



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PAULA VANESSA COSME DE SÁ OLIVEIRA**

**DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA EM INSTALAÇÕES DE  
BOMBEAMENTO OPERANDO COM DIFERENTES FLUIDOS DE TRABALHO E  
TEMPERATURAS VARIÁVEIS**

**FORTALEZA**

**2018**

**PAULA VANESSA COSME DE SÁ OLIVEIRA**

**DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA EM INSTALAÇÕES DE  
BOMBEAMENTO, OPERANDO COM DIFERENTES FLUÍDOS DE TRABALHO E  
TEMPERATURAS VARIÁVEIS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de engenheira mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

**FORTALEZA**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

O49d Oliveira, Paula Vanessa Cosme de Sá.  
Determinação da altura manométrica em instalações de bombeamento operando com diferentes fluidos de trabalho e temperaturas variáveis / Paula Vanessa Cosme de Sá Oliveira. – 2018.  
52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

1. Altura manométrica. 2. Perda de carga. 3. Eletrobombas. I. Título.

CDD 620.1

---

**PAULA VANESSA COSME DE SÁ OLIVEIRA**

**DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA EM INSTALAÇÕES DE  
BOMBAMENTO OPERANDO COM DIFERENTES FLUÍDOS DE TRABALHO E  
TEMPERATURAS VARIÁVEIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de engenheira  
mecânica.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Claus Franz Wehmann  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTO**

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, pela orientação e paciência. Aos professores participantes da banca examinadora: Prof. Dr. Claus Franz Wehmann e Prof.<sup>a</sup> Dra. Maria Alexandra Rios pelo tempo e atenção. Ao Engenheiro André Cavalcante, do grupo M. Dias Branco, pelo tempo e permissões cedidas.

Aos meus amigos que sempre me incentivaram e nunca me deixaram esquecer as minhas obrigações. Ao meu marido, Raphael de Oliveira Costa, pela paciência, amor, incentivo e companheirismo em cada momento.

## RESUMO

As eletrobombas são amplamente empregadas em instalações industriais e comerciais. Na indústria são utilizadas para atender serviços de refrigeração, lubrificação, transporte de fluidos de processo e sistemas hidráulicos. No setor comercial são utilizadas principalmente em sistemas de aquecimento e condicionamento de ar, além de serem utilizadas em sistemas de transporte e tratamento de água e esgotamento sanitário. Esses equipamentos representam boa parte do consumo de energia elétrica nos sistemas em que são empregados, muitas vezes devido ao superdimensionamento por falta de informações confiáveis para avaliação de perdas de carga em tubulações. Devido isso, foi desenvolvida uma planilha eletrônica, reunindo dados de propriedades físicas de diversos fluidos determinadas experimentalmente, e também métodos mais confiáveis para determinação da perda de carga em acessórios de tubulação para realização do levantamento da altura manométrica em um sistema de bombeamento de forma mais próxima a real ainda na fase de projeto. A planilha foi aplicada na determinação da altura manométrica de uma bomba utilizada em um sistema de bombeamento de óleo de uma fábrica de margarina e os resultados foram comparados com os dos cálculos realizados à época do projeto desse sistema, em 2014. Analisando esses valores, obteve-se uma redução de 34% no valor calculado para perda de carga no sistema. Conclui-se que o uso de métodos e dados determinados experimentalmente resulta em valores menores comparados aos métodos teóricos, o que contribui para dimensionamento e seleção de equipamentos não superdimensionados, favorecendo a operação do sistema e reduzindo custos de energia, manutenção e aquisição.

**Palavras-chave:** Altura Manométrica. Perda de carga. Eletrobombas.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2. ESCOAMENTO DE FLUIDOS EM TUBULAÇÕES</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1. PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1.1. DENSIDADE</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.2. VISCOSIDADE</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2. FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DOS FLUIDOS APLICADA AO ESCOAMENTO EM DUTOS</b> <b>15</b>	
<b>2.2.1. VELOCIDADE MÉDIA DO FLUIDO – EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE DE MASSA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.2. NÚMERO DE REYNOLDS</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.3. EQUAÇÃO DE BERNOULLI</b> .....	<b>18</b>
<b>3. PERDA DE CARGA</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1. PERDAS DE CARGA MAIORES - EQUAÇÃO GERAL DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS OU EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1.1. FATOR DE ATRITO</b> .....	<b>21</b>
<b>3.2. PERDAS DE CARGA MENORES OU LOCALIZADAS – PERDAS EM ACESSÓRIOS DE TUBULAÇÃO E VÁLVULAS</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2.1. MÉTODOS DE CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM ACESSÓRIOS</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.1.1. MÉTODO DO COMPRIMENTO EQUIVALENTE</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.1.2. MÉTODO DA CRANE CO.</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2.1.3. MÉTODO DO COEFICIENTE DE PERDA K</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2.1.4. MÉTODO 2-K (MÉTODO DE HOOPER)</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2.1.5. MÉTODO 3-K (MÉTODO DE DARBY)</b> .....	<b>30</b>
<b>4. CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA</b> .....	<b>32</b>
<b>5. APRESENTAÇÃO DA PLANILHA DE CÁLCULO DE ALTURA MANOMÉTRICA</b> .....	<b>35</b>
<b>5.1. DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO E CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM TRECHOS RETOS</b> .....	<b>35</b>
<b>5.2. CÁLCULO DE PERDA DE CARGA EM ACESSÓRIOS E EQUIPAMENTOS</b> .....	<b>38</b>

<b>6.</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>41</b>
<b>6.1.</b>	<b>DADOS DO SISTEMA.....</b>	<b>42</b>
<b>6.2.</b>	<b>CÁLCULO DA ALTURA MANOMÉTRICA - 2014.....</b>	<b>43</b>
<b>6.3.</b>	<b>CÁLCULO DA ALTURA MANOMÉTRICA - 2017.....</b>	<b>47</b>
<b>6.4.</b>	<b>RESULTADOS – PERDA DE CARGA.....</b>	<b>50</b>
<b>6.5.</b>	<b>SELEÇÃO DA BOMBA.....</b>	<b>51</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As eletrobombas são amplamente empregadas em instalações industriais e comerciais. Na indústria são utilizadas para atender serviços de refrigeração, lubrificação, transporte de fluidos de processo e sistemas hidráulicos. No setor comercial são utilizadas principalmente em sistemas de aquecimento e condicionamento de ar, além de serem utilizadas em sistemas de transporte e tratamento de água e esgotamento sanitário.

De acordo com a *Alliance to Save Energy* (ASE, 2013), entre 2% e 3% do consumo de energia mundial é utilizado em sistemas de bombeamento e tratamento de água para residências e indústrias. No Brasil, conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2017), em 2016, as despesas por parte de prestadoras de serviço de saneamento atingiram R\$ 5,41 bilhões, tendo sido consumidos 11,8 TWh; 10,6 TWh com abastecimento de água e 1,2 TWh com esgotamento sanitário. Este consumo refere-se aos diversos usos nos processos, porém, destaca-se o consumo por parte das eletrobombas das estações elevatórias, que são responsáveis por cerca de 90% da energia consumida (TSUTIYA, 2001).

Parte considerável da energia gasta nos sistemas de bombeamento se deve à ineficiência, muitas vezes decorrente do dimensionamento inadequado das bombas. Por esses equipamentos serem essenciais na operação diária de muitas instalações, há a tendência de promover a prática de dimensionar as bombas de forma conservadora para assegurar que as necessidades do sistema sejam atendidas sob todas as condições.

Os dois motivos principais para o superdimensionamento de bombas são:

- a) A perda de pressão de um sistema, que deve ser estimada ainda na fase de projeto do sistema de bombeamento. Notadamente, valores da literatura, como por exemplo, os valores de resistência de acessórios e válvulas, variam significativamente, além de serem ensaiadas para um fluido de trabalho específico, normalmente água e consequentemente as perdas de pressão são incertas. Portanto é prática comum adicionar certa margem de segurança ao cálculo, que pode variar de 10% a 25%.
- b) Os projetistas de instalações de bombeamento adicionam também uma margem de segurança na seleção do equipamento, para garantir que irá operar de maneira satisfatória, principalmente se o fluido não for água. Dessa forma, nem sempre é possível evitar instalações com bombas superdimensionadas.

Quando uma bomba é superdimensionada, o sistema apresenta baixa eficiência energética devido ao consumo elevado de energia, além disso, exige um maior investimento

tanto em custo de aquisição como em manutenção, e em muitos casos pode resultar em problemas operacionais como o desgaste dos componentes do sistema e ruído excessivo, etc.

Como pôde ser observado, um dos principais fatores para o dimensionamento inadequado de bombas concentra-se na incerteza ao calcular-se a pressão necessária para o sistema. A maioria dos ábacos existentes na literatura técnica foi desenvolvida para tubulações de materiais específicos, sendo o fluido de trabalho a água, e temperaturas de referência fixas, o que dificulta a determinação da pressão para sistemas que operem com fluidos diferentes. Além disso, os dados existentes a respeito das perdas de pressão em acessórios de tubulação têm valores tabelados bastante dispersos.

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma ferramenta para auxiliar no cálculo da altura manométrica de redes de tubulações ainda na fase de projeto, determinação da curva do sistema e seleção adequada de bombas, contando com um banco de dados contendo fluidos e materiais de tubulações utilizados na indústria, dimensões de tubulações fornecidas por fabricantes, além de cálculos adequados para avaliação da perda de carga em acessórios de tubulação.

## 2. ESCOAMENTO DE FLUIDOS EM TUBULAÇÕES

Com o desenvolvimento tecnológico, o transporte de fluidos tem desempenhado papéis cada vez mais importantes nos diversos setores industriais e comerciais. O meio mais comum de manipulá-los, seja durante a produção, processo ou transporte é através da condução por tubulações.

O comportamento do escoamento interno às tubulações depende de vários fatores como: propriedade do fluido, material da tubulação, velocidade de escoamento, dentre outros. Estes e outros assuntos pertinentes serão tratados nos tópicos a seguir.

### 2.1. Propriedades físicas dos fluidos

Atualmente muitos tipos de fluidos são utilizados nos processos industriais: água, óleos, ácidos, metais líquidos, etc. A solução para qualquer problema de escoamento requer o conhecimento das propriedades físicas do fluido de trabalho. Dentre as propriedades mais relevantes para o escoamento tem-se a densidade,  $\rho$ , e a viscosidade cinemática,  $\mu$ .

Frequentemente encontra-se na literatura valores tabelados ou em gráficos para as propriedades de diversos fluidos, porém, com valores usualmente específicos de temperatura e pressão. A Tabela 1 apresenta um exemplo com dados de densidade e peso específico para a água em diferentes temperaturas e pressão constante de 1,0 atm.

Esses dados não são adequados, visto que as condições reais de operação em uma rede de bombeamento diferem consideravelmente daquelas para as quais as propriedades são disponibilizadas na literatura e o objetivo principal do trabalho é apresentar os cálculos de altura manométrica para as mais variadas condições de operação.

Tabela 1 - Densidade e peso específico da água líquida de 0°C a 100°C com pressão externa de 101.325Pa.

TEMPERATURA [°C]	DENSIDADE [kg/m <sup>3</sup> ]	PESO ESPECÍFICO [kN/m <sup>3</sup> ]
0	999,82	9,80
5	1000,00	9,81
10	999,77	9,80
15	999,19	9,80
20	998,29	9,79
25	997,13	9,78
30	995,71	9,76
35	994,08	9,75
40	992,25	9,73
45	990,22	9,71
50	988,02	9,69
55	985,65	9,67
60	983,13	9,64
65	980,45	9,61
70	977,63	9,59
75	974,68	9,56
80	971,60	9,53
85	968,39	9,50
90	965,06	9,46
95	961,62	9,43
100	958,05	9,40

Fonte: [http://www.vaxasoftware.com/doc\\_eduen/qui/denh2o.pdf](http://www.vaxasoftware.com/doc_eduen/qui/denh2o.pdf).

