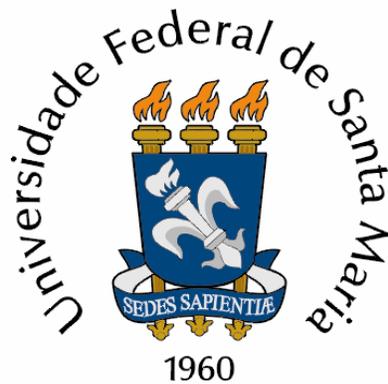


**Universidade Federal de Santa Maria**

**MEDIDOR DE VAZÃO PROPORCIONAL PARA A QUANTIFICAÇÃO  
DO  
CONSUMO DE ÁGUA NA IRRIGAÇÃO**

---

**Adriana Biassus Guimarães**



**UFSM**

**Santa Maria, RS, Brasil**

G963m

Guimarães, Adriana Biassus

Medidor de vazão proporcional para a quantificação do consumo de água na irrigação / por Adriana Biassus Guimarães ; orientador Adroaldo Dias Robaina. – Santa Maria, 2007.  
113 f. ; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2007.

1. Engenharia agrícola 2. Medidor de vazão proporcional 3. Sistema de irrigação 4. Hidrômetro 5. Diferença de pressão 6. Estivamativa de vazão I. Robaina, Adroaldo Dias, orient. II. Título

CDU: 631.67

Ficha catalográfica elaborada por  
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160  
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM



**UFSM**

Dissertação de Mestrado

**MEDIDOR DE VAZÃO PROPORCIONAL PARA A  
QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA NA  
IRRIGAÇÃO**

---

Adriana Biassus Guimarães

PPGEA

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**MEDIDOR DE VAZÃO PROPORCIONAL PARA A  
QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ÀGUA NA  
IRRIGAÇÃO**

---

por

**Adriana Biassus Guimarães**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

PPGEA

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora , abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**MEDIDOR DE VAZÃO PROPORCIONAL PARA A  
QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ÀGUA NA  
IRRIGAÇÃO**

elaborada por

**Adriana Biassus Guimarães**

como requisito parcial para a obtenção de grau de

**Mestre em Engenharia Agrícola**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina  
(Presidente / Orientador)

---

Prof. Dr. Toshio Nishijima

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Márcia Xavier Peiter

Santa Maria, 14 de agosto de 2007.

## OFERECÇO

*A minha mãe, amiga e companheira, Maria Salete, que me encorajou a buscar os meus sonhos e me deu a oportunidade de realizá-los.*

## DEDICO

*A minha família de Santa Maria, tia Cleusa, Camila e Bianca, por terem me acolhido, me encorajado e me ensinado a amar.*

*Dedico esse trabalho a vocês, pois sem o incentivo de mãe, o carinho de irmãs e o amor da família eu não conseguiria completar minha jornada.*

*Ao meu tio Danilo, que me inspirou sempre pela dedicação profissional e busca do conhecimento através dos estudos.*

## MINHA HOMENAGEM

*Ao meu pai e anjo guardião das minhas viagens, Raul Azambuja Guimarães.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu Deus e ao meu anjo guardião, que me deram força e iluminaram minha caminhada.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e aos professores, pela oportunidade e ensinamentos.

Ao amigo e professor Adroaldo Dias Robaina, pela grande oportunidade a mim oferecida no meio de minha jornada, pela paciência com meus problemas, pela orientação impecável, pela sinceridade e pela amizade. Muito obrigada por tornar possível a realização deste sonho.

À professora Márcia Xavier Peiter, pelo companheirismo, incentivo e amizade incondicional.

Às minhas queridas colegas e amigas Ana Carla Gomes e Ana Rita Parizi, pelo companheirismo, amizade e ajuda nas dificuldades. Obrigada por estarem ao meu lado quando eu precisei e por terem me dado a oportunidade de conhecer o nosso amigo e orientador, o que foi fundamental para a realização do meu projeto.

À minha mãe Maria Salete Biassus, pelo carinho e compreensão nas horas que eu estive ausente. Obrigada por tornar esse sonho possível e por estar presente em todos os momentos da minha vida em que eu precisei de ti.

À minha irmã Sabrina Biassus, pela ajuda nas dificuldades e por tantas vezes ter me recebido com tanto carinho e hospitalidade, sem medir esforços.

À família que me recebeu em Santa Maria, Cleusa, Camila, Bianca e Olga, meu sincero e eterno agradecimento, por me acolherem, me ajudarem e me incentivarem a retornar toda a semana.

A toda a minha família, avó, tios, tias, primos e primas, obrigada pelo carinho e por desejarem o meu sucesso.

Ao meu amigo e namorado, Pablo Gindri, pela compreensão nos momentos em que estive ausente e pela dedicação estando sempre presente quando eu retornava para casa.

À minha amiga e afilhada, Ana Maria Chiarelli, pelo carinho, preocupação e incentivo.

À minha amada tia Nenita, pela preocupação e pelas orações que me protegeram.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Engenharia de Irrigação, Ana Carla Gomes, Ana Rita Parizi, Alexandro Vielmo, Ezequiel Miola, e Ricardo Shons, pela contribuição em meus aprendizados, e incansável ajuda para o desenvolvimento e realização do meu projeto.

Ao colega de profissão, Henrique Cunha, por ter me aberto as portas dentro da Universidade Federal de Santa Maria, me dando a oportunidade de estudar e desenvolver meus projetos.

Ao professor João Batista Dias de Paiva, por ter me recebido, dividido ensinamentos e me orientado.

Aos proprietários e funcionários da fazenda Mayã no município de São Sepé, onde foi realizado o experimento de campo.

Aos colegas acadêmicos e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, em especial aos funcionários Ercelino Martin Bevilaqua e Luiz Cunha Dutra, agradeço a dedicação, atenção ajuda e disposição.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade a mim cedida através da bolsa de estudos.

Finalmente, agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada.

*“Deus, dai-me a serenidade para aceitar as coisas que eu não posso mudar,  
coragem para mudar as coisas que eu possa,  
e sabedoria para que eu saiba a diferença entre elas”.*

Rinhold Niebuhr

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria

### MEDIDOR DE VAZÃO PROPORCIONAL PARA A QUANTIFICAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA NA IRRIGAÇÃO

Autor: Adriana Biassus Guimarães  
Orientador: Adroaldo Dias Robaina  
Santa Maria, 14 de agosto de 2007.

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um processo simples, de baixo custo e suficientemente preciso para a sua utilização em sistemas de irrigação. O medidor consiste de uma canalização secundária provida de um hidrômetro de baixa vazão instalada em paralelo com uma singularidade capaz de provocar uma diferença de pressão entre os pontos extremos do dispositivo. A pressão diferencial induz ao escoamento parcial da água através da canalização secundária sendo medida pelo hidrômetro. O trabalho foi desenvolvido no laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria e em um sistema de bombeamento para adução de água para um pivô central na instalado na Fazenda Mayã, município de São Sepé – RS. O trabalho consta da avaliação de um medidor de volume (ou de vazão) proporcional e da posterior aplicação para a estimativa do volume de água alimentado pelo sistema de bombeamento a uma adutora de um sistema de irrigação do tipo pivô central. O medidor proporcional apresenta facilidade quanto à sua construção e instalação no campo. Os resultados obtidos permitiram concluir que o medidor proporcional foi capaz de estimar com precisão a vazão da adutora de alimentação de um sistema de irrigação do tipo pivô central. O medidor proporcional pode ser instalado e operado de modo simples, sendo que seus componentes são de fácil aquisição e de baixo custo e manutenção. Tais características assumem grande importância nos dias atuais contribuindo para a implantação de sistemas de medição em todos os sistemas de irrigação existentes no meio rural.

**Palavras-Chave:** medidor de vazão proporcional, sistemas de irrigação, hidrômetro, diferença de pressão, estimativa de vazão.

## **ABSTRACT**

Master's Dissertation  
Graduation Program in Agricultural Engineering  
Federal University of Santa Maria, RS, BRAZIL

### **MEASURER OF PROPORTIONAL OUTFLOW FOR THE QUANTIFICATION OF THE WATER CONSUMPTION IN THE IRRIGATION**

Author: Adriana Biassus Guimarães  
Advisor: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina  
Santa Maria, August 14, 2007.

The present work had for objective to develop a simple process, with low cost and enough precise for its use in irrigation systems. The measurer consists of a secondary canalization provided with a hydrometer of low outflow installed in parallel with a singularity capable to provoke a pressure difference enters the extreme points of the device. The distinguishing pressure induces to the partial draining of the water through the secondary canalization being measured for the hydrometer. The work was developed in the Irrigation, Hydraulical and Draining laboratory of the Department of Agricultural Engineering of the Federal University of Santa Maria and in a system of water main for a central pivot installed in the Mayã Farm, in the city of São Sepé - RS. The work consists in the evaluation of a proportional measurer of volume (or outflow) and of the posterior application for the estimate of the volume of water fed for the system of bombardment to an expository of a system of irrigation of the type central pivot. The proportional measurer presents easiness about the construction and installation in the field. The results allowed concluding that the proportional measurer was capable to estimate the outflow of the central pivot irrigation system. The proportional measurer can be installed and operated in a simple way, and its components are of easy acquisition and low cost and maintenance. Such characteristics assume great importance in the current days becoming viable the implantation of systems of measurement in all the existing systems of irrigation in the agricultural way.

**Keywords:** measurer of proportional outflow, systems of irrigation, hydrometer, difference of pressure, estimate of outflow.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Manômetro e vacuômetro metálicos (ou de Bourbon).....	17
FIGURA 2.2	Piezômetro.....	18
FIGURA 2.3	Manômetro em tubo em “U” .....	19
FIGURA 2.4	Vacuômetro de coluna de mercúrio (Tensiômetro).....	20
FIGURA 2.5	Manômetro diferencial.....	20
FIGURA 2.6	Esquema para a representação Equação da Continuidade.....	21
FIGURA 2.7	Funcionamento de um Medidor Ultra-sônico.....	31
FIGURA 2.8	Medidor ultra-sônico de vazão (portátil).....	31
FIGURA 2.9	Funcionamento de um medidor Eletromagnético.....	32
FIGURA 2.10	Medidor de vazão magnético.....	33
FIGURA 2.11	Corte horizontal de um hidrômetro monojato.....	35
FIGURA 2.12	Corte vertical e horizontal de um hidrômetro multijato.....	35
FIGURA 2.13	Esquema de um hidrômetro de velocidade tangencial.....	36
FIGURA 2.14	Esquema de um hidrômetro de velocidade axial.....	36
FIGURA 2.15	Diferentes modelos de mostradores de hidrômetros.....	36
FIGURA 2.16	Funções do mostrador de um Hidrômetro.....	37
FIGURA 2.17	Trecho de uma tubulação com derivação.....	38
FIGURA 3.1	Medidor de volume (vazão) acoplado a tubulação.....	39
FIGURA 3.2	Componentes do medidor.....	40
FIGURA 3.3	Determinação da perda de carga linear: canos PVC e aço galvanizado.....	41
FIGURA 3.4	Hidrômetro.....	42
FIGURA 3.5	Reservatório e régua graduada utilizada na calibração do hidrômetro.....	43
FIGURA 3.6	Régua graduada utilizada na determinação do volume.....	43
FIGURA 3.7	Montagem para a determinação de perda de carga da estrutura sem o hidrômetro e com o hidrômetro.....	44
FIGURA 3.8	Montagem para a determinação de perda de carga das peças da estrutura do medidor.....	46

FIGURA 3.9	Medidor inserido em tubulação com singularidade.....	46
FIGURA 3.10	Vista do conjunto motor e bomba utilizado no experimento.....	49
FIGURA 3.11	Válvula de retenção utilizada como singularidade.....	51
FIGURA 3.12	Medidor instalado na válvula de retenção da adutora de água.....	52
FIGURA 4.1	Calibração do método do hidrômetro x método volumétrico.....	58
FIGURA 4.2	Perda de carga da estrutura de medição – sem o hidrômetro inserido.....	58
FIGURA 4.3	Perda de carga da estrutura de medição – com o hidrômetro inserido.....	60
FIGURA 4.4	Verificação do coeficiente de perda de carga do hidrômetro ( $K_h$ ) em função do numero de Reynolds.....	60
FIGURA 4.5	Altura manométrica x vazão da bomba centrífuga.....	67
FIGURA 4.6	Potencia no eixo x vazão da bomba centrífuga.....	68
FIGURA 4.7	Relação entre a vazão da adutora e a vazão do medidor.....	70
FIGURA 4.8	Comparação entre os valores de altura manométrica e corrente elétrica estimados e valores observados nos ensaios no campo.....	73

## LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1	Medidas do diâmetro interno, do diâmetro externo e da espessura das paredes dos canos utilizados no medidor.....	53
TABELA 4.2	Perda de carga linear na canalização de PVC.....	55
TABELA 4.3	Perda de carga linear na canalização de aço galvanizado utilizada na estrutura do medidor.....	56
TABELA 4.4	Perda de carga da estrutura de medição sem e com o hidrômetro em função da vazão (ou velocidade da água).....	57
TABELA 4.5	Coefficiente de perda de carga do hidrômetro ( $K_h$ ) em função da velocidade da água.....	59
TABELA 4.6	Perda de carga no medidor de aço galvanizado ( $\Delta h$ medidor) em função da vazão ou da velocidade da água.....	61
TABELA 4.7	Perda de carga nas peças do medidor de aço galvanizado ( $\Delta h$ medidor) em função da vazão ou da velocidade da água.....	62
TABELA 4.8	Verificação dos coeficientes de perda de carga na canalização ( $K_1$ ), nas peças ( $\sum K_p$ ) e no hidrômetro ( $K_h$ ) em função da vazão ou velocidade da água.....	63
TABELA 4.9	Modelagem do coeficiente de perda de carga nas peças ( $\sum K_p$ ) em função da vazão ou da velocidade da água.....	65
TABELA 4.10	Resultados obtidos no experimento no campo com o medidor proporcional e da relação entre as vazões Q e q.....	69
TABELA 4.11	Valores médios do número de rotações da bomba centrífuga, da vazão do medidor, da vazão da adutora, da altura manométrica, da diferença entre pressão na entrada e na saída da bomba e corrente elétrica medidos no campo.....	71
TABELA 4.12	Valores médios da vazão do medidor, do coeficiente do medidor, da vazão na adutora, da altura manométrica, da diferença entre pressão na entrada e na saída da bomba e corrente elétrica, obtidos a partir da leitura do medidor.....	71
TABELA 4.13	Valores dos coeficientes (b e $r^2$ ), do teste t e significância estatística.....	72

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
<b>2.1. Medição de Pressão</b> .....	17
<b>2.2 Processos de medidas e instrumentos</b> .....	17
2.2.1 Processo direto.....	17
2.2.2 Processo indireto.....	18
2.2.2.1 Piezômetro.....	18
2.2.2.2 Manômetro em U.....	19
2.2.2.3 Tensiômetro.....	19
2.2.2.4 Manômetro diferencial.....	20
<b>2.3 Equação da Continuidade</b> .....	21
<b>2.4 Teorema de Bernoulli</b> .....	21
<b>2.5 Perda de Carga</b> .....	22
2.5.1 Número de Reynolds.....	22
2.5.2 Regime laminar.....	23
2.5.3 Regime de transição.....	23
2.5.4 Regime turbulento.....	24
2.5.5 Perda de carga principal.....	24
2.5.6 Perda de carga secundária.....	26
2.5.6.1 Perda de carga em curvas.....	27
2.5.6.2 Perda de carga em cotovelos (ou joelhos).....	27
2.5.6.3 Perda de carga em válvulas gaveta.....	27
2.5.6.4 Perda de carga em válvulas de retenção.....	27
<b>2.6 Medições de Vazões</b> .....	28
2.6.1 Método volumétrico e gravimétrico.....	28
2.6.2 Métodos diferenciais.....	29
2.6.2.1 Diafragmas.....	29
2.6.2.2 Venturi.....	29
2.6.2.3 Singularidades (curvas).....	30

2.6.3 Medidores especiais.....	30
2.6.3.1 Ultra-sônicos.....	30
2.6.3.2 Magnéticos ou eletromagnéticos.....	32
<b>2.7 Medidores de Volume.....</b>	<b>33</b>
2.7.1 Hidrômetros.....	33
2.7.1.1 Hidrômetros de Volume.....	34
2.7.1.2 Hidrômetros de Velocidade.....	34
2.7.2 Medidores Proporcionais.....	37
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
<b>3.1 Montagem do medidor.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2 Componentes do medidor.....</b>	<b>40</b>
3.2.1 Perda de carga principal (ou linear).....	41
<b>3.3 Hidrômetro utilizado.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4 Calibração do hidrômetro.....</b>	<b>42</b>
<b>3.5 Perda de carga devida ao hidrômetro.....</b>	<b>44</b>
<b>3.6 Coeficiente de perda de carga do hidrômetro.....</b>	<b>45</b>
<b>3.7 Perda de carga secundária das peças da estrutura do medidor.....</b>	<b>45</b>
<b>3.8 Modelagem do medidor de vazão proporcional.....</b>	<b>46</b>
<b>3.9 Aplicação do medidor no campo.....</b>	<b>48</b>
3.9.1 Estação de bombeamento utilizada.....	48
3.9.1.1 Relação de altura manométrica e vazão de bomba centrífuga.....	49
3.9.1.2 Relação de potência necessária no eixo e vazão da bomba centrífuga.....	50
3.9.1.3 Relação entre potência no eixo do motor e corrente elétrica.....	50
3.9.2 Singularidade utilizada e instalação do medidor.....	51
<b>3.10 Análise do desempenho do medidor.....</b>	<b>52</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Diâmetro dos canos.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2 Calibração do hidrômetro.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3 Perda de carga principal na canalização de PVC.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4 Perda de carga principal na canalização de aço galvanizado.....</b>	<b>56</b>

<b>4.5 Perda de carga na estrutura de medição sem e com o hidrômetro.....</b>	<b>57</b>
<b>4.6 Perda de carga no hidrômetro.....</b>	<b>59</b>
<b>4.7 Perda de carga nas peças da estrutura do medidor.....</b>	<b>61</b>
4.7.1 Perda de carga no medidor.....	61
4.7.2 Perda de carga devido às peças especiais do medidor.....	62
<b>4.8 Modelagem do medidor de vazão proporcional.....</b>	<b>63</b>
4.8.1 Coeficientes $K_1$ , $K_2$ e $K_3$ .....	63
4.8.2 Ajustamento do coeficiente $K_2$ .....	64
4.8.3 Coeficiente de singularidade $K_r$ .....	66
4.8.4 Modelo matemático do medidor proporcional.....	66
<b>4.9 Curva característica da bomba centrífuga.....</b>	<b>67</b>
4.9.1 Altura manométrica em função da vazão.....	67
4.9.2 Potência necessária em função da vazão.....	68
<b>4.10 Verificação do desempenho do medidor proporcional no campo.....</b>	<b>69</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada vem tomando importância no Brasil, tanto em termos de área cultivada como em termos de volume de produção. As culturas conduzidas com esta ferramenta tecnológica alcançam produtividades superiores às conseguidas sem irrigação, uma vez que a falta de chuvas é um dos principais fatores de redução de produção e de produtividade.

