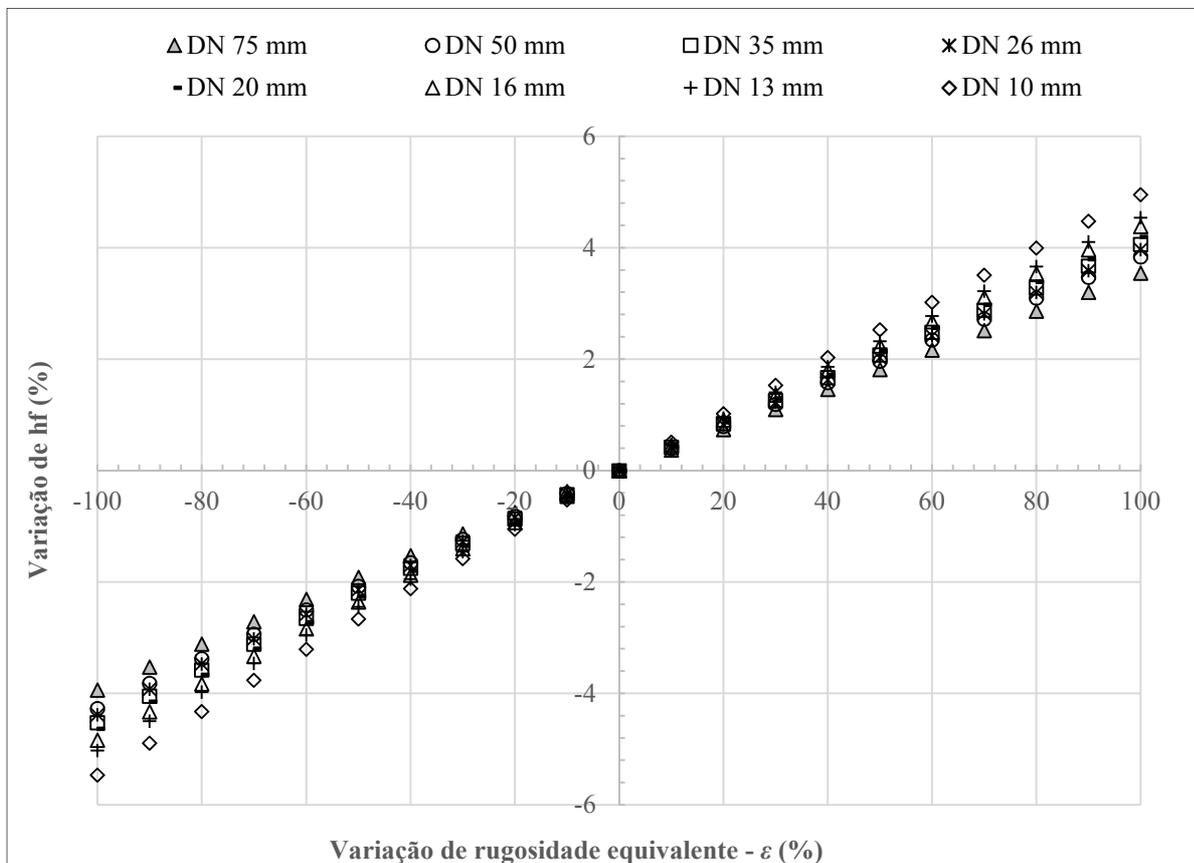


Figura 16 – Análise de sensibilidade da perda de carga às variações de rugosidade

4.5 Espessura da camada limite

Considerando-se os parâmetros Ra para PEBDL e Rc para PVC, obteve-se a espessura média da camada limite δ , de modo que a mesma foi confrontada com o valor médio obtido para o parâmetro Rt (Figura 17). Este parâmetro representa a soma da maior altura de picos com a maior profundidade de vales no comprimento de avaliação, conforme função matemática para sua obtenção e ilustração constantes no Anexo A.