Para a obtenção de informações confiáveis para as propriedades foram utilizados os dados e métodos desenvolvidos pelo *Design Institute for Physical Properties* (DIPPR), um dos principais colaboradores para a pesquisa de dados de propriedades físicas de diversos compostos sob o patrocínio do *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE), que estão descritos nos tópicos a seguir.

### 2.1.1. Densidade

A densidade,  $\rho$ , de uma substância é expressa pela razão de sua massa por unidade de volume. A unidade de densidade no SI é o kg/m<sup>3</sup> e varia com a temperatura. Os efeitos da pressão sobre a densidade dos líquidos não têm importância prática, a não ser que estejam submetidos a altas pressões.

A correlação da densidade em função da temperatura foi calculada utilizando-se a equação 105 do DIPPR (Eq. 1), exceto para a água em que foi utilizada a equação 100 (Eq. 2):

$$\rho = \frac{A}{B \left(1 + \left(1 - \frac{T}{C}\right)^D\right)} \cdot M \quad (1)$$

$$\rho = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (2)$$

Onde:

$\rho$ : Densidade, kg/m<sup>3</sup>;

T: Temperatura do Fluido, K;

M: Massa molar, kg/kmol;

A, B, C, D e E: Constantes determinadas experimentalmente.

Uma lista de alguns fluidos e suas respectivas constantes, bem como a faixa de temperatura em que estas equações podem ser aplicadas, encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Lista de fluidos e suas constantes para cálculo de densidade

FÓRMULA	NOME	MASSA MOLAR [kg/kmol]	A	B	C	D	Temp. mín [K]	Temp. máx [K]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico	98,1	1,5	0,3	924,0	0,3	283,5	610,0
H <sub>2</sub> O	Água	18,0	-13,9	0,6	0,0	0,0	273,2	353,2
NH <sub>3</sub>	Amônia	17,0	3,5	0,3	405,7	0,3	195,4	405,7
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Etil Acetato	88,1	0,9	0,3	523,3	0,3	189,6	523,3
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Ácido Acético	60,1	1,4	0,3	592,0	0,3	289,8	592,0
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Ácido Fórmico	46,0	1,9	0,2	588,0	0,2	281,5	588,0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Etanol	46,1	1,6	0,3	514,0	0,2	159,1	514,0
CH <sub>4</sub> O	Metanol	32,0	2,3	0,3	512,5	0,2	175,5	512,5
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	Acetona	58,1	1,2	0,3	508,2	0,3	178,5	508,2
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzeno	78,1	1,0	0,3	562,1	0,3	278,7	562,1
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetileno	26,0	2,5	0,3	308,3	0,3	192,4	308,3
HCl	Ácido Clorídrico	36,5	3,3	0,3	324,7	0,3	159,0	324,7

Fonte: Software Diadem – DIPPR

### 2.1.2. Viscosidade

A viscosidade de um fluido expressa a facilidade com que esse escoar quando submetido a uma força externa. O coeficiente de viscosidade absoluta de um fluido,  $\mu$ , é uma medida da sua resistência interna a deformação ao cisalhamento e é dependente da temperatura.

Os dados de viscosidade de um fluido são muito importantes em diversas aplicações da engenharia. O DIPPR possui um vasto banco de dados com valores de constantes que permitem estimar a viscosidade de líquidos. Por serem derivadas de dados experimentais essas constantes podem ser utilizadas com confiança. A correlação da viscosidade em função da temperatura pode ser expressa pela equação 101 do DIPPR (Eq. 3):

$$\mu = \exp \left[ A + \frac{B}{T} + C \ln(T) + DT^E \right] \quad (3)$$

Onde:

$\mu$ : Viscosidade Dinâmica, Pa.s;

T: Temperatura do Fluido, K;

A, B, C, D e E: Constantes determinadas experimentalmente.

Na Tabela 3 há uma lista de alguns fluidos, suas respectivas constantes para determinação da viscosidade em Pa.s através da equação 101 do DIPPR e a faixa de temperatura aplicável.

Tabela 3 - Lista de fluidos e suas respectivas constantes para o cálculo da viscosidade dinâmica em Pa.s através da equação 101 do DIPPR.

FÓRMULA	NOME	MASSA MOLAR [kg/kmol]	A	B	C	D	E	Temp. mín [K]	Temp. máx [K]
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico	98,1	-13,3	2863,7	0,0	0,0	0,0	273,1	610,0
H <sub>2</sub> O	Água	18,0	-52,8	3703,6	5,9	5,8E-29	10,0	273,2	646,2
NaOH	Hidróxido de Sódio	40,0	-9,5	2484,0	0,0	0,0	0,0	596,0	1830,0
NH <sub>3</sub>	Amônia	17,0	-6,7	598,3	-0,7	3,6E-27	0,0	195,4	393,2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Ácido Acético	60,1	-9,0	1212,3	-0,3	0,0	0,0	289,8	391,1
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Ácido Fórmico	46,0	-48,5	3394,7	5,4	0,0	0,0	281,5	373,7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Etanol	46,1	7,9	782,0	-3,0	0,0	0,0	200,0	440,0
CH <sub>4</sub> O	Metanol	32,0	-25,3	1789,2	2,1	0,0	0,0	175,5	337,9
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	Acetona	58,1	-14,9	1023,4	0,6	0,0	0,0	190,0	329,4
CH <sub>2</sub> O	Formaldeído	30,0	-7,7	603,4	-0,5	0,0	0,0	155,2	253,9
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	Tolueno	92,1	-226,1	6805,7	37,5	-0,1	0,0	178,2	383,8
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Benzeno	78,1	7,5	294,7	-2,8	0,0	0,0	278,7	545,0
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetileno	26,0	6,2	-151,8	-2,7	0,0	0,0	193,2	273,2
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno	28,1	1,9	78,9	-2,2	0,0	0,0	104,0	250,0
HCl	Ácido Clorídrico	36,5	-116,3	3834,6	16,9	-2,5875E-10	4,0	159,0	318,2

Fonte: Software Diadem – DIPPR

A unidade para a viscosidade dinâmica no Sistema Internacional de unidades (SI) é o Pascal-segundo (Pa.s) que pode ser expresso também em Newton-segundo por metro quadrado (N.s/m<sup>2</sup>). No sistema CGS o Poise (P) é a unidade correspondente para a viscosidade, sendo o submúltiplo cP (10<sup>-2</sup> P) a forma mais utilizada.

## 2.2. Fundamentos da Dinâmica dos Fluidos Aplicada ao Escoamento em Dutos

### 2.2.1. Velocidade Média do Fluido – Equação da Continuidade de Massa

Para um escoamento permanente em uma tubulação fechada, baseado na conservação de massa, é requerido que a vazão mássica que entra seja igual à vazão mássica que sai (Eq. 4):

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2 \quad (4)$$

Considerando que trata-se de um fluido incompressível,  $\rho_1 = \rho_2$ , portanto:

$$Q_1 = Q_2 = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (5)$$

Portanto, em uma dada seção de tubulação, a velocidade média é determinada pela equação da continuidade para escoamento em regime permanente (Eq. 6):

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{w}{A\rho} \quad (6)$$

Onde:

v: Velocidade média, m/s;

Q: Vazão volumétrica, m<sup>3</sup>/h;

A: Área da seção da tubulação, m<sup>2</sup>;

w: Vazão mássica, kg/s;

$\rho$ : Densidade do fluido, kg/m<sup>3</sup>.

Na Tabela 4 foram listadas velocidades recomendadas para alguns serviços e aplicações:

Tabela 4 - Velocidades recomendadas para serviços e aplicações específicas

SERVIÇO OU APLICAÇÃO	VELOCIDADE	VELOCIDADE	VELOCIDADE
	MÉDIA	MÍNIMA	MÁXIMA
	[m/s]	[m/s]	[m/s]
DESCARGA DE BOMBA	2,70	2,40	3,00
SUCÇÃO DE BOMBA	1,65	1,20	2,10
LINHA DE DESCARGA	1,60	1,10	2,10
TUBO PRINCIPAL	2,10	1,20	3,00
MONTANTE OU TUBO ASCENDENTE	2,00	1,00	3,00
SERVIÇO GERAL	2,25	1,50	3,00

Fonte: ABNT NBR 16.401-1 2008: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1 – Projeto das instalações – Tabela 3 (Adaptada)

### 2.2.2. Número de Reynolds

A natureza do escoamento em um tubo dependerá do diâmetro, densidade e viscosidade do fluido escoado e da velocidade de escoamento. Combinando essas variáveis foi obtido um parâmetro adimensional chamado número de Reynolds,  $Re$ , que representa a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas, calculado a partir da equação 7:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (7)$$

Onde:

$Re$ : Número de Reynolds;

$\rho$ : Densidade do fluido,  $\text{kg/m}^3$ ;

$V$ : Velocidade média do fluido na seção,  $\text{m/s}$ ;

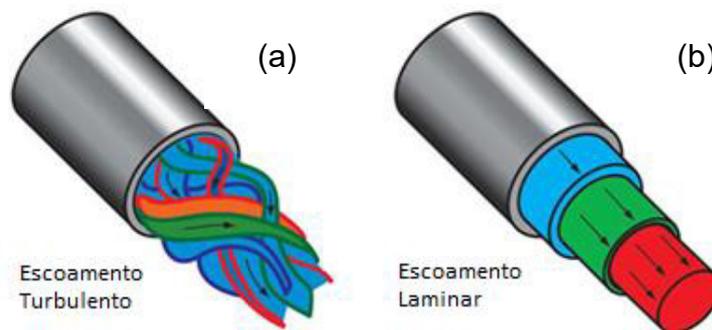
$D$ : Diâmetro do tubo,  $\text{m}$ ;

$\mu$ : Viscosidade cinemática;  $\text{Pa.s}$ .

Para escoamentos internos, valores de Reynolds abaixo de 2.000 indicam um escoamento laminar, Figura 1b. O escoamento laminar ocorre quando o fluido escoar como lâminas, ou cilindros, tratando-se de tubulações, que deslizam umas sobre as outras, não havendo mistura entre as camadas de fluido.

Valores de Reynolds acima de 4.000 indicam um escoamento turbulento, Figura 1a, o mais comum nos processos de engenharia. Neste as partículas movem-se segundo trajetórias aleatórias, o que causa transferência de quantidade de movimento entre as camadas, resultando em flutuações de velocidade em torno de um valor médio.

Figura 1- Representação de escoamento turbulento (a) e laminar (b) em um tubo.



Fonte: <http://www.smartflow-usa.com/turbulent-flow-rate-calculator/images/turbulent-flow.jpg>

Para valores de Reynolds entre 2.000 e 4.000 diz-se que o escoamento está em transição entre o regime laminar e o turbulento.

### 2.2.3. Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli é um meio de aplicar a lei da conservação da energia ao escoamento de fluidos em tubos. A energia total em um ponto qualquer da seção do escoamento é igual à soma da elevação, pressão e da velocidade, Equação 8:

$$Z + \frac{P}{\rho g_n} + \frac{v^2}{2g_n} = H \quad (8)$$

Se as perdas por atrito forem negligenciadas e nenhuma energia for adicionada ou retirada do sistema, então a energia total,  $H$ , será constante em qualquer ponto do fluido. Porém, na prática, perdas ou aumentos e reduções de energia são encontradas e devem ser incluídas na equação de Bernoulli. Expressando um balanço de energia entre dois pontos, tem-se a Equação 9:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g_n} + \frac{v_1^2}{2g_n} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g_n} + \frac{v_2^2}{2g_n} + H_l \quad (9)$$

Onde:

Z: Elevação, m;

P: Pressão, Pa;

$\rho$ : Densidade, kg/m<sup>3</sup>;

$g_n$ : Aceleração da gravidade, igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>;

v: Velocidade, m/s;

$H_l$ : Perda de carga, m;

### 3. PERDA DE CARGA

A perda de carga,  $H_l$ , corresponde à soma das perdas maiores e menores (ou localizadas).