A tendência nos anos vindouros é de que os agricultores busquem a irrigação de suas culturas visando cada vez mais a garantia de produção. Essa tendência leva a competição pelos recursos hídricos, tanto entre os irrigantes como entre estes e outros usuários da água, o que conduz a uma necessidade neste setor do agronegócio.

Esta necessidade é a busca pela eficiência no consumo da água de irrigação, adotando um manejo adequado a fim de evitar seu uso excessivo no processo de irrigação, economizando dessa forma, a própria água e a energia necessária à sua aplicação.

Uma produção eficiente e rentável deve constituir um dos principais objetivos econômicos da empresa agrícola e para isto, os fatores de produção devem ser utilizados de maneira racional no processo de produção, de tal maneira que sejam atingidos altos níveis de produtividade econômica.

A viabilidade econômica da atividade agrícola passa pela redução de custos para a implantação e para a condução da cultura, mas como não deixaria de ser, altamente dependente do preço de venda do produto colhido.

Além da luta permanente para a obtenção de melhores preços pelo produto colhido, outra preocupação dos agricultores é a aplicação das regras oriundas da legislação de recursos hídricos.

Pelo lado da legislação de recursos hídricos, a principal preocupação é a cobrança pelo uso da água para a produção agrícola, uma vez que a legislação pertinente declarou a água dotada de valor econômico.

Um dos problemas da cobrança pelo uso da água bruta é a forma de implantar um sistema justo para quantificar a água utilizada. Muitas propostas utilizam meios indiretos e de baixa precisão, como por exemplo, a cobrança pelo volume captado estimado através da área plantada.

Em vista disso, entende-se que a adoção de um sistema de medição que permita quantificar o volume de água bruta utilizado, com razoável precisão, de fácil instalação, de baixo custo e de pouca manutenção pode ser uma solução viável e justa em relação à cobrança pelo uso da água bruta no meio rural.

Desta forma, a implantação de um sistema de medição possibilita que o usuário possa monitorar o volume de água aplicado em sua atividade agrícola e possa fazer os ajustes necessários para conduzir o processo com maior eficiência de uso da água de irrigação na sua propriedade.

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um processo de medição de vazão simples, de baixo custo e preciso para a sua utilização em sistemas de irrigação e avaliar o desempenho de um medidor proporcional de consumo de água para a sua utilização no gerenciamento da irrigação.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo trata dos princípios fundamentais de hidrostática e de hidrodinâmica que fundamentam os processos que envolvem a medição de pressão e de vazão.

### 2.1 Medição de pressão

A pressão é uma força exercida sobre uma unidade de superfície, sendo a pressão hidrodinâmica aquela suportada dentro de uma canalização quando há um líquido em movimento. As pressões podem ser expressas na forma absoluta e na forma relativa, sendo que a primeira forma de expressão leva em conta o valor da pressão atmosférica o que não ocorre na segunda forma.

### 2.2 Processos de medida e instrumentos

#### 2.2.1 Processo direto

Os aparelhos mais empregados para as medidas da pressão são os manômetros e os vacuômetros, dependendo se a pressão a ser medida é positiva ou negativa. Os manômetros metálicos (manômetros de Bourdon) são os mais empregados na prática para verificar e controlar pressões. Conforme AZEVEDO NETTO et al. (1998), as pressões indicadas chamam-se pressões manométricas.

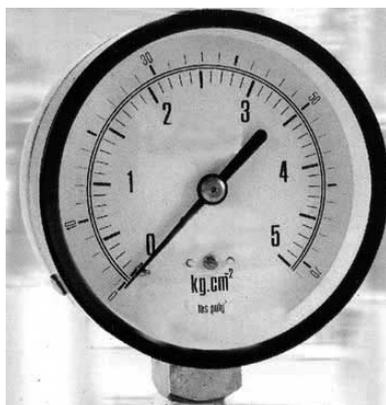


Figura 2.1 – Manômetro e vacuômetro metálicos (ou de Bourbon).

### 2.2.2 Processos indiretos

Segundo BERTULANI (2006) a relação entre pressão e profundidade é muito utilizada em instrumentos que medem pressão.

Esses instrumentos se fundamentam na lei de Stevin, utilizando a altura da coluna de líquido como meio indireto para a determinação da pressão.

O valor da pressão, após a medida da altura de uma coluna de líquido, é determinada através da expressão:

$$p = \gamma \cdot h$$

onde  $p$  é a pressão relativa ( $\text{N/m}^2$ ),  $\gamma$  é o peso específico do líquido ( $\text{N/m}^3$ ) e  $h$  é a altura de coluna de água ou diferença da mesma entre dois pontos (m).

#### 2.2.2.1 Piezômetro

O aparelho mais simples utilizado em medições de pressão é o piezômetro, também conhecido como tubo piezométrico. Ele consiste na inserção de um tubo transparente na canalização ou no recipiente de onde se quer medir a pressão do líquido. Este irá subir através do tubo até uma determinada altura “ $h$ ” (Figura 2.2), a qual corresponde à pressão interna (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

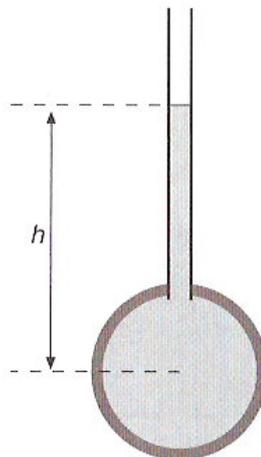


Figura 2.2 - Piezômetro.

A pressão absoluta pode ser estimada somando o valor da pressão manométrica obtida através das medições com a pressão atmosférica no local.

#### 2.2.2.2 Manômetro em U

Segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998), outro dispositivo utilizado como manômetro é o tubo em forma de “U” (Figura 2.3), aplicado quando se tem pressão muito pequena ou muito alta para as medições realizadas com os piezômetros.

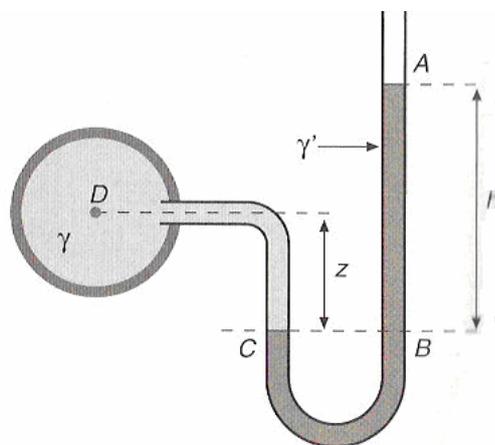


Figura 2.3 – Manômetro de tubo em “U”.

Para pressões pequenas (baixas) utiliza-se a água, tetra cloreto de carbono, tetra brometo de acetileno e benzina como líquidos indicadores e para pressões elevadas (altas) o mercúrio é mais utilizado.

#### 2.2.2.3 Tensiômetro

Esse tipo de instrumento, na verdade é um vacuômetro dotado de um indicador de coluna de mercúrio, dotado em uma de suas extremidades de uma cápsula cerâmica porosa.

De acordo com REICHARDT (1985), sua principal aplicação é para a determinação do potencial da água retida pela matriz do solo, mas pode ser utilizado para a determinação da pressão negativa, como a que ocorre na tubulação de sucção de bombas centrífugas.

Para a sua utilização em tubulações, a cápsula porosa e o corpo de plástico são retirados e a conexão do medidor do aparelho é feita diretamente na sucção da bomba, que deverá ter um ponto devidamente preparado para recebê-lo.

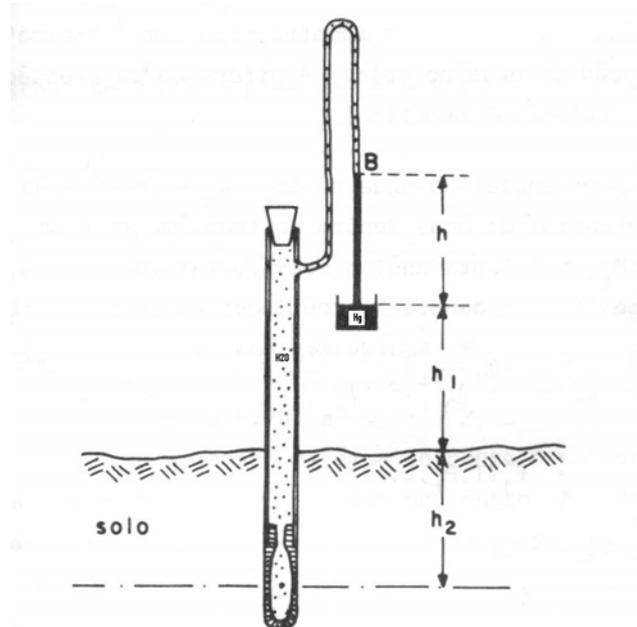


Figura 2.4 – Vacuômetro de coluna de mercúrio (Tensiômetro).

#### 2.2.2.4 Manômetro diferencial

O manômetro diferencial difere dos anteriores por não possuir uma das extremidades em contato com a atmosfera, ou seja, tem as duas extremidades ligadas nos sistemas nos quais se deseja medir a diferença de pressão.

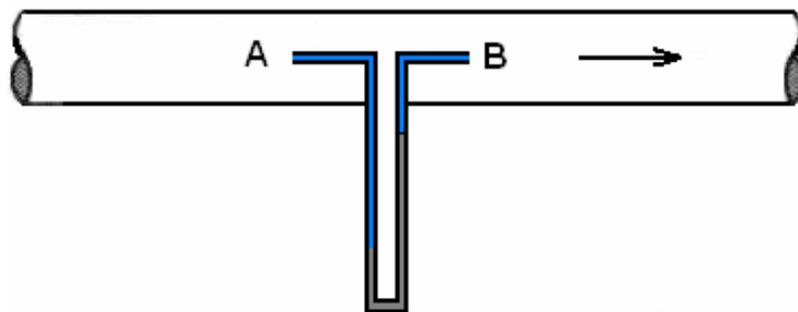


Figura 2.5 – Manômetro diferencial.

O manômetro diferencial não permite a medição da pressão nos pontos onde está conectado, mas tão somente a diferença de pressão entre os pontos.

### 2.3 Equação da Continuidade

Segundo LENCASTRE (1972), a equação da continuidade traduz um fato físico evidente da conservação de massa que diz que durante certo período de tempo, o aumento de massa de um determinado fluido contido em um determinado volume, é igual a soma da massa do fluido que nele entra menos a massa do fluido que dele sai.

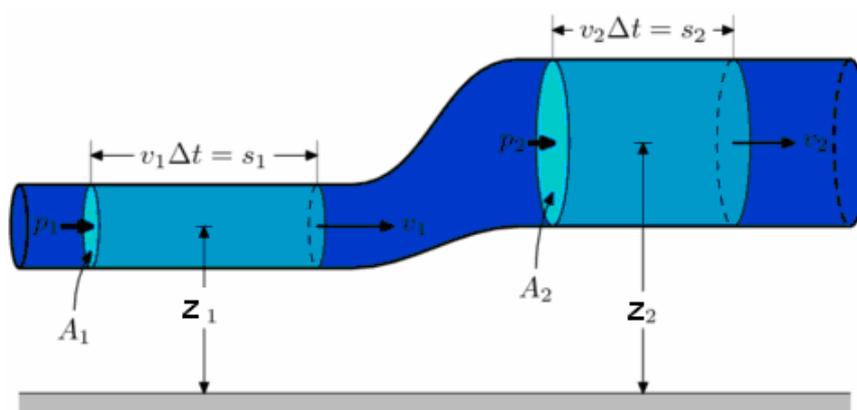


Figura 2.6 – Esquema para a representação da Equação da Continuidade

Assim, a equação da continuidade é dada por:

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad [2.1]$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  representam a área da primeira seção e da segunda seção e  $V_1$  e  $V_2$  representam a velocidade do fluido na primeira seção e na segunda seção da tubulação e  $Q$  a vazão do sistema.

### 2.4 Teorema de Bernoulli

O Teorema de Bernoulli, atribuída a Daniel Bernoulli, descreve o comportamento de um fluido que se move ao longo de um conduto.

Para um fluxo de líquidos reais sob um campo gravitacional uniforme como o encontrado na terra, a equação de Bernoulli é:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h \quad [2.2]$$

onde  $\Delta h$  é perda de carga total,  $Z_1$  e  $Z_2$  as alturas geométricas,  $p_1$  e  $p_2$  as pressões,  $V_1$  e  $V_2$  as velocidade nas secções 1 e 2 respectivamente,  $\gamma$  o peso específico do líquido que escoar no conduto e  $g$  a aceleração da gravidade.

## 2.5 Perda de carga

Na Engenharia, grande parte das aplicações diz respeito à utilização de condutos para o transporte de fluídos, geralmente de seção transversal circular, onde o líquido escoar com pressão maior que a pressão atmosférica.

O escoamento dos líquidos nas tubulações não ocorre sem que haja perda de certa quantidade de energia (DAKER, 1987). Quando um líquido flui de um determinado ponto até outro dentro de uma canalização, parte da energia inicialmente contida neste líquido se dissipa em forma de calor, o que caracteriza a perda de carga, pois a energia transformada em calor é um processo irreversível.

### 2.5.1 Número de Reynolds

Com a finalidade de observar o comportamento dos líquidos em canalizações, Osborne Reynolds realizou uma experiência em 1883 onde constatou que, com o aumento da vazão e mantida a seção de escoamento, as partículas componentes do fluido passam do movimento ordenado (regime laminar) para um movimento desordenado (regime turbulento).

Posteriormente, com o desenvolvimento de estudos teóricos e experimentais, Reynolds concluiu que a velocidade é apenas um dos fatores que altera esse regime, sendo que outras características interferem na classificação.

Conforme descrito por NETO (2007), Reynolds desenvolveu uma expressão na qual a viscosidade do líquido também é levada em consideração. O número de Reynolds é expresso da seguinte maneira:

$$R_e = \frac{V.D}{\nu}$$

onde  $V$  é o valor da velocidade de escoamento do líquido no interior da tubulação,  $D$  é o diâmetro do conduto e  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido.

Segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998), no estudo dos fluidos em movimento ocorrem três tipos de regimes de escoamento em condutos forçados: o laminar, o de transição e o turbulento.

Eles são classificados principalmente em função da velocidade de escoamento do líquido e constituem um fator de grande importância a ser considerado para o cálculo da perda de carga.

### 2.5.2 Regime laminar

Os perfis de velocidade são bem definidos, tendo velocidades maiores no centro do canal e diminuindo à medida que se aproximam das laterais onde atingem um valor nulo (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

A resistência a um escoamento em regime laminar ocorre puramente devido à viscosidade, sendo esta resistência (perda de carga) resultado do atrito do líquido com as paredes da canalização em velocidades variadas, diferentemente do que ocorre com os sólidos.

O regime laminar ocorre e é estável para número de Reynolds inferior a 2000, onde as partículas fluidas apresentam trajetória bem definida e não se cruzam (NETO 2007).

### 2.5.3 Regime de transição

Conforme NETO (2007), Reynolds ainda observou que ao se diminuir a vazão (velocidade) as partículas voltavam a se ordenar a partir de uma certa velocidade, a qual recebeu a denominação de velocidade crítica inferior.

Esta faixa onde o regime passa do laminar para o turbulento é denominada regime de transição, onde os valores do número de Reynolds está entre 2000 e 4000.

#### 2.5.4 Regime turbulento

De acordo com IGNÁCIO (2007), com o aumento da velocidade do fluido no interior da tubulação, ocorre um aumento na resistência ao escoamento tornando o movimento do líquido altamente irregular e conseqüentemente passando do regime laminar para o turbulento a medida em que essa velocidade excede um determinado valor crítico.

No caso do regime turbulento, a resistência é o efeito combinado das forças devido à viscosidade e à inércia, sendo que a distribuição de velocidades na canalização depende da turbulência, que é influenciada pelas condições das paredes do conduto. Um tubo com paredes rugosas causa maior turbulência do que um tubo com paredes mais lisas. Nestes casos, a velocidade de escoamento do líquido tem maior influência na perda de carga do que em regimes laminares.

Segundo IGNÁCIO (2007), o escoamento turbulento ainda pode ser subdividido em hidraulicamente liso e hidraulicamente rugoso.