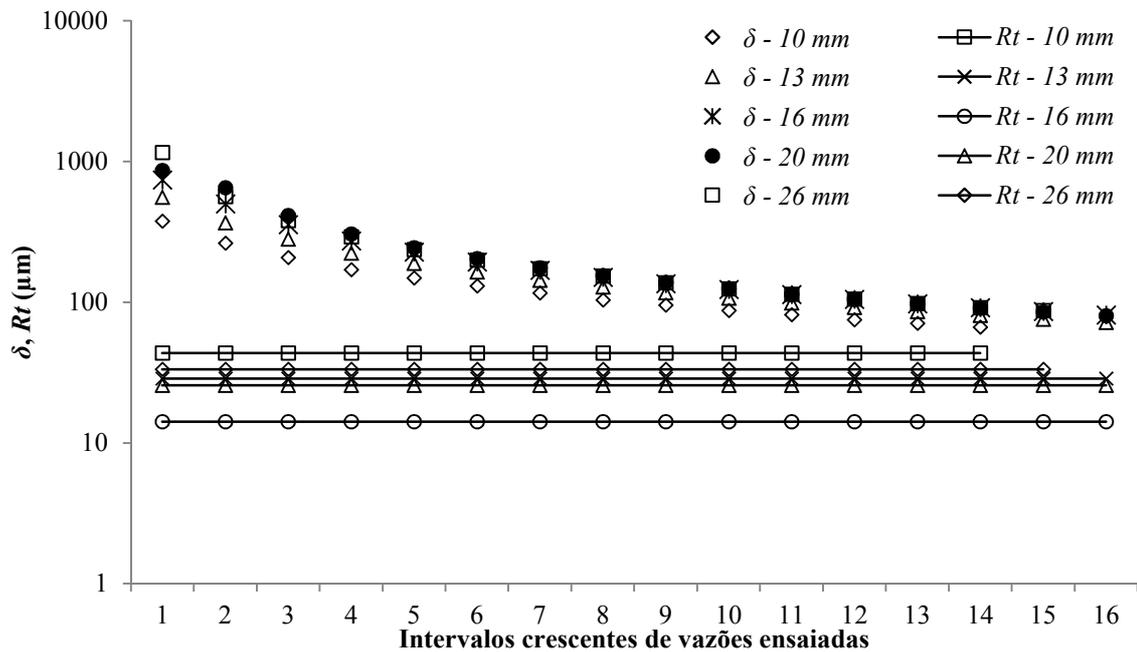


Figura 17 – Espessura da camada limite para fator f calculado a partir dos valores de Ra medidos no rugosímetro para tubos de PEBDL

O nível de corte para obtenção do parâmetro de contagem de picos no perfil (Pcu) foi estabelecido como a espessura δ da camada limite, não sendo observado nenhum ponto acima deste valor, tanto para tubos de PEBDL como para os tubos de PVC (Figura 18). Isto confirma a condição de escoamento hidraulicamente liso $\left(\frac{Re\sqrt{f}}{D/\epsilon} \leq 14,14\right)$ em ambos os tubos. Caso fossem encontrados pontos acima do nível δ , ter-se-ia a condição de transição do escoamento turbulento hidraulicamente liso para escoamento hidraulicamente rugoso ou de turbulência completa (VENNARD; STREET, 1978; MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004; PORTO, 2006).

