

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA**  
**ENERGIA**

**LUIZ ANTONIO ANDRIATTA AYRES**

**PROPOSTA DE AVALIAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DOS**  
**ESTUDOS EXPERIMENTAIS HIDRÁULICOS DO**  
**LABORATÓRIO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA**

**MIRETA BASTOS**

**Itajubá, MG**

**2010**

**LUIZ ANTONIO ANDRIATTA AYRES**

**PROPOSTA DE AVALIAÇÃO E PADRONIZAÇÃO DOS  
ESTUDOS EXPERIMENTAIS HIDRÁULICOS DO  
LABORATÓRIO DA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA**

**MIRETA BASTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Ciências da Engenharia da Energia.

**Área de Concentração:** Energia, Hidráulica.

**Orientador:**

Prof. Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana

**Co-Orientador:**

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva.

**Itajubá, MG**

**2010**

Dedico este trabalho aos meus pais pelo exemplo de fibra, coragem e, sobretudo honestidade.

Aos meus irmãos **Carmem**, **Cristiana** e **Enéias** por acreditarem nos meus sonhos, e darem apoio às minhas empreitas.

A minha namorada **Andréia**, por seu amor incondicional me fazendo uma pessoa melhor a cada dia.

## **AGRADECIMENTOS**

Não poderia deixar de iniciar este agradecimento citando o nome de duas pessoas. Em primeiro lugar DEUS que me acompanha sempre e em segundo o meu orientador Professor Doutor Augusto Nelson Carvalho Viana, que viu em mim, antes de todos, uma luz no fim do túnel e me ofereceu uma oportunidade.

Ao Professor Doutor Fernando das Graças Braga pelo apoio e aprendizado.

Aos amigos do LHPCH, pela troca de conselhos e dicas para a realização deste trabalho.

Ao meu amigo do LEB, Técnico eletrônico Júlio dos Santos pelo aprendizado e apoio indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos meus companheiros de viagens e sobretudo de alegrias e tristezas no decorrer do mestrado: Josimar Cornélio Páscoa e André de Freitas Queles.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

A todos os meus amigos.

A CAPES pelo financiamento

“Bom mesmo é ir à luta com determinação. Abraçar a vida e viver com paixão. Perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve.....e a vida é muito para ser insignificante.”

Charlie Chaplin.

## SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	i
Lista de ilustrações.....	ii
Lista de tabelas.....	vii
Lista de nomenclaturas e abreviaturas.....	ix
Lista de símbolos.....	x
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. – Objetivo do trabalho.....	1
1.1.1- Objetivos específicos.....	2
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 – Princípios básicos de hidráulica.....	3
2.2 – Conceitos fundamentais.....	4
2.2.1- Vazão volumétrica.....	4
2.2.2 – Escoamento laminar e turbulento.....	7
2.2.3 – Equação da continuidade para regime permanente.....	11
2.2.4 – Equação da energia para regime permanente.....	12
2.2.5 – Equação de Bernoulli.....	14
2.2.6- Perda de carga em tubulações.....	17
2.3- Medidas de pressão.....	25
2.3.1- Conceito.....	25
2.3.2- Composição dos medidores de pressão.....	29
2.3.3- Principais tipos de medidores.....	29
2.3.3.1- Manômetros.....	29
2.3.4- Manômetros de líquido.....	30
2.3.5- Manômetros de Bourdon.....	30
2.3.6- Transdutores de pressão.....	31
2.3.7- Calibração dos instrumentos de pressão.....	32
2.4- Medidas de velocidade – escoamento e vazões.....	33
2.4.1- Escoamento fechado (Tubulações).....	33
2.4.1.1- Pitot-Cole e Prandtl.....	33
2.4.2- Medidores de vazão ultrassônicos.....	37