No primeiro caso o regime de escoamento no interior do tubo é turbulento, porém próximo à parede interna, devido à aderência, há a formação de um filme laminar que cobre a rugosidade da parede. Já no segundo caso, o regime próximo à parede é considerado turbulento, pois o filme laminar não cobre a rugosidade da parede (IGNÁCIO, 2007).

Conforme descrito por AZEVEDO NETTO et al. (1998), em instalações reais as canalizações não são inteiramente constituídas por tubos retilíneos e de mesmo diâmetro, mas incluem ainda peças especiais e conexões que elevam a turbulência, provocando atrito e causam choques entre as partículas, dando origem as perdas de carga, que se classificam em duas categorias: a perda de carga principal e a perda de carga secundária.

#### 2.5.5 Perda de carga principal

A perda de carga principal se distribui uniformemente ao longo do conduto, tendo seu valor invariável independentemente da posição e do trecho da canalização, também podendo ser chamada de perda de carga contínua (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

Este tipo de perda é ocasionado pela resistência ao movimento da água nos condutos, sendo essa resistência devido à ação resultante de dois tipos de atritos: o interno e o externo (DAKER, 1987).

O atrito interno é aquele que ocorre no interior do líquido quando este entra em movimento, causando atrito entre suas moléculas, de modo que a carga perdida depende principalmente da viscosidade do líquido.

O atrito externo é aquele que ocorre quando o líquido em movimento entra em contato com as paredes do conduto, determinado que esta perda dependa do material que constitui os condutos, da rugosidade de suas paredes e da velocidade do líquido (DAKER, 1987).

Segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998), após inúmeros estudos conduzidos por vários pesquisadores, com canalizações ou tubulações circulares, concluiu-se que a resistência da água ao escoamento é diretamente proporcional ao comprimento da canalização, inversamente proporcional a uma potência do diâmetro, função de uma potência da velocidade média, variável conforme a rugosidade dos condutos, independente da posição da tubulação, independente da pressão interna sob a qual o líquido escoar e função de uma potência da relação entre a viscosidade e a densidade do fluido.

Para um conduto circular, a perda de carga principal pode ser estimada através da expressão:

$$\Delta h = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad [2.3]$$

na qual  $\Delta h$  representa a perda de carga principal (m),  $f$  é o coeficiente de perda de carga,  $L$  é o comprimento (m),  $D$  o diâmetro (m),  $V$  a velocidade de escoamento do líquido (m/s) e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ).

De acordo com BAPTISTA e COELHO (2003), considerando-se a equação da continuidade, obtém-se a equação da perda de carga em função da vazão:

$$\Delta h = 0.0826 f \frac{Q^2}{D^5} L \quad [2.4]$$

onde Q é a vazão (m<sup>3</sup>/s).

O coeficiente de atrito f, sem dimensões, é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa, pode ser determinado por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}} \right) \quad [2.5]$$

sendo R o número de Reynolds, D o diâmetro do conduto e  $\varepsilon$  a rugosidade absoluta do conduto.

A expressão anterior é conhecida como fórmula de Colebrook-White e através dela é determinado o fator de perda de carga f.

A equação [2.3] ou a equação [2.4] quando o valor de f é determinado pela equação [2.5] é conhecida como fórmula universal de perda de carga.

#### 2.5.6 Perda de carga secundária

Esse tipo de perda de carga, conhecida como perda de carga localizada ou perda de carga acidental, ocorre devido aos choques causados pelo turbilhonamento quando há passagem da água em peças especiais (singularidade) colocadas em uma canalização (ou tubulação).

Segundo AZEVEDO NETTO (1998), as perdas são denominadas locais, acidentais ou singulares, pelo fato de ocorrerem em pontos bem determinados da tubulação, isto é, ocorrem devido à presença da peça.

A estimativa da perda de carga secundária pode ser expressa sob a forma da equação geral:

$$\Delta h_p = K \frac{V^2}{2g} \quad [2.6]$$

onde  $\Delta h_p$  é a perda de carga devido à peça, K o coeficiente de perda de carga localizada, V a velocidade média do escoamento do líquido e g é o valor da aceleração da gravidade.

Os valores do coeficiente de perda de carga secundária podem ser encontrados em tabelas que os relacionam as peças mais comuns na prática.

Segundo alguns autores, como LENCASTRE (1972) e AZEVEDO NETO ET AL. (1998), o valor de K é praticamente constante para valores do número de Reynolds acima de 50000.

#### 2.5.6.1 Perda de carga em curvas

Curvas representam uma mudança gradual da direção do escoamento, sendo que para cada curva existe um raio de curvatura e um desenvolvimento adaptado para que as perdas de carga sejam menores.

#### 2.5.6.2 Perda de carga em cotovelos (ou joelhos)

Cotovelos ou joelhos representam uma mudança brusca de direção do escoamento. Apesar de apresentarem a mesma função das curvas e maiores perdas de carga sua utilização é necessária em plantas industriais com espaço reduzido.

#### 2.5.6.3 Perda de carga em válvulas gaveta

De uma maneira geral, registros oferecem perda de carga nos condutos por caracterizarem uma resistência ao escoamento mesmo quando totalmente abertos.

Conforme AZEVEDO NETO ET AL. (1998), para registros de gaveta totalmente abertos, os valores do coeficiente K podem variar entre 0.1 a 0.4, sendo que essa variação é devida principalmente às características de fabricação.

Na maioria das citações, encontra-se o valor de K igual a 0.2, como um valor médio representativo.

#### 2.5.6.4 Perda de carga em válvulas de retenção

Da mesma forma como ocorre para válvulas de gaveta, mesmo estando a estrutura completamente aberta, ela representa um obstáculo que gera perda de carga fazendo com que o coeficiente K das válvulas de retenção alcance um valor aproximado de 2.5, podendo variar entre 0.6 e 2.3, segundo LANCASTRE (1972).

## 2.6 Medição de vazões

A medição de vazão é uma das mais importantes aplicações da hidrometria, que cuida de questões como medidas de profundidade, variação dos níveis de água, seções de escoamento, pressões, velocidades, vazões ou descargas. O mesmo também trata dos ensaios em bombas e turbinas, assim como outros (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

As vazões são medidas para diversas finalidades, como para sistemas de abastecimento de água, estudos de lançamentos de esgotos, instalações hidrelétricas, defesa contra inundações e também para o principal foco da engenharia agrícola que são as obras de irrigação.

A medição de vazão pode ser realizada em condutos abertos (canais) ou condutos fechados (canalizações e tubulações).

Neste estudo, interessa os métodos de medição de vazão com aplicação nos condutos fechados.

### 2.6.1 Método volumétrico e gravimétrico

O método volumétrico, considerado um método direto, consiste na medição do volume de água que preencha um recipiente de medidas conhecidas e também a determinação do tempo necessário que este mesmo recipiente demora para ser preenchido e a relação entre os valores de volume e tempo permite a determinação da vazão.

O método gravimétrico, que pode ser considerado uma variação do método citado anteriormente, difere daquele por determinar o volume a partir a massa de água coletada e da sua massa específica, o que exige a determinação da temperatura da água.

De acordo com AZEVEDO NETTO et al. (1998), quanto maior o tempo de determinação ou quanto maior o número de repetições do ensaio, maior será a precisão dos valores de vazão.

Conforme DAKER (1987), o tempo é muito importante e a precisão na sua contagem deve ser considerada, pois um pequeno erro por segundo ocasiona um erro considerável na vazão e na estimativa do volume diário.

## 2.6.2 Métodos diferenciais

Os medidores diferenciais para condutos são dispositivos que consistem numa redução da secção de escoamento de uma canalização e tubulação de modo a produzir uma diferença de pressão, em consequência do aumento de velocidade.

Os medidores diferenciais, segundo LENCASTRE (1972), se baseiam na teoria da perda de carga e sua relação com a velocidade de escoamento da água e a equação da continuidade para a determinação da vazão. A perda de carga no medidor é feita com a utilização de manômetros diferenciais.

### 2.6.2.1 Diafragmas

Segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998), os orifícios concêntricos se constituem um dos processos mais simples para a medição de vazões.

Sua instalação é relativamente fácil, uma vez que consiste num orifício executado em uma chapa metálica instalada entre flanges do conduto. O diâmetro mínimo do orifício deve estar entre 30 a 80% do diâmetro da tubulação, uma vez que menores que 30% produzem perdas excessivas e maiores que 80% não apresentam boa precisão.

O local de sua instalação deverá obedecer distâncias mínimas, que variam de acordo com a relação entre o diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação.

### 2.6.2.2 Venturi

Segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998), o medidor Venturi é um aparelho inventado por Clemens Herschel em 1881, que leva o nome de Venturi, por ser o primeiro hidráulico a experimentar tubos divergentes.

O aparelho consiste de três secções principais: uma peça convergente, outra divergente (o difusor) e uma peça intermediária, que constitui a garganta ou estrangulamento.

São fabricados em versões longas (comprimento variando entre 5 e 12 vezes o diâmetro da tubulação) e versões curtas (comprimento variando entre 3.5 e 7 vezes o diâmetro da tubulação) e o diâmetro da garganta entre 25 e 75% do diâmetro da tubulação.

O local de sua instalação deverá ser precedido por um trecho de tubulação retilínea de 6 vezes o diâmetro da tubulação, no mínimo.

### 2.6.2.3 Singularidades (curvas)

Um medidor em curva mede a diferença de pressões existente entre a parte externa e a parte interna de uma curva inserida em um conduto.

De acordo com HWANG (1984), a força centrífuga desenvolvida em uma curva da tubulação força os filetes a tenderem para a parede exterior da curva desenvolvendo-se uma diferença de pressões entre a parte externa e a mais interna da curva, o que é passível de ser medida por um manômetro diferencial.

O medidor em curva quando precedido de um trecho reto de tubulação de, pelo menos, 30 vezes o diâmetro desse tubo e elevados números de Reynolds pode ser usado para a determinação da vazão, com uma margem de erro de 10%.

### 2.6.3 Medidores especiais

O medidor de vazão especial é um instrumento utilizado para o controle de processo e detecção de perdas dos insumos da empresa, servindo para converter recursos, como tempo, dinheiro e materiais, em medidas de quanto material está correndo.

#### 2.6.3.1 Ultra-sônicos

Os aparelhos que medem vazão por meio ultra-sônico são considerados os mais modernos e com alta precisão.

Estes instrumentos foram desenvolvidos para medição de vazão de líquidos limpos em tubulações fechadas sem que ocorra qualquer contato físico entre o medidor e o meio medido. A instalação do aparelho é efetuada de modo fácil e simples, uma vez que dispensa qualquer tipo de serviço na tubulação como seccionamento ou perfuração.

Podem ser aplicados a diversos tipos de tubulações, variando o material, e cobrindo diâmetros de até 5.000 mm (milímetros) e também são utilizados em canais prismáticos (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

A medição é baseada no princípio do tempo de trânsito: dois transdutores que podem ser acoplados na parede externa do tubo emitem e recebem pulsos de ultra-som. O tempo de trajeto destes pulsos é analisado por um circuito eletrônico que efetua o cálculo da vazão instantânea (Figura 2.7).

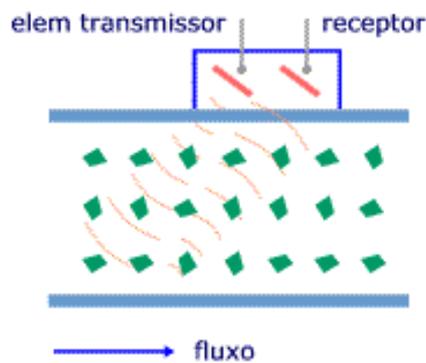


Figura 2.7 - Funcionamento de um medidor Ultra-sônico.

Entre os diferentes métodos utilizados para medir a velocidade de líquidos e gases por ultra-som, o método que utiliza a diferença do tempo de trânsito é considerado o mais preciso e o único que permite realizar uma verdadeira integração de todas as velocidades envolvidas ao longo do trajeto acústico (ULTRAFLUX, 2006).

Em função das condições hidráulicas do escoamento e a incerteza desejada, pode-se utilizar uma ou mais cordas. Uma corda é constituída por duas sondas ou sensores que estão diretamente ligadas ao aparelho receptor que armazena e processa as informações, fornecendo a vazão e velocidade do fluido instantaneamente (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Medidor ultra-sônico de vazão (portátil).

A medição da vazão é obtida através dos processos de medição de velocidade sobre uma ou mais cordas e o cálculo da vazão a partir da velocidade de uma ou mais velocidades medidas.

Podem-se observar algumas vantagens dos aparelhos ultra-sônicos sobre os demais, como a independência dos parâmetros geométricos comprimento e diâmetro, a independência da velocidade do som no fluido, ser bidirecional, não provocar perda de carga, ser de fácil instalação e não precisar interromper o funcionamento da estrutura.

### 2.6.3.2 Magnéticos ou eletromagnéticos

Os medidores magnéticos ou eletromagnéticos baseiam-se, segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998), no princípio que diz que quando um condutor elétrico, no caso a água, desloca-se através de um campo eletromagnético, a força eletromotiva induzida no condutor é proporcional a sua velocidade, isto é, quando um condutor elétrico se move num campo magnético cortando as linhas de campo forma-se uma força eletromotriz (f.e.m.) no condutor proporcional a sua velocidade.

Na figura 9 pode-se observar um tubo de material não magnético contendo duas bobinas que geram um campo magnético  $B$  no seu interior. Dois eletrodos são colocados em lados opostos do tubo e em direção perpendicular ao campo. O fluido faz o papel do condutor e a tensão “ $V$ ” gerada tem relação com a velocidade do fluxo e, portanto, com a sua vazão.

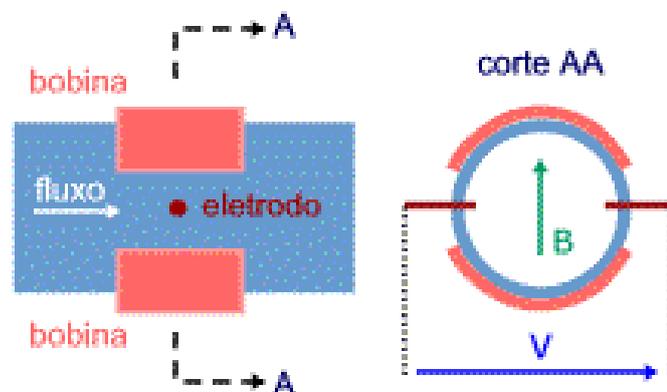


Figura 2.9 – Funcionamento de um medidor Eletromagnético.

No caso de tubulações, o condutor é a própria água e o campo eletromagnético é formado por espiras em volta do tubo. A força eletromotriz é medida por meio de eletrodos que devem ter contato com o líquido.

Os medidores eletromagnéticos têm a vantagem da virtual ausência de perda de carga, mas só podem ser usados com líquidos condutores de eletricidade.



Figura 2.10 - Medidor de vazão magnético

O transmissor de vazão magnético instalado na tubulação entre flanges é composto, basicamente, do tubo cilíndrico, bobinas fixadas no tubo para geração do campo magnético e eletrodos fixados perpendicularmente ao campo (Figura 10).

Este tipo de medidor é produzido para tubulações que compreende os diâmetros de 50 a 900 mm. São peças de elevado valor de mercado, mas tem vantagens como não causar a perda de carga na medição.

## 2.7 Medidores de volume

Esses medidores servem para a determinação do volume de água utilizada para um determinado processo em intervalo de tempo. Desse modo, pode-se estimar a vazão média no período.

### 2.7.1 Hidrômetros

Segundo AZEVEDO NETTO et al. (1998), os hidrômetros são aparelhos que se destinam a medir a quantidade de água que transita em longos períodos de

tempo e são usados para a medição e posterior cobrança de água em instalações prediais e industriais, também podem ser utilizados como alternativa de medir volume de água captada em estações de bombeamento de água.

A escolha deste aparelho é feita dependendo da utilização, escolhendo-se o tipo conforme a vazão média diária a ser medida.

#### 2.7.1.1 Hidrômetros de volume

Os hidrômetros de volume também denominados hidrômetros volumétricos ou de deslocamento positivo, possuem câmaras de volume conhecido que enchem e se esvaziam sucessivamente, num processo contínuo com a passagem da água pelo seu interior. Um mecanismo transmite continuamente o movimento da peça móvel da câmara a um sistema de marcação.

Estes hidrômetros são mais sensíveis e apresentam erros menores que os de velocidades, mesmo a baixa vazão. Entretanto, apresentam o inconveniente de exigir água sem nenhum material sólido em suspensão, por isso, no Brasil seu uso não foi difundido (AZEVEDO NETTO et al., 1998)

#### 2.7.1.2 Hidrômetros de velocidade

São os mais simples e mais acessíveis economicamente, porém são menos sensíveis e com precisão menor (AZEVEDO NETTO, et al., 1998).

No Brasil, praticamente, só os hidrômetros de velocidade tiveram o seu uso difundido, devido principalmente as características de nossas águas que freqüentemente apresentam sólidos em suspensão inviabilizando a utilização dos hidrômetros volumétricos.

Conhecido também por hidrômetros taquímetros e, conforme o mecanismo giratório, podem ser do tipo rotor com pás (incidência tangencial) ou do tipo axial (incidência axial).

Este tipo de hidrômetro também pode ser classificado conforme a entrada da água na câmara que contém o rotor como de jato único também conhecido por monojato e jatos múltiplos, conhecido também por multijato. A transmissão das rotações das turbinas ao sistema indicador de volume, no hidrômetro de jatos

múltiplos é feita magneticamente, permitindo a relojoaria do medidor trabalhar numa câmara seca.

As figuras 2.11 e 2.12 mostram em corte os detalhes dos medidores monojato e multijato respectivamente.