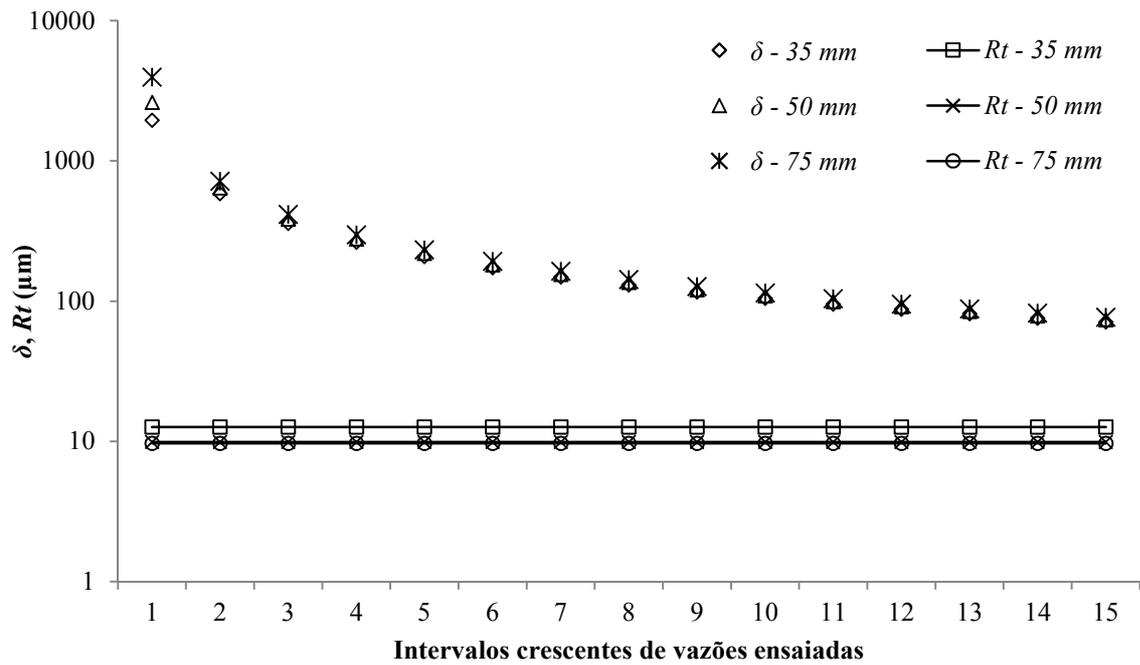


Figura 18 – Espessura da camada limite para fator f calculado a partir dos valores de Rc medidos no rugosímetro para tubos de PVC

4.6 Coeficientes das fórmulas empíricas

Os coeficientes C e b das equações de Hazen-Williams e Flamant em função do número de Reynolds são apresentados na Figura 19 para os diâmetros de 35, 50 e 75 mm dos tubos de PVC, e 10, 13, 16, 20 e 26 mm de PEBDL, respectivamente.

