

ANÁLISE DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DA PERDA DE CARGA DE FLUIDOS (ARMFIELD C6-MKII-10) E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA OS ESTUDOS DOS CONCEITOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA

Matheus Vieger Ribeiro (IC) e Liliane Frosini Armelin (Orientador)

Apoio: PIBIC Santander

RESUMO

O projeto consiste no estudo e avaliação de uma bancada da empresa britânica Armfield, a C6-MKII-10, uma mesa que tem como objetivo demonstrar a alunos graduandos alguns tópicos básicos envolvendo fluidos hidráulicos, como perda de carga distribuída, perda de carga localizada, medidores deprimogêneos, equação de continuidade, equação de Reynolds, viscosidade e rugosidade, equação de Bernoulli, entre outros. Este equipamento foi adquirido pela Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, junto com outras bancadas de estudo, para funcionar no laboratório de hidráulica do Campus Higienópolis que ainda será construído. O treinamento realizado pela empresa fornecedora envolveu apenas a operação do equipamento sem a verificação do seu funcionamento para realização de medidas de vazão, determinação dos coeficientes de perda de carga, além de outras características que devem ser comportadas conforme literatura vigente. Através de simulações hidráulicas e ensaios a diferentes vazões, diferentes tubulações e vinculados a medidores de vazão distintos, foi estudado a eficácia da bancada e sua contribuição no dia-a-dia para os componentes curriculares que farão uso dessa podendo o aparelho ser operado por várias pessoas para desenvolvimento de atividades didáticas que comportarão as aulas de ou projetos de pesquisa para determinados fins.

Palavras-chave: Perda de carga localizada. Armfield. simulações hidráulicas.

ABSTRACT

The project consists in the study and evaluation of a workbench of the British company Armfield, the C6-MKII-10, a table that aims to demonstrate to the undergraduates some basic topics involving hydraulic fluids, like friction head loss, minor losses, depressed meters (instruments who measure water flow using difference of pressure in two points), Continuity equation, Reynold equation, viscosity and rugosity, Bernoulli equation, among others. This equipment was acquired by Mackenzie Presbyterian University School of Engineering, along with other apparatus, for work in the hydraulic laboratory to be built. The training realized by the supplier company involved only the operation of the equipment without functionality check for performing flow measuring, head loss coefficient determination, besides of other characteristics that must be performed according current literature. Through hydraulics simulations and tests under different flow rates, different pipelines and connected to different flow meters, the efficiency of the workbench and it is daily contribution to the curriculum

components that will use this equipment was studied, being able the apparatus be operated by several people for to develop didactic activities who performed classes or elaboration of research projects that have as it is subject basic concepts of hydraulics.

Keywords: Head loss due pipe fittings. Armfield. hydraulic simulations.

1. INTRODUÇÃO

A montagem de um laboratório de hidráulica no âmbito da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, requereu algumas iniciativas, dentre as quais, a aquisição de novos equipamentos. Nesta transação, foram adquiridos alguns equipamentos de estudos hidráulicos, entre eles a bancada C6-MKII-10 da Armfield, que estuda, sobretudo, as perdas de carga, medidores deprimogêneos e equações vinculadas a condutos forçados.

Antes da disponibilização do equipamento para as atividades didáticas, foi necessário estudar o seu funcionamento o que implicou em alguns procedimentos: determinação de erros entre os resultados experimentais e os valores teóricos e verificação do funcionamento de todas as opções disponíveis para as condições locais.

Este artigo consiste da apresentação das respostas aos procedimentos descritos acima que foram alcançadas através da metodologia de simulações hidráulicas sob diferentes tubulações que compõem a bancada, vinculadas à diferentes vazões. Além disso, foi necessário a coleta de informações teóricas importantes nos estudos desenvolvidos, uma vez que o equipamento não foi fabricado no Brasil. Estas foram necessárias para a obtenção de dados e confecção de materiais necessários para a finalização deste artigo.

Ao decorrer dessa análise, também foi analisado o software vinculado ao equipamento, em relação à compatibilidade de suas informações com as mesmas realizadas manualmente.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

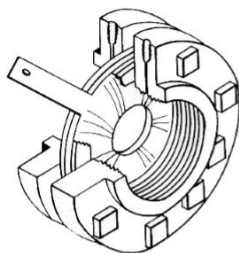
a. Medidores Deprimogêneos

Os medidores deprimogêneos são usados para determinar a vazão através da diferença de pressão e a bancada britânica apresenta três: Placa de Orifício, medidor Venturi e tubo Pitot.

A Placa de Orifício é uma chapa metálica instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação entre flanges e sua espessura varia considerando o diâmetro da tubulação e a pressão da linha, variando entre $\frac{1}{16}$ " até $\frac{1}{4}$ ". A perfuração que, em sua seção transversal, deve ter um formato circular, precisa ter um diâmetro tal que seja possível, a uma máxima vazão, produzir uma pressão diferencial adequada para cálculos.

Dentre os tipos de Placas, a utilizada pela bancada é a Placa de Orifício concêntrica, utilizada para fluidos sem sólidos em suspensão.

Figura 01 – Placa de Orifício e Flange de União



Fonte: SENAI (1999)

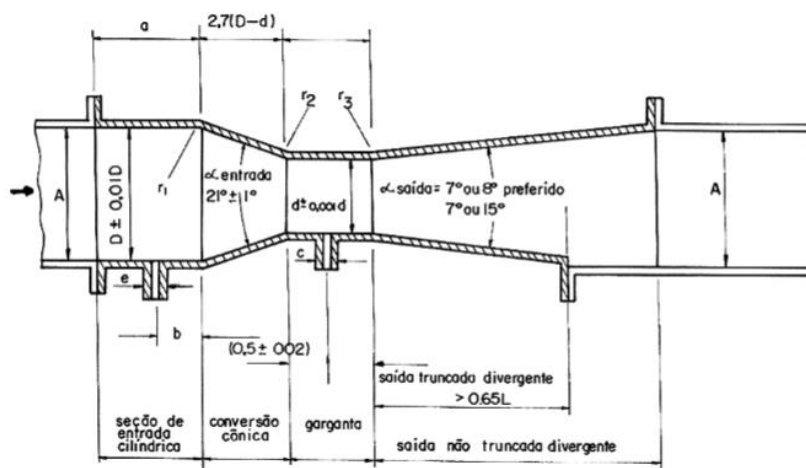
O tubo Venturi é um instrumento que mede a vazão de um sistema segundo a lei proposta por Giovanni Batista Venturi, conhecida como Lei de Venturi, que tem o seguinte enunciado:

“Os fluidos sob pressão, na passagem através de tubos convergentes, ganham velocidade e perdem pressão, ocorrendo o oposto em tubos divergentes.”
(VENTURI, 1797).

O aparelho combina uma curta “garganta” estreitada entre duas seções cônicas e está usualmente instalada entre duas flanges. Em uma tubulação, seu propósito é acelerar o fluido temporariamente e baixar sua pressão estática, para que, através destas, medir a vazão do conduto.