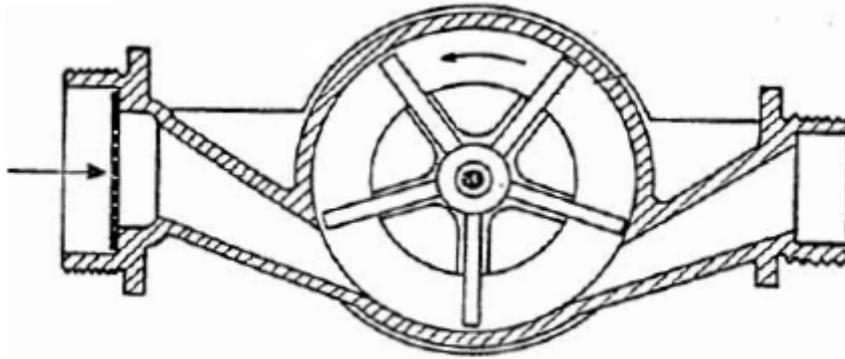


Figura 2.11 – Corte horizontal de um hidrômetro monojato.

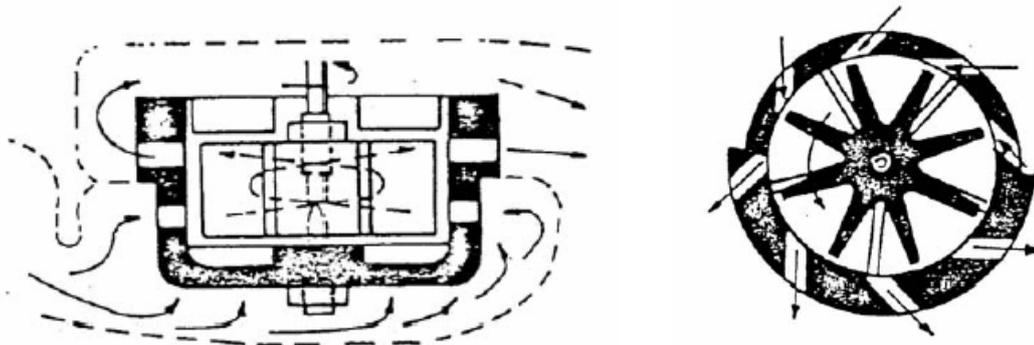


Figura 2.12 – Corte vertical e horizontal de um hidrômetro multijato.

O princípio de funcionamento do medidor se baseia na proporcionalidade entre a velocidade da água que passa pelo seu interior e o número de revoluções da turbina (hélice ou palheta) provocada pelo fluxo da água, sendo a vazão de água que o atravessa determinada por:

$$q = k \cdot n \cdot a \quad [2.6]$$

onde  $a$  é a área do orifício,  $n$  é o número de revoluções da turbina ou hélice e  $k$  é o coeficiente que depende das características hidráulicas do conjunto.

Os medidores de velocidade, além de serem classificados em monojatos e multijatos, ainda podem ser classificados conforme a direção do funcionamento, sendo divididos em hidrômetros tangenciais ou axiais.

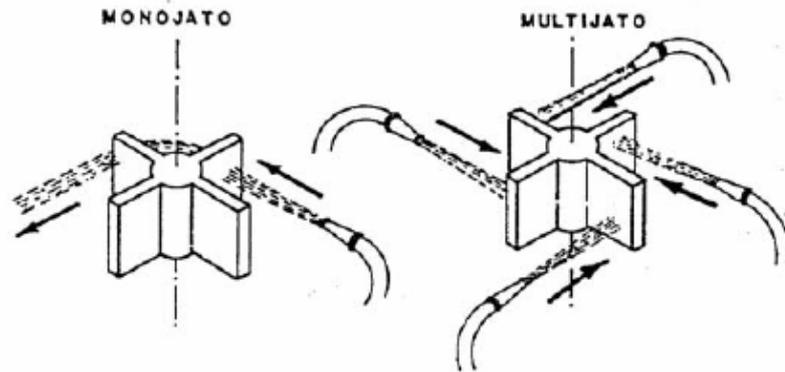


Figura 2.13 – Esquema de um hidrômetro de velocidade tangencial.

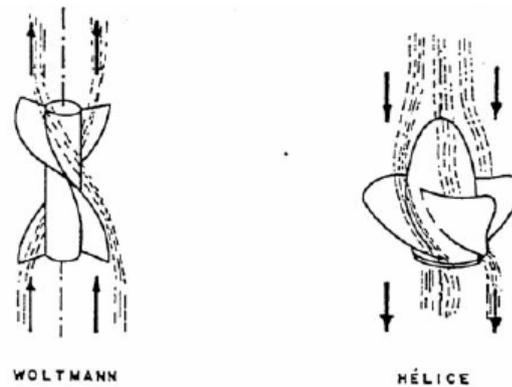


Figura 2.14 – Esquema de um hidrômetro de velocidade axial.

Existem vários modelos de mostradores de hidrômetros (Figura 2.15), que variam de acordo com o fabricante.

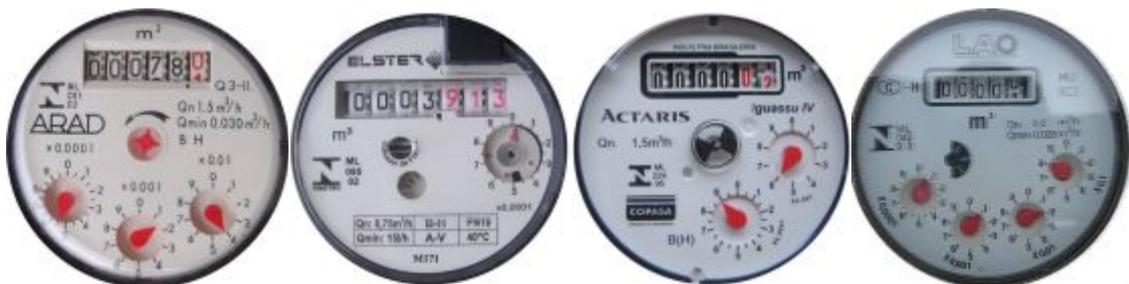


Figura 2.15 – Diferentes modelos de mostradores de hidrômetros.

Existem normas específicas para o projeto dos indicadores do volume de líquido registrado pelos instrumentos.



Figura 2.16 – Funções do mostrador de um hidrômetro.

Por norma, todos esses modelos têm indicadores do volume em metros cúbicos na cor preta, e indicadores de volume em litros na cor vermelha (combinações de roletes vermelhos e ponteiros vermelhos ou somente ponteiros vermelhos), como demonstrado na figura 2.16.

### 2.7.2 Medidores proporcionais

Também conhecidos como medidores do tipo derivação, este tipo de medição é feita por meio de uma derivação na tubulação principal, onde se instala um hidrômetro de pequenas dimensões.

Conforme COELHO e PINHO (1979), o medidor proporcional consiste em uma tubulação de um determinado diâmetro de grande porte ao qual se adapta uma derivação composta por uma tubulação de menor diâmetro provida de um hidrômetro.

O princípio de funcionamento deste aparelho é baseado na proporcionalidade existente entre as vazões que passam através do hidrômetro e através da tubulação principal.

Este tipo de medidor pode ser dimensionado, calibrado, instalado, operado e mantido de forma simples, uma vez que a estrutura é de menor custo em comparação aos demais medidores de vazão.

O medidor pode ser instalado aproveitando vários tipos de singularidades, como diafragmas, tubos de Venturi, ampliações e reduções graduais, curvas de 45° e 90°, ou ainda este sistema pode ser instalado para canalizações sem nenhuma singularidade, como trechos retos de tubos.

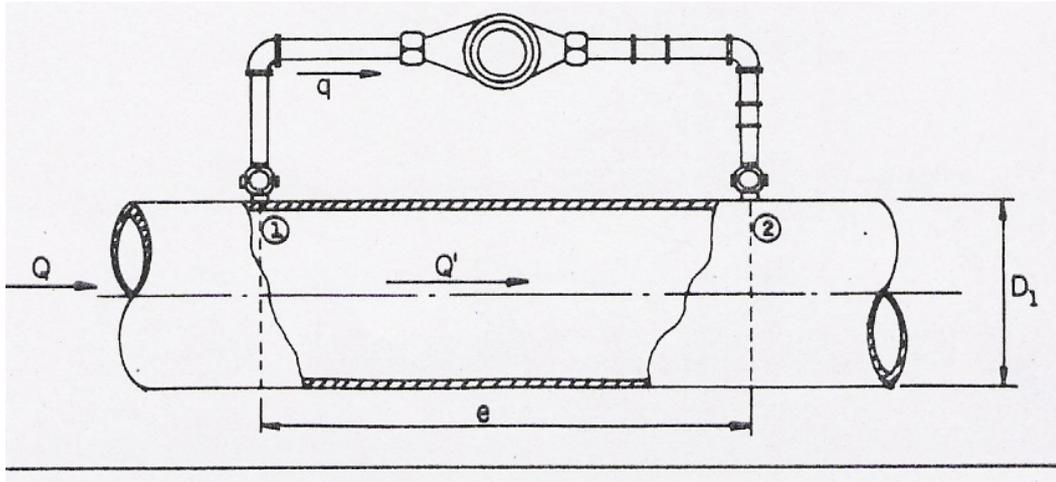


Figura 2.17 – Trecho reto de uma tubulação com derivação.

A perda de carga entre as seções 1 e 2 da Figura 2.17, provocada pelo escoamento através do conduto principal é calculada através da fórmula universal de perda de carga.

Neste tipo de medidor deve-se determinar a correlação entre a vazão real da tubulação principal e a vazão obtida com o hidrômetro na derivação, a fim de se estabelecer a proporcionalidade entre as vazões.

De acordo com HUEB e KAPPAZ (1979), é uma maneira alternativa, econômica e confiável de se medir a vazão ou o volume de água gasto em uma estação de bombeamento de água.

Devido a fácil manutenção e confiabilidade nos resultados, quando bem calibrado, este método pode ser uma alternativa para a medição dos sistemas de abastecimento de água.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no laboratório de Hidráulica, Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria e em um sistema de bombeamento para adução de água para um pivô central instalado na Fazenda Mayã, município de São Sepé – RS.

O trabalho consistiu na avaliação de um medidor de volume (vazão) proporcional e da posterior aplicação para a estimativa do volume de água captado pelo sistema de bombeamento para a adutora de um sistema de irrigação do tipo pivô central.

#### 3.1 Montagem do medidor

O medidor proposto pode ser utilizado em situações onde a tubulação principal apresenta singularidade e onde a tubulação não apresenta singularidade.

A Figura 3.1 mostra um esquema de um medidor de vazão proporcional inserido em uma tubulação que apresenta uma singularidade, caso no qual se enquadra o presente estudo.

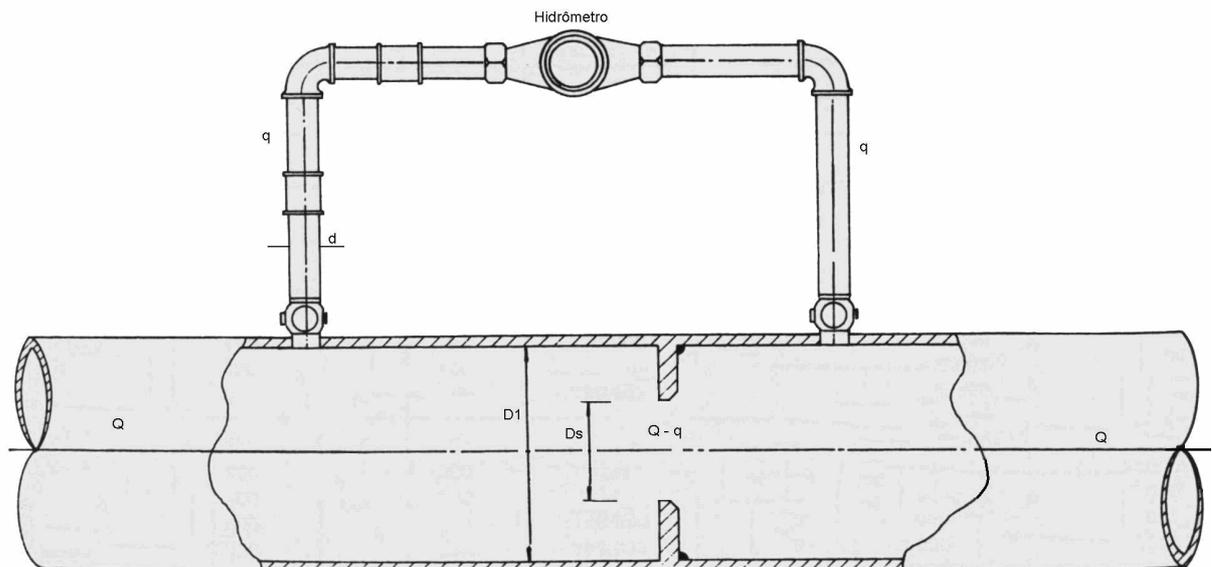


Figura 3.1 – Medidor de volume (vazão) acoplado a tubulação.

### 3.2 Componentes do medidor

O proporcional desenvolvido utilizou uma união, um cotovelo de 90°, um trecho de cano de aço galvanizado de comprimento de 50 cm, uma curva de 90°, uma luva, um niple, uma luva, um hidrômetro de vazão nominal de 3 m<sup>3</sup>/s, uma luva, uma curva de 90°, um trecho de cano de comprimento de 46 cm, uma registro de gaveta, um cotovelo de 90° e uma união (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Componentes do medidor

O material das diversas peças componentes do medidor é de aço galvanizado de diâmetro nominal de 1" e a distância entre os canos colocados na vertical era de 47 cm.

Para a determinação das características reais do escoamento foi feita a medição do diâmetro da parte interna dos canos utilizados para a montagem da estrutura do medidor. As medidas dos diâmetros interno e externo dos canos foram realizadas com o auxílio de um paquímetro e as espessuras das paredes dos canos foram obtidas pela semidiferença entre as medidas dos diâmetros externos e internos dos canos do medidor.

### 3.2.1 Perda de carga principal (ou linear)

Foram realizados ensaios de perda de carga linear em função da vazão em canos de aço galvanizado para serem utilizados na montagem de medidores.

A perda de carga foi determinada com um medidor de pressão diferencial e a vazão foi determinada com um hidrômetro calibrado.

Esses ensaios tiveram o objetivo de determinar o coeficiente  $f$  da fórmula universal de perda de carga dos canos de PVC e de aço galvanizado e a determinação da rugosidade absoluta  $\epsilon$  dos canos de aço galvanizado, sendo para os canos de PVC adotado o valor da rugosidade absoluta  $\epsilon = 0.06$  mm.



Figura 3.3 – Determinação da perda de carga linear: canos PVC e aço galvanizado.

O coeficiente de perda de carga linear  $f$  foi determinado a partir da fórmula universal de perda de carga, expressa por:

$$\Delta h_p = 0.0826 f \frac{Q^2}{D^5} L \quad [4.1]$$

onde  $\Delta h_p$  é a perda de carga linear (m) ,  $f$  o coeficiente de perda de carga,  $Q$  ( $m^3/s$ ) a vazão,  $D$  o diâmetro interno do cano (m) e  $L$  a distância entre as tomadas de pressão (m).

A rugosidade absoluta da canalização de aço galvanizado foi determinada com o auxílio da equação de Colebrook-White, expressa por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( 0.27 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2.51}{R \sqrt{f}} \right) \quad [4.2]$$

na qual  $f$  é o coeficiente de perda de carga,  $D$  o diâmetro interno do cano (m),  $R$  o número de Reynolds e  $\varepsilon$  a rugosidade absoluta.

### 3.3 Hidrômetro utilizado

O hidrômetro utilizado (Figura 3.4) é de fabricação da LAO, do tipo unijato e apresenta como característica uma vazão nominal de  $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , mínima de  $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$  e máxima de  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Figura 3.4 – Hidrômetro

### 3.4 Calibração do hidrômetro

A calibração do hidrômetro foi fundamentada no ajuste a uma regressão linear das vazões obtidas pelo hidrômetro com as vazões obtidas pelo método volumétrico.

Para a determinação das vazões pelo método volumétrico foi utilizado um reservatório com secção retangular. A área do reservatório é de  $1.08 \text{ m}^2$  e a altura da água no interior do reservatório foi medida com uma régua metálica dotada de escala milimétrica.



Figura 3.5 – Reservatório e régua graduada utilizada na calibração do hidrômetro.

Após a leitura na régua graduada (figura 3.6) que indicava o nível da água no reservatório (figura 3.5) era dada a partida na bomba centrífuga que alimentava uma canalização onde estava acoplado o hidrômetro a calibrar. Após um determinado tempo de funcionamento desligava-se a bomba centrífuga e anotava-se volume de água registrado pelo hidrômetro e a leitura do nível da água no reservatório, que servia para calcular o volume de água retirado e forçado a passar pelo hidrômetro.

O volume de água foi obtido pelo produto da área do reservatório pela diferença entre as leituras dos níveis inicial e final do reservatório.



Figura 3.6 – Régua graduada utilizada na determinação do volume.

A análise de regressão linear ( $y = a + b x$ ) entre os valores de vazão obtidos com o hidrômetro ( $x$ ) e os valores de vazão obtidos pela aplicação do método volumétrico ( $y$ ) possibilitou obter o modelo que permite a conversão dos valores das vazões obtidos pelo hidrômetro e estabelecer o grau de precisão do processo de obtenção das vazões pelo hidrômetro, quando comparado com o volumétrico.

### 3.5 Perda de carga devido ao hidrômetro

Foram realizados ensaios de perda de carga total (principal + secundárias) em função da vazão na estrutura do medidor, sem e com a presença do hidrômetro.

Esses ensaios tiveram o objetivo de determinar o coeficiente  $K_h$  do hidrômetro inserido na estrutura do medidor.