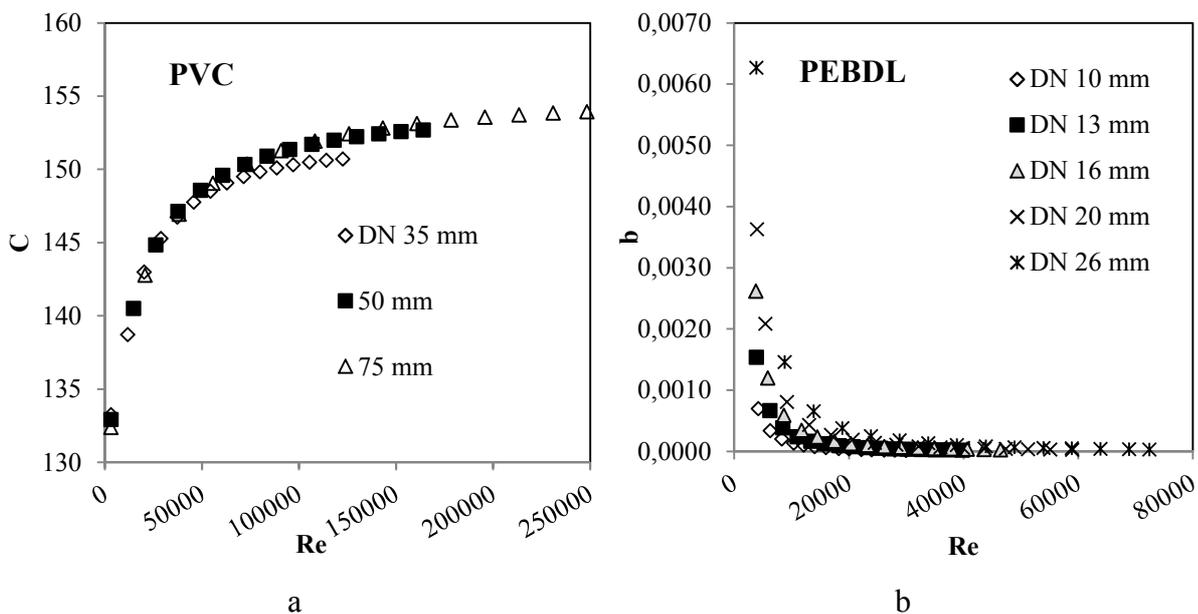


Figura 19 – Coeficientes de atrito das equações de Hazen-Williams e Flamant em função do número de Reynolds para os três diâmetros de PVC e cinco de PEBDL

Tais coeficientes foram calculados conforme equações 13 e 14, a partir do f de Swamee (1993) obtido com os parâmetros de rugosidade Ra (tubos de PEBDL) e Rc (tubos de PVC) para a rugosidade ε .

Para o tubo de 35 mm, o coeficiente C variou de 133 a 151 com Re de 3000 a 122366; para o tubo de 50 mm, C permaneceu entre 133 e 153 para Re entre 3000 e 163876; e, para o tubo de 75 mm, C variou entre 132 e 154 com Re de 3000 a 248253. Observa-se que os valores de C sofreram aumento de acordo com o número de Reynolds, tendendo à estabilidade para Re acima de 100000, valor no qual obteve-se aproximadamente C igual a 151 para todos os diâmetros. Porto (2006) descreve comportamento semelhante para tubos rigorosamente lisos ($\varepsilon \approx 0$) e de diâmetros entre 50 e 200 mm, nos quais o C mostrou-se praticamente estável para Re superior a 10^6 .

No caso dos tubos de PEBDL (Figura 19b), o valor do coeficiente b para a equação de Flamant decresceu de acordo com o aumento no número de Reynolds, sendo que b tendeu à estabilidade para $Re \geq 20000$. Foram verificados os valores de $5,043 \times 10^{-4}$; $0,861 \times 10^{-4}$; $1,361 \times 10^{-4}$; $2,030 \times 10^{-4}$ e $3,704 \times 10^{-4}$ para os tubos de 10, 13, 16, 20 e 26 mm, respectivamente, com número de Reynolds igual a 20000. Assy (1977) sugere adotar o valor de 0,00052 para b sob condições de escoamento hidraulicamente liso, com $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^5$.

Os dados apresentados na Figura 19 demonstram que os coeficiente C e b variam em função de Re , e portanto, a adoção de um valor fixo para todos os regimes de escoamento incorrem em erros na estimativa de perda de carga. De acordo com Allen (1996), são necessários ajustes no coeficiente C conforme mudanças de velocidade da água e diâmetro do tubo. Por este motivo, a equação de Darcy-Weisbach apresenta-se mais precisa do que as equações empíricas devido ao fator de atrito f considerar não somente a condição de rugosidade, mas também o número de Reynolds.