As perdas maiores referem-se àquelas causadas pelo atrito no escoamento em tubos retos de seção constante. Já as perdas localizadas são causadas por acessórios de tubulação, como curvas e transições, ou válvulas.

#### 3.1. Perdas de carga maiores - Equação Geral do Escoamento de Fluidos ou Equação de Darcy-Weisbach

O escoamento em tubos sempre virá acompanhado do atrito das partículas do fluido umas contra as outras e conseqüente perda de energia disponível para trabalho, em outras palavras, deve haver perda de pressão na direção do escoamento.

A equação geral para determinação da perda de carga, Eq. 10, conhecida como equação de Darcy-Weisbach e expressa em metros de coluna de fluido, é:

$$H_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g_n} \quad (10)$$

Onde:

$H_l$ : Perda de pressão devido ao atrito, m;

f: fator de atrito;

L: Comprimento da tubulação, m;

D: Diâmetro interno do tubo, m;

v: Velocidade, m/s

$g_n$ : Aceleração da gravidade, 9,81 m/s<sup>2</sup>;

A equação de Darcy apresenta as seguintes vantagens:

- a) É dimensionalmente consistente;
- b) É útil para qualquer fluido;
- c) Pode ser derivada analiticamente na região de escoamento laminar;
- d) É útil na região de transição entre escoamento laminar e escoamento turbulento completamente desenvolvido;

e) A variação do fator de atrito é bem documentada.

### 3.1.1. Fator de Atrito

Na região de escoamento laminar onde o número de Reynolds é menor que 2.000, o fator de atrito pode ser calculado pela equação 11, sendo independente da rugosidade:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (11)$$

Onde:

f: Fator de atrito;

Re: Número de Reynolds.

Para valores de Reynolds acima de 2.000, pode-se utilizar a equação de Colebrook (Eq. 12) para determinação do fator de atrito:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (12)$$

Onde:

f: fator de atrito;

$\varepsilon$ : Rugosidade absoluta, m;

D: Diâmetro interno do tubo, m;

Re: Número de Reynolds.

Na Tabela 5 foram listados alguns materiais e seus respectivos valores de rugosidade,  $\epsilon$ :

Tabela 5 - Lista de materiais para tubulação e valores de rugosidade

MATERIAL	RUGOSIDADE ABSOLUTA [m]
Polietileno Reticulado (PEX)	0,00000150
PVC	0,00000500
PP	0,00000700
PVDF	0,00000150
PEAD	0,00000152
PRFV	0,00002000
PB	0,00000150
PE	0,00000700
Aço Carbono	0,00004600
Aço Carbono Galvanizado	0,00015001
Aço Inox	0,00004600
Aço incrustação leve	0,00025000
Aço incrustação moderada	0,00142500
Aço incrustação severa	0,00450000
Cobre	0,00000150

. Fonte: Technical Note: Friction Factor Diagrams for Pipe Flow - Jim McGovern E Pipeflow Expert Software - v 6.39

Em alguns casos o fator de atrito pode causar incertezas e prever o valor de  $f$  após anos de serviço de um sistema é dificultoso devido a mudanças na rugosidade e diâmetro interno do tubo causadas pela corrosão, deposição de minerais, dentre outros fatores.

### 3.2. Perdas de carga menores ou localizadas – Perdas em acessórios de tubulação e válvulas

As instalações de bombeamento geralmente possuem um considerável número de válvulas e acessórios. A resistência ao escoamento através desses vários componentes contribui significativamente com a perda de pressão de toda uma rede de tubulações.

A velocidade em um tubo é obtida com o custo da pressão estática, e a redução da carga devido à velocidade é dada pela equação 13:

$$H_L = \frac{v^2}{2g_n} \quad (13)$$

É utilizado um coeficiente de resistência K para definir a quantidade de carga perdida, Eq. 14, que está sempre associado ao diâmetro em que a velocidade é atingida.

$$H_L = K \frac{v^2}{2g_n} \quad (14)$$

O coeficiente de resistência K é considerado independente do número de Reynolds e do fator de atrito.

A mesma perda em um trecho reto de tubo pode ser expressa pela equação de Darcy-Weisbach, Eq.10:

$$H_L = \left( f \frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g_n} \quad (10)$$

O fator K pode ser relacionado à fórmula de Darcy-Weisbach para tubos retos através da Equação 14:

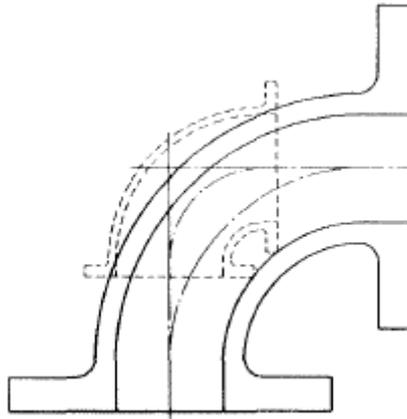
$$K = \left( f_D \frac{L_e}{D} \right) \quad (14)$$

Dados de perda de pressão para válvulas e acessórios são disponibilizados através de experimentos, porém devido o tempo consumido nos ensaios e o custo de tais experimentos, não é possível obter os dados de perda para todos os acessórios e para cada diâmetro. Portanto, é necessário proporcionar um meio confiável pelo qual se possam extrapolar os dados disponíveis para englobar os itens não testados. Normalmente são utilizados conceitos de comprimento equivalente e fator de resistência K.

A razão  $L_e/D$ , chamada comprimento equivalente, causará a mesma perda de pressão que um acessório sob as mesmas condições de escoamento. O valor de  $L_e/D$  para qualquer acessório deve necessariamente variar inversamente com a variação do fator de atrito para diferentes condições.

O fator de resistência  $K$  deveria, teoricamente, ser constante para todos os tamanhos de acessórios, se estes fossem geometricamente similares, porém, na prática, isso não ocorre, Figura 2.

Figura 2 - Dissimilaridade geométrica entre curva flangeada de ferro fundido de 2" e 12".



Fonte: Figura 2-13, Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Crane Co, 1986.

Os tópicos seguintes abrangerão os diversos métodos para obtenção da perda de carga em acessórios.

### **3.2.1. Métodos de cálculo da perda de carga em acessórios**

#### **3.2.1.1. Método do comprimento equivalente**

O método do comprimento equivalente é, dentre os métodos mais conhecidos, o mais antigo. Este método é baseado na hipótese de que um componente de tubulação pode ser substituído por um tubo de um dado diâmetro com um comprimento fictício, o chamado comprimento equivalente, com perda de pressão igual ao de um dado componente com um dado número de Reynolds em uma tubulação. Muitos fabricantes disponibilizam tabelas de comprimento equivalente para suas peças (Figura 3):

Figura 3 - Tabela de comprimentos equivalentes, em metros, para conexões roscadas de ferro fundido galvanizado. Obs.:Válidos somente para condução de água a temperatura ambiente.

DIÂMETRO NOMINAL	¼"	¾"	½"	¾"	1"	1¼"	1½"	2"	2½"	3"	4"	5"	6"
	0,23	0,35	0,47	0,70	0,94	1,17	1,41	1,88	2,35	2,82	3,76	4,70	5,64
	0,22	0,33	0,44	0,67	0,89	1,11	1,33	1,78	2,23	2,68			
		0,16	0,22	0,32	0,43	0,54	0,65	0,86	1,08	1,30	1,73	2,16	2,59
		0,61	0,81	1,22	1,63	2,03	2,44	3,25					
			0,27	0,41	0,55	0,68	0,82	1,04	1,37	1,64	2,18		
	0,16	0,24	0,32	0,48	0,64	0,79	0,95	1,27	1,59	1,91	2,54		
		0,25	0,34	0,50	0,67	0,84	1,01	1,35	1,68	2,02	2,69		4,04
	0,10	0,15	0,20	0,30	0,41	0,51	0,61	0,81	1,02	1,22			
			0,43	0,65	0,86	1,08	1,30	1,73					
	0,04	0,06	0,08	0,12	0,17	0,21	0,25	0,33	0,41	0,50	0,66	0,83	0,99
	0,34	0,51	0,69	1,03	1,37	1,71	2,06	2,74	3,43	4,11	5,49	6,86	8,23
	0,42	0,62	0,83	1,25	1,66	2,08	2,50	3,33	4,16	4,99	6,65	8,32	9,98
			0,09	0,13	0,18	0,22	0,27	0,36	0,44	0,55	0,73		
			0,44	0,66	0,88	1,10	1,31	1,75	2,19	2,70	3,51		
	0,05	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,41	0,49	0,59			
	0,34	0,50	0,67	1,01	1,35	1,68	2,02	2,69	3,36	4,02			
			0,28										
			0,30										
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01		

Fonte: Catálogo Técnico – Tupy, Junho/2015.

O comprimento equivalente referente aos acessórios,  $L_e$ , pode ser adicionado ao comprimento dos trechos retos de tubo,  $L$ , para inclusão da perda de carga nessas peças.

A desvantagem desse método é que o comprimento equivalente para um dado acessório não é constante, mas depende do número de Reynolds, rugosidade, diâmetro do tubo e geometria. Todo comprimento equivalente possui um fator de atrito específico.

O método assume que:

(1) Os tamanhos dos acessórios de um dado tipo podem ser escalados para o diâmetro correspondente do diâmetro do tubo.

(2) A influência do número de Reynolds nas perdas por atrito no acessório é a mesma que na perda para um trecho reto de tubulação.

Verifica-se que nenhuma dessas suposições apresentadas no método é precisa devido à natureza do campo de escoamento laminar ou turbulento no interior de uma válvula ou acessório ser geralmente diferente de um tubo reto. Portanto, há uma incerteza ao

determinar o efeito do número de Reynolds no coeficiente de perda. Esse método não considera adequadamente o escoamento em uma válvula ou acessório.

### 3.2.1.2. Método da Crane Co.

O método desenvolvido pela Crane Co. é uma modificação do método do comprimento equivalente, porém, leva em consideração o fato de que há um grau mais elevado de turbulência em válvulas e acessórios do que em um tubo reto para um dado número de Reynolds. Essa é a razão pela qual a área de um escoamento turbulento completamente desenvolvido é considerada no cálculo do fator de atrito nos componentes independentemente do número de Reynolds corrente no tubo.

A última versão do método desenvolvido pela Crane no “Technical Paper 410” requer o uso de dois fatores de atrito. O primeiro é o fator de atrito real para o escoamento em um tubo reto ( $f$ ), e o segundo é um fator de atrito padrão para um acessório em particular ( $f_T$ ), Figura 4.

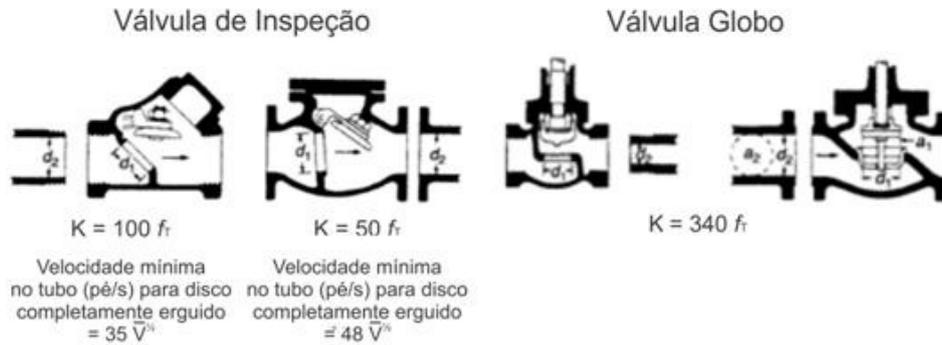
Figura 4 - Fatores  $f_T$  para o método da Crane Co.