2.4.2.1- Ultrassônicos por tempo de trânsito.....	37
2.4.2.2- Medidor de espessura ultrassônico.....	39
2.4.3- Escoamento livre.....	39
2.4.3.1- Molinete.....	41
2.4.3.2- Flutuadores.....	44
2.4.3.3- Teoria do vertedor e suas classificações.....	47
2.4.3.4- Vertedores obtidos experimentalmente.....	49
2.4.4- Elementos geométricos de canais.....	52
2.4.5- Equações de resistência.....	55
2.4.5.1- Manning.....	55
Capítulo 3 – Laboratório de Hidráulica da MCH Mireta Bastos.....	59
3.1 – Descrição.....	59
3.2 – Experiências Práticas.....	65
Capítulo 4 – Padronização dos ensaios propostos e realizados.....	68
4.1 – Padronização dos ensaios.....	68
1- Introdução.....	68
2- Objetivos.....	68
3- Equipamentos utilizados.....	68
4- Desenvolvimento.....	68
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	68
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	68
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	69
5- Valores obtidos e calculados.....	69
6- Análise dos resultados e conclusões.....	69
4.2 – Ensaios propostos.....	70
4.2.1- Medidas de pressão.....	70
1- Introdução.....	70
2- Objetivos.....	70
3- Equipamentos utilizados.....	70
4- Desenvolvimento.....	70
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	70
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	71
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	71
4.3.1- Manômetro de Bourdon.....	71

4.3.2- Transdutor de pressão.....	72
5- Valores obtidos e calculados.....	73
6- Análise dos resultados e conclusões.....	74
4.2.2- Medidas de vazão em condutos forçados utilizando Pitot-Cole e ultra-som por tempo de trânsito.....	75
1- Introdução.....	75
2- Objetivos.....	75
3- Equipamentos utilizados.....	75
4- Desenvolvimento.....	76
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	76
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	76
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	77
5- Valores obtidos e calculados.....	79
6- Análise dos resultados e conclusões.....	81
4.2.3- Perda de carga em tubulações.....	82
1- Introdução.....	82
2- Objetivos.....	82
3- Equipamentos utilizados.....	82
4- Desenvolvimento.....	82
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	82
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	83
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	84
4.3.1- Perda de carga medidas.....	84
4.3.2- Perda de carga calculadas.....	87
5- Valores obtidos e calculados.....	87
6- Análise dos resultados e conclusões.....	90
4.2.4- Medidas de vazão em canais comparando os métodos do molinete e do flutuador.....	91
1- Introdução.....	91
2- Objetivos.....	91
3- Equipamentos utilizados.....	91
4- Desenvolvimento.....	91
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	91
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	92

4.2.1- Flutuador.....	93
4.2.2- Micromolinete.....	93
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	93
4.3.1- Flutuador no canal de adução e dos peixes.....	93
4.3.2- Micromolinete no canal de adução e dos peixes.....	94
5- Valores obtidos e calculados.....	95
5.1- Canal de adução.....	95
5.2- Canal dos peixes.....	96
5.2- Comparação dos resultados.....	97
6- Análise dos resultados e conclusões.....	99
4.2.5- Medidas de vazão no rio do Onça utilizando molinetes.....	100
1- Introdução.....	100
2- Objetivos.....	100
3- Equipamentos utilizados.....	100
4- Desenvolvimento.....	100
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	100
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	101
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	102
4.3.1- Micromolinete no rio.....	102
4.3.2- Molinete no rio.....	102
5- Valores obtidos e calculados.....	103
5.1- Molinetes no rio do Onça.....	103
5.2- Comparação dos resultados.....	105
6- Análise dos resultados e conclusões.....	107
4.2.6- Medidas de vazão no conduto forçado e canal de fuga.....	108
1- Introdução.....	108
2- Objetivos.....	108
3- Equipamentos utilizados.....	108
4- Desenvolvimento.....	108
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	108
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	109
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	110
4.3.1- Vertedores.....	110
4.3.2- Ultra-som.....	110