Na bancada em estudo, dentre os diversos tipos de tubo Venturi, o utilizado é o Clássico Longo, onde o difusor aumenta até igualar-se ao diâmetro da tubulação. Este medidor apresenta vantagem a outros medidores semelhantes: boa precisão; resistência a abrasão e ao acúmulo de sedimentos e capacidade de medição em grandes escoamentos de líquidos em grandes tubulações.

Figura 02 – Tubo Venturi



Fonte: SENAI (1999)

Já o tubo Pitot obtém sua diferença de pressão através da mudança de velocidade em todo o trecho e não da área.

O instrumento tem como princípio de funcionamento o mesmo de um medidor de pressão diferencial, necessitando para isso, possuir duas pressões bem definidas. A primeira fonte de pressão do sistema é a pressão de impacto – pressão total ou pressão de estagnação – tomada na extremidade frontal do tubo de Pitot. A segunda é a pressão estática somada à pressão dinâmica, podendo-se calcular a pressão dinâmica após verificar a pressão estática.

Este medidor possui algumas limitações:

- Para tubulações de diâmetro pequeno – como é o caso da bancada – o número de Reynolds máximo é de 50.000 e para grandes tubulações, o Reynolds é ilimitado;
- Não pode ser utilizado para fluidos contendo sólidos;
- A tomada de alta pressão do tubo Pitot encontra-se na entrada da parte convergente do tubo e a de baixa pressão encontra-se no final do cone convergente e no início do divergente, isto é, no “gargalo”.

Figura 03 – Tubo Pitot



Fonte: FILARDI (2012)

b. Perda de carga total

O balanço de quantidade de movimento de um fluído que conta com viscosidade, como a água, é determinado pela equação de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho * g} + \frac{V_1^2}{2 * g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho * g} + \frac{V_2^2}{2 * g} + h_2 + h_p \quad (\text{eq. 01})$$

Onde os índices 1 e 2 nos termos de velocidade (V), pressão (P) e altura (h) correspondem, respectivamente, as parcelas de energia cinética, pressão e potencial em duas seções transversais ao escoamento do fluido. Ainda, o índice h_p está associado à perda de carga produzida pela fricção das partículas do fluido entre si e com as paredes internas que delimitam o escoamento, ou seja, viscosidade do fluido e rugosidade da tubulação.

Aqui é necessário inferir que, em trechos horizontais e sem variações de diâmetro e rugosidade nas paredes internas das seções, as velocidades são iguais e, portanto, podemos desprezá-las nos cálculos e podemos considerar a altura h_1 igual a h_2 em um trecho

horizontal. Assim, pode-se reescrever a equação anterior da seguinte forma considerando as especificidades da bancada:

$$P_1 - P_2 = \rho * g * h_p \quad (\text{eq. 02})$$

Já em trechos verticais sem variação de seção, a equação será:

$$P_1 - P_2 = \rho * g * (h_p + h_2) \quad (\text{eq. 03})$$

Por fim, nos trechos em que há variação de seção que só existem em trechos totalmente horizontais, a equação será:

$$P_1 - P_2 = \left(\frac{2 * g * h_p - (V_1^2 - V_2^2)}{2} \right) * \rho \quad (\text{eq. 04})$$

A perda de carga total ($P_1 - P_2$) é o somatório de duas perdas de energia que o fluido pode sofrer dentro de uma tubulação: perda de carga distribuída e perda de carga localizada. A primeira é a perda de energia em um trecho reto e uniforme de tubulação e seu valor é diretamente proporcional ao comprimento do tubo. Agora, quaisquer sejam as alterações na direção ou no módulo de velocidade do fluido – mudanças na seção transversal do escoamento ou presença de acessórios como válvulas – constituem as perdas de carga localizadas. Estas podem ser calculadas, respectivamente, pelas equações que se seguem:

$$\Delta h_{dist.} = \frac{10,688 * Q^{1,85} * L}{C^{1,85} * D^{4,87}} \quad (\text{eq. 05})$$

$$\Delta h_{loc.} = \Delta h_{total} - \Delta h_{dist.} \quad (\text{eq. 06})$$

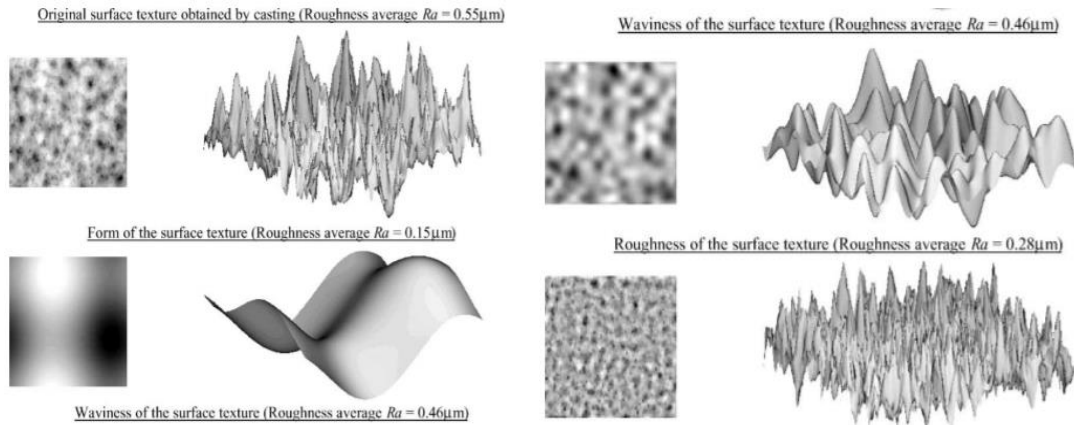
Onde:

- Q – Vazão, obtida através do medidor Venturi (m^3/s);
- D - Diâmetro interno da tubulação (m).
- L – Comprimento do trecho, obtido por trena (m);
- Δh_{total} - Perda de carga total, obtida pelo manômetro de engate rápido (mca).
- C – Fator Hazen-Williams (aproximadamente 150 devido a tubulação ser confeccionada em acrílico e aço inox);

c. Rugosidade

Para a engenharia, superfícies rugosas possuem três componentes principais: rugosidade, ondulação e a forma. Forma é a componente mais simples de ser observada e representa o formato da peça em questão, ondulação são pequenas elevações na peça que são compostas por estruturas menores, formada por picos e vales, conhecidas por rugosidade.