Figura 3.6 – Montagem para a determinação da perda de carga da estrutura sem hidrômetro e com hidrômetro.

A perda de carga secundária ou localizada referente ao hidrômetro foi obtida pela diferença entre a perda de carga total da estrutura com o hidrômetro inserido e

a perda de carga total da estrutura sem o hidrômetro inserido, considerando as mesmas vazões, através da expressão:

$$\Delta h_h = \Delta h_{ch} - \Delta h_{sh} \quad [4.3]$$

sendo  $\Delta h_h$  é a perda de carga referente ao hidrômetro (m),  $\Delta h_{ch}$  é a perda de carga com hidrômetro (m) e  $\Delta h_{sh}$  é a perda de carga sem o hidrômetro (m).

### 3.6 Coeficiente de perda de carga do hidrômetro

O coeficiente de perda de carga secundária (ou localizada) do hidrômetro foi determinado a partir da fórmula:

$$\Delta h_h = 0.0826 \cdot K_h \frac{Q^2}{D^4} = K_h \frac{V^2}{2g} \quad [4.4]$$

sendo  $\Delta h_h$  a perda de carga (m) devido ao hidrômetro,  $K_h$  o coeficiente de perda de carga localizada do hidrômetro,  $Q$  ( $m^3/s$ ) a vazão e  $D$  o diâmetro interno do cano (m).

### 3.7 Perda de carga secundária das peças da estrutura do medidor

Para determinar o coeficiente de perda de carga  $K_p$  das peças da estrutura do medidor foram realizados ensaios de perda de carga total da estrutura com e sem a presença do hidrômetro.

A perda de carga total foi determinada com um medidor de pressão diferencial e a vazão  $Q$  foi determinada com um hidrômetro calibrado.

A perda de carga secundária das peças do medidor foi obtida pela diferença entre a perda de carga total e a perda de carga no hidrômetro, considerando as mesmas vazões, através da expressão:

$$\Delta h_p = \Delta h_t - \Delta h_h \quad [4.5]$$

onde  $\Delta h_p$  é a perda de carga (m) das peças do medidor,  $\Delta h_t$  é a perda de carga (m) total e  $\Delta h_h$  é a perda de carga (m) no hidrômetro.



Figura 3.8 – Montagem para a determinação da perda de carga das peças da estrutura do medidor.

### 3.8 Modelagem do medidor de vazão proporcional

A modelagem matemática do escoamento da água no medidor proposto foi desenvolvida para o caso da tubulação principal apresentar singularidade.

A modelagem do medidor de vazão inserido em uma tubulação, cujo esquema é mostrado na Figura 3.9, obedece a dois equacionamentos básicos: a equação da continuidade e a equação da perda de carga total (principal e secundária) que ocorre nos escoamentos.

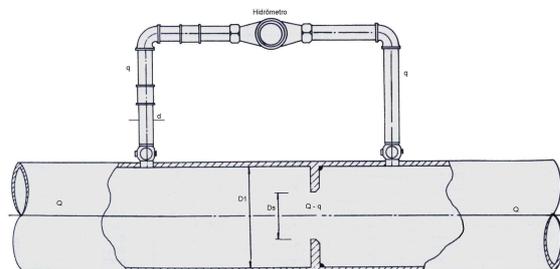


Figura 3.9 – Medidor inserido em tubulação com singularidade

A perda de carga localizada ou secundária que ocorre no trecho onde está inserida a singularidade pode ser expressa por:

$$\Delta h = 0,0826 Kr \frac{(Q - q)^2}{D^4} \quad [4.6]$$

sendo  $\Delta h$  é perda de carga entre os pontos 1 e 2 mostrados no esquema,  $Kr$  o coeficiente de perda de carga próprio da singularidade,  $D$  o diâmetro da singularidade,  $q$  a vazão que ocorre no medidor e  $Q$  a vazão a ser determinada.

A perda de carga total que ocorre no trecho onde está inserido o medidor pode ser expressa por:

$$\Delta h = 0,0826 \frac{q^2}{d^4} \left( \frac{f_m L_m}{d} + \sum K_p + K_h \right) \quad [4.7]$$

sendo  $\Delta h$  é perda de carga total entre os pontos 1 e 2 mostrados na figura 3.9,  $f_m$  o coeficiente de atrito na canalização,  $d$  o diâmetro da tubulação,  $q$  a vazão que ocorre no medidor,  $L_m$  o comprimento da tubulação do medidor,  $\sum K_p$  o somatório dos coeficientes das peças do medidor e  $K_h$  o coeficiente de perda de carga do medidor.

Sendo as perdas de carga iguais nos dois trechos da tubulação (pontos 1 e 2), pode-se escrever que:

$$0,0826 \frac{q^2}{d^4} \left( \frac{f_m L_m}{d} + \sum K_m + K_h \right) = 0,0826 Kr \frac{(Q - q)^2}{D^4} \quad [4.8]$$

Após manipulações algébricas da expressão acima podemos deduzir o modelo matemático

$$\frac{Q}{q} = 1 + \left( \frac{D}{d} \right)^2 \sqrt{\frac{f_m \frac{L_m}{d} + \sum k_p + K_h}{Kr}} \quad [4.9]$$

que permite a determinação da vazão  $Q$  a ser medida em função da vazão  $q$  verificada no medidor proporcional.

Neste estudo, a equação anterior foi expressa de uma maneira equivalente por:

$$\frac{Q}{q} = 1 + \left(\frac{D}{d}\right)^2 f(q) \quad [4.10]$$

que representa uma função geral do medidor proporcional, admitindo-se que o radicando é uma função de  $q$ .

A formulação difere de outras encontradas na literatura que consideram um valor constante para a função  $q$  em medidores do tipo proporcional.

### 3.9 Aplicação do medidor no campo

A aplicação do medidor do tipo proporcional foi feita em uma instalação de bombeamento de água que abastece um sistema de irrigação do tipo pivô central, a fim de se obter dados que serviram para análise do desempenho do medidor na estimativa da vazão da água.

#### 3.9.1 Estação de bombeamento utilizada

A estação de bombeamento utilizada, do tipo afogada, é composta de uma tubulação de aço com 300 mm de diâmetro, uma bomba centrífuga marca IMBIL, modelo INI 150-400, entrada de 200mm e saída de 150mm, acionada por um motor WEG de 150 cv, 4 pólos, alimentado por uma rede de tensão 380V e 60 Hz e uma tubulação de aço com 250 mm de diâmetro, que desempenha a função de adutora de água a um pivô central.

A ligação da saída da bomba centrífuga à adutora é feita por um registro de gaveta de 150 mm de diâmetro e uma ampliação gradual de 150 para 250 mm.

A estação de bombeamento mostrando os principais componentes pode ser observada na Figura 3.10.



Figura 3.10 - Vista do conjunto motor e bomba utilizado no experimento.

### 3.9.1.1 Relação da altura manométrica e vazão da bomba centrífuga

Os valores da altura manométrica em função da vazão foram obtidos no catálogo do fabricante da bomba centrífuga (IMBIL, s.d.d) utilizada para alimentar a adutora do sistema de irrigação. Essa relação foi utilizada para determinar a vazão do sistema de bombeamento em função da altura manométrica calculada através da leitura dos manômetros instalados na entrada e na saída.

A altura manométrica em função da vazão foi representada, algebricamente, para a rotação de 1790 rpm, pela equação:

$$H_m = A + BQ + CQ^2 \quad [4.11]$$

onde  $H_m$  é a altura manométrica (m),  $Q$  a vazão da bomba centrífuga ( $m^3/h$ ) e  $A$ ,  $B$  e  $C$  são coeficientes determinados pela técnica dos quadrados mínimos.

A altura manométrica de uma instalação de bombeamento existente foi calculada pela expressão:

$$H_m = \left( Z_s + \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} \right) - \left( Z_e + \frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} \right) \quad [4.12]$$

na qual  $Z_s$  é a altura do centro do manômetro na saída da bomba (m) ,  $P_s$  a pressão lida no manômetro na saída da bomba ( $N/m^2$ ),  $V_s$  a velocidade da água na saída da bomba (m/s),  $Z_e$  a altura do centro do manômetro na entrada da bomba (m) ,  $P_e$  a pressão lida no manômetro na entrada da bomba ( $N/m^2$ ),  $V_e$  a velocidade da água na entrada da bomba (m/s),  $\gamma$  o peso específico da água ( $9810 N/m^3$ ) e  $g$  aceleração da gravidade ( $9.8 m/s$ ).

### 3.9.1.2 Relação da potência necessária no eixo e vazão da bomba centrífuga

Os valores da potência necessária no eixo da bomba centrífuga em função da vazão foram obtidos no catálogo do fabricante da bomba centrífuga (IMBIL, s.d.d) utilizada para alimentar a adutora do sistema de irrigação.

Essa relação foi utilizada para determinar a potência necessária no eixo da bomba centrífuga em função da vazão do sistema de bombeamento através de:

$$P_e = D + EQ + FQ^2 + GQ^3 \quad [4.13]$$

onde  $P_e$  é a potência (cv),  $Q$  a vazão da bomba centrífuga ( $m^3/h$ ) e  $D$ ,  $E$ ,  $F$  e  $G$  são coeficientes determinados pela técnica dos quadrados mínimos

### 3.9.1.3 Relação entre potência no eixo do motor e corrente elétrica

A corrente absorvida no eixo de um motor elétrico, alimentado por uma rede trifásica, foi estimada através de:

$$A = \frac{424.52 P_e}{V \cos \varphi R_m} \quad [4.14]$$

na qual  $A$  é a corrente elétrica retirada da rede (Ampéres),  $P_e$  a potência fornecida no eixo do motor (cv) ,  $V$  a voltagem da rede (Volts),  $\cos \varphi$  o fator de potência e  $R_m$  o rendimento do motor elétrico.

Para a estimativa da intensidade da corrente elétrica, a voltagem da rede foi medida com um voltímetro, o fator de potência e o rendimento do motor foram obtidos, por interpolação, no catálogo do fabricante do motor.

### 3.9.2 Singularidade utilizada e instalação do medidor

Uma válvula de retenção (figura 3.11) marca MB, série 334, diâmetro nominal 250 mm, dotada de um desvio (by-pass), inserida na linha da tubulação adutora foi utilizada como a singularidade para a realização dos testes no campo.



Figura 3.11 – Válvula de retenção utilizada como singularidade

O coeficiente de perda de carga adotado para a válvula de retenção foi obtido na literatura, que apresenta valores entre 0.6 e 2.3 (LENCASTRE, 1972).

O medidor em estudo foi inserido junto a válvula de retenção (figura 3.12) da adutora do sistema de bombeamento a fim de verificar o volume de água em diferentes aberturas do registro de gaveta, que permitia o estabelecimento na adutora da vazão a ser medida.



Figura 3.12 Medidor instalado na válvula de retenção da adutora de água.

### 3.10 Análise do desempenho do medidor

A avaliação do desempenho do medidor proporcional foi feita pela análise comparativa entre os valores da altura manométrica obtidos através dos valores da vazão do sistema estimados com a metodologia proposta e os valores da altura manométrica do sistema de bombeamento medidos no campo.

Também com a finalidade de avaliar o desempenho do medidor proporcional foi realizada uma análise comparativa entre os diferentes valores da corrente elétrica estimados pela metodologia proposta e os valores da corrente elétrica determinados através da medição no campo.

As alturas manométricas foram obtidas através da leitura dos manômetros inseridos nas tubulações de entrada e de saída da bomba da vazão correspondente para uma determinada rotação do rotor da bomba e os valores da corrente elétrica foram verificados com um amperímetro.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo tem a finalidade de mostrar os resultados obtidos nas diversas fases, de modo seqüencial, para comparar valores estimados pelo modelo de cálculo desenvolvido e os valores obtidos experimentalmente de modo a verificar a validade da metodologia proposta neste estudo.

### 4.1 Diâmetros dos canos

Os canos utilizados na montagem da estrutura do medidor proporcional apresentavam um diâmetro nominal ou diâmetro de referência de uma polegada e constituídos de aço galvanizado.

Os resultados das medidas do diâmetro externo, das medidas do diâmetro interno e das medidas da espessura das paredes podem se vistos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Medidas do diâmetro interno, do diâmetro externo e da espessura das paredes dos canos utilizados no medidor.

N°	Diâmetros		Espessura (mm)
	Externo (mm)	Interno (mm)	
1	33.50	28.80	4.70
2	33.50	28.90	4.60
3	33.50	28.90	4.60
4	33.50	29.00	4.50
5	33.40	28.60	4.80
6	33.50	28.70	4.80
7	33.50	28.40	5.10
8	33.50	28.30	5.20
9	33.60	28.40	5.20
10	33.50	28.50	5.00
Média	33.5	28.65	4.85
Desvio padrão	0.05	0.25	0.26

Os resultados das medidas efetuadas mostram um valor médio de 33.5 mm para o diâmetro externo, 28.65 mm para o diâmetro interno e 4.85 mm para a espessura das paredes.

Os valores obtidos para os desvios padrão e para o coeficiente de variação mostram a elevada precisão das medidas realizadas.

## 4.2 Calibração do hidrômetro

A vazão do hidrômetro a ser utilizado na estrutura do medidor foi comparada com a vazão obtida com o método volumétrico, a fim de se determinar a constante de correção das leituras obtidas no processo de medição.

Os resultados obtidos permitiram construir o gráfico da Figura 4.1, onde pode ser visto que a reta de regressão dos valores de vazão obtidas pelo método do hidrômetro com os valores de vazão obtidas com o método volumétrico parte da origem (coeficiente linear = 0) e tem uma inclinação, de aproximadamente 45°, o que indica que o valor do coeficiente angular é muito próximo de 1.

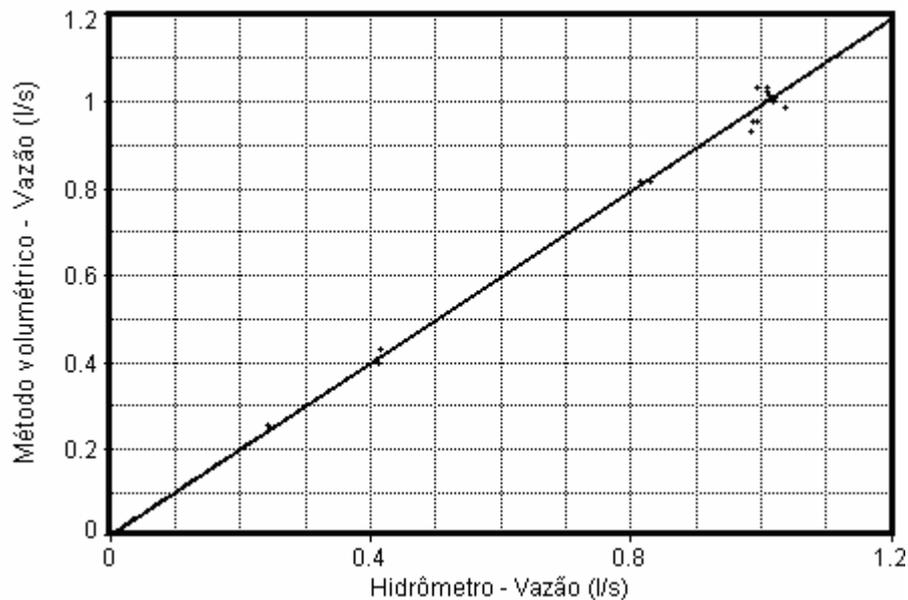


Figura 4.1 – Calibração do método do hidrômetro x método volumétrico

A análise de regressão forneceu um valor para o coeficiente angular igual a 0,9836, significando que as vazões obtidos pelo método do hidrômetro diferem em menos de 2% das vazões obtidos pelo método padrão e apresentaram um elevado coeficiente de determinação ( $r^2 = 0.9992$ ).

O elevado coeficiente de determinação  $r^2$  permite deduzir que não existe diferença significativa entre os dois métodos e que a determinação da vazão com o método do hidrômetro pode substituir a determinação da vazão através do método volumétrico (padrão).

### 4.3 Perda de carga principal na canalização de PVC

A perda de carga principal (ou por atrito)  $\Delta h_p$  na canalização de PVC em função da velocidade da água (ou da vazão) obtida em ensaio de laboratório pode ser vista na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Perda de carga linear na canalização de PVC.

$\Delta h_p$	Q	V	Rey	f	Flamant
m	m <sup>3</sup> /s	m/s			
0.3528	0.000999	1.7193	46766	0.0212	0.000126
0.3528	0.000994	1.7107	46530	0.0214	0.000127
0.3528	0.000997	1.7150	46648	0.0213	0.000126
0.3402	0.001028	1.7694	48129	0.0193	0.000115
0.3402	0.001002	1.7244	46905	0.0204	0.000121
0.3402	0.000995	1.7128	46589	0.0206	0.000122
0.3276	0.000985	1.6957	46123	0.0203	0.000120
0.3276	0.000999	1.7186	46747	0.0197	0.000117
0.3276	0.001011	1.7392	47306	0.0193	0.000114
0.3150	0.000971	1.6706	45442	0.0201	0.000118
0.3150	0.000984	1.6929	46046	0.0196	0.000115
0.3150	0.000976	1.6789	45667	0.0199	0.000117
0.2142	0.000808	1.3899	37806	0.0197	0.000111
0.2142	0.000821	1.4131	38436	0.0191	0.000108
0.2142	0.000813	1.3985	38040	0.0195	0.000110
0.1764	0.000742	1.2774	34744	0.0192	0.000106
0.1764	0.000746	1.2834	34909	0.0191	0.000105
0.1764	0.000744	1.2810	34843	0.0191	0.000105
Média					0.000116
Desvio padrão					0.000007

A Tabela 4.2 mostra, além dos valores da perda de carga principal em relação à vazão e a velocidade da água, os valores do número de Reynolds, do coeficiente de perda de carga linear f da fórmula universal de perda de carga e o coeficiente da fórmula de Flamant, por ser muito utilizada em canalizações lisas e de pequeno diâmetro.