5- Valores obtidos e calculados.....	111
5.1- Vertedor retangular com contração comparado com ultrason.....	111
5.2- Comparação dos resultados.....	112
6- Análise dos resultados e conclusões.....	114
4.2.7- Ensaio do cálculo do coeficiente de Manning no canal de adução.....	115
1- Introdução.....	115
Objetivos.....	115
3- Equipamentos utilizados.....	115
4- Desenvolvimento.....	116
4.1- Esquema do banco de ensaios.....	116
4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas.....	116
4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas.....	116
4.3.1- Micromolinete no canal.....	116
4.3.2- Molinete hidrométrico.....	117
4.3.3- Cálculo do coeficiente de Manning.....	118
5- Valores obtidos e calculados.....	119
5.1- Canal de adução.....	119
5.2- Comparação dos resultados.....	121
6- Análise dos resultados e conclusões.....	123
Capítulo 5 – Conclusões e recomendações.....	124
Capítulo 6 – Referências bibliográficas.....	125
Capítulo 7- Anexos.....	128
Anexo A- Gráficos das áreas dos perfis de velocidade e das áreas (Vazões) utilizando o Pitot-Cole.....	129
Anexo B- Gráficos das áreas dos perfis de velocidade e das áreas (Vazões) utilizando o micromolinete no canal de adução e canal de alimentação dos peixes.....	132
Anexo C- Gráficos das áreas dos perfis de velocidade e das áreas (Vazões) utilizando os molinetes no córrego da Onça (Table-Curve e Auto-Cad).....	137
Anexo D- Gráficos das áreas dos perfis de velocidade e das áreas (Vazões) utilizando os molinetes no canal de adução (cálculo do coeficiente de Manning).....	152
Anexo E- Características dos instrumentos realizados nos ensaios.....	162

## RESUMO

A Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) desde os tempos do Instituto de Eletrotécnica de Itajubá (IEI) vem preparando os alunos na parte de hidráulica e máquinas hidráulicas, no sentido de dar subsídios para a geração de energia hidroelétrica. Nesse sentido o IEI inaugurou em 1930 o Laboratório de Máquinas Hidráulicas, onde na época se fazia experiências de hidráulica de canais, de condutos, Reynolds e outras, além de ensaios em turbinas e bombas hidráulicas.

Em 1986 a UNIFEI inaugurou o Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas (LHPCH), onde na sua parte didática, introduziu o Laboratório Hidromecânico Didático Científico (LHDC), onde possibilitou as experiências em canais, condutos forçados e máquinas hidráulicas de forma modernizada. Com a criação de novos cursos a partir de 1998, em particular as Engenharias Hídrica, Ambiental e Mestrado na área de Energia fez-se necessário a construção de novos Laboratórios. Desta forma, em Dezembro de 2006, com recursos do Ministério de Minas e Energia (MME), foi inaugurado o “Laboratório Avançado de Microcentrais Hidrelétricas” (LABMCH) na Fazenda Boa Esperança.

O LABMCH possui uma MCH de 30 kW, barragem, canal, comportas, câmara de carga e dois condutos forçados, casa de máquina e canal de fuga. Nesse circuito é possível realizar várias experiências hidráulicas e ensaios em grupos geradores.

Este trabalho pretende propor uma estruturação didática correlacionando às disciplinas oferecidas nos cursos de Engenharia Hídrica, Ambiental e de Mestrado em Energia e através de alguns estudos de caso avaliar a aplicabilidade de experimentos propostos em um laboratório em escala real de várias medidas hidráulicas e hidrométricas correlacionando às disciplinas oferecidas.

**Palavras Chave:** Microcentral Hidrelétrica, medições de vazão, laboratório didático.

## ABSTRACT

The University of Itajubá (UNIFEI) since the days of the Institute of Eletrotécnica of Itajubá (IEI) is preparing the students at the hydraulics and hydraulic machines, to make allowances for the generation of hydroelectric energy. In this sense the IEI inaugurated in 1930 the HYDRAULIC MACHINERY Laboratory, where it was at the time experiences of hydraulic channels, conduits, Reynolds and others, in addition to testing on hydraulic turbines and pumps.