Figura 04 – Forma, ondulação e rugosidade decompostas do perfil de uma textura



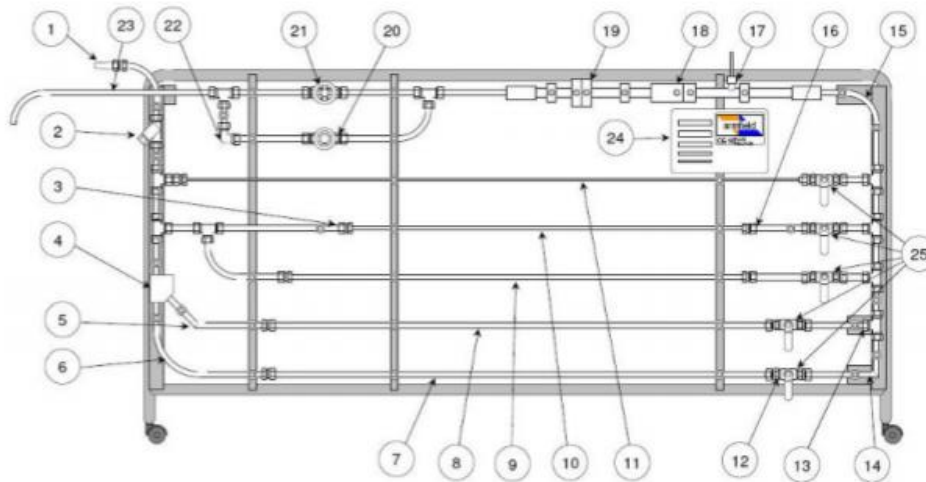
Fonte: JOSSO (2002)

A rugosidade influencia em diversas propriedades de um determinado componente como resistência à corrosão, ao desgaste e fadiga, além do coeficiente de atrito entre duas peças, a qualidade de deslizamento, qualidade de aderência, vedação e resistência ao escoamento.

3. METODOLOGIA

A bancada C6-MKII-10 é extremamente versátil (figura 05). Possui muitos pontos de estudo na área da hidráulica básica.

Figura 05 – Bancada C6-MKII-10 Armfield



Quadro 01: legenda com indicação das peças instaladas na bancada em estudo

Legenda:		
1: Inlet: tubo de formato flexível que será acoplado ao F1-10, isto é, por ele é que a água entra no equipamento;	2: Filtro d'água que impede a entrada de sedimentos no equipamento;	3: Contração súbita;
4: Abertura em "Y" com 45° de ângulo de abertura;	5: Cotovelo de 45°;	6: Curva de 90° com raio longo;
7: Tubo artificialmente áspero (paredes rugosas);	8, 9, 10 e 11: Quatro tubulações de mesmo material, porém com diâmetros diferentes;	12: Válvula de esfera;
13: Tê de 90°;	14: Mitre de 90°;	15: Curva de 90° com raio curto;
16: Ampliação repentina;	17: Seção de tubo feito de acrílico liso com um tubo Pitot estático acoplado;	18: Venturi confeccionado em acrílico;
19: Diafragma confeccionado em acrílico;	20: Válvula de globo;	21: Válvula de gaveta;

22: Cotovelo de 90°;	23: <i>Outlet</i> : saída de água do equipamento;	24: Amostras curtas de cada tubo de testes usadas para medir o diâmetro exato de cada tubulação estudada;
	25: Sistema de válvulas isoladas usadas para impedir o fluxo de água nas tubulações, permitindo o estudo isolado de cada tubo.	

Fonte: ARMFIELD INC. (2013)

Para a verificação do funcionamento da bancada foram escolhidos parâmetros para análise: coeficiente de perda de carga total e vazão. Os seus valores foram determinados através de ensaios realizados na bancada e comparados com a literatura a fim de estabelecer a eficiência desta na obtenção de resultados satisfatórios para seu uso em pesquisas.

Para as simulações, foram especificadas diferentes vazões para escoar na bancada – o número de vazões dependeu da capacidade de escoamento de cada tubulação, a qual estava atrelada ao diâmetro destas – e foram medidas as pressões em todos os pontos disponíveis nos trechos. Ainda, foi verificado da vazão dos medidores deprimogêneos através do método volumétrico que consiste na medição do volume escoado em relação ao tempo.

a. Verificação dos medidores de vazão

A bancada conta com três medidores deprimogêneos: tubo de Pitot; medidor Venturi e uma Placa de Orifício – respectivamente os pontos 17, 18 e 19 na figura 05. Para a obtenção da vazão com a Placa de Orifício, fez-se uso da seguinte equação presente no manual técnico do equipamento:

$$Q = C_d * A_0 * \sqrt{\frac{2 * g * \Delta H}{1 - (A_0/A_1)^2}} \quad (\text{eq. 07})$$

Onde:

- $Q \rightarrow$ Vazão do sistema (m^3/s);
- $\Delta H \rightarrow$ Pressão diferencial (m);
- $C_d \rightarrow$ Coeficiente de descarga (adimensional) – Considerar 0,62 (valor dado pelo manual);
- $A_0 \rightarrow$ Área do orifício (m^2) – Considerar $d_0 = 20mm$;
- $g \rightarrow$ Aceleração da gravidade (m/s^2) – Considerar $9,81m/s^2$;
- $A_1 \rightarrow$ Área da tubulação (m^2) – Considerar $d_1 = 24mm$.

No caso do tubo Venturi, usou-se a mesma equação da Placa, mas com algumas particularidades: o coeficiente de descarga (C_d) foi considerado 0,98 (dado pelo manual) e o diâmetro da menor seção do Venturi (d_0), 14mm.

Por último, o tubo de Pitot, por ser um aparato em que a vazão é obtida através da velocidade do fluido, utilizou-se a equação 08:

$$Q = A * V \rightarrow Q = A * \sqrt{2 * g * \Delta H} \quad (\text{eq. 08})$$

Onde:

- V – Velocidade do sistema (m/s)
- ΔH – Pressão diferencial (m);
- g – Aceleração da gravidade (m/s^2) – Considerar $9,81 m/s^2$;
- A – Área da tubulação (m^2) – Considerar $d_0 = 24mm$.
- Q – Vazão do sistema (m^3/s);

b. Verificação da perda de carga total nas tubulações lisas

A bancada é constituída por tubulações de diâmetros diferentes que, nas simulações hidráulicas, foram submetidas a vazões diferentes. Dentre esses trechos, foram instaladas singularidades, reduções, alargamentos e peças de mudança de direção do escoamento. Ao longo desse sistema complexo foram disponibilizados inúmeros pontos de medição de pressão que permitiram analisar a perda de carga total entre eles e esta foi tomada através do medidor manométrico de engate rápido (figura 06). Para tanto, foi medida a pressão a cada duas tomadas, em kPa, a distância entre os dois pontos, em metros, para que, unidos a vazão e velocidade, fosse possível calcular as perdas de carga equivalentes em cada trecho dos trajetos.