<b>Dimensão nominal (pol)</b>	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	4	5	5
<b>Fator de Atrito, <math>f_T</math></b>	0,027	0,025	0,023	0,022	0,021	0,019	0,018	0,017	0,016	0,015

Fonte: “K” Factor Table, Apendice A, A-26, Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Crane Co, 1986.

A Crane disponibiliza valores de  $f_T$  para uma ampla variedade de acessórios, válvulas e etc, como exemplificado na Figura 5. Esse método fornece resultados satisfatórios para altos níveis de turbulência (altos valores de Reynolds), mas é menos preciso para valores de Reynolds baixos.

Figura 5 - Fórmulas para avaliação do fator K a partir de  $f_T$  no método da Crane Co.



Fonte: “K” Factor Table, Apêndice A, A-27, Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Crane Co, 1986.

Por esse método, a perda de carga é calculada através da equação 15:

$$h_L = K_f \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

Onde  $K_f$  é expresso pela equação 16:

$$K_f = 4f_T \left( \frac{L_{eq}}{D} \right) \quad (16)$$

Esse método fornece uma estimativa melhor para os efeitos da geometria.

### 3.2.1.3. Método do coeficiente de perda K

Este método considera um coeficiente de perda K cujos valores normalmente são tabelados em vários livros e “handbooks”, exemplo na Figura 6. A aproximação de que esses valores são constantes para dados tipos de válvula e acessórios não é realmente verdade, uma vez que os valores mudam de acordo com a geometria do componente de tubulação (diâmetro, raio, tipo de conexão).

Figura 6 - Coeficientes de Resistência K para diversas conexões e válvulas.

	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	4
VÁLVULA ANGULAR	1,48	1,38	1,27	1,21	1,16	1,05	0,99	0,99	0,94
VÁLVULA DE ESFERA	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05
VÁLVULA BORBOLETA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,81	0,81	0,77
VÁLVULA GAVETA	0,22	0,2	0,18	0,18	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14
VÁLVULA GLOBO	9,20	8,50	7,80	7,50	7,10	6,50	6,10	6,10	5,80
PLUG VALVE BRANCH FLOW	2,43	2,25	2,07	1,98	1,89	1,71	1,62	1,62	1,53
PLUG VALVE PASSAGEM RETA	0,48	0,45	0,41	0,40	0,38	0,34	0,32	0,32	0,31
PLUG VALVE 3-WAY THRU-FLOW	0,81	0,75	0,69	0,66	0,63	0,57	0,54	0,54	0,51
STANDARD ELBOW 90°	0,81	0,75	0,69	0,66	0,63	0,57	0,54	0,54	0,51
STANDARD ELBOW 45°	0,43	0,40	0,37	0,35	0,34	0,30	0,29	0,29	0,27
STANDARD ELBOW LONG RADIUS 90°	0,43	0,40	0,37	0,35	0,34	0,30	0,29	0,29	0,27
SIFÃO (180°)	1,35	1,25	1,15	1,10	1,05	0,95	0,90	0,90	0,85

Fonte: <http://www.metropumps.com/ResourcesFrictionLossData.pdf>

K é um fator adimensional definido como o coeficiente de perda em um acessório ou válvula. A maior parte dos valores tabelados de K aplica-se a escoamentos completamente turbulentos, pois para altos valores do número de Reynolds, K aparentemente é independente deste.

#### 3.2.1.4. Método 2-K (Método de Hooper)

O método 2-K ou método de Hooper é baseado em dados experimentais de muitas válvulas e acessórios adquiridos para um amplo espectro de números de Reynolds. O coeficiente K não depende da rugosidade, mas é uma função do número de Reynolds, geometria do componente dado e até do tipo de conexão (roscada, flangeada ou soldada). Comparado a outros métodos este é válido para uma ampla gama de Reynolds, mas o impacto das dimensões da tubulação (1/D) não é exatamente considerado.

K é um fator adimensional definido como um excesso de perda de carga em um acessório de tubulação. K não depende da rugosidade do acessório ou do tamanho do sistema, mas é função do número de Reynolds e da geometria exata do acessório. O método 2-K leva em consideração essas dependências através da equação a seguir (Eq. 17):

$$K_f = \frac{K_1}{Re} + K_\infty \left( 1 + \frac{25,4}{D_{mm}} \right) \quad (17)$$

Onde:

$K_1$  = fator K para o acessório com  $Re=1$ ;

$K_\infty$  = fator K para um acessório a  $Re=\infty$ ;

$D_{mm}$ : Diâmetro interno do tubo, mm;

Re: Número de Reynolds;

Valores dos coeficientes K para o método 2-K de Hooper podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes 2-K para cálculo do coeficiente de perda de carga de válvulas e acessórios.

ACESSÓRIO	r/D	$K_1$	$K_\infty$
COTOVELO 90° ROSCADO - RAIO CURTO	1,0	800	0,40
COTOVELO 90° SOLDADO - RAIO CURTO	1,0	800	0,25
COTOVELO 90° ROSCADO - RAIO LONGO	1,5	800	0,20
COTOVELO 90° FLANGEADO - RAIO LONGO	1,5	800	0,20
COTOVELO 90° SOLDADO - RAIO LONGO	1,5	800	0,20
COTOVELO 45° ROSCADO - RAIO CURTO		500	0,20
COTOVELO 45° SOLDADO - RAIO CURTO		500	0,20
COTOVELO 45° ROSCADO - RAIO LONGO		500	0,15
COTOVELO 45° FLANGEADO - RAIO LONGO		500	0,15
COTOVELO 45° SOLDADO - RAIO LONGO		500	0,15
TÊ ROSCADO - PASSAGEM RETA		200	0,10
TÊ FLANGEADO - PASSAGEM RETA		250	0,05
TÊ SOLDADO - PASSAGEM RETA		250	0,05
TÊ - COLAR DE ENCAIXE - SAÍDA LATERAL		100	0,00
VÁLVULA GAVETA	1	300	0,10
VÁLVULA ESFERA	0,9	500	0,15
VÁLVULA PLUG	0,8	1000	0,25
VÁLVULA GLOBO PADRÃO		1500	4,00
VÁLVULA GLOBO ANGULAR		1000	2,00
VÁLVULA DIAFRAGMA		1000	2,00
VÁLVULA BORBOLETA		800	0,25
VÁLVULA DE RETENÇÃO COM PORTINHOLA		1500	1,50
VÁLVULA DE RETENÇÃO HORIZONTAL		2000	10,00
VÁLVULA DE RETENÇÃO DUPLEX		1000	0,50

Fonte: "The two-K method predicts", William B. Hooper.

A correção D nas duas expressões de K leva em consideração as diferenças de tamanho. K é alto para tamanhos pequenos, mas aproximadamente constantes para tamanhos maiores.

Contudo, o efeito do tamanho do tubo ( $1/D$ ) não reflete precisamente dados em relação a uma ampla faixa de tamanhos para válvulas e acessórios. Além do mais, o fator de escala de Hooper não é consistente com os valores da Crane para valores de Reynolds elevados e é especialmente inconsistente para acessórios de maior diâmetro.

### 3.2.1.5. Método 3-K (Método de Darby)

O método 3-K ou método de Darby é similar ao método 2-K de Hooper, mas com um maior valor preditivo para ampla gama de valores de número de Reynolds e dimensões de acessórios. O método 3-K de Darby também é dependente do diâmetro interno do acessório e valores do número de Reynolds. O método de Darby fornece bons resultados mesmo para escoamento laminar (baixos números de Reynolds). Esse método também considera o tipo de conexão.

O método 3-K de Darby representa características melhoradas sobre a mais ampla faixa de números de Reynolds e tamanhos de acessórios e é expressa pela equação Eq. 18:

$$K_f = \frac{K_1}{Re} + K_i \left[ 1 + K_d \left( \frac{25,4}{D_n} \right)^{0,3} \right] \quad (18)$$

Onde:

$D_n$ : Diâmetro nominal do tubo, m;

Re: Número de Reynolds;

$K_1$  = fator K para o acessório com  $Re=1$ ;

$K_i$  = fator experimental adimensional  $K_i$ ;

$K_d$  = fator experimental adimensional  $K_d$ .

Os valores de  $K_1$  são, em sua maioria, os mesmos que aqueles para o método de Hooper, e os valores de  $K_i$  foram determinados a partir de dados da Crane Co. Os valores de  $K_d$  concentram-se em torno de 4.

Os valores dos coeficientes K para alguns acessórios podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes 3-K para cálculo do coeficiente de perda de carga de válvulas e acessórios.

ACESSÓRIO	r/D	(L/D)EQ	Km	Ki	Kd
COTOVELO 90° ROSCADO - RAIO CURTO	1,0	30	800	0,140	4,0
COTOVELO 90° ROSCADO - RAIO LONGO	1,5	16	800	0,071	4,2
COTOVELO 90° FLANGEADO	1,0	20	800	0,091	4,0
	2,0	12	800	0,056	3,9
	4,0	14	800	0,066	3,9
	6,0	17	800	0,075	4,2
COTOVELO 90° SOLDADO	1,0	20	800	0,091	4,0
	2,0	12	800	0,056	3,9
COTOVELO 90° DE 2 GOMOS		60	1000	0,027	4,0
COTOVELO 90° DE 3 GOMOS		15	800	0,068	4,1
COTOVELO 90° DE 4 GOMOS		8	800	0,035	4,2
COTOVELO 45° ROSCADO - RAIO CURTO	1,0	16	500	0,071	4,2
COTOVELO 45° ROSCADO - RAIO LONGO	1,5		500	0,052	4,0
COTOVELO 45° DE 2 GOMOS		15	500	0,086	4,0
COTOVELO 45° DE 3 GOMOS		6	500	0,052	4,0
COTOVELO 180° ROSCADO - RAIO CURTO	1,0	50	1000	0,230	4,0
COTOVELO 180° FLANGEADO - RAIO CURTO	1,0		1000	0,120	4,0
COTOVELO 180° ROSCADO - RAIO LONGO	1,5		1000	0,100	4,0
COTOVELO 180° FLANGEADO - RAIO LONGO	1,5		1000	0,100	4,0
TÊ ROSCADO - SAÍDA LATERAL - RAIO CURTO	1	60	500	0,274	4,0
TÊ ROSCADO - SAÍDA LATERAL - RAIO LONGO	1,5		800	0,140	4,0
TÊ FLANGEADO - SAÍDA LATERAL - RAIO CURTO	1	20	800	0,280	4,0
SAÍDA LATERAL NO COLAR DE ENCAIXE			1000	0,340	4,0
TÊ ROSCADO - PASSAGEM RETA	1		200	0,091	4,0
TÊ FLANGEADO - PASSAGEM RETA	1		150	0,017	4,0
PASSAGEM RETA COM COLAR DE ENCAIXE			100	0,000	0,0
VÁLVULA GLOBO	1	340	1500	1,700	3,6
VÁLVULA GAVETA	1	8	300	0,037	3,9
VÁLVULA ESFERA	1	3	300	0,017	4,0
VÁLVULA DE RETENÇÃO COM PORTINHOLA		100	1500	0,460	4,0

Fonte: Correlate pressure drops through pipe fittings, (vol 106, pg 101, 1999) – Ron Darby.