In 1986 and UNIFEI launched the Small laboratory hydro mechanical for Central Hydroelectric (LHPCH), which in its part didactic, introduced the hydro mechanical Didactic Scientific Laboratory (LHDC), which has experience in channels, conduits and hydraulic forced to form a modernized. With the creation of new courses from 1998, in particular the Water Engineering Environmental and Master Energy was in the area of the necessity of building new laboratories. Thus, in December 2006, with the Ministry of Mines and Energy (MME), inaugurated the “Advanced Laboratory of Micro Hydroelectric Power” (LABMCH) at Good Hope Farm.

The LABMCH has a 30 kW, channel, locks, load chamber and two forced conduits, home of machinery and channel of escape. In this circuit you can perform various experiments and tests on hydraulic generating sets.

This paper aims to propose a structure didactic correlating the subjects offered in the courses of Hydraulic Engineering Environmental and Master in Energy and through some case studies to evaluate the applicability of proposed experiments in a laboratory scale of several measures water meters and correlating the subjects offered with the possibilities provided.

**Keywords:** Micro hydroelectric, flow measurements, laboratory teaching.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

FIGURA 2.1 – Tubo de corrente.....	5
FIGURA 2.2- Líquido se deslocando em uma tubulação.....	6
FIGURA 2.3- Velocidade média e perfil de velocidades.....	6
FIGURA 2.4- Visualização dos tipos de escoamento.....	7
FIGURA 2.5- Tabela de exemplos de dimensão característica .....	8
FIGURA 2.6- Perfis de velocidades para escoamento laminar e turbulento.....	10
FIGURA 2.7- Escoamento em uma tubulação.....	11
FIGURA 2.8- Energia potencial.....	12
FIGURA 2.9- Energia cinética.....	12
FIGURA 2.10- Energia de pressão.....	13
FIGURA 2.11- Tubo de corrente, escoamento de um líquido nas seções 1 e 2.....	14
FIGURA 2.12- Representação da equação de Bernoulli, linha de energia e linha piezométrica, para escoamento ideal.....	16
FIGURA 2.13- Representação da equação de Bernoulli, linha de energia e linha piezométrica, para escoamento real.....	17
FIGURA 2.14- Perda de carga distribuídas entre os pontos 1 e 2.....	18
FIGURA 2.15- Perda de carga localizada entre os pontos 1 e 2.....	18
FIGURA 2.16- Diagrama de Moody.....	21
FIGURA 2.17- Comprimento equivalente.....	22
FIGURA 2.18- Ábaco de comprimentos equivalentes.....	23
FIGURA 2.19 - Características da válvula borboleta em relação a vazão e a abertura da válvula.....	24
FIGURA 2.20- Força e área em uma massa líquida.....	25
FIGURA 2.21- Pressão em função de h.....	26
FIGURA 2.22- Pressão em uma tubulação.....	26