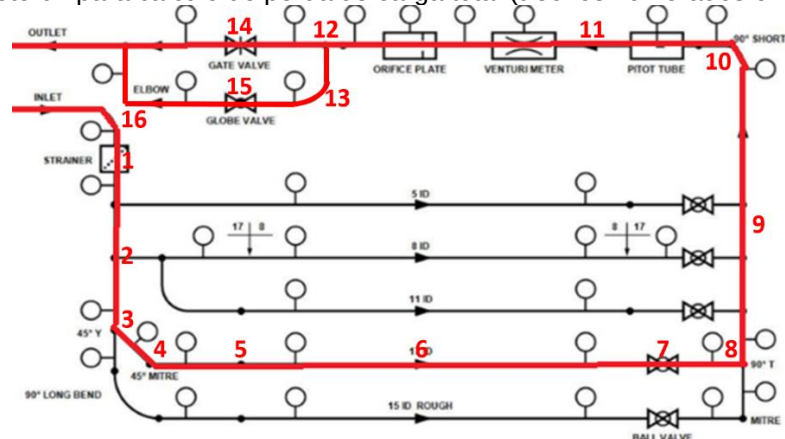
Figura 06 – Medidor manométrico de engate rápido



Fonte: UNITEST INSTRUMENTS (2017)

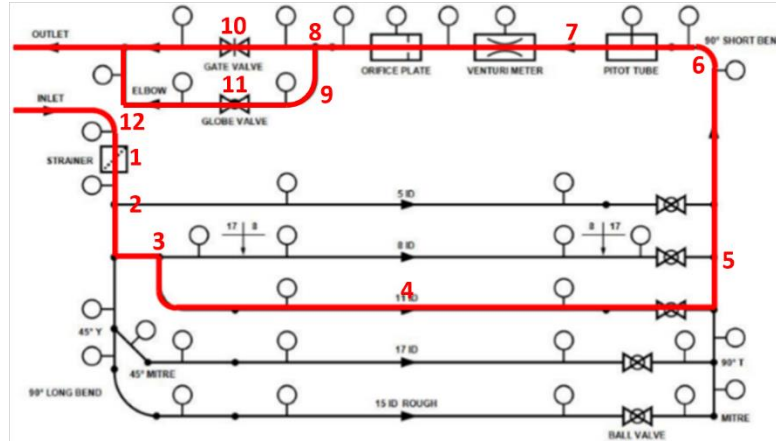
A vazão que entra na bancada pode percorrer inúmeros caminhos e isso vai depender do arranjo estipulado preliminarmente de abertura e fechamento de válvulas. Neste estudo, o caminho (figuras 07 a 10) em vermelho, será denominado “trajeto” e, a região entre pontos de medição de pressão, “trechos”.

Figura 07 - Trajeto 01 para cálculo de perda de carga total (trechos numerados em vermelho)



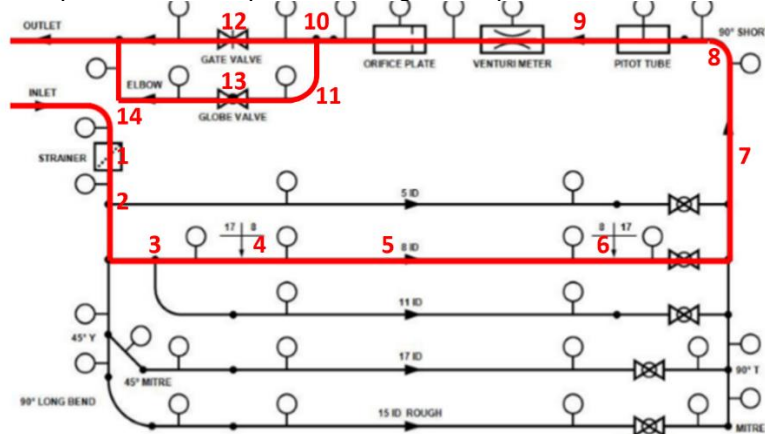
Fonte: ARMFIELD INC. modificado (2019)

Figura 08 - Trajeto 02 para cálculo de perda de carga total (trechos numerados em vermelho)



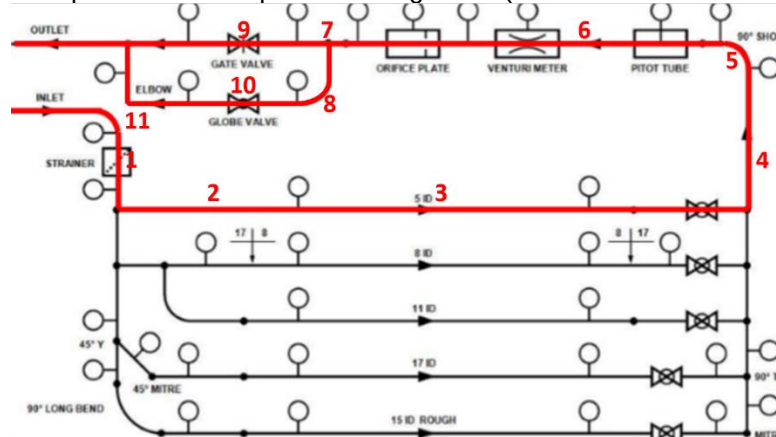
Fonte: ARMFIELD INC. modificado (2019)

Figura 09 - Trajeto 03 para cálculo de perda de carga total (trechos numerados em vermelho)



Fonte: ARMFIELD INC. modificado (2019)

Figura 10 - Trajeto 04 para cálculo de perda de carga total (trechos numerados em vermelho)



Fonte: ARMFIELD INC. modificado (2019)

Para o estudo do escoamento dos trajetos 01 (17mm de diâmetro), 02 (11mm), 03 (08mm) e 04 (05mm), foram usadas as equações a seguir:

- Perda de carga distribuída em tubulações com 17mm de diâmetro:

$$\Delta h_{dist.} = L * \Delta h_{1m} \quad (\text{eq. 09})$$

Onde L é o comprimento da tubulação em metros e, Δh_{1m} , a perda de carga distribuída em um trecho sem singularidade com um metro de comprimento, em mca – este valor pode ser encontrado em “Resultado e Discussão”, como o trecho 06 da tabela 03.

- Perda de carga distribuída em tubulações com diâmetro diferente de 17mm, fez-se uso da equação 05.
- Perda de carga localizada, fez-se uso da equação 06.
- Coeficiente de perda de carga singular (K):

$$K = \Delta h_{loc.} * \frac{2 * g}{V^2} \quad (\text{eq. 10})$$

Onde:

- V – Velocidade do sistema (m/s);
- g – Aceleração da gravidade (m/s^2) – Considerado $9,81 m/s^2$.

Nos trechos onde há alteração de diâmetro, foi calculada a perda de carga distribuída dos dois diâmetros de forma independente, somados e depois subtraiu-se o resultado da perda total para que o valor da localizada fosse descoberto.

A metodologia adotada foi comparar os valores de coeficiente de perda de carga singular determinados através das simulações hidráulicas com os teóricos encontrados na tabela universal (tabela 01), levantando os erros relativos e observações.