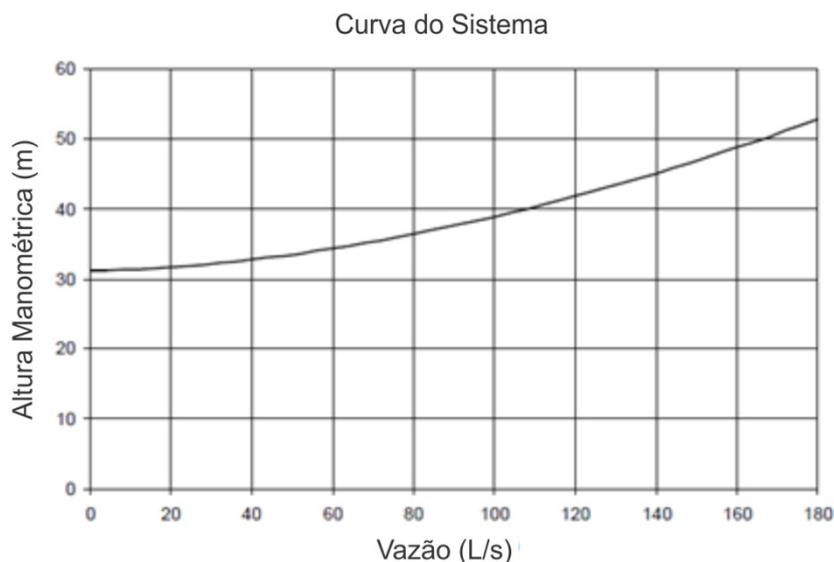
O método 3-K é altamente recomendado, pois leva em consideração diretamente o efeito do número de Reynolds e do tamanho do acessório no coeficiente de perda. Também reflete mais precisamente o efeito escala de tamanho de acessório que o método 2-K.

#### 4. CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA

O impacto da vazão em qualquer rede de tubulações pode ser previsto e representado graficamente como uma curva do sistema. A compreensão dos efeitos da vazão através da tubulação é de suma importância para seleção e avaliação de uma bomba.

A curva característica de um sistema, Figura 7, é uma representação gráfica do relacionamento entre a vazão,  $Q$ , e a perda de carga,  $H$ , de uma rede de tubulações e é independente das características da bomba. Como as perdas dependem da vazão, tamanho e comprimento da tubulação e do número e tipo de acessórios e conexões, cada sistema possui sua própria curva característica.

Figura 7 - Exemplo de curva característica de um sistema.



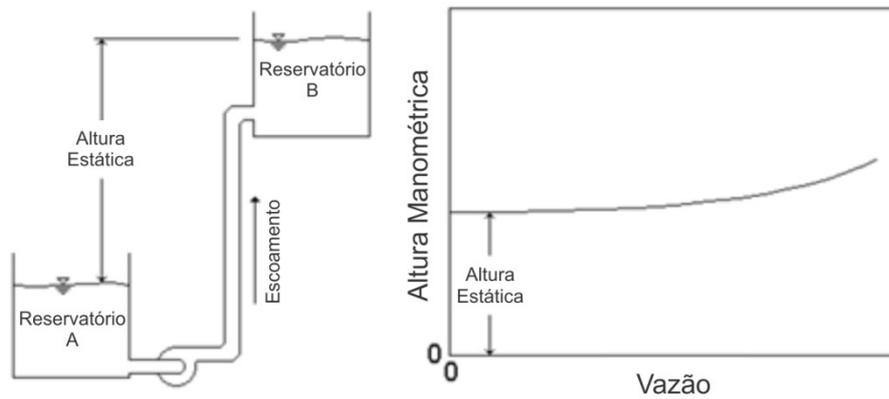
A forma básica da curva de um sistema é parabólica. Ela iniciará no ponto 0 de vazão e perda de carga se não houver altura estática, Figura 8, de outra maneira, iniciará com um afastamento do 0 correspondente à altura estática, Figura 9 e Figura 10.

Figura 8 - Exemplo de curva de sistema com altura estática 0.



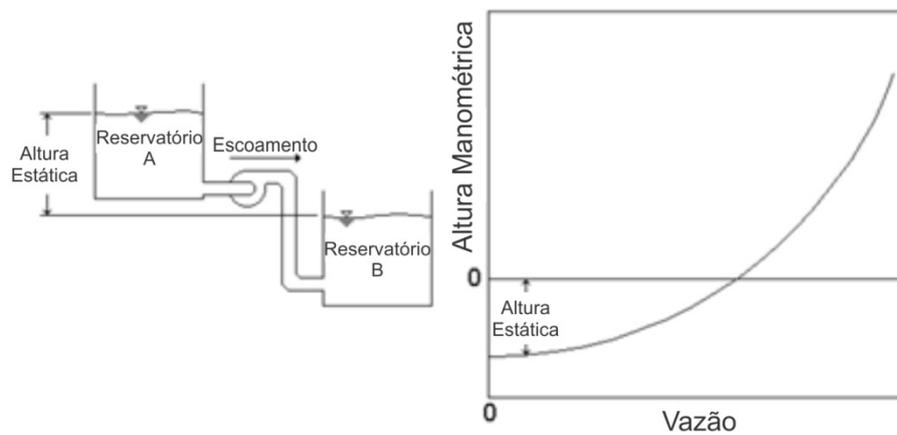
Fonte: Sprinkle & Trickle Irrigation Lectures – Lecture 11 Pump and System Curves

Figura 9 - Exemplo de curva de sistema com altura estática positiva.



Fonte: Sprinkle & Trickle Irrigation Lectures – Lecture 11 Pump and System Curves

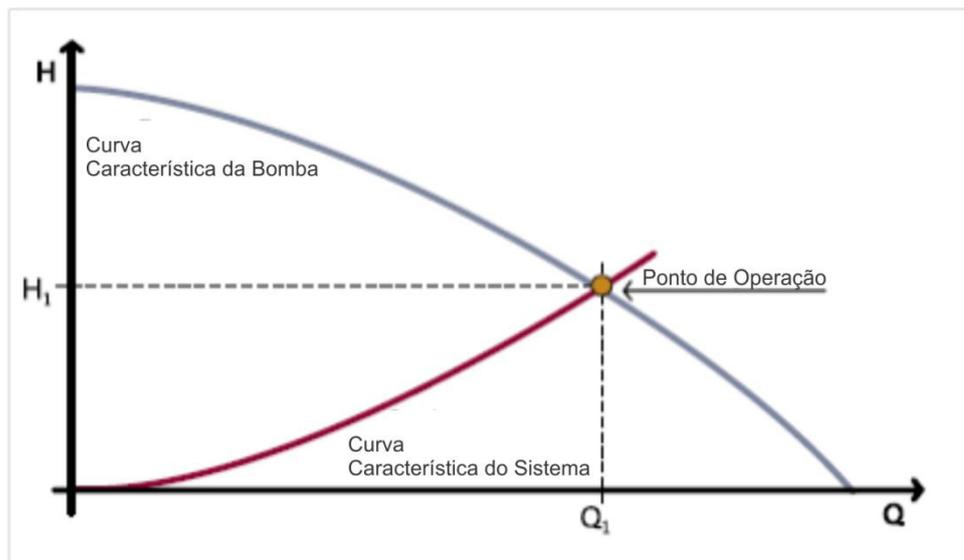
Figura 10 - Exemplo de curva de sistema com altura estática negativa



Fonte: Sprinkle & Trickle Irrigation Lectures – Lecture 11 Pump and System Curves

Sobrepondo-se a curva característica de um sistema e a curva de desempenho de uma bomba, a sua interseção determina o ponto de operação da bomba, Figura 11.

Figura 11 - Sobreposição de curvas do sistema e da bomba, mostrando o ponto de operação.



Fonte: Pump Handbook – Grundfoss

## 5. APRESENTAÇÃO DA PLANILHA DE CÁLCULO DE ALTURA MANOMÉTRICA

A ferramenta desenvolvida para o cálculo de altura manométrica foi construída utilizando-se o software Microsoft Office Excel e será apresentada a seguir. Para melhor organização dos dados, foi elaborada em duas etapas: Dimensionamento de Tubulação/Cálculo da Perda de Carga em Trechos Retos e Cálculo da Perda de Carga Localizada.

### 5.1. Dimensionamento de Tubulação e Cálculo da Perda de Carga em Trechos Retos

Nesta etapa é possível dimensionar uma nova rede de tubulações ou realizar somente o levantamento de perda de carga nos trechos retos de uma rede de tubulações já projetada. Os primeiros dados solicitados nesta aba referem-se à identificação do sistema e equipamento com que se está trabalhando (Figura 12). Esses dados, tópico 1.0, serão apresentados em todas as abas da planilha. Devem ser preenchidos o nome do sistema (por exemplo, sistema de água gelada, água de condensação), a TAG (identificação) do equipamento e sua vazão em m<sup>3</sup>/h. Ao lado, há a legenda informando o que indicam as cores de alguns campos da planilha, sendo que os campos azuis devem ser preenchidos manualmente, os valores dos campos em laranja devem ser selecionados em uma lista e os campos em lilás são de preenchimento opcional.

Figura 12 - Seção de identificação e legenda da planilha

CÁLCULO DE ALTURA MANOMÉTRICA EM TUBULAÇÕES							
<b>1.0 DADOS DO SISTEMA</b>							
SISTEMA:	<input type="text"/>						
TAG EQUIP:	<input type="text"/>						
VAZÃO:	<input type="text"/>						
LEGENDA:	<table border="1"> <tr> <td><input type="text"/></td> <td>Selecionar</td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td> <td>Preencher</td> </tr> <tr> <td><input type="text"/></td> <td>Opcional</td> </tr> </table>	<input type="text"/>	Selecionar	<input type="text"/>	Preencher	<input type="text"/>	Opcional
<input type="text"/>	Selecionar						
<input type="text"/>	Preencher						
<input type="text"/>	Opcional						

Fonte: Autora

Na tabela 2.0 Dados de Operação, (Figura 13), devem ser selecionados o material da tubulação, fluido de trabalho, e a temperatura de operação, que deve ser informada, em °C. Nesta tabela também são mostradas a rugosidade  $\epsilon$  do tubo de acordo com o material

selecionado, a viscosidade cinemática  $\nu$ , dinâmica  $\mu$  e a densidade  $\rho$  do fluido selecionado, de acordo com a temperatura de operação do fluido.

Figura 13 - Tabela Dados de Operação

<b>2.0 DADOS DE OPERAÇÃO</b>	
<b>Material da Tubulação</b>	Aço Carbono Galvanizado
<b>Fluido de trabalho</b>	Ácido Clorídrico
<b>Temperatura de operação do fluido</b>	50 °C
<b>[ε] Rugosidade Absoluta do Tubo</b>	0,0001500 m
<b>[ν] Viscosidade Cinemática</b>	9,31449E-08 m <sup>2</sup> /s
<b>[μ] Viscosidade Dinâmica</b>	5,27356E-05 Pa.s
<b>[ρ] Densidade Específica</b>	566,17 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Autora

Os materiais de tubulação comumente utilizados disponíveis na planilha estão listados na Tabela 8 e a lista de fluidos na Tabela 9.

Tabela 8 - Lista de materiais de tubulação disponíveis para uso na planilha.

<b>MATERIAL</b>
Polietileno Reticulado (PEX)
PVC
CPVC
PP
PVDF
PEAD
PRFV
PB
PE
Aço Carbono
Aço Carbono Galvanizado
Aço Inox
Aço incrustação leve
Aço incrustação moderada
Aço incrustação severa
Cobre

Tabela 9 - Lista de alguns fluidos disponíveis para uso na planilha

Fórmula	Nome
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfídrico
NaOH	Hidróxido de Sódio
NH <sub>3</sub>	Amônia
C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> N	Etilamina
CH <sub>5</sub> N	Metilamina
CHCl <sub>3</sub>	Clorofórmio
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	Dietil Éter
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Dimetil Éter
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	Etil Acetato
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Metil Acetato
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	Ácido Acético
CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Ácido Fórmico

Em seguida tem-se a Tabela 3.0, Dimensionamento de tubulação – Cálculo da Perda de Carga em trechos retos, Figura 14.