Os valores do coeficiente b variaram entre 0.000105 e 0.000126, com um valor médio de 0.000116, bem próximo do valor  $b = 0.000120$  sugerido por vários autores, como NEVES (1974), STREETER & WYLEY(1982), AZEVEDO NETTO et al. (1998) e PORTO (1999), para este tipo de material de canalização.

#### 4.4 Perda de carga principal na canalização de aço galvanizado

A perda de carga principal (ou por atrito)  $\Delta h_p$  na canalização de aço galvanizado utilizada na estrutura do medidor em função da velocidade da água (ou da vazão) obtida em ensaio em laboratório pode ser vista na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Perda de carga linear na canalização de aço galvanizado utilizada na estrutura do medidor.

$\Delta h_p$	Q	V	Rey	f	$\epsilon$	FWH
m	m <sup>3</sup> /s	m/s			mm	
0.1232	0.001258	1.9515	55909.1	0.0395	0.31	0.0022
0.1142	0.001256	1.9490	55837.5	0.0367	0.24	0.0021
0.1201	0.001265	1.9615	56197.7	0.0382	0.27	0.0022
0.1117	0.001233	1.9122	54783.9	0.0373	0.25	0.0021
0.1069	0.001228	1.9050	54578.0	0.0360	0.22	0.0020
0.1074	0.001227	1.9026	54509.7	0.0362	0.22	0.0021
0.0906	0.001115	1.7294	49548.6	0.0370	0.24	0.0021
0.0882	0.001114	1.7275	49492.3	0.0361	0.22	0.0020
0.0919	0.001116	1.7314	49605.0	0.0374	0.25	0.0021
0.0754	0.001025	1.5901	45557.8	0.0365	0.22	0.0020
0.0760	0.001023	1.5868	45462.7	0.0369	0.24	0.0020
0.0785	0.001022	1.5852	45415.2	0.0382	0.27	0.0021
0.0447	0.000778	1.2065	34566.0	0.0375	0.24	0.0020
0.0478	0.000777	1.2046	34511.3	0.0402	0.32	0.0022
0.0434	0.000778	1.2065	34566.0	0.0364	0.21	0.0020
0.0179	0.000482	0.7478	21423.1	0.0390	0.26	0.0020
0.0181	0.000483	0.7485	21444.2	0.0396	0.27	0.0020
0.0175	0.000483	0.7485	21444.2	0.0382	0.24	0.0019
Média					0.25	0.0021
Desvio padrão					0.03	0.0001

A Tabela 4.3 mostra, além da perda de carga principal em relação as vazões, os valores da velocidade da água, os valores do número de Reynolds, os valores do coeficiente de perda de carga linear f, os valores da rugosidade absoluta e os valores do coeficiente da fórmula de Fair-Whipple-Hsiao, por ser bastante utilizada em canalizações de pequeno diâmetro e de aço galvanizado

O valor médio que a rugosidade absoluta apresenta está de acordo com os valores fornecidos pela literatura (AZEVEDO NETTO et al, 1998) e, da mesma forma, o valor médio do coeficiente FWH concorda com os valores encontrados na literatura (PORTO, 1999).

#### 4.5 Perda de carga da estrutura de medição sem e com o hidrômetro

Os ensaios realizados com a estrutura de medição sem e com o hidrômetro inserido permitiram obter os valores da perda de carga dessa estrutura em função da vazão (ou da velocidade da água), cujos resultados podem ser vistos na Tabela 4.4.

A Tabela 4.4 mostra a perda de carga da estrutura de PVC sem o hidrômetro inserido e a perda de carga da estrutura de PVC com o hidrômetro inserido em função da vazão e da velocidade da água.

Tabela 4.4 – Perda de carga da estrutura de medição sem e com o hidrômetro em função da vazão e da velocidade da água.

Perda de carga sem hidrômetro			Perda de carga com hidrômetro		
$\Delta h$	Q	V	$\Delta h$	Q	V
m	m <sup>3</sup> /s	m/s	m	m <sup>3</sup> /s	m/s
1.058	0.001233	2.12	4.10	0.000668	1.15
1.071	0.001233	2.12	4.16	0.000669	1.15
1.071	0.001234	2.12	4.22	0.000669	1.15
0.718	0.000987	1.70	1.31	0.000380	0.65
0.731	0.000989	1.70	1.27	0.000378	0.65
0.731	0.000991	1.70	1.29	0.000376	0.65
0.617	0.000915	1.58	2.46	0.000508	0.87
0.643	0.000915	1.58	2.37	0.000504	0.87
0.617	0.000918	1.58	2.42	0.000507	0.87
0.466	0.000800	1.38	0.50	0.000231	0.40
0.466	0.000798	1.37	0.52	0.000232	0.40
0.454	0.000803	1.38	0.52	0.000232	0.40
0.391	0.000689	1.19	0.23	0.000141	0.24
0.391	0.000689	1.19	0.24	0.000142	0.24
0.403	0.000691	1.19	0.24	0.000142	0.24

A perda de carga de estrutura de PVC sem hidrômetro foi obtida para um intervalo de variação de velocidade da água entre 2.12 e 1.19 m/s, diferente da perda de carga da estrutura de PVC com hidrômetro, que teve a velocidade da água variando entre 0.24 e 1.15 m/s.

Em virtude deste fato, para se obter a perda de carga ocasionado pela presença do hidrômetro foi necessário obter-se funções da perda de carga em função da velocidade da água para as duas situações experimentadas (com e sem o hidrômetro).

A Figura 4.2 mostra o comportamento da perda de carga em função da velocidade da água escoando na estrutura de medição sem o hidrômetro inserido.

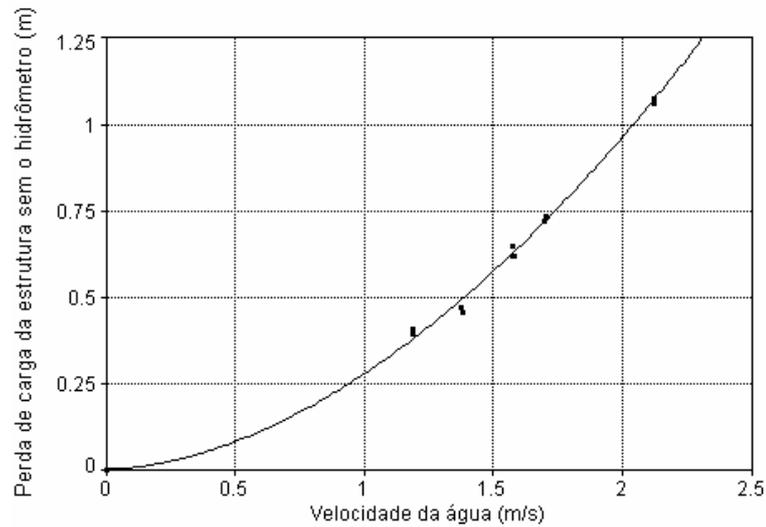


Figura 4.2 - Perda de carga da estrutura de medição – sem o hidrômetro inserido.

A relação funcional encontrada do tipo potencial é  $\Delta h_{sh} = a.V^b$ , na qual  $\Delta h_{sh}$  corresponde a perda de carga da estrutura de medição sem o hidrômetro inserido,  $V$  a velocidade da água, o valor de  $a = 0.26$  e o valor de  $b = 1.8$  sendo o coeficiente de determinação  $r^2 = 0.9986$  (99.86%).

A Figura 4.3 mostra o comportamento da perda de carga em função da velocidade da água escoando na estrutura de medição com o hidrômetro inserido.

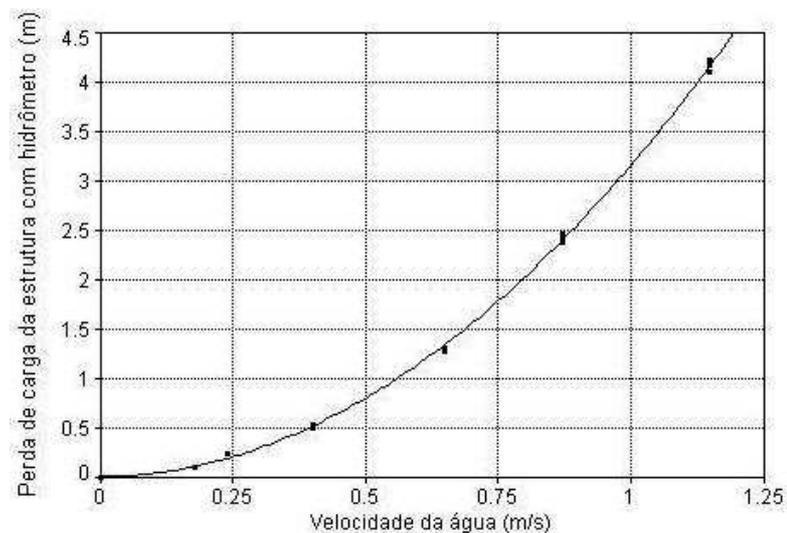


Figura 5.5 - Perda de carga da estrutura de medição – com o hidrômetro inserido.

A relação funcional encontrada do tipo potencial é  $\Delta h_{ch} = c.V^d$ , na qual  $\Delta h_{ch}$  corresponde a perda de carga da estrutura de medição com o hidrômetro inserido,  $V$  a velocidade da água, o valor de  $c = 3.36$  e o valor de  $d = 2.0$  sendo o coeficiente de determinação  $r^2 = 0.9993$  (99.93%).

#### 4.6 Perda de carga no hidrômetro

A perda de carga secundária (ou localizada) devido a presença do hidrômetro inserido no medidor foi determinada, pela diferença entre a perda de carga que ocorreria na estrutura com o hidrômetro e a perda de carga que ocorreria na estrutura sem o hidrômetro considerando a mesma velocidade da água (ou mesma vazão).

Os resultados obtidos na determinação da variação do coeficiente de perda de carga secundária ou localizada devido ao hidrômetro em função da velocidade da água podem ser vistos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Coeficiente da perda de carga do hidrômetro ( $K_h$ ) em função da velocidade da água.

V	Rey	$\Delta h_{ch}$	$\Delta h_{sh}$	$\Delta h_h$	$\Delta h / V^2$	$K_h$
m/s		m	m	m		
0.2	5440.0	0.14	0.02	0.12	3.01	59.14
0.4	10880.0	0.54	0.05	0.49	3.04	59.67
0.6	16320.0	1.21	0.11	1.10	3.05	59.93
0.8	21760.0	2.15	0.19	1.96	3.06	60.08
1.0	27200.0	3.36	0.29	3.07	3.07	60.19
1.2	32640.0	4.82	0.40	4.43	3.07	60.27
1.4	38080.0	6.56	0.52	6.03	3.08	60.33
1.6	43520.0	8.55	0.66	7.89	3.08	60.38
1.8	48960.0	10.81	0.82	9.99	3.08	60.43
2.0	54400.0	13.33	0.99	12.34	3.08	60.46
2.2	59840.0	16.12	1.18	14.94	3.08	60.49
2.4	65280.0	19.16	1.38	17.78	3.08	60.52
2.6	70720.0	22.47	1.59	20.88	3.09	60.54
2.8	76160.0	26.04	1.82	24.22	3.09	60.56
3.0	81600.0	29.87	2.06	27.81	3.09	60.57
3.2	87040.0	33.97	2.31	31.66	3.09	60.59
3.4	92480.0	38.32	2.58	35.74	3.09	60.60
3.6	97920.0	42.94	2.86	40.08	3.09	60.62
3.8	103360.0	47.82	3.15	44.67	3.09	60.63
4.0	108800.0	52.96	3.46	49.50	3.09	60.64
Média					3.08	60.33
D. padrão					0.02	0.38

A primeira coluna da Tabela 4.5 mostra os valores da velocidade da água, a segunda o número de Reynolds, a terceira a perda de carga da estrutura do medidor completa (com o hidrômetro), a quarta a perda de carga da estrutura do medidor sem o hidrômetro, a quinta a perda de carga devido ao hidrômetro, a sexta a relação entre a perda de carga devido ao hidrômetro e o quadrado da velocidade da água e a última coluna os valores do coeficiente de perda de carga localizada devido ao hidrômetro ( $K_h$ ).

Como pode ser visto na Tabela 4.5, os valores do coeficiente de perda de carga no hidrômetro  $K_h$  variam com a velocidade da água (com a vazão ou com o número de Reynolds), mas tendem a um valor constante conforme aumenta a velocidade da água.

O valor médio do coeficiente de perda de carga secundária no hidrômetro variou entre 59.14 e 60.64, sendo o valor médio igual a 60.33 e o seu desvio padrão é de 0.38, o que indica uma pequena variabilidade dos valores de  $K_h$  em função da variação da velocidade da água (0.2 a 4 m/s).

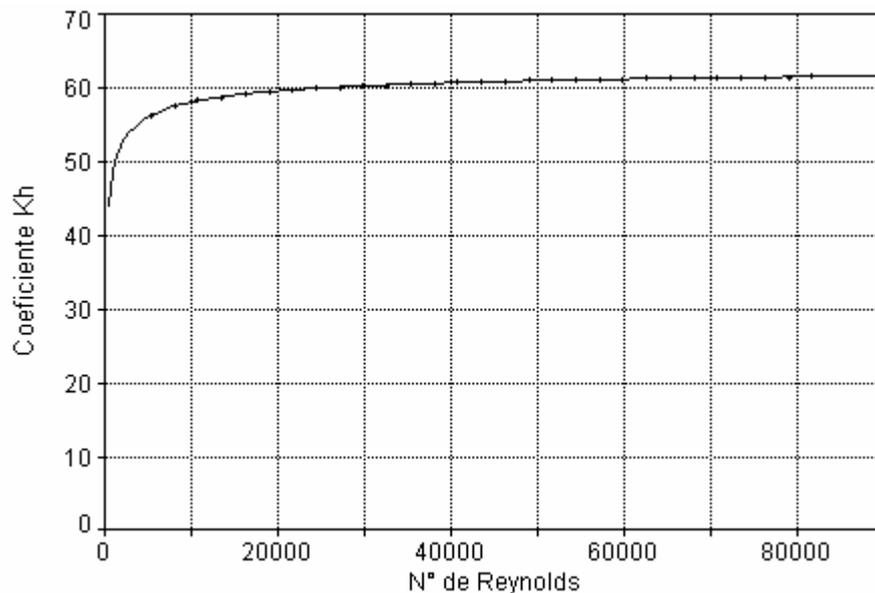


Figura 4.4 – Variação do coeficiente de perda de carga do hidrômetro ( $K_h$ ) em função do número de Reynolds.

A análise visual do gráfico da Figura 4.4 evidencia que o coeficiente de perda de carga do hidrômetro  $K_h$  em função do número de Reynolds é praticamente constante para valores superiores a 50000, o que está de acordo com o afirmado por AZEVEDO NETTO et al. (1998).

## 4.7 Perda de carga nas peças da estrutura do medidor

### 4.7.1 Perda de carga no medidor

A perda de carga do medidor foi obtida através de ensaios com a estrutura montada no laboratório. Esta foi inserida em um trecho de canalização de PVC onde estavam as tomadas de pressão, o que foi devidamente descontado.

Os resultados obtidos na determinação da perda de carga do medidor mais os trechos de PVC em função da velocidade da água (ou da vazão) podem ser vistos na Tabela 4.6. A primeira coluna mostra os valores da perda de carga, a segunda os valores da vazão, a terceira a velocidade da água nos trechos de PVC, a quarta o número de Reynolds, a quinta o coeficiente de perda de carga, a sexta os valores da perda de carga devido aos trechos de PVC e a sétima coluna a perda de carga devido ao medidor.

Tabela 4.6 – Perda de carga no medidor de aço galvanizado ( $\Delta h$  medidor) em função da vazão ou da velocidade da água.

$\Delta h$ mca	Q m <sup>3</sup> /s	V pvc m/s	Rey	f	$\Delta h$ pvc mca	$\Delta h$ medidor mca
3.9060	0.000619	1.0654	28979.2	0.0291	0.0458	3.8602
3.9060	0.000617	1.0621	28888.0	0.0291	0.0455	3.8605
3.9060	0.000616	1.0607	28851.6	0.0291	0.0454	3.8606
3.1500	0.000558	0.9604	26124.2	0.0294	0.0377	3.1123
3.1500	0.000559	0.9621	26168.9	0.0294	0.0378	3.1122
3.1500	0.000558	0.9610	26139.1	0.0294	0.0377	3.1123
2.3940	0.000483	0.8320	22631.5	0.0300	0.0288	2.3652
2.3940	0.000483	0.8308	22598.1	0.0300	0.0287	2.3653
2.3940	0.000483	0.8320	22631.5	0.0300	0.0288	2.3652
1.7640	0.000406	0.6995	19027.0	0.0307	0.0209	1.7431
1.7640	0.000405	0.6972	18964.1	0.0308	0.0207	1.7433
1.7640	0.000405	0.6978	18979.8	0.0308	0.0208	1.7432
0.7560	0.000251	0.4320	11750.5	0.0333	0.0086	0.7474
0.7560	0.000251	0.4319	11747.5	0.0333	0.0086	0.7474
0.7560	0.000251	0.4320	11750.5	0.0333	0.0086	0.7474
0.0630	0.000064	0.1101	2995.8	0.0453	0.0008	0.0622
0.0630	0.000064	0.1101	2996.0	0.0453	0.0008	0.0622
0.0630	0.000064	0.1101	2995.8	0.0453	0.0008	0.0622

Os valores da perda de carga do medidor aumentaram, como era esperado, com o aumento da velocidade da água (ou da vazão).