Tabela 01 – Coeficientes de perda localizada singular

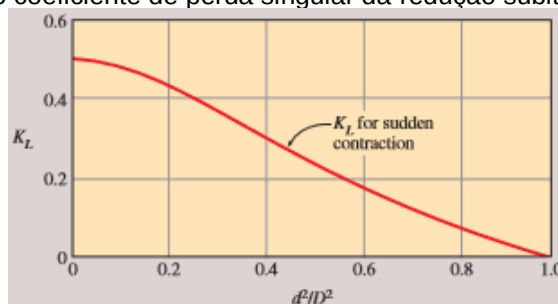
Singularidade	K	Singularidade	K
Curva de 90° de raio curto	0,40	Válvula de globo aberta	10,00
Curva de 90° de raio longo	0,25	Ampliação súbita	eq. 11
Cotovelo de 45°	0,40	Redução súbita	gráfico 1
Válvula de gaveta aberta	0,20	Junção	0,40
Tê, passagem direta	0,90	Válvula de esfera aberta	0,05
Tê, passagem lateral	2,00	Curva de Mitra 90°	1,10
Cotovelo de 90°	0,90		

Fonte: CENGEL (2014), AZEVEDO NETTO (1998)

$$K_{amp.} = 2 * \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \quad (\text{eq. 11})$$

- 2 – Coeficiente adimensional usado em escoamentos turbulentos;
- $\frac{d^2}{D^2}$ – Razão entre o menor diâmetro e o maior.

Gráfico 01 – Obtenção do coeficiente de perda singular da redução súbita

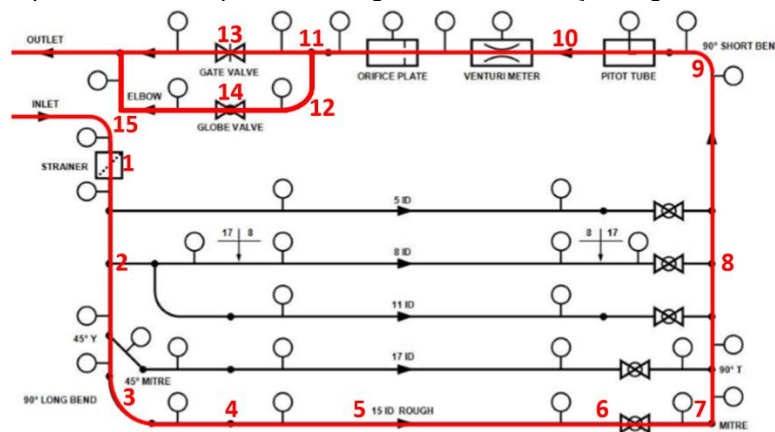


Fonte: CENGEL (2013)

c. Verificação da perda de carga total na tubulação rugosa

Existe uma tubulação rugosa no equipamento que é indicada como o ponto 07 da figura 05. Esta foi testada sob as mesmas condições que as demais tubulações de rugosidade lisa, com o diferencial do seu coeficiente de Hazen-Williams (C) ser 90 ao invés de 150, valor usado quando aço inoxidável e cobre, materiais usados na construção da bancada estão novos (NFPA 13-2013). Na figura 11, o trajeto do escoamento para o ensaio nesta condição:

Figura 11 –Trajeto para cálculo de perda de carga total na tubulação rugosa



Fonte: ARMFIELD INC. modificado (2019)

d. Verificação do software C6-50

O programa vem, de fábrica, com quatro exercícios que avaliam o escoamento da água em tubulação lisa e rugosa; perda de carga localizada nas singularidades e medição de vazão pela perda de pressão através dos medidores deprimogêneos (placa de orifício e medidor Venturi).

O ensaio consistiu em seguir o procedimento disposto no manual de instruções e realizado com o auxílio do programa computacional e manualmente. Uma vez feito isso, seria comparado os resultados e verificado a consistência dos valores obtidos.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

a. Medidores deprimogêneos

Nos testes realizados para avaliar os medidores de vazão, realizados usando a tubulação de 17mm de diâmetro interno (ponto 08 da figura 05), o tubo de Pitot apresentou um erro relativo extremamente alto, porém, esperado pois, como já apresentado, o tubo de Pitot só consegue medir a vazão de forma eficaz uma vez que as pressões estática e dinâmica são bem definidas. A pressão dinâmica é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade (eq. 08) e quando esta é muito baixa há uma variação grande da tomada de pressão. Como a velocidade no equipamento é muito baixa, a precisão do medidor torna-se muito pequena (ARMFIELD INC., 2013).

A placa de orifício apresentou um erro relativo médio de 12,6%. A suposta causa levantada pelo motivo de um valor tão alto está que a empresa informou incorretamente o

diâmetro do orifício. Considerando o valor de 21mm nos cálculos, o erro relativo médio obtido foi 4,7%.

O único que apresentou um resultado satisfatório foi o tubo Venturi. Nos ensaios realizados, apenas um valor apresentou um erro relativo superior a 4%, coincidentemente foi o único ensaio que apresentou, para a placa de orifício, um erro relativo maior quando considerado 21mm o diâmetro do orifício ao invés de 20mm e, por isso, foi desconsiderado este valor. Assim sendo, o erro relativo médio neste aparato foi 3,4%. Para os próximos testes, foi usado apenas o medidor Venturi para a medição de vazão, descartando as medidas obtidas pelos outros dois aparelhos. A tabela 02 apresenta todas as simulações realizadas para a investigação do funcionamento dos medidores deprimogêneos.

Tabela 02 – Ensaio dos Medidores Deprimogêneos

1º Ensaio: (Trajeto 04 - $d = 51D$)			
Medidor	Vazão (m^3/s)	ER (%)	Observação adicional:
Método Volumétrico	$6,7 \cdot 10^{-4} m^3/s$	—	Este método não apresenta erros relativos porque ele foi o considerado ideal para aferir a precisão dos medidores Como o diâmetro desta tubulação é muito pequeno para esta vazão. A perda de carga distribuída é tão grande que impede o escoamento, portanto ele não possui capacidade de vazão, impossibilitando o cálculo. ($\Delta h \gg D$).
Placa de Orifício	Δh negativo	—	
Medidor Venturi	Δh negativo	—	
Tubo de Pitot	Δh negativo	—	
2º Ensaio: (Trajeto 01 - $d = 171D$)			
Medidor	Vazão (m^3/s)	ER (%)	Observação adicional:
Método Volumétrico	$6,67 \cdot 10^{-4} m^3/s$	—	—
Placa de Orifício	$5,81 \cdot 10^{-4} m^3/s$	13	$Q = 7,168 \cdot 10^{-4} m^3/s$ para $d_0 = 21mm$ (Erro = 7%)
Medidor Venturi	$6,905 \cdot 10^{-4} m^3/s$	3,5	—
Tubo de Pitot	Δh negativo	—	Δh negativo devido baixa velocidade
3º Ensaio: (Trajeto 01 - $d = 171D$)			
Medidor	Vazão (m^3/s)	ER (%)	Observação adicional:
Método Volumétrico	$7,2 \cdot 10^{-4} m^3/s$	—	—
Placa de Orifício	$6,697 \cdot 10^{-4} m^3/s$	7	—
Medidor Venturi	$7,957 \cdot 10^{-4} m^3/s$	11	Como o erro relativo deste ensaio está muito distante de todos os outros erros relativos, o seu resultado foi considerado discrepante e, por isso, desprezado.
Tubo de Pitot	Δh negativo	—	—
4º Ensaio: (Trajeto 01 - $d = 171D$)			
Medidor	Vazão (m^3/s)	ER (%)	Observação adicional:
Método Volumétrico	$5,00 \cdot 10^{-4} m^3/s$	—	—
Placa de Orifício	$4,305 \cdot 10^{-4} m^3/s$	14	—
Medidor Venturi	$5,170 \cdot 10^{-4} m^3/s$	3	—
Tubo de Pitot	Δh negativo	—	—
5º Ensaio: (Trajeto 01 - $d = 171D$)			
Medidor	Vazão (m^3/s)	ER (%)	Observação adicional:

Método Volumétrico	$9,10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	–	Vazão máxima que a tubulação é capaz de transportar
Placa de Orifício	$7,457 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	18	$Q = 9,20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para $d_0 = 21\text{mm}$ (Erro = 1%)
Medidor Venturi	$8,710 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	4	–
Tubo de Pitot	Δh negativo	–	–
6º Ensaio: (Trajeto 01 - $d = 17\text{ID}$)			
<i>Medidor</i>	<i>Vazão (m^3/s)</i>	<i>ER (%)</i>	<i>Observação adicional:</i>
Método Volumétrico	$1,80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	–	–
Placa de Orifício	$1,594 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	11	$Q = 1,966 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ para $d_0 = 21\text{mm}$ (Erro = 9%)
Medidor Venturi	$1,862 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$	3	–
Tubo de Pitot	Δh negativo	–	–

Fonte: pessoal do autor

b. Verificação da perda de carga

Os testes de perda de carga nas tubulações apresentaram não conformidades e estas aumentavam de acordo com a redução do diâmetro do tubo. O método utilizado foi a comparação do coeficiente de perda de carga localizada singular (K) obtidos nos ensaios e o universal tabelado (Tabela 01).

Para cada tubulação foram testes variando a vazão de acordo com o diâmetro (quanto menor o diâmetro, menor o número de vazões). Ainda, para a bifurcação dos trechos que dão às válvulas gaveta e globo, a coleta de dados não foi simultânea, isto é, enquanto uma é estudada, a outra manteve-se fechada. A determinação das vazões foi realizada com o auxílio do medidor Venturi e os resultados estão dispostos nas tabelas abaixo junto com observações. Ainda cabe dizer que os dados usados para levantamento do coeficiente K foram apenas aqueles em que a singularidade se encontrava sozinha no trecho, explicando a ausência de alguns trechos nas tabelas a seguir.

No primeiro trajeto, o trecho 11 foi ensaiado em um dia diferente dos outros, por isso a vazão simulada é distinta.

Tabela 03 – Ensaio de perda de carga no Trajeto 01

LEITURA 01 - Vazão simulada: 0,00049150 m^3/s										
TRECHO	ΔH_{total} (kPa)	ΔH_{total} (mca)	V (m/s)	D (m)	L (m)	$\Delta h_{\text{dis.}}$ (mca)	$\Delta h_{\text{loc.}}$ (mca)	K	Singularidade	Observação
1	6,240	0,636	2,169	0,01705	0,169	0,052	0,585	2,440	Filtro	
3	2,570	0,262	2,169	0,01705	0,203	0,062	0,200	0,835	Junção 45°	
4	1,260	0,129	2,169	0,01705	0,200	0,061	0,067	0,281	Cotovelo 45°	
6	3,000	0,306	2,169	0,01705	1,000	0,306	0,000	0,001	Não há singularidade	Usado para determinar a Δh_{dis}
7	1,750	0,179	2,169	0,01705	0,383	0,117	0,061	0,256	Válvula Esfera	
8	4,010	0,409	2,169	0,01705	0,143	0,044	0,365	1,524	Tê Passagem Lateral	
10	0,840	0,086	2,169	0,01705	0,111	0,034	0,052	0,216	Curva 90° Raio Curto	
11	-1,480	-0,151	2,419	0,01705	0,100	0,031	-0,190	-0,636	Alargamento	Vazão simulada: 0,00055221 m^3/s K negativo devido ao Pitot
			1,221	0,02400	0,142	0,008			Tubo Pitot	
14	1,960	0,200	2,169	0,01705	0,510	0,156	0,044	0,183	Registro de Gaveta	
15	11,620	1,185	2,169	0,01705	0,510	0,156	1,029	4,294	Registro de Globo	
16	4,370	0,446	2,169	0,01705	0,176	0,054	0,392	1,635	Cotovelo 90°	

LEITURA 01 - Vazão simulada: 0,00039310m³/s										
TRECHO	ΔH_{total} (kPa)	ΔH_{total} (mca)	V (m/s)	D (m)	L (m)	$\Delta h_{dis.}$ (mca)	$\Delta h_{loc.}$ (mca)	K	Singularidade	Observação
1	4,100	0,418	1,7217	0,01705	0,169	0,034	0,384	2,543	Filtro	
2	0,770	0,079	1,7217	0,01705	0,151	0,030	0,048	0,319	Tê Passagem Direta	
4	77,250	7,880	1,7217	0,01705	0,074	0,015	6,443	1,774	Não há singularidade	
6	17,520	1,787	8,4417	0,0077	0,103	0,996	0,765	5,061	Alargamento	
			1,7217	0,01705	0,131	0,026			Não há singularidade	
8	0,650	0,066	1,7217	0,01705	0,100	0,020	0,046	0,306	Curva de 90° Raio Curto	
12	1,530	0,156	1,7217	0,01705	0,510	0,103	0,053	0,353	V. Gaveta	
13	7,930	0,809	1,7217	0,01705	0,510	0,103	0,706	4,674	V. Globo	
14	3,110	0,317	1,7217	0,01705	0,176	0,035	0,282	1,865	Cotovelo 90°	

LEITURA 02 - Vazão simulada: 0,00040153m³/s										
TRECHO	ΔH_{total} (kPa)	ΔH_{total} (mca)	V (m/s)	D (m)	L (m)	$\Delta h_{dis.}$ (mca)	$\Delta h_{loc.}$ (mca)	K	Singularidade	Observação
1	4,330	0,442	1,7586	0,01705	0,169	0,035	0,406	2,577	Filtro	
2	0,760	0,078	1,7586	0,01705	0,151	0,032	0,046	0,291	Tê Passagem Direta	
3	4,380	0,447	1,7586	0,01705	0,574	0,120	0,327	2,071	1 Tê Passagem Lateral + 1 Tê Passagem Direta	O K está variando muito devido a diferença entre as vazões nos trajetos 1 e 3
4	82,600	8,425	1,7586	0,01705	0,074	0,015	6,931	1,829	Não há singularidade	
			8,6228	0,0077	0,147	1,478			Redução	
6	18,730	1,910	8,6228	0,0077	0,103	1,036	0,847	5,374	Alargamento	
			1,7586	0,01705	0,131	0,027			Não há singularidade	
8	0,700	0,071	1,7586	0,01705	0,100	0,021	0,021	0,131	Curva de 90° Raio Curto	
12	1,470	0,150	1,7586	0,01705	0,510	0,107	0,043	0,274	V. Gaveta	
13	8,000	0,816	1,7586	0,01705	0,510	0,107	0,709	4,499	V. Globo	
14	3,120	0,318	1,7586	0,01705	0,176	0,037	0,281	1,785	Cotovelo 90°	