Figura 14 - Tabela de Dimensionamento de Tubulação e Cálculo da Perda de Carga em Trechos Retos

3.0 DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO - CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM TRECHOS RETOS								
TRECHO	VAZÃO [m <sup>3</sup> /h]	SERVIÇO/APLICAÇÃO	MATERIAL DA TUBULAÇÃO	Ø ATRIBUÍDO [pol]	Ø CALCULADO [pol]	VELOCIDADE (m/s)	Ø INTERNO [mm]	COMP. TUBO [m]
0 - 1		USO ESPECÍFICO (1,5 m/s)	Aço Carbono Galvanizado		0	0,00	0,00	
1 - 2		USO ESPECÍFICO (1,5 m/s)	Aço Carbono Galvanizado		0	0,00	0,000	
2 - 3		USO ESPECÍFICO (1,5 m/s)	Aço Carbono Galvanizado		0	0,00	0,000	
3 - 4		USO ESPECÍFICO (1,5 m/s)	Aço Carbono Galvanizado		0	0,00	0,000	
4 - 5		USO ESPECÍFICO (1,5 m/s)	Aço Carbono Galvanizado		0	0,00	0,000	

NÚMERO DE REYNOLDS Re	COEF. ATRITO f	PERDA UNIT. [mca/m]	PERDA TOTAL [mca]
0	0,000000	0,0000	0,0000
0	0,000000	0,0000	0,0000
0	0,000000	0,0000	0,0000
0	0,000000	0,0000	0,0000
0	0,000000	0,0000	0,0000

Fonte: Autora

Nesta tabela devem ser definidos os trechos que compõem o sistema. Cada coluna dessa tabela será descrita a seguir:

- **Trecho:** Identifica os trechos do sistema. Cada trecho é definido por sua vazão e diâmetro;
- **Vazão:** Nesta coluna deve ser inserido o valor de vazão do trecho referido em m<sup>3</sup>/h;

- **Serviço/Aplicação:** Contém uma lista de serviços ou aplicações de tubulações onde são definidas as velocidades recomendadas para cada caso, Tabela 4.
- **Material da tubulação:** Nessa coluna pode ser definido um material diferente do escolhido na tabela 2.0 para um trecho específico;
- **Diâmetro atribuído:** Nos casos em que se está calculando a perda de carga de uma instalação existente, caso o diâmetro calculado seja diferente do real, pode-se inserir o valor do diâmetro real neste campo, o qual será considerado nos cálculos, em polegadas;
- **Diâmetro calculado:** Diâmetro calculado a partir da aplicação escolhida, e correspondente velocidade recomendada. O diâmetro é calculado através da equação da continuidade e então o resultado é corrigido para o valor comercial logo superior, em polegadas;
- **Velocidade:** Velocidade calculada considerando as dimensões comerciais de tubulação em m/s.;
- **Diâmetro interno:** Valor do diâmetro interno comercial do tubo, em mm.
- **Comprimento:** Valor do comprimento de tubulação reta do referido trecho, em m;
- **Número de Reynolds:** Número de Reynolds calculado para o trecho específico, de acordo com a equação 7;
- **Fator de atrito:** Fator de atrito calculado nas condições do referido trecho, por meio da equação 11, caso o escoamento seja laminar ou pela equação 12, de Colebrook, tratando-se de escoamento turbulento;
- **Perda Unitária:** Valor da perda de carga por metro de tubulação para o referido trecho, em mca/m;
- **Perda Total:** Perda de carga total calculada para o trecho, em mca.

## 5.2. Cálculo de Perda de Carga em Acessórios e Equipamentos

Nessa aba devem ser especificados os acessórios de tubulação para cada trecho, equipamentos existentes no sistema e o valor da altura estática. Esta também traz o resumo do resultado do cálculo de altura manométrica.

A aba se divide em três seções: Perda de Carga em acessórios, Perda de carga em equipamentos e Resumo do Resultado.

Na tabela Perda de carga em acessórios, Figura 15, o trecho trabalhado é indicado na primeira coluna e logo ao lado há alguns dados pertinentes ao trecho como vazão, diâmetro e ao fim, a perda de carga devido aos acessórios do trecho, em mca.

Figura 15 - Tabela de inserção de acessórios em um trecho

4.1 PERDA DE CARGA - ACESSÓRIOS				1	2	3
Dados da Tubulação			Material Tub. Acessório	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono
0 - 1	Vazão	0,00 m <sup>3</sup> /h	Vazão	0,00	0,00	0,00
	Diâm.	0 pol	Diâm.	0	0	0
	Veloc.	0,00 m/s	Qntd			
	Reynolds	0 m	K	0,00	0,00	0,00
	P. Acess	0,00 mca	P. Total	0,00	0,00	0,00

Ao lado dos dados do trecho estão os itens a serem informados e que estão descritos a seguir:

- **Material:** Campo onde um material específico, diferente daquele do trecho, pode ser selecionado. Como padrão, estará selecionada inicialmente a mesma opção escolhida para o trecho na aba para trechos retos.
- **Acessórios:** Deve-se escolher na lista suspensa o acessório a ser inserido no trecho indicado. A lista de acessórios pode variar de acordo com o material escolhido.
- **Vazão:** Valor de vazão que passa pelo acessório;
- **Diâmetro:** Diâmetro do acessório;
- **Quantidade:** Deve ser indicada a quantidade do acessório existente no trecho;
- **Coefficiente de perda K:** Será exibido após o preenchimento dos dados solicitados. Prioritariamente, K é calculado pelo método 3-K de Darby. Caso seja selecionado um acessório que não esteja disponível por esse método, o cálculo é realizado por meio do método 2-K de Hooper. Em último caso é utilizado o método do comprimento equivalente. Também é possível inserir um valor de K manualmente, caso este seja informado pelo fabricante do acessório.
- **Perda Total:** Exibe o resultado de perda de carga total para o acessório, de acordo com sua quantidade, em mca. Calculada pela equação 14.

Na tabela de perda de carga por equipamentos, deve-se identificar o equipamento e então inserir a perda de carga correspondente a ele informada pelo fabricante, Figura 16.

Figura 16 - Tabela para inserção de equipamentos.

4.2 PERDA DE CARGA EM EQUIPAMENTOS		1	2	3
EQUIPAMENTO				
PERDA DE CARGA	[mca]			

Na tabela Resumo do Resultado, Figura 17, devem ser preenchidos os campos fator de segurança e altura estática. Opcionalmente pode ser alterado o estado da tubulação

devido ao tempo de uso, ou seja, material com corrosão e assim o resultado futuro da instalação é previsível e dispensa o uso do fator de segurança. Também são apresentados os resultados da altura manométrica para trechos retos de tubulação, para acessórios e equipamentos. Então é mostrado o resultado da altura manométrica total e por último, inserido o fator de segurança.

Figura 17 - Tabela resumo de resultados para o cálculo de altura manométrica

<b>5.0 RESUMO DO RESULTADO</b>		
<b>FATOR DE SEGURANÇA</b>	10%	<b>(%)</b>
<b>ALTURA ESTÁTICA</b>		<b>(mca)</b>
<b>ALT. MAN. TUBULAÇÃO</b>	0,00	<b>(mca)</b>
<b>ALT. MAN. ACESSÓRIOS</b>	0,00	<b>(mca)</b>
<b>ALT. MAN. EQUIPAMENTOS</b>	0,00	<b>(mca)</b>
<b>ALT. MANOMÉTRICA TOTAL</b>	0,00	<b>(mca)</b>
<b>ALT. MANOMÉTRICA + 10%</b>	<b>0,00</b>	<b>(mca)</b>

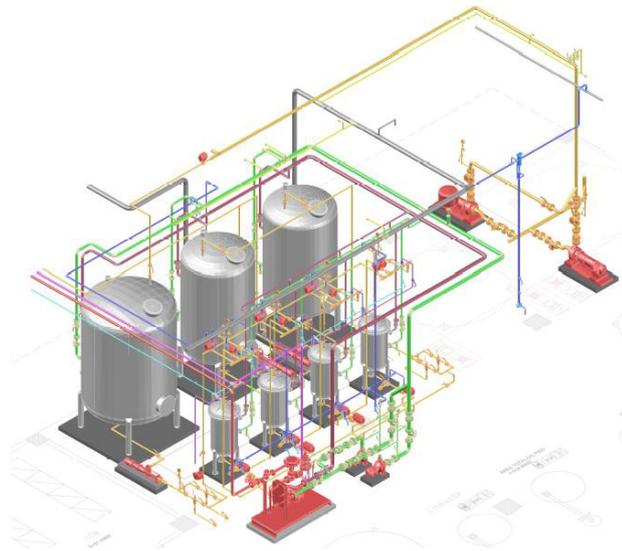
O campo com indicação da altura estática também deve ser preenchido. Em seguida são exibidos separadamente os valores de perda devido aos trechos retos de tubulação, aos acessórios e aos equipamentos. Ao fim é calculada a perda total e então a perda de carga com aplicação do fator de segurança.

O valor resultante corresponde à altura manométrica necessária a bomba para vencer a resistência do sistema. Esse é o valor a ser utilizado na seleção da bomba.

## 6. ESTUDO DE CASO

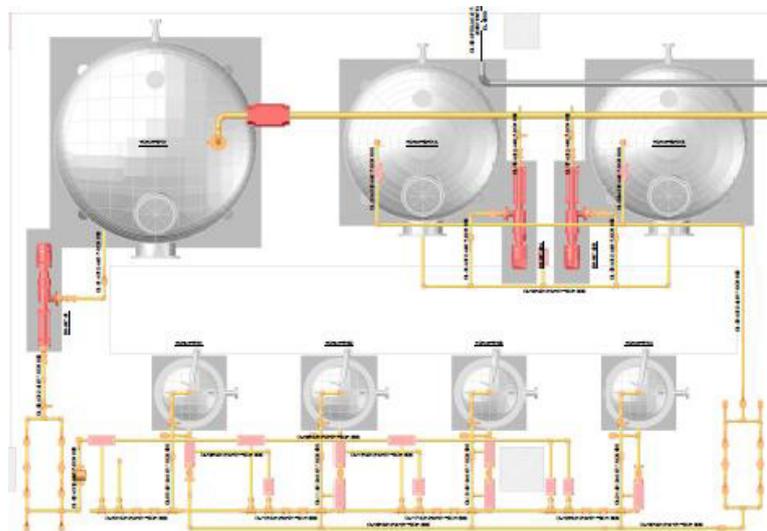
Foi realizado o cálculo da perda de carga utilizando-se a planilha desenvolvida para uma rede de bombeamento de gordura, ainda na fase de projeto, de uma Fábrica de Margarina, para a instalação apresentada na Figura 18 e Figura 19. No caso, a tubulação do sistema já havia sido definida, sendo necessário o cálculo da altura manométrica total para seleção das bombas.

Figura 18 - Projeto de rede de tubulações para processo de interesterificação enzimática



Fonte: Projeto de Interesterificação Enzimática – Utilidades Gerais – GME, 2014

Figura 19 - Planta baixa de rede de tubulações para processo de interesterificação enzimática



Fonte: Projeto de Interesterificação Enzimática – Utilidades Gerais – GME, 2014

Esse projeto foi realizado em 2014, quando a planilha ainda não contava com todos os recursos para cálculo das propriedades dos fluidos e o método de avaliação dos coeficientes de resistência para acessórios e conexões de tubulação utilizada era basicamente o de comprimento equivalente. A planilha também não considerava dados de diâmetro interno de tubos disponibilizados por fabricantes ou Normas.

Serão apresentados os dados e resultados obtidos na época, bem como a especificações da bomba selecionada. Logo após serão apresentados os resultados para o cálculo da perda de carga nesse sistema com os dados da planilha atualizada, então os valores serão comparados.