#### 4.7.2 Perda de carga devido às peças especiais do medidor

A perda de carga devido às peças do medidor foi feita através da diferença da perda de carga observada para o medidor descontando-se a perda de carga que ocorre no hidrômetro, ou seja, a perda de carga do medidor sem o hidrômetro.

Os resultados obtidos na determinação da perda de carga das peças que compõem o medidor em função da velocidade da água (ou da vazão) podem ser vistos na Tabela 4.7.

A primeira coluna da Tabela 4.7 mostra os valores da perda de carga no medidor, a segunda os valores da vazão, a terceira a velocidade da água, a quarta o número de Reynolds, a quinta a perda de carga devido ao hidrômetro, a sexta a perda de carga devida ao trecho de cano de aço galvanizado e a última a perda de carga devido as peças que compõem a estrutura do medidor.

Tabela 4.7 – Perda de carga nas peças do medidor de aço galvanizado ( $\Delta h$  peças) em função da vazão ou da velocidade da água.

$\Delta h$ medidor	Q	V	Rey	$\Delta h$ Hidro	$\Delta h$ cano	$\Delta h$ Peças
m	m <sup>3</sup> /s	m/s		m	m	m
3.8602	0.000619	0.9603	27512.5	2.8568	0.0452	0.9583
3.8605	0.000617	0.9573	27425.9	2.8387	0.0449	0.9769
3.8606	0.000616	0.9561	27391.4	2.8315	0.0448	0.9844
3.1123	0.000558	0.8657	24802.0	2.3175	0.0371	0.7578
3.1122	0.000559	0.8672	24844.5	2.3255	0.0372	0.7495
3.1123	0.000558	0.8662	24816.2	2.3202	0.0371	0.7551
2.3652	0.000483	0.7500	21486.1	1.7349	0.0282	0.6021
2.3653	0.000483	0.7488	21454.4	1.7297	0.0281	0.6075
2.3652	0.000483	0.7500	21486.1	1.7349	0.0282	0.6021
1.7431	0.000406	0.6305	18064.0	1.2224	0.0203	0.5004
1.7433	0.000405	0.6284	18004.3	1.2142	0.0202	0.5088
1.7432	0.000405	0.6289	18019.2	1.2163	0.0202	0.5068
0.7474	0.000251	0.3894	11155.8	0.4618	0.0083	0.2773
0.7474	0.000251	0.3893	11153.0	0.4616	0.0083	0.2775
0.7474	0.000251	0.3894	11155.8	0.4618	0.0083	0.2773
0.0622	0.000064	0.0993	2844.1	0.0290	0.0007	0.0325
0.0622	0.000064	0.0993	2844.3	0.0290	0.0007	0.0325
0.0622	0.000064	0.0993	2844.1	0.0290	0.0007	0.0325

Os valores da perda de carga das peças foram obtidas por diferença entre os valores da perda de carga do medidor e os valores das perdas de carga do

hidrômetro e do cano de aço. A perda de carga nas peças aumentam a medida que aumentam os valores da velocidade (ou da vazão).

#### 4.8 Modelagem do medidor de vazão proporcional

A modelagem do medidor consiste em verificar a amplitude e a forma de variação dos componentes da estrutura do medidor, sendo o modelo matemático do medidor expresso pela equação:

$$\frac{Q}{q} = 1 + \left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{1}{\sqrt{Kr}} \sqrt{K_1 + K_2 + K_3} \quad [5.1]$$

onde os valores de  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são os coeficientes da estrutura a serem modelados.

##### 4.8.1 Coeficientes $K_1$ , $K_2$ e $K_3$

A Tabela 4.8 mostra a variação da perda de carga na canalização, da perda de carga nas peças especiais e no hidrômetro do medidor de aço galvanizado em função da vazão bem como os respectivos coeficientes ( $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ).

Tabela 4.8 – Variação dos coeficientes de perda de carga na canalização ( $K_1$ ), nas peças ( $\sum K_p$ ) e no hidrômetro ( $k_h$ ) em função da vazão ou da velocidade da água.

Q	V	$\Delta h$ cano	$\Delta h$ Peças	$\Delta h$ Hidro	$K_1 = f_m \text{ Lm/d}$	$K_2 = \sum K_p$	$K_3 = K_h$
$\text{m}^3/\text{s}$	$\text{m/s}$	m	m	m			
0.000619	0.9603	0.0452	0.9583	2.8568	0.96	20.39	60.78
0.000617	0.9573	0.0449	0.9769	2.8387	0.96	20.92	60.78
0.000616	0.9561	0.0448	0.9844	2.8315	0.96	21.13	60.78
0.000558	0.8657	0.0371	0.7578	2.3175	0.97	19.84	60.67
0.000559	0.8672	0.0372	0.7495	2.3255	0.97	19.56	60.67
0.000558	0.8662	0.0371	0.7551	2.3202	0.97	19.74	60.67
0.000483	0.7500	0.0282	0.6021	1.7349	0.98	21.01	60.52
0.000483	0.7488	0.0281	0.6075	1.7297	0.98	21.25	60.52
0.000483	0.7500	0.0282	0.6021	1.7349	0.98	21.01	60.52
0.000406	0.6305	0.0203	0.5004	1.2224	1.00	24.70	60.33
0.000405	0.6284	0.0202	0.5088	1.2142	1.00	25.28	60.33
0.000405	0.6289	0.0202	0.5068	1.2163	1.00	25.13	60.33
0.000251	0.3894	0.0083	0.2773	0.4618	1.07	35.88	59.76
0.000251	0.3893	0.0083	0.2775	0.4616	1.07	35.93	59.76
0.000251	0.3894	0.0083	0.2773	0.4618	1.07	35.88	59.76

Q	V	$\Delta h$ cano	$\Delta h$ Peças	$\Delta h$ Hidro	$K_1 = f_m Lm/d$	$K_2 = \sum K_p$	$K_3 = K_h$
$m^3/s$	m/s	m	m	m			
0.000064	0.0993	0.0007	0.0325	0.0290	1.42	64.66	57.83
0.000064	0.0993	0.0007	0.0325	0.0290	1.42	64.65	57.83
0.000064	0.0993	0.0007	0.0325	0.0290	1.42	64.66	57.83
Média					1.07	31.20	59.98
D. padrão					0.16	16.39	1.05

Os valores dos coeficientes  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  da estrutura do medidor foram obtidos multiplicando-se, respectivamente, a perda de carga linear devido à canalização ( $\Delta h$  cano), a perda de carga secundária devido às peças ( $\Delta h$  peças), a perda de carga secundária devido ao hidrômetro ( $\Delta h$  hidro) por duas vezes a aceleração da gravidade ( $2g$ ) e dividindo-se pela velocidade da água ao quadrado ( $V^2$ ).

Como pode ser visto na Tabela 4.8, os valores do coeficiente  $K_1$  variaram entre 0.96 e 1.42, apresentando um valor médio de 1.07 e desvio padrão de 0.16, o que mostra uma pequena variação em relação à velocidade da água. Ainda na mesma Tabela 4.8, pode-se observar que os valores do coeficiente  $K_3$  variaram entre 57.83 e 60.78, apresentando um valor médio de 59.98 e desvio padrão de 1.05 o que mostra uma pequena variação em relação à velocidade da água.

Em virtude da pequena amplitude de variação dos valores coeficientes  $K_1$  e  $K_3$ , no presente estudo, para efeito da modelagem do medidor foram considerados constantes e iguais ao valor médio, isto é, o valor de  $K_1 = 1.07$ , que corresponde a parcela  $f_m Lm/d$  e o valor de  $K_3 = 59.98$ , que referente à perda de carga no hidrômetro.

Analisando-se os valores de  $K_2$ , na mesma Tabela 5.7, pode-se notar que os valores de  $K_2$  variam entre 19.53 e 64.66, apresentando um valor médio de 31.2 e desvio padrão de 16.39, o que mostra uma grande variação em relação à velocidade da água e não permite que possa ser admitido um valor constante e igual ao valor médio sem incorrer em perda de precisão.

#### 4.8.2 Ajustamento do coeficiente $K_2$

Em virtude do comportamento do coeficiente  $K_2$  foi feita uma tentativa de modelar a sua alta variação (desvio padrão elevado) em função da velocidade da água.

A Tabela 4.9 mostra, na quarta coluna os valores do coeficiente  $K_2$  em função da velocidade da água e na quinta coluna os valores do coeficiente  $K_2$  divididos pela raiz quadrada da velocidade da água.

Como pode ser visto na Tabela 4.9, os valores de  $K_2/V^{0.5}$  variam entre 18.43 e 22.42, apresentando um valor médio de 19.93 e um desvio padrão de 1.45, o que permite deduzir que o coeficiente  $K_2$  pode ser colocado em função da velocidade da água, sob a forma:

$$K_2 = \frac{19.93}{V^{0.5}} \quad [5.2]$$

onde  $V$  é a velocidade da água em m/s (metros por segundo).

Tabela 4.9 – Modelagem do coeficiente de perda de carga nas peças ( $\sum K_p$ ) em função da vazão ou da velocidade da água.

Q	V	$\Delta h$ Peças	$K_2 = \sum K_p$	$K_2 / V^{0.5}$	$\Delta h'$ Peças	Diferença
m <sup>3</sup> /s	m/s	m			m	%
0.000619	0.9603	0.9583	20.39	19.98	0.9559	0.2
0.000617	0.9573	0.9769	20.92	20.47	0.9514	2.7
0.000616	0.9561	0.9844	21.13	20.66	0.9496	3.7
0.000558	0.8657	0.7578	19.84	18.46	0.8182	-7.4
0.000559	0.8672	0.7495	19.56	18.21	0.8203	-8.6
0.000558	0.8662	0.7551	19.74	18.38	0.8189	-7.8
0.000483	0.7500	0.6021	21.01	18.19	0.6597	-8.7
0.000483	0.7488	0.6075	21.25	18.39	0.6583	-7.7
0.000483	0.7500	0.6021	21.01	18.19	0.6597	-8.7
0.000406	0.6305	0.5004	24.70	19.61	0.5086	-1.6
0.000405	0.6284	0.5088	25.28	20.04	0.5060	0.6
0.000405	0.6289	0.5068	25.13	19.93	0.5067	0.0
0.000251	0.3894	0.2773	35.88	22.39	0.2468	12.3
0.000251	0.3893	0.2775	35.93	22.42	0.2467	12.5
0.000251	0.3894	0.2773	35.88	22.39	0.2468	12.3
0.000064	0.0993	0.0325	64.66	20.37	0.0318	2.2
0.000064	0.0993	0.0325	64.65	20.37	0.0318	2.2
0.000064	0.0993	0.0325	64.66	20.37	0.0318	2.2
Média				19.93		
D. padrão				1.45		

A sexta coluna da Tabela 4.9 foi calculada com a equação 5.2 utilizando-se as velocidades da água (segunda coluna). Uma comparação entre os valores da perda de carga obtidas experimentalmente e os valores da perda de carga estimados com o auxílio da expressão obtida para o coeficiente  $K_2$  pode ser vista na última coluna

da Tabela 4.9 demonstrando que a diferença entre os valores experimentais e estimados variaram entre 0 e -12.5%.

#### 4.8.3 Coeficiente da singularidade Kr

Uma válvula de retenção inserida na tubulação de aço que alimenta um sistema de irrigação do tipo pivô central foi utilizada como singularidade, cuja equação da vazão em função da perda de carga foi representada por:

$$\Delta h = 0,0826 Kr \frac{Q'^2}{D^4} \quad [5.3]$$

sendo a vazão que circula através da singularidade  $Q' = Q - q$ , D o diâmetro da singularidade (D = 259.6 mm), Kr, o coeficiente de perda de carga da singularidade e  $\Delta h$  a perda de carga da singularidade.

O valor do coeficiente de perda de carga, segundo a literatura, varia entre 0.3 a 2.6 (LENCASTRE,1972) ou assumir uma valor constante igual a 2.5 segundo outros autores (AZEVEDO NETTO et al., 1998).

#### 4.8.4 Modelo matemático do medidor proporcional

A substituição dos valores dos coeficientes de perda de carga ( $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$ ) obtidos neste estudo permitem obter o modelo matemático do medidor proporcional representado pela equação:

$$\frac{Q}{q} = 1 + \frac{82.1}{\sqrt{Kr}} \sqrt{1.07 + \frac{19.93}{V^{0.5}} + 60.16} \quad [5.4]$$

que se transforma em:

$$Q = q \left( 1 + \frac{82.1}{\sqrt{Kr}} \sqrt{61.23 + \frac{30.36}{q^{0.5}}} \right) \quad [5.5]$$

sendo os valores das vazões  $Q$  e  $q$ , expressos em  $m^3/h$  (metros cúbicos por hora).

#### 4.9 Curva característica da bomba centrífuga

Dentre as curvas características da bomba centrífuga foi determinada a curva da altura manométrica em função da vazão e a potência necessária no eixo em função da vazão.

##### 4.9.1 Altura manométrica em função da vazão

Os valores da altura manométrica em função da vazão foram obtidos no catálogo do fabricante da bomba centrífuga utilizada para alimentar a adutora do sistema de irrigação.

A Figura 4.5 mostra a relação entre a altura manométrica e a vazão, para a rotação de 1790 rpm da bomba centrífuga (marca Imbil, modelo INI 150-400).

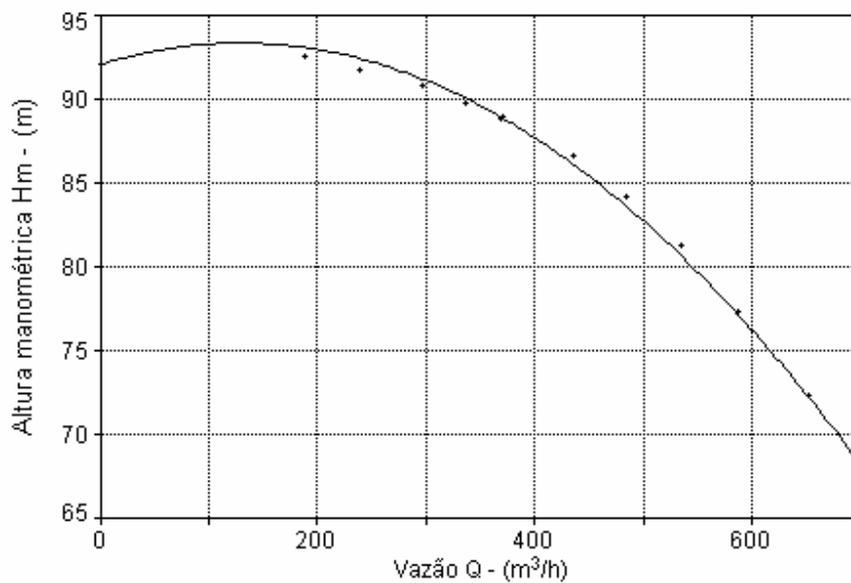


Figura 4.5 – Altura manométrica x vazão da bomba centrífuga

A altura manométrica em função da vazão foi representada, algebricamente, para a rotação de 1790 rpm, pela equação:

$$Hm = A + BQ + CQ^2 \quad [5.6]$$

onde  $H_m$  é a altura manométrica (m),  $Q$  a vazão da bomba centrífuga ( $m^3/h$ ) e  $A$ ,  $B$  e  $C$  são coeficientes determinados pela técnica dos quadrados mínimos.

Para o modelo de bomba centrífuga utilizado neste trabalho, o valor do coeficiente  $A$  é igual a 92, o valor do coeficiente  $B$  igual a 0.01958 e o valor do coeficiente  $C$  igual a - 0.00007686 e o coeficiente de determinação  $r^2 = 0.9972$  (99.72%). O valor do  $r^2$ , sendo bastante elevado, significa um forte ajuste entre os valores do fabricante e a equação proposta para modelar a relação entre altura manométrica e vazão da bomba.

#### 4.9.2 Potência necessária em função da vazão

Os valores da potência necessária no eixo em função da vazão foram obtidos no catálogo do fabricante da bomba centrífuga utilizada para alimentar a adutora do sistema de irrigação.

A Figura 4.6 mostra a relação entre a potência necessária no eixo da máquina e a respectiva vazão, para a rotação de 1790 rpm da bomba centrífuga (marca Imbil, modelo INI 150-400).

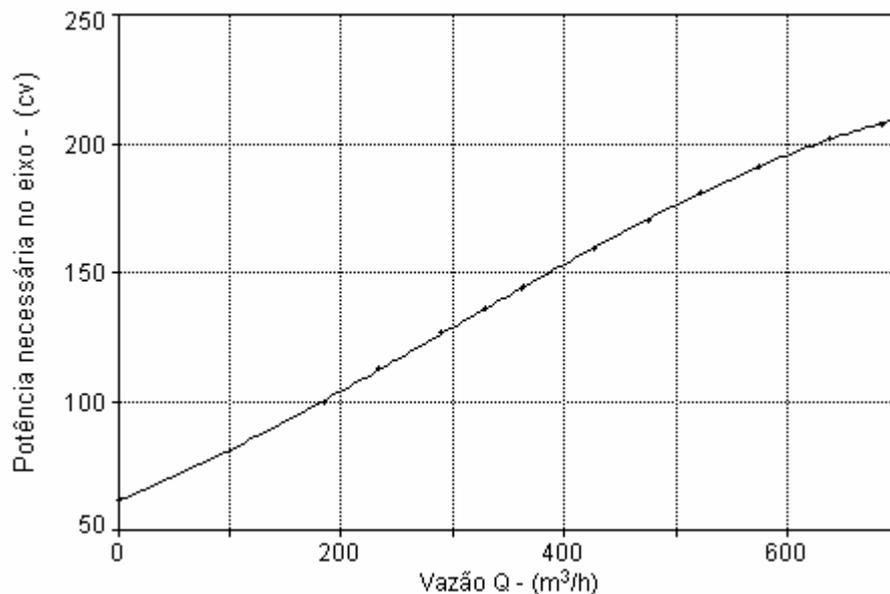


Figura 4.6 – Potência no eixo x vazão da bomba centrífuga

A potência no eixo em função da vazão foi representada, algebricamente, para a rotação de 1790 rpm, pela equação:

$$P = D + EQ + FQ^2 + GQ^3 \quad [5.7]$$

onde P é a potência (m), Q a vazão da bomba centrífuga (m<sup>3</sup>/h) e D, E, F e G são coeficientes determinados pela técnica dos quadrados mínimos.