Fonte: pessoal do autor

Tabela 06 – Ensaio de perda de carga no Trajeto 04

LEITURA 01 - Vazão simulada: 0,00013427m³/s										
TRECHO	ΔH_{total} (kPa)	ΔH_{total} (mca)	V (m/s)	D (m)	L (m)	$\Delta h_{dis.}$ (mca)	$\Delta h_{loc.}$ (mca)	K	Singularidade	Observação
1	0,480	0,049	0,5881	0,01705	0,169	0,005	0,044	2,513	Filtro	Vazamento na tomada de pressão
2	121,700	12,413	0,5881	0,01705	0,143	0,004	-1,219	-0,307	Tê Passagem Lateral	
			8,8305	0,0044	0,675	13,629			Redução	
3	73,380	7,485	8,8305	0,0044	1,000	20,191	-12,706	-3,197	Sem singularidade	
5	0,220	0,022	0,5881	0,01705	0,100	0,003	0,020	1,117	Curva de 90° Raio Curto	
9	0,300	0,031	0,5881	0,01705	0,510	0,014	0,017	0,939	V. Gaveta	
10	0,680	0,069	0,5881	0,01705	0,510	0,014	0,055	3,138	V. Globo	
11	0,370	0,038	0,5881	0,01705	0,176	0,005	0,033	1,866	Cotovelo 90°	

Fonte: pessoal do autor

A tabela 07 para as peças mostrando o erro relativo comparando a média dos coeficientes dos dados experimentais com os teóricos (tabela 01):

Tabela 07 – Resultados individuais das singularidades dos Trajetos 01 a 04

Cotovelo de 45°				Junção de 45°			
Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)	Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)
01/01	0,281	0,40	27,1	01/01	0,835	0,40	123%
01/02	0,291			01/02	0,908		
01/03	0,303			01/03	0,931		
Junção				Válvula Esfera			
Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)	Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)
01/01	0,160	0,40	51,8%	01/01	0,256	0,05	418%
01/02	0,208			01/02	0,267		
01/03	0,210			01/03	0,265		
Cotovelo de 90°				Curva de 90° Raio Curto			
Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)	Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)
01/01	1,635	0,90	95,5%	01/01	0,216	0,40	51,6%
01/02	1,907			01/02	0,221		
01/03	1,394			01/03	0,249		
02/01	1,716			02/01	0,280		
02/02	1,926			02/02	0,264		
02/03	1,749			02/03	0,392		
03/01	1,865			03/01	0,306		
03/02	1,785			03/02	0,131		
04/01	1,866			04/01	1,117		
Registro de Gaveta				Registro de Globo			
Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)	Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)
01/01	0.183	0.20	123%	01/01	4.294	10.0	57%

01/02	0,373			01/02	4,892		
01/03	0,233			01/03	3,600		
02/01	0,257			02/01	4,341		
02/02	0,997			02/02	4,880		
02/03	0,372			02/03	4,303		
03/01	0,353			03/01	4,674		
03/02	0,274			03/02	4,499		
04/01	0,939			04/01	3,138		
Tê passagem lateral				Tê passagem direta			
Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)	Trajeto/Leitura	K exp.	K teó.	Erro (%)
01/01	1,524	2,00	20,4%	01/01	0,248	0,90	67,8%
01/02	1,601			01/02	0,264		
01/03	1,652			01/03	0,252		
				02/01	0,276		
				02/02	0,262		
				02/03	0,406		
				03/01	0,319		
				03/02	0,291		

Fonte: pessoal do autor

Nos ensaios realizados, foram observados alguns problemas na bancada, listados a seguir:

- O coeficiente de perda de carga localizada das singularidades é muito diferente daquele obtido na tabela 01, com alguns apresentando diferenças superiores a 50%, como a caso da válvula globo (ponto 20 – figura 05) e o cotovelo de 90° (ponto 22 – figura 05);
- Ainda sobre o coeficiente K, o trecho entre o tubo Pitot e Venturi apresentou um valor negativo para o coeficiente em todos os trajetos, sob todas as vazões, com exceção do trajeto 04;
- Os dois últimos trajetos tinham diâmetros tão baixos que impossibilitou a obtenção de resultados satisfatórios em seus testes, sobretudo o trajeto 04. Devido ao baixo diâmetro, a velocidade aumentou significativamente, acarretando em uma perda de carga enorme, diminuindo a capacidade de escoamento do fluido;
- Em decorrência da alta velocidade no trajeto 04, houve um pequeno vazamento no primeiro ponto de tomada de pressão, antes do filtro (ponto 02 – figura 05);
- No trajeto 04, com a incapacidade de escoamento da água, as vazões calculadas pelo tubo Venturi foram todas abaixo de 0,3L/s e em nenhuma obtiveram-se resultados satisfatórios de perda de carga, admitindo que a bancada não funciona com eficiência sob vazões nesta escala de grandeza.

c. Rugosidade

O método utilizado foi a comparação do entre as perdas distribuídas do trajeto 1 (tubulação lisa), que possui um diâmetro de 17mm, e a rugosa que conta com um diâmetro

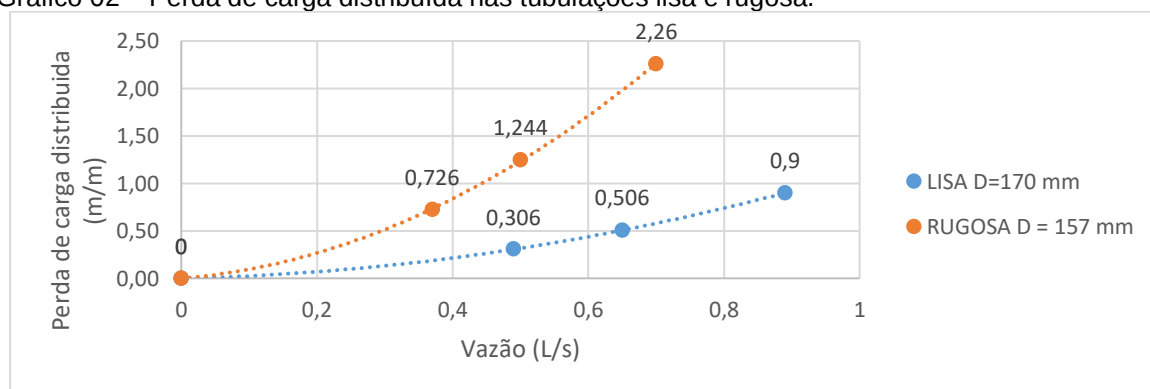
de 15,7 mm. Esta comparação foi realizada através do gráfico 2 abaixo que mostra o aumento da perda de carga na tubulação rugosa. Foram feitos três testes variando a vazão com auxílio do medidor Venturi e os resultados estão dispostos na tabela abaixo junto com observações:

Tabela 07 – Ensaio de perda de carga na tubulação rugosa

LEITURA 01 - Vazão simulada: 0,000503m³/s										
TRECHO	ΔH_{total} (kPa)	ΔH_{total} (mca)	V (m/s)	D (m)	L (m)	$\Delta h_{dis.}$ (mca)	$\Delta h_{loc.}$ (mca)	K	Singularidade	Observação
5	27,900	2,846	2,205	0,01565	1,000	2,846	0,000	0,000	Trecho rugoso s/ singularidade	
LEITURA 02 - Vazão simulada: 0,00069583m³/s										
TRECHO	ΔH_{total} (kPa)	ΔH_{total} (mca)	V (m/s)	D (m)	L (m)	$\Delta h_{dis.}$ (mca)	$\Delta h_{loc.}$ (mca)	K	Singularidade	Observação
5	55,900	5,702	3,617	0,01565	1,000	5,702	0,000	0,000	Trecho rugoso s/ singularidade	
LEITURA 03 - Vazão simulada: 0,00037637m³/s										
TRECHO	ΔH_{total} (kPa)	ΔH_{total} (mca)	V (m/s)	D (m)	L (m)	$\Delta h_{dis.}$ (mca)	$\Delta h_{loc.}$ (mca)	K	Singularidade	Observação
5	16,540	1,687	1,957	0,01565	1,000	1,687	0,000	0,000	Trecho rugoso s/ singularidade	

Fonte: pessoal do autor

Gráfico 02 – Perda de carga distribuída nas tubulações lisa e rugosa.



Fonte: pessoal do autor (2019)

Como esperado, a tubulação com rugosidade artificial apresentou uma perda de energia maior em comparação a tubulação lisa. Isso se deu ao seu diâmetro interno menor e um coeficiente de Hazen-Williams inferior. De acordo com a equação da continuidade, quanto menor o diâmetro, menor será a área e, por consequência, menor será a capacidade de vazão e, de acordo com a equação 5, quanto menor foi o coeficiente C, maior será a perda de carga distribuída.

d. C6-50

O aplicativo que acompanhou o equipamento apresentou problemas no início desta pesquisa que estavam relacionados à não transmissão de dados do equipamento para o computador. Mesmo assim, foram feitos dois dias de testes infrutíferos no equipamento com o auxílio do software. O dispositivo foi encaminhado para a Alemar, representante da Armfield no Brasil, para verificar qual era o problema do acessório e, até então, está sob a elaboração de testes, impedindo a finalização da verificação de seu funcionamento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escala de redução adotada na construção do equipamento resultou em vazões baixas e diâmetros reduzidos, limitando os usos disponíveis para medição de vazão e perda de carga localizada. Como objetivo, essa pesquisa avaliou o uso do equipamento em aula ou em pesquisas e isso será possível parcialmente e, apenas, mediante providências.

A vazão só poderá ser medida pelo Venturi ou pela Placa de Orifício caso utilizando o diâmetro do orifício de 20mm e não o indicado pelo fabricante. O Pitot não deverá ser utilizado como já indicado pela empresa fornecedora do equipamento.

Agora, em relação à perda de carga localizada, o K (coeficiente de perda de carga localizada) fez ser necessário algumas considerações. Observa-se que os valores recomendados para esse coeficiente, na literatura, referem-se a valores médios, uma vez que sua determinação, segundo Porto (2006), é afetada por vários fatores como tipo de acabamento interno das conexões, existência de rebarbas ou ângulos vivos e até das condições das instalações onde os ensaios são realizados como a fixação de uma flange ou um aperto de rosca. Assim, a mesma conexão, originada de fabricantes diferentes, apresentará valores diferentes. Outro fator importante para explicar resultados inesperados é o fato de que o K apresenta valor constante para números de Reynolds elevados ($n * 10^5$); porém, nos ensaios realizados, este adimensional resultou em valores menores a este, mostrando que, para esta bancada, não é possível admitir que o Reynolds não interfira nos resultados.

Algumas singularidades como o cotovelo 45°, Tê de passagem lateral e direta, junção 45° e válvula esfera, apesar do valor experimental de K ser distinto ao da literatura, foram relativamente constantes entre si. Então, como alternativa, no manual que será feito para uso do equipamento para atividades didáticas, indicar o K como a média dos dados experimentais.

A tubulação rugosa da bancada proporciona uma perda de energia superior em comparação à lisa, atendendo aos referenciais teóricos e podendo ser objeto de estudo durante o uso do aparelho.

Portanto, o equipamento pode ser utilizado com algumas ressalvas e preparação prévia de um manual onde indicar-se-ia coeficientes K médios para algumas peças e indicação de impossibilidade de trabalhar algumas singularidades e o tubo Pitot.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16198**: Medição de vazão de fluidos em condutos fechados – Métodos usando medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito – Diretrizes gerais de seleção, instalação e uso. Rio de Janeiro, 2013.

ARMFIELD INC. **Fluid Friction Apparatus – Instruction Manual**. Ringwood, UK. 2013.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, Miguel; ARAÚJO, Roberto de. **Manual de Hidráulica**. 8ª ed., São Paulo, Edgard Blücher, 1998, 668 p. ISBN 85212-0277-6

CENGEL, Yunus. A.; CIMBALA, John. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3ª ed., New York City: McGraw-Hill, 2014, 1004 p. ISBN 978-0-07-338032-2.

FILARDI, Marcelo. **Medição de vazão em tubos de pequeno diâmetro utilizando orifícios integrais**. 2012. 178 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88861>>.

GARCIA, Renato Letizia; FALCÃO, Daiane Acosta; GIUSTINA NETO, José André Della; PIBERNAT, Cristiane Cassales; ZABADAL, Jorge Rodolfo Silva. Tanque Hidráulico Experimental para cálculo de perda de carga em tubulações. **Revista eletrônica científica da UERGS**, Porto Alegre, RS. Vol. 2, n. 1, p. 54-62. 2016.

JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J. Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation. **Wear**, Liverpool: Elsevier, v. 252, n. 5, p. 491-500, 2002.

MARTINS, J. R. S.; GUKOVAS, M. **Hidráulica Básica: Guia de Estudos: Conduitos Forçados e Instalações de Recalque**. Hidráulica Básica: Notas de Aula. São Paulo: EPUSP. 2010, 35 p. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4211259/mod_resource/content/2/Hidr%C3%A1ulica%201.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Standard for the Installation of Sprinkler Systems**. Chicago, 2013.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4ª ed., São Carlos: EESC-USP, 2006, 519 p. ISBN 85-7656-084-4.

SCHNEIDER, Paulo Smith. **Medição de velocidade e vazão de fluidos**. Rio Grande do Sul, UFRGS: GESTE – Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos. 2011.

SENAI. **Instrumentação Básica II: Vazão, Temperatura e Analítica**. Tubarão: CPM – Programa de Certificação do Pessoal de Manutenção, 1999. 242 p.

UNITEST INSTRUMENTS. **Comark C9501/IS Pressure Meter (2 PSI)**. Formato JPEG. Disponível em: <<https://unitestinst.com/productcategory/comark/>>. Acesso em: 16 mai. 2019.

Contatos: matheus.vieger.ribeiro@gmail.com e liliane.armelin@mackenzie.br