5 CONCLUSÕES

Perante os resultados obtidos, conclui-se que:

- a) a rugosidade da superfície interna de tubos de PVC e PEBDL utilizados em irrigação foi determinada satisfatoriamente utilizando rugosímetro de bancada. Entretanto, evidenciou-se a necessidade de efetuar a aferição do rugosímetro sempre que o mesmo for utilizado;
- b) evidenciou-se diferença significativa dos parâmetros de rugosidade (Ra , Rq , Rc e Ry) entre os diâmetros nominais dos tubos de PEBDL, e portanto, entende-se que a adoção de valores de rugosidade específicos para cada diâmetro contribui para a qualidade das estimativas de perda de carga. Por outro lado, não foi observada diferença significativa na rugosidade entre diâmetros de tubos de PVC;
- c) sugere-se a utilização do parâmetro Rc para representar a rugosidade de tubos de PVC com diâmetro entre 35 e 75 mm;
- d) sugere-se a utilização do parâmetro Ra para representar a rugosidade de tubos de PEBDL com diâmetro entre 10 e 26 mm;
- e) os parâmetros Rt e Pcu fornecidos pelo rugosímetro e associados à espessura da camada limite, permitiram comprovar que todos os ensaios foram efetuados sob regime de escoamento hidraulicamente liso;
- f) a análise de sensibilidade da perda de carga às variações de rugosidade permitiu quantificar a implicação da escolha incorreta do parâmetro (Ra , Rq , Rc ou Ry) para representar a rugosidade do tubo;
- g) a rugosidade média para tubos de PVC foi de 4,431 μm (parâmetro Rc) e está em conformidade com as recomendações das tabelas para tubos plásticos ($1,5\mu m \leq \varepsilon \leq 10\mu m$). Da mesma forma, o valor médio foi de 3,143 μm (parâmetro Ra) para tubos de PEBDL, também contido na referida faixa;
- h) para tubos de PVC, o coeficiente C de Hazen-Williams variou entre 132 e 154 para Re entre 3000 e 248253; e
- i) para tubos de PEBDL, o coeficiente b da equação de Flamant variou consideravelmente entre os diâmetros avaliados não apresentando tendência clara. Para todos os diâmetros o valor de b estabilizou para $Re \geq 20000$.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G. Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach friction loss equation for pressurized irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 6, n.12, p. 685-693, 1996.
- ANDRADE, L.; CARVALHO, J.A. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.554-557, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18p.
- ASSY, T.M. **Fórmula universal de perda de carga, seu emprego e as limitações das formas empíricas**. São Paulo: CETESB, 1977. 64p.
- AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Blücher, 1998. 669p.
- BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 121, n. 5, p. 313-316, 1995.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- BOMBARDELLI, F.A.; GARCÍA, H. Hydraulic design of large-diameter pipes. **Journal of Hydraulic Engineering**. New York, v. 129, n. 11, p. 839-846, 2003.
- BORYCZKO, A. Distribution of roughness and waviness components of turned surface profiles. **Metrology and Measurement Systems**. Gdansk, v. 17, n. 4, 611-620, 2010.
- BORYCZKO, A. Effect of waviness and roughness components on transverse profiles of turned surfaces. **Measurement**, Amsterdam, v. 46, n. 1, p. 688–696, 2013.
- CAIXETA, A.V. **Perda de carga em tubos e conexões de PVC utilizados em sistemas portáteis de irrigação por aspersão**. 1991. 115 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- 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.
- CARDOSO, G.G.G.; FRIZZONE, J.A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, 2008.