### 6.1. Dados do sistema

O fluido de operação consistia em óleo. Os dados para o fluido eram bastante específicos, portanto foram informados pela própria empresa, Tabela 10:

Tabela 10 - Propriedades físicas do fluido de operação (informados pela empresa contratante)

VARIÁVEL	VALOR	UNIDADE
Viscosidade Cinemática ( $\nu$ )	0,000026909	m <sup>2</sup> /s
Viscosidade Dinâmica ( $\mu$ )	0,024	Pa.s
Densidade Específica ( $\rho$ )	891,9	kg/m <sup>3</sup>

O sistema deveria operar com uma vazão de 1,7 m<sup>3</sup>/h e temperatura de 70°C, contando com um sistema de aquecimento por vapor, steam-tracer, em todo o comprimento da tubulação e acessórios, portanto, ao longo da tubulação a temperatura do fluido pode ser considerada praticamente constante.

O sistema contava ainda com um reator, onde os dados de perda de carga desse equipamento foram adquiridos através do fabricante.

## 6.2. Cálculo da altura manométrica - 2014

Toda a rede de tubulações foi dimensionada com diâmetro de 1". Os dados de trechos do sistema lançados podem ser vistos na Figura 20.

Como mencionado anteriormente, à época não foi considerado diâmetro interno para um tubo de aço baseado em dados de fabricante ou normas, tendo sido considerado um valor de 21 mm. Isso afeta o cálculo da velocidade e consequentemente do número de Reynolds.

Dados dimensionais para tubos de aço carbono de acordo com a Norma ASME B36.10M—2004 podem ser

Tabela 11 - Dados dimensionais de tubulações de aço carbono de acordo com a norma ASME B36.10M de 2004

DIÂMETRO NOMINAL [pol]	DIÂMETRO EXTERNO [mm]	ESPESSURA DA PAREDE [mm]	DIÂMETRO INTERNO [mm]	PESO [kg/m]	SCHEDULE
3/4	26,70	3,91	18,88	2,20	80
1	33,40	4,55	24,30	3,24	80
1 1/4	42,20	4,85	32,50	4,47	80
1 1/2	48,30	5,08	38,14	5,41	80
2	60,30	5,54	49,22	7,48	80
2 1/2	73,00	7,01	58,98	11,41	80
3	88,90	5,49	77,92	11,29	40
4	114,30	6,02	102,26	16,08	40
5	141,30	6,55	128,20	21,77	40
6	168,30	7,11	154,08	28,26	40
8	219,10	8,18	202,74	42,55	40
10	273,00	9,27	254,46	60,29	40

Fonte: ASME B36.10M-2004

Pela Tabela 11, vê-se que o diâmetro externo para um tubo de 1" é de 33,4 mm, com espessura de parede de 4,55 mm. Portanto seu diâmetro interno é de 24,3mm.

Para os acessórios, eram utilizados, em sua maioria, dados de comprimento equivalente para cálculo da perda de carga. Os dados de acessórios podem ser vistos nas Figuras 21A e B.

Figura 20 - Planilha preenchida para o cálculo da altura manométrica

Dados de Projeto	
Material da Tubulação	Tubo de aço comercial
Temperatura do fluido (°C)	70

Legenda:

Selecione a opção
Entre com o valor
Dados Gerados

Variáveis			
$\epsilon$	rugosidade absoluta (tubo)	0,000090	m
$\nu$	viscosidade cinemática (base interestificada)	0,000026909	m <sup>2</sup> /s
$\mu$	viscosidade dinâmica (base interestificada)	0,024	Pa.s
$\rho$	Densidade específica (base interestificada)	891,9	kg/m <sup>3</sup>
$g$	aceleração da gravidade	9,81	m/s <sup>2</sup>

Sistema de Óleo										
Trecho	Vazão	Serviço/Aplicação	Velocidade	Diam.		Comp. Tubo	Reynolds	Coef. Atrito	Perda Unit.	Perda Total
	Q		v	D		L	Re	f	$\Delta P$	
	(m <sup>3</sup> /h)		(m/s)	(pol)	$\varnothing$ int. (mm)	(m)			(mca/m)	
1-2	1,7	Sucção de bomba	1,369	1	21	2,42	1.066	0,060036	0,2393	0,5785
2-3	1,7	Linha de descarga	1,369	1	21	10,39	1.066	0,060036	0,2393	2,4846
3-4	1,7	Montante ou Tubo ascendente	1,369	1	21	9,64	1.066	0,060036	0,2393	2,3054
4-5	1,7	Montante ou Tubo ascendente	1,369	1	21	9,64	1.066	0,060036	0,2393	2,3054
5-6	1,7	Montante ou Tubo ascendente	1,369	1	21	9,79	1.066	0,060036	0,2393	2,3423
6-7	1,7	Montante ou Tubo ascendente	1,369	1	21	14,31	1.066	0,060036	0,2393	3,4237

Figura 21A - Dada de acessórios de tubulação – Linha de Recalque

Bomba - Linha de Recalque							
Trecho	Q (m <sup>3</sup> /h)	Descrição	Diâmetro (pol)	Quantidade	Comp. (real/equiv.)	Perda Unit.	Perda Total
					L (m)	ΔP (mca/m)	ΔP (mca)
<b>2-3</b>	<b>1,70</b>	<b>Tubulação</b>	<b>1</b>		<b>10,39</b>	<b>0,2393</b>	<b>2,4846</b>
		Junta de Expansão	1	1	0,80	0,24	0,25
		Válvula de Retenção (Portinhola)	1	1	3,20	0,24	0,77
		Válvula Gaveta	1	5	0,20	0,24	0,24
		Filtro "Y"	1	1	1,52	0,24	0,36
		Tê saída de lado	1	3	1,70	0,24	1,22
		Tê de saída bilateral	1	1	1,70	0,24	0,41
		Curva de 90°	1	9	0,50	0,24	1,08
		Válvula Globo	1	1	8,20	0,24	1,96
<b>3-4</b>	<b>1,70</b>	<b>Tubulação</b>	<b>1</b>		<b>9,64</b>	<b>0,2393</b>	<b>2,3054</b>
		Redução concêntrica	1	1	0,71	0,24	0,17
		Curva de 90°	1	7	0,50	0,24	0,84
		Válvula Gaveta	1	2	0,20	0,24	0,10
		Tê saída de lado	1	2	1,70	0,24	0,81
		Válvula Globo	1	1	8,20	0,24	1,96
		Válvula de Retenção (Portinhola)	1	1	3,20	0,24	0,77
<b>4-5</b>	<b>1,70</b>	<b>Tubulação</b>	<b>1</b>		<b>9,64</b>	<b>0,2393</b>	<b>2,3054</b>
		Redução concêntrica	1	1	0,71	0,24	0,17
		Curva de 90°	1	7	0,50	0,24	0,84
		Válvula Gaveta	1	2	0,20	0,24	0,10
		Tê saída de lado	1	2	1,70	0,24	0,81
		Válvula Globo	1	1	8,20	0,24	1,96
		Válvula de Retenção (Portinhola)	1	1	3,20	0,24	0,77
<b>5-6</b>	<b>1,70</b>	<b>Tubulação</b>	<b>1</b>		<b>9,79</b>	<b>0,2393</b>	<b>2,3423</b>
		Redução concêntrica	1	1	0,71	0,24	0,17
		Curva de 90°	1	8	0,50	0,24	0,96
		Válvula Gaveta	1	2	0,20	0,24	0,10
		Tê saída de lado	1	2	1,70	0,24	0,81
		Válvula Globo	1	1	8,20	0,24	1,96
		Válvula de Retenção (Portinhola)	1	1	3,20	0,24	0,77
<b>6-7</b>	<b>1,70</b>	<b>Tubulação</b>	<b>1</b>		<b>14,31</b>	<b>0,2393</b>	<b>3,4237</b>
		Redução concêntrica	1	1	0,71	0,24	0,17
		Curva de 90°	1	10	0,50	0,24	1,20
		Válvula Gaveta	1	7	0,20	0,24	0,33
		Tê saída de lado	1	3	1,70	0,24	1,22
		Tê de saída bilateral	1	1	1,70	0,24	0,41
		Válvula Globo	1	1	8,20	0,24	1,96
		Filtro "Y"	1	1	1,52	0,24	0,36
					<b>Recalque - Sub-Total 1</b>		<b>38,85</b>

Figura 21B - Dados de acessórios de tubulação – Linha de Sucção, equipamentos, altura estática e altura manométrica resultante

Bomba - Linha de Sucção							
Trecho	Q (m3/h)	Descrição	Diâmetro (pol)	Quantidade	Comp. (real/equiv.)	Perda Unit.	Perda Total
					L (m)	$\Delta P$ (mca/m)	$\Delta P$ (mca)
1-2	1,70	Tubulação	1		2,42	0,2393	0,5785
		Curva de 90°	1	3	0,50	0,2393	0,3589
		Válvula Gaveta	1	1	0,20	0,2393	0,0479
		Junta de Expansão	1	1	0,80	0,2393	0,2500
		Redução concêntrica	1	2	0,71	0,2393	0,3900
Sucção - Sub-Total 2							1,63
Componentes							
	Descrição	Fabricante de Referência	Modelo	Capacidade (TR)	Vazão de água (m3/h)	Perda de Carga (m3)	Perda de Carga (mca)
A	Serpentina Reator						5,00
Sub-Total 3							5,00
Componentes							
	Descrição	Fabricante de Referência	Modelo	Capacidade (TR)	Vazão de água (m3/h)	Perda de Carga (m3)	Perda de Carga (mca)
A							
Sub-Total 4							0,00
Altura Estática							(mca)
							1,00
Altura Manométrica							(mca)
							46,48
FS=25%							58,10

A altura manométrica total resultante foi de 58,1 mca, incluindo 25% de segurança no resultado. O fator de segurança foi adotado com base na possibilidade de ampliação do sistema futuramente.

### **6.3. Cálculo da altura manométrica - 2017**

A planilha atualizada foi preenchida com os mesmos dados de trechos, acessórios e equipamentos que a de 2014, Figura 22 e 23.

O resultado para a altura manométrica foi de 38,30 mca, já incluindo 25% de segurança.