FIGURA 2.23- Escalas de pressão.....	27
FIGURA 2.24- Tubo de Pitot, pressão de estagnação.....	28
FIGURA 2.25- Formas de meniscos de acordo com o líquido.....	30
FIGURA 2.26- Tipo c, tipo espiral e tipo helicoidal, respectivamente.....	31
FIGURA 2.27- Detalhes de um manômetro tipo Bourdon "C".....	31
FIGURA 2.28- Viscosidade cinemática x temperatura.....	33
FIGURA 2.29- Pitot-Cole e seus detalhamentos.....	34
FIGURA 2.30- Tubo de Prandtl.....	34
FIGURA 2.31- Pitot-Cole e as posições padronizadas de medidas da velocidade de escoamento e seu perfil.....	36
FIGURA 2.32- Perfil de velocidades em cada raio r em uma tubulação.....	36
FIGURA 2.33- Medidor ultrassônico não intrusivo (DCT 7088).....	37
FIGURA 2.34- Emissores / receptores interno e externo do ultrassom.....	38
FIGURA 2.35- Classificação dos medidores de vazão ultrassônicos de acordo com a configuração do trajeto da onda dentro da tubulação.....	38
FIGURA 2.36- Exemplo de medição de vazão em uma seção de um rio, com as indicações das verticais, distâncias (dist.) e profundidades (prof.). os pontos indicam as posições em que é medida a velocidade no caso de utilizar apenas dois pontos por vertical.....	40
FIGURA 2.37- Esquema do molinete.....	42
FIGURA 2.38- Tipos de molinetes.....	42
FIGURA 2.39- Seções de medidas em um canal.....	43
FIGURA 2.40- Perfis de velocidades de cada seção de medida.....	43
FIGURA 2.41- Gráfico profundidades x versus áreas dos perfis de velocidades.....	44
FIGURA 2.42- Objeto flutuante - garrafa com $\frac{3}{4}$ de água.....	45
FIGURA 2.43- Explicação do método flutuador e suas posições.....	45
FIGURA 2.44- Rio ou canal com explicação da sua profundidade e largura.....	46
FIGURA 2.45 – Vertedor retangular de parede delgada.....	48
FIGURA 2.46- Vertedor retangular de parede delgada com duas contrações.....	50
FIGURA 2.47- Vertedor retangular de parede delgada e sem contração.....	50

FIGURA 2.48- Vertedor triangular.....	51
FIGURA 2.49- Vertedor de parede espessa.....	52
FIGURA 2.50- Representação de elementos em um canal.....	53
FIGURA 2.51- Nível esquemático do nível de mangueira.....	54
FIGURA 2.52- Representação geométrica da declividade.....	55
FIGURA 2.53- Ilustração de um esquema com trecho unitário com movimento uniforme.....	55

### **CAPÍTULO 3- LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA MCH MIRETA BASTOS**

FIGURA 3.1- Barragem e comporta da tomada d'água.....	60
FIGURA 3.2- Canal de adução e comporta desarenadora.....	60
FIGURA 3.3- Câmara de carga e blocos de ancoragem.....	61
FIGURA 3.4- Condutos forçados, blocos de apoio e casa de máquinas.....	61
FIGURA 3.5- Grupo gerador com BFT/GI (Casa de máquina).....	61
FIGURA 3.6- Canal de Fuga (MCH Mireta Bastos).....	61
FIGURA 3.7- Arranjo geral da MCH Mireta Bastos.....	62
FIGURA 3.8- Logo da Fazenda Boa Esperança.....	62
FIGURA 3.9- Como chegar na Fazenda.....	63
FIGURA 3.10- Cachoeira Formosa localizada ao redor da Fazenda.....	63
FIGURA 3.11- Chalés da Fazenda Boa Esperança.....	64
FIGURA 3.12- Sauna e piscina térmica da do Hotel Fazenda Boa Esperança.....	64
FIGURA 3.13- Fogueira noturna, cachoeira ao fundo e comida mineira.....	65
FIGURA 3.14- Suporte para instalação dos molinetes no canal de adução.....	66
FIGURA 3.15- Tomadas de pressão no conduto forçado.....	66
FIGURA 3.16- Taps para colocação de sondas de Pitot e Prandtl.....	66
FIGURA 3.17- Suporte para colocação de vertedores no canal de fuga.....	66
FIGURA 3.18- Instalação dos manômetros na entrada da turbina Michell-Banki.....	67

FIGURA 3.19- Manômetro de Bourdon e transdutor de pressão instalados na entrada da turbina Michell-Banki.....67

## **CAPÍTULO 4- ENSAIOS PROPOSTOS**

### **MEDIDAS DE PRESSÃO**

FIGURA 4.1- Entrada da turbina com medidores de pressão.....71

FIGURA 4.2- Instalação dos medidores de pressão na entrada da TMB.....73

### **MEDIDAS DE VAZÃO EM CONDUTOS