- CARRIÓN, F.; TARJUELO, J. M.; HERNÁNDEZ, D.; MORENO, M.A. Design of microirrigation subunit of minimum cost with proper operation. **Irrigation Science**, New York/Amsterdam, v. 31, n. 5, p. 1199–1211, 2013.
- CHEN, Q.; YANG, S.; LI, Z. Surface roughness evaluation by using wavelets analysis. **Precision Engineering**, Guildford, v. 23, n. 3, p. 209-212, 1999.
- CHENG, S.N. Formulas for Friction Factor in Transitional Regimes. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 134, n. 9, p. 1357–1362, 2008.
- DOBZJAŃSKI, P.; PAWLUS, P. Modification of robust filtering of stratified surface topography. **Metrology and Measurement Systems**, Gdansk, v. 20, n. 1, p. 107–118, 2013.
- FACCIO, I. **Investigação sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte**. 2002. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- FARIA, L.A.; COELHO, R.D.; SILVA, R.M.; FRIZZONE, J.A. Rugosidade superficial interna de diferentes tubogotejadores de polietileno usados em irrigação localizada. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 20, 2010, Uberaba. **Anais...Uberaba: ABID**, 2010. 1 CD-ROM.
- FARSHAD, F.; RIEKE, H.; GARBER, J. New developments in surface roughness measurements, characterization, and modeling fluid flow in pipe. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. Amsterdam, v. 29, n. 2, p. 139–150, 2001.
- FRIZZONE, J.A.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R.R. FARIA, M.A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. 1 ed. Maringá: EDUEM, 2012. 356p.
- FRIZZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P.S.; BOTREL, T.A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.3, p.278-283, 1998.
- GADELMAWLA, E.S.; KOURA, M.M.; MAKSOUD, T.M.A.; ELEWA, I.M.; SOLIMAN, H.H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 123, n. 1, p. 133–145, 2002.
- HAGER, W.H.; LIIV, U. Johann Nikuradse – Hydraulic experimenter. **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 46, no. 4, p. 435-444, (2008), pp. 435–444.
- HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. London: Edward Arnold, 1992. 273p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **ISO GUM 2008**. Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008. Duque de Caxias, 2012. 141 p.
- JIANG, X.J.; WHITEHOUSE, D.J. Technological shifts in surface metrology. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, Amsterdam, n. 6, v. 1, p. 815-836, 2012.

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, 2002.

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.

KRISTEK, M. A fast gauss filtering algorithm for roughness measurement. **Precision Engineering**, Guildford, v. 19, p. 198-200, 1996.

LAPERUTA NETO, J.; CRUZ, R.L.; LAPERUTA FILHO, J.; PLETSCHE, T.A. Perda de carga em mangueiras gotejadoras novas e usadas. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 329-338, 2011.

LEACH, R.; HAITJEMA, H. Bandwidth characteristics and comparisons of surface texture measuring instruments. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 21, n. 3, p. 32-41, 2010.

LEITE, C.A.P. **Dinâmica e reatividade de superfícies de poli (dimetilsiloxano)s**. 1994. 136p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

LINGADURAI, K.; SHUNMUGAM, M.S. Metrological characteristics of wavelet filter used for engineering surfaces. **Measurement**, Amsterdam, v. 39, n. 7, p. 575-584, 2006.

MARIANI, E.J. As normas ISO. **Revista Científica Eletrônica de Administração**, Porto Alegre, v. 6, n. 10, 2006.

MELO, L.J.V.; SILVA, E.L.; FARIA, M.A. Perda de carga em conectores utilizados em sistemas de irrigação localizada. **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 24, edição especial, p. 205-214, 2000.

MINGOTI, S.A.; FIDELIS, M.T. Aplicando a geoestatística no controle estatístico de processo. **Revista Produto & Produção**, Porto Alegre, v.5, n.2, p. 55-70, 2001.

MITUTOYO. **Apostila do Curso: Rugosidade superficial**. Instituto de Metrologia – Departamento de Treinamento. 2012. 44p.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 513p.

MUNSON, B.R.; YOUNG, D.F.; OKIISHI, T.H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. Tradução de E.J. Zerbini. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2004. 572p.

NEVES, E.T. **Curso de hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Globo, 1989. 577p.

NIELSEN, H.S. New approaches to surface roughness evaluation of special surfaces. **Precision Engineering**, Guildford, n.4, v. 10, p. 209-213, 1988.

NOMELINI, Q.S.S.; FERREIRA, E.B.; OLIVEIRA, M.S. Estudos dos padrões de não aleatoriedade dos gráficos de controle de Shewhart: um enfoque probabilístico. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 16, n. 3, p. 414-421, 2009.