Figura 21 - Planilha atualizada preenchida com os dados de trechos retos

											TOTAL	10,0049
2.3 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO/CÁLCULO DA PERDA DE CARGA EM TRECHOS RETOS												
TRECHO	VAZÃO [m³/h]	SERVIÇO/APLICAÇÃO	MATERIAL DA TUBULAÇÃO	Ø ATRIBUÍDO [pol]	VELOCIDADE (m/s)	Ø INTERNO [mm]	COMP. TUBO [m]	REYNOLDS Re	COEF. ATRITO f	PERDA UNIT. [mca/m]	PERDA TOTAL [mca]	
0 - 1	1,70	SUCÇÃO DE BOMBA	Aço Carbono Galvanizado	1	1,37	24,30	2,42	1.236	0,051768	0,1781	0,4309	
1 - 2	1,70	LINHA DE DESCARGA	Aço Carbono Galvanizado	1	1,37	24,30	10,39	1.236	0,051768	0,1781	1,8500	
2 - 3	1,70	MONTANTE OU TUBO ASCENDENTE	Aço Carbono Galvanizado	1	1,37	24,30	9,64	1.236	0,051768	0,1781	1,7164	
3 - 4	1,70	MONTANTE OU TUBO ASCENDENTE	Aço Carbono Galvanizado	1	1,37	24,30	9,64	1.236	0,051768	0,1781	1,7164	
4 - 5	1,70	MONTANTE OU TUBO ASCENDENTE	Aço Carbono Galvanizado	1	1,37	24,30	9,79	1.236	0,051768	0,1781	1,7432	
5 - 6	1,70	MONTANTE OU TUBO ASCENDENTE	Aço Carbono Galvanizado	1	1,37	24,30	14,31	1.236	0,051768	0,1781	2,5480	

Figura 22 - Planilha atualizada preenchida com dados de acessórios de tubulação

3.1 PERDA DE CARGA - ACESSÓRIOS									
			1	2	3	4			
Dados da Tubulação			Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono			
Acessório			COTOVELO 90° SOLDADO	VÁLVULA GAVETA	JUNTA DE EXPANSÃO	JUNTA DE EXPANSÃO			
0 - 1	Vazão	1,70 m <sup>3</sup> /h	1,70	1,70	1,70	1,70			
	Diâm.	1 pol	1	1	1	1			
	Veloc.	1,37 m/s	3	1	1	2			
	Reynolds	1.236 m	1,07	0,41	1,70	-			
	P. Acess	0,90 mca	0,31	0,04	0,16	0,39			
			1	2	3	4	5	6	7
Dados da Tubulação			Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono
Acessório			JUNTA DE EXPANSÃO	JA DE RETENÇÃO COM PORTI	VÁLVULA GAVETA	FILTRO Y	ADO - SAÍDA LATERAL - RAIC	COTOVELO 90° SOLDADO	VÁLVULA GLOBO
1 - 2	Vazão	1,70 m <sup>3</sup> /h	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70
	Diâm.	1 pol	1	1	1	1	1	1	1
	Veloc.	1,37 m/s	1	1	5	1	4	9	1
	Reynolds	1.236 m	1,70	3,37	0,41	-	1,69	1,07	8,55
	P. Acess	3,43 mca	0,16	0,32	0,20	0,36	0,64	0,92	0,82
			1	2	3	4	5	6	
Dados da Tubulação			Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono
Acessório			REDUÇÃO CONCENTRICA	COTOVELO 90° SOLDADO	VÁLVULA GAVETA	SAÍDA LATERAL	VÁLVULA GLOBO	JA DE RETENÇÃO COM PORTINHOLA	
2 - 3	Vazão	1,70 m <sup>3</sup> /h	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	
	Diâm.	1 pol	1	1	1	1	1	1	
	Veloc.	1,37 m/s	1	7	2	2	1	1	
	Reynolds	1.236 m	-	1,07	0,41	1,30	8,55	3,37	
	P. Acess	2,35 mca	0,17	0,72	0,08	0,25	0,82	0,32	
			1	2	3	4	5	6	
Dados da Tubulação			Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono
Acessório			REDUÇÃO CONCENTRICA	COTOVELO 90° SOLDADO	VÁLVULA GAVETA	SAÍDA LATERAL	VÁLVULA GLOBO	JA DE RETENÇÃO COM PORTINHOLA	
3 - 4	Vazão	1,70 m <sup>3</sup> /h	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	
	Diâm.	1 pol	1	1	1	1	1	1	
	Veloc.	1,37 m/s	1	7	2	2	1	1	
	Reynolds	1.236 m	-	1,07	0,41	1,30	8,55	3,37	
	P. Acess	2,35 mca	0,17	0,72	0,08	0,25	0,82	0,32	
			1	2	3	4	5	6	
Dados da Tubulação			Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono
Acessório			REDUÇÃO CONCENTRICA	COTOVELO 90° SOLDADO	VÁLVULA GAVETA	SAÍDA LATERAL	VÁLVULA GLOBO	JA DE RETENÇÃO COM PORTINHOLA	
4 - 5	Vazão	1,70 m <sup>3</sup> /h	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	
	Diâm.	1 pol	1	1	1	1	1	1	
	Veloc.	1,37 m/s	1	8	2	2	1	1	
	Reynolds	1.236 m	-	1,07	0,41	1,30	8,55	3,37	
	P. Acess	2,46 mca	0,17	0,82	0,08	0,25	0,82	0,32	
			1	2	3	4	5	6	
Dados da Tubulação			Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono	Aço Carbono
Acessório			REDUÇÃO CONCENTRICA	COTOVELO 90° SOLDADO	VÁLVULA GAVETA	SAÍDA LATERAL	VÁLVULA GLOBO	FILTRO Y	
5 - 6	Vazão	1,70 m <sup>3</sup> /h	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	
	Diâm.	1 pol	1	1	1	1	1	1	
	Veloc.	1,37 m/s	1	10	7	4	1	1	
	Reynolds	1.236 m	-	1,07	0,41	1,30	8,55	-	
	P. Acess	3,15 mca	0,17	1,03	0,28	0,50	0,82	0,36	

3.2 PERDA DE CARGA EM EQUIPAMENTOS			
EQUIPAMENTO		1	2
Serpentina Reator			
PERDA DE CARGA	[mca]	5	

3.3 RESUMO DO RESULTADO		
FATOR DE SEGURANÇA	25%	(%)
ALTURA ESTÁTICA	1,00	(mca)
ALT. MAN. TUBULAÇÃO	10,00	(mca)
ALT. MAN. ACESSÓRIOS	14,64	(mca)
ALT. MAN. EQUIPAMENTOS	5,00	(mca)
ALT. MANOMÉTRICA TOTAL	30,64	(mca)
ALT. MANOMÉTRICA + 25%	38,30	(mca)

#### 6.4. Resultados – Perda de Carga

Na Tabela 12 é mostrado um resumo dos resultados para cada planilha:

Tabela 12 - Tabela comparativa de resultados entre a planilha de 2014 e 2017

	2014	2017
	ALTURA MANOMÉTRICA	
	[mca]	[mca]
TRECHOS RETOS	13,44	10,00
ACESSÓRIOS DE TUBULAÇÃO	27,04	14,64
EQUIPAMENTOS	5,00	5,00
ALTURA ESTÁTICA	1,00	1,00
TOTAL	46,48	30,64
FATOR DE SEGURANÇA	25%	25%
ALT. MAN. C/ FATOR DE SEGURANÇA	58,10	38,3

Para o cálculo realizado em 2014, dispondo somente de dados de comprimento equivalente, obteve-se um resultado de 13,44 mca para trechos retos e 27,04 mca para acessórios.

Para o cálculo realizado em 2017, utilizando os métodos 3K, 2K, etc, o resultado foi de 10,0 mca para trechos retos e 14,64 mca para acessórios.

A diferença apresentada entre os resultados nos trechos retos ocorre devido à utilização de diferentes diâmetros internos, isso afeta o cálculo da velocidade e do número de Reynolds. Quanto ao cálculo da perda nos acessórios, a diferença de velocidades calculadas tem influência nesses resultados, porém, fator mais importante são os diferentes métodos utilizados. Caso fosse utilizada a velocidade do fluido na tubulação resultante da planilha de 2014 na de 2017, o resultado da perda para acessórios seria de 15,42 mca, em torno de 57% da perda calculada em 2014.

Os valores de perda para equipamentos, altura estática e fator segurança adotados foram os mesmos para as duas planilhas.

## 6.5. Seleção da bomba

À época, a bomba foi selecionada pelo próprio fabricante, os dados podem ser vistos na Tabela 13.

Tabela 13 - Dados da bomba selecionada

FABRICANTE DE REFERÊNCIA	NETZSCH
MODELO	NM031BY02S12B
FLUIDO BOMBEADO	ÓLEO
TEMPERATURA DO FLUIDO [°C]	70
VAZÃO [m³/h]	1 a 2
ALTURA MANOMÉTRICA	60
TIPO DE ROTOR	PARAFUSO
TAMANHO/DIÂMETRO DO ROTOR [mm]	31
MOTOR	2 cv / 4 pólos
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	380V, 3F, 60Hz

Na Figura 23 está apresentada uma imagem ilustrativa da bomba e na Figura 24, uma fotografia da instalação de bombeamento de óleo vegetal da Fábrica de Margarinas, objeto do estudo de caso apresentado neste trabalho.

Figura 23 - Ilustração da bomba selecionada, modelo Nemo BY do fabricante Netzsch



Fonte: Netzsch

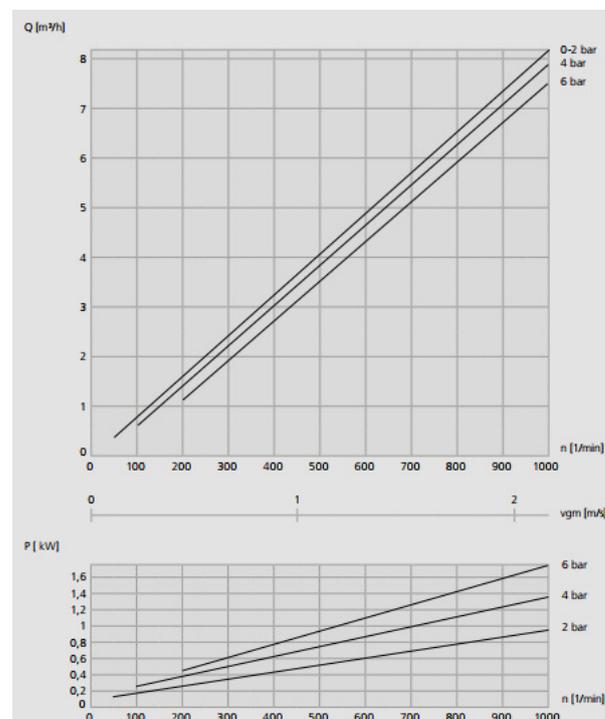
Figura 24 - Bomba selecionada para o sistema



A bomba adquirida é adequada para aplicações da indústria alimentícia e farmacêutica, trabalhando com fluidos viscosos com ou sem sólidos em suspensão.

A curva característica da bomba, Figura 25, é disponibilizada pelo fabricante, porém em condições determinadas para o fluido de trabalho água.

Figura 25 - Curva característica da bomba selecionada. Disponibilizada pelo fabricante para operação com o fluido água.



Fonte: Catálogo Bomba Nemo® - Modelos, Curvas, Dimensões - Netzsch

## 7. CONCLUSÃO

O resultado para o cálculo da altura manométrica à época do projeto foi de 58,1 mca. Na sua maior parte, eram empregados dados de comprimento equivalente disponibilizados na literatura para casos em que se utiliza água. Como visto anteriormente, este método é pouco preciso para o caso trabalhado, em que o fluido de operação é óleo.

O cálculo posterior, em que foram empregados métodos mais precisos, desenvolvidos experimentalmente como 3K, 2K e Crane Co, resultou em um valor de altura manométrica de 38,3 mca. Uma redução de cerca de 34%.

Os resultados mostram que o método de comprimento equivalente resulta em valores maiores de perda de carga em acessórios, levando, conseqüentemente, a uma maior altura manométrica.

O cálculo da altura manométrica é essencial para a seleção adequada de uma bomba. É importante levar em consideração o máximo de fatores reais ou próximos à realidade para obter um resultado mais confiável. Dessa forma, evita-se o superdimensionamento ou subdimensionamento de equipamentos, o que pode causar prejuízos ao processo, além de maior consumo de energia.

## REFERÊNCIAS

GOMES, H. P. **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. 1ª Ed. Editora Universitária – UFPB, João Pessoa, 2009.

*Hydraulic Institute; U.S. Department of Energy Industrial Technologies Program. Improving Pump system performance: A sourcebook for industry*. 2nd Ed, 2006.

Crane Co. *Flow of fluids through valves, fittings and pipe*. 6th ed. 1986.

Idel'Chik, I. E. *Handbook of Hydraulic Resistance – Coefficients of Local Resistance and of Friction*, 1966

Hooper, W. B. *The Two-K method predicts*, Chemical Engineering, 1981

Darby, R. *Correlate pressure drops through pipe fittings*, vol. 6, p 101, Chemical Engineering, Mcgraw Hill, New York, 1999.

COKER, A. K. *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. Volume 1. 4 ed. Elsevier Inc, 2007.

JONES, G. M.; SANKS, R. L.; TCHOBANOGLOUS, G.; BOSSERMAN, B. E; *Pumping Station Design*, 3<sup>rd</sup> ed., 2008.