Para o modelo de bomba centrífuga utilizado neste trabalho, o valor do coeficiente D é igual a 61, o valor do coeficiente E igual a 0.21773, o valor do coeficiente F igual a 0.0001906 e o valor do coeficiente G igual a - 0.000000236778 e o coeficiente de determinação  $r^2 = 0.9999$  (99.99%). O elevado valor do  $r^2$  demonstra uma forte relação entre os valores do fabricante e a equação proposta para modelar a potência em função da vazão da bomba centrífuga

#### 4.10 Verificação do desempenho do medidor proporcional no campo

A Tabela 4.10 mostra os resultados obtidos experimentalmente com o medidor proporcional, os valores da altura manométrica, a relação entre as vazões da adutora (ou da bomba), os valores do coeficiente de proporcionalidade entre as vazões, o valor do coeficiente de proporcionalidade médio ( $C_m$ ) e os desvios entre os valores do coeficiente variável e o valor do coeficiente médio.

Tabela 4.10 – Resultados obtidos no experimento no campo com o medidor proporcional e da relação entre as vazões Q e q.

Ensaio	Medidor proporcional			Bomba - Adutora		Q/q	$C_m$	$\Delta$
	Tempo	Volume	q	Hm	Q			
	s	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /h	m	m <sup>3</sup> /h			
1	622.8	0.0420	0.2428	91.4	284.2	1170.5	1140.4	2.64
2	622.9	0.0420	0.2427	91.4	284.1	1170.5	1140.4	2.64
3	622.8	0.0420	0.2428	91.4	284.2	1170.5	1140.4	2.64
4	193.4	0.0150	0.2792	90.4	321.2	1150.3	1140.4	0.87
5	192.9	0.0150	0.2799	90.4	321.9	1150.0	1140.4	0.84
6	193.0	0.0150	0.2798	90.4	321.8	1150.0	1140.4	0.85
7	196.4	0.0160	0.2933	90.0	335.4	1143.5	1140.4	0.27
8	183.4	0.0150	0.2944	89.9	336.5	1143.0	1140.4	0.22
9	183.5	0.0150	0.2943	89.9	336.4	1143.0	1140.4	0.23
10	188.8	0.0160	0.3051	89.6	347.2	1138.1	1140.4	- 0.20
11	188.4	0.0160	0.3057	89.5	347.9	1137.8	1140.4	- 0.23
12	189.8	0.0160	0.3035	89.6	345.6	1138.8	1140.4	- 0.14
13	318.0	0.0290	0.3283	88.7	370.4	1128.3	1140.4	- 1.06

Ensaio	Medidor proporcional			Bomba - Adutora		Q/q	C <sub>m</sub>	Δ
	Tempo	Volume	q	Hm	Q			
	s	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /h	m	m <sup>3</sup> /h			
14	592.4	0.0540	0.3282	88.8	370.3	1128.3	1140.4	- 1.06
15	592.4	0.0540	0.3282	88.8	370.3	1128.3	1140.4	- 1.06

Os valores da vazão na adutora do sistema de irrigação foram determinadas através da equação 5.6, que estabelece a relação entre a altura manométrica e a vazão da bomba centrífuga. Os valores da vazão na adutora (ou da bomba centrífuga) variaram entre 284.2 e 370.3 m<sup>3</sup>/h correspondendo a valores da altura manométrica entre 88.8 e 91.4 m.

Ainda pode ser observado na Tabela 4.10, que os valores do coeficiente de proporcionalidade do medidor variaram entre 1128.3 e 1170.4 na faixa de vazão entre 0.2428 e 0.3282 m<sup>3</sup>/h obtidas nos ensaios realizados no campo.

O coeficiente de proporcionalidade do medidor obtido por análise de regressão entre os valores de Q e q, mostrado na Figura 5.9 apresentou um valor igual a 1140.4, um desvio padrão de 5.2 e um coeficiente de determinação de 0.9996 (99.96%).

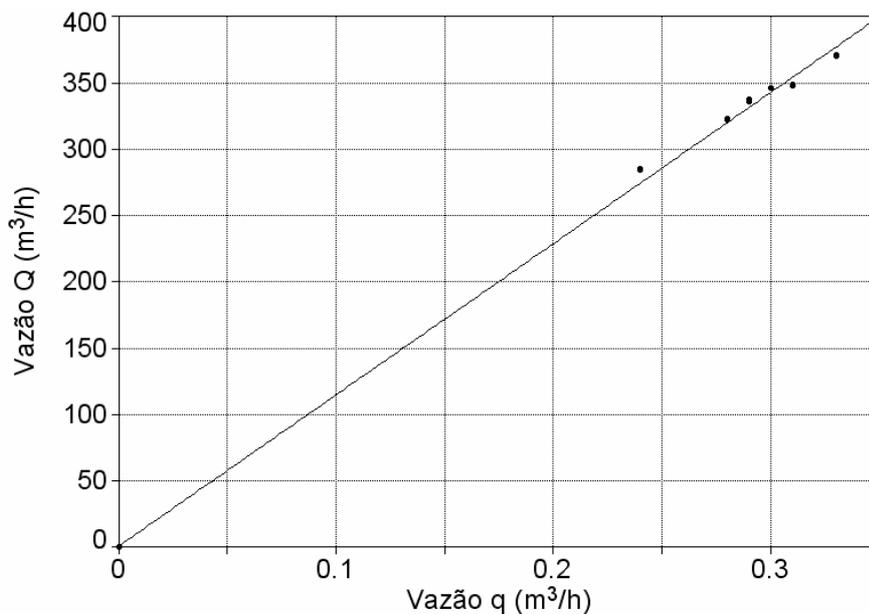


Figura 4.7 – Relação entre a da vazão da adutora e a vazão no medidor

Os desvios entre os valores do coeficiente de proporcionalidade de cada determinação em relação ao valor médio do coeficiente de proporcionalidade variaram entre -0.23 e 2.64%, o que demonstra a precisão do medidor quando utilizado na faixa de vazões apresentadas na tabela anterior.

A Tabela 4.11 apresenta, para rotação da bomba, os valores da vazão  $q$  observados no medidor proporcional, os valores da altura manométrica obtidos a partir da leitura dos manômetros instalados na entrada e na saída da bomba e os valores da intensidade da corrente elétrica.

Tabela 4.11 – Valores médios do número de rotações da bomba centrífuga, da vazão no medidor, da vazão na adutora, da altura manométrica, da diferença entre pressão na entrada e saída da bomba e corrente elétrica medidos no campo.

Ensaio	rotação	$q$	$Q$	$H_m$	$P_s - P_e$	$A$
	rpm	$m^3/h$	$m^3/h$	m	m	amp
1	1790	0.2428	284.2	90.19	89.0	174.6
2	1790	0.2798	321.8	87.19	85.8	184.0
3	1790	0.2943	336.4	89.47	88.0	187.5
4	1790	0.3035	345.6	89.73	88.2	189.8
5	1790	0.3278	369.9	85.48	83.8	195.7
6	1790	0.3282	370.3	89.25	88.7	195.8

A Tabela 4.12 apresenta, para as mesmas rotações da bomba, os valores da vazão  $q$ , os valores da vazão  $Q$  calculadas com a equação 5.5 adotando-se um coeficiente de proporcionalidade único para as vazões ( $Q / q = C_m$ ), os valores da altura manométrica estimadas, as diferenças entre a pressão na saída e na entrada da bomba centrífuga e a intensidade da corrente elétrica.

Tabela 4.12 – Valores médios da vazão no medidor, do coeficiente do medidor, da vazão na adutora, da altura manométrica, da diferença entre pressão na entrada e saída da bomba e corrente elétrica, obtidos a partir da leitura do medidor.

Ensaio	$q$	$C_m$	$Q$	$H_m$	$P_s - P_e$	$A$
	$m^3/h$		$m^3/h$	m	m	amp
1	0.2428	1140.4	276.8	91.6	90.4	172.7
2	0.2798	1140.4	319.1	90.5	89.1	183.3
3	0.2943	1140.4	335.6	89.9	88.5	187.4
4	0.3035	1140.4	346.1	89.6	88.1	189.9
5	0.3278	1140.4	373.8	88.6	86.9	196.7
6	0.3282	1140.4	374.2	88.6	86.9	196.8

A análise estatística da regressão linear ( $Y = b X$ ) entre os valores de Hm e A obtidos nos diferentes procedimentos feito através de um modelo que permita a estabelecer a relação entre as variáveis envolvidas, pode ser vista na Tabela 5.13.

Tabela 4.13 – Valores dos coeficientes (b e  $r^2$ ), do teste t e significância estatística.

Variável	b	$r^2$	Valores de t (95%)		Obs
			$t_b$	$t_{tab}$	
Altura manométrica	0.9886	0.9999	1.44	2.78	NS
Corrente elétrica	0.9997	0.9999	0.14	2.78	NS

Os valores calculados para o teste t dos coeficientes angulares da regressão entre os valores da altura manométrica e para a corrente elétrica apresentaram valores inferiores aos obtidos em uma tabela da distribuição de Student (COSTA NETO, 1987). Desse modo, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que os resultados obtidos para a altura manométrica e para a intensidade da corrente elétrica obtidos pela metodologia proposta não diferem significativamente, ou seja, são estatisticamente iguais.

A Figura 4.8 mostra a comparação entre os valores da altura manométrica e da intensidade da corrente elétrica obtidos pela metodologia proposta e os valores da altura manométrica obtidas pela leitura dos manômetros instalados na bomba centrífuga e da intensidade da corrente elétrica obtidos com amperímetro através da análise de regressão linear.

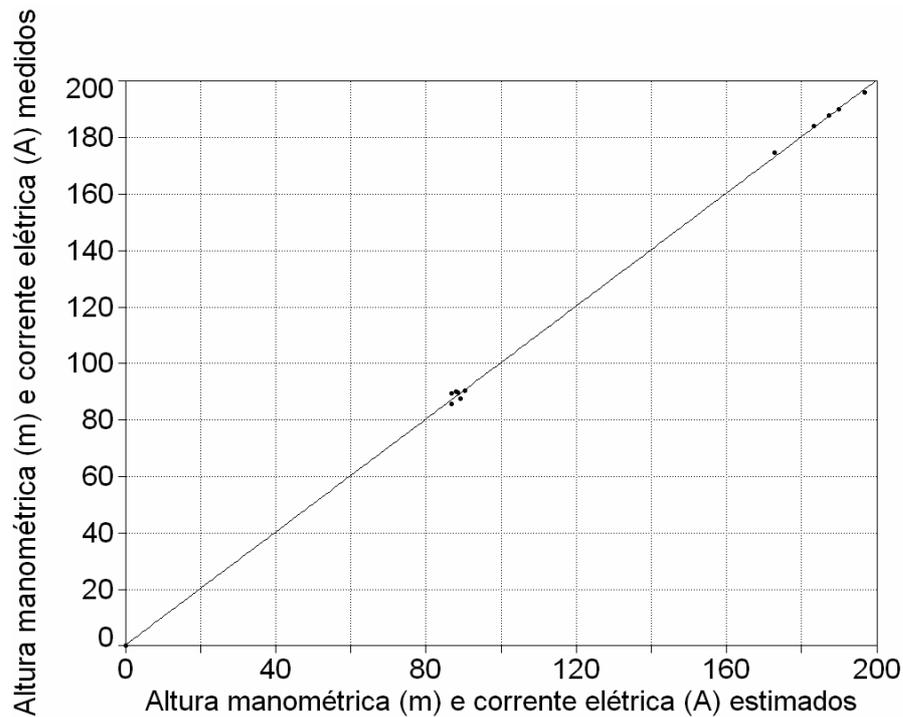


Figura 4.8 – Comparação entre os valores de altura manométrica e corrente elétrica estimados e valores observadas nos ensaios no campo.

Conforme pode ser visto na Figura 4.8, os valores da altura manométrica e da corrente elétrica estimados e os valores da altura manométrica e corrente elétrica medidos se distribuem sobre a reta que passa na origem dos eixos e forma um ângulo de  $45^\circ$  (coeficiente angular igual a 1), o que nos leva a crer que foi indiferente a aplicação de um ou outro método na obtenção das alturas manométricas correspondentes as diferentes vazões da bomba estimadas pelas leituras do medidor proporcional.

A análise dos resultados através da comparação gráfica e da análise estatística permitiram validar a metodologia proposta no presente estudo, uma vez que não apresentaram diferenças significativas, sob o ponto de vista estatístico.

## 5 CONCLUSÕES

Segundo a metodologia proposta neste estudo e os resultados obtidos foi possível concluir que:

O medidor proporcional apresenta facilidade quanto à sua construção, instalação e operação no campo, quando utilizado para a estimativa da vazão da adutora de alimentação de um sistema de irrigação do tipo pivô central.

Tais características assumem grande importância nos dias atuais tornando viável a implantação de sistemas de medição em todos os sistemas de irrigação existentes no meio rural.

Como recomendações, para futuros trabalhos da mesma natureza, pode-se destacar:

A utilização de um medidor de vazão de alta precisão na coleta de dados da tubulação de alimentação.

A utilização de um medidor proporcional com outro tipo de material para facilitar a montagem no campo.

A possibilidade de automação do processo de medição de vazão evitando a intervenção do fator humano.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. **Manual de Hidráulica**. 6. ed: Edgard Blucher. 1977, V.1, p. 1-333 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de Hidráulica**. 6 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. V.2, p. 334-663.

\_\_\_\_\_. Cálculo de tubulações sob pressão. In: **Manual de Hidráulica**. , 8. ed , São Paulo: Edgard Blucher. 1998., cap. 8, p. 141-204.

\_\_\_\_\_. Hidrometria. In: **Manual de Hidráulica**. 8. ed São Paulo: Edgard Blucher. 1998, cap. 17, p. 423-464.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. **A mecânica do Flúidos em Hidráulica**. In: Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 2. ed, Belo Horizonte: Editora da UFMG. 2003, cap. 2, p. 35-68.

\_\_\_\_\_. Escoamento em condutos forçados simples. In: **Fundamentos de Engenharia Hidráulica** 2. ed, Belo Horizonte: Editora da UFMG. 2003, cap. 3, p. 67-98.

BERTULANI, C. **Ensino de Física a Distância: Hidrostática**. Capturado em 17 de set. de 2006. On-line. Disponível na Internet <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/hidrostatica/pressao.html>.

COELHO, A. C.; PINHO, J. H. Macromedição – Medidor de Derivação. Uma solução prática para sistemas de médio e pequeno porte. **Revista DAE**, n. 122, p. 64 – 68, 1979.

COSTA NETO, P. L. de O. **Estatística**. 7. ed. São Paulo : Edgard Blücher, 1987. 263p.

DAKER, A. **A água na agricultura** 7. ed, Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos. 1987, v. 1, 535 p.

HUEB, J. A.; KAPPAZ, A. P. Medidor de Vazão Proporcional. **Revista DAE**, n. 122, p. 148 – 149, 1972.

HWANG, N. H. Medições de água. In: **Fundamentos de sistemas de engenharia hidráulica**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil. 1984, c. 9, p. 253-273.

IGNÁCIO, R. F. **Mecânica dos fluidos básica**: cálculo de perda de carga. Capturado em 01 de jul. de 2007. On-line. Disponível na Internet [http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/apostila\\_unidade%206.htm](http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/apostila_unidade%206.htm)

IMBIL. **Catálogo de bombas**: Indústria e manutenção de Bombas INI. 6. ed. Itapira: Imbil. [s.d.], 44 p.

LENCASTRE, A. Escoamento em pressão: Regime permanente. In: **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Edgard Blucher. 1972, c. 4, p. 63-92.

\_\_\_\_\_ Medidas hidráulicas. In: **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Edgard Blucher. 1972, c. 9, p. 156-169.

CARDOSO NETO, A. **Elementos de mecânica dos fluídos**: equações fundamentais. conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Capturado em 15 de mai. de 2007. On-line. Disponível na Internet [http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Antonio%20Cardoso%20Neto/Elementos\\_de\\_Mecanica\\_dos\\_Fluidos.pdf](http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Antonio%20Cardoso%20Neto/Elementos_de_Mecanica_dos_Fluidos.pdf)

NEVES, E. T. Conduitos sob pressão. In: **Curso de hidráulica**, 9. ed, Porto Alegre: Globo. 1974, c. 11, p. 185-250.

NEVES, E. T. Conduitos sob pressão. In: **Curso de hidráulica**, 9. ed, Porto Alegre: Globo, 1974, c. 11, p. 185-250.

PORTO, R. de M. **Hidráulica básica** 2. ed, São Carlos: Editora EESC-USP, 1999, 519 p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4 ed, Campinas: Fundação Cargil, 1985, 466p.

STREETER, V. L.; WYLEI, E. B. Efeitos da viscosidade: resistência dos fluídos. In: **Mecânica dos fluídos**, 7. ed, São Paulo: McGraw –Hill. 1982, cap. 5, p. 193-276.

\_\_\_\_\_ Medidas dos fluídos. In: **Mecânica dos fluídos**. São Paulo: McGraw –Hill. 1982, 7ª ed, cap. 8, p. 355-393.

ULTRAFLUX, USE. **Princípios de Medidas**. Capturado em 4 de dez. de 2006. On-line. Disponível na Internet <http://www.use.com.br/societe/presentation.htm>