NORONHA, R.H.F.; SILVA, R.P.; CHIORDEROLI, C.A.; SANTOS, E.P.; CASSIA, M.T. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada diurna e noturna de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 931–938, 2011.

OLIVEIRA, C.J. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados a topografia de superfície em usinagens**. 2004. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

PIRATELLI-FILHO, A.; STERNADT, G.H.; ARENCIBIA, R.V. Removing deep valleys in roughness measurement of soft and natural materials with mathematical filtering. **Ciência e Engenharia**, Uberlândia, v. 21, n. 2, p. 29 – 34, 2012.

POON, C.Y.; BHUSHAN, B. Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler. **Wear**, Lausanne, v. 190, n. 1, p. 76–88, 1995.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4ed. São Carlos: EESC-USP. Projeto REENGE. ISBN 85-7656-084-4. 2006. 540 p.

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

RADHAKRISHNAN, V. Effect of stylus radius on the roughness values measured with tracing stylus instrument. **Wear**, Lausanne, v. 16, n. 5, p. 325–335, 1970.

RAJA, J.; MURALIKRISHNAN, B.; FU, S. Recent advances in separation of roughness, waviness and form. **Precision Engineering**, Guildford, v. 26, p. 222–235, 2002.

RAJA, J.; RADHAKRISHNAN, V. Digital filtering of surface profiles. **Wear**, Lausanne, v. 57, n. 1, p. 147–155, 1979.

REN, J.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; OLSEN, M.; SUNDARARAJAN, S. Evolution of random roughness in microchannel and its impact in laminar flow. In: Excellence of Graduate Research Conference, 2011, Iowa. **Anais...** Iowa State University. 2011. 1 CD-ROM

RETTORE NETO, O. **Modelo para determinação da perda de carga contínua em tubos elásticos**. 2011. 96p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

RETTORE NETO, O.; PINTO, M.F.; CAMARGO, A.P.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A. Quantificação do erro na determinação da perda de carga contínua em tubos de polietileno. In: Winotec – WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS EM IRRIGAÇÃO, 4., 2012. Fortaleza. **Anais...** Instituto Inovagri, 2012. 1 CD-ROM.

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

SCHRODER, F.C. **Levantamento em campo da rugosidade equivalente de tubos metálicos**. 2011. 204p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SHERRINGTON, I.; SMITH, E.H. The significance of surface topography in engineering. **Precision Engineering**, Guildford, v. 8, n. 2, p. 79–87, 1986.

SILVA, R.P.; CORRÊA, C.F.; CORTEZ, J.W.; FURLANI, C.E.A. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n. 2, p. 292–304, 2008.

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

STREETER, V.L.; WYLIE, E.B. **Mecânica dos fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1980. 585 p.

SWAMEE, P.K. Design of a submarine oil pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, New York, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.

VENNARD, J.; STREET, R. **Elementos de mecânica dos fluidos**. 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 687 p.

VIANNA, M.R. **Mecânica dos Fluidos para Engenheiros**. 3 ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 1997. 582p.

VILAÇA, F.N. **Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada**. 2012. 67p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

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.

WHITEHOUSE, D.J. **Handbook of Surface Metrology**. Leicester: Taylor&Francis, 1994. 350p.

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

YANG, B.H; JOSEPH, D.D. Virtual Nikuradse. **Journal of Turbulence**. New York, v. 10, n. 11, 2009.

YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two Methods for the Computation of Commercial Pipe Friction Factors. **Journal of Hydraulic Engineering**. New York, v. 131, n. 8, p. 694–704, 2005.

YOUNG-HUI, L.; GUANG-SHENG, D.; LI-PING, L. ZHU-FENG, S.; CHENG-YUAN, Z. **Journal of Hydrodynamics**, Amsterdam, n. 5, v. 23, p. 643-648, 2011.

ZENG, W.; JIANG, X.; SCOTT, P. A generalised linear and nonlinear spline filter. **Wear**, Lausanne, v. 271, n. 3-4, p. 544–547, 2011.

ZITTERELL, D.B.; FRIZZONE, J.A.; RETTORE NETO, O.; ULLMANN, M.N. Perda de carga em microtubos e conectores utilizados em microaspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, p.591-604, 2009.

ANEXOS

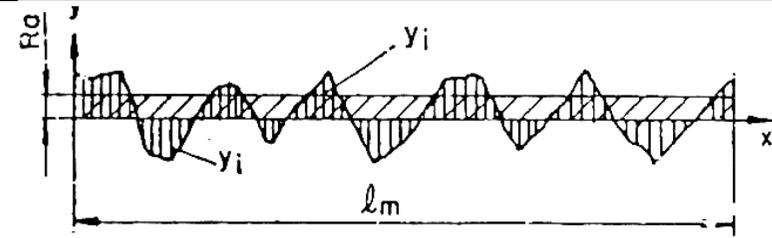
ANEXO A - Função matemática para se obter os respectivos parâmetros de rugosidade e (b) esquema para representação no perfil. Adaptado de GADELMAWLA et al. (2002)

Função matemática para obtenção dos respectivos parâmetros

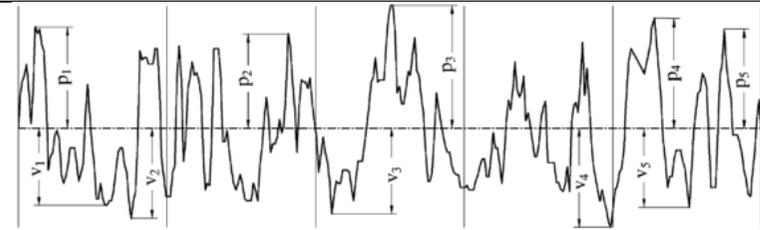
Ilustração

Parâmetros de amplitude da rugosidade

$$Ra = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \text{ e } Rq = \sqrt{\frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} \{y(x)\}^2 dx}$$



$$Rc = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i \right)$$



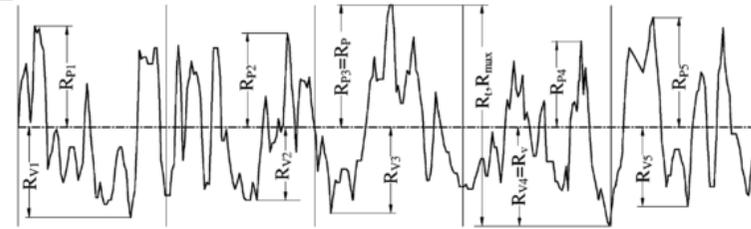
ANEXO A - Função matemática para se obter os respectivos parâmetros de rugosidade e (b) esquema para representação no perfil. Adaptado de GADELMAWLA et al. (2002)

Função matemática para obtenção dos respectivos parâmetros

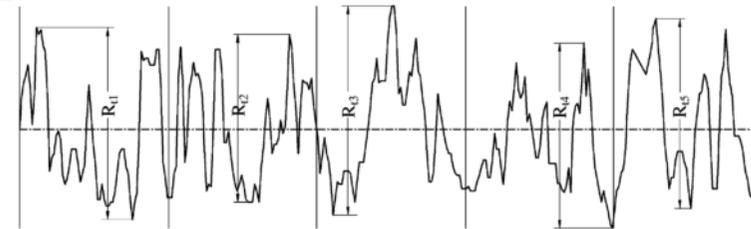
Ilustração

Parâmetros de amplitude da rugosidade

$$R_{max} \text{ ou } R_t = \text{Max}(R_{ti}) = R_{p\text{máx}} + R_{v\text{máx}}$$



$$R_y = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^5 R_{ti} \right)$$



Pcu = contagem de picos acima do nível de corte no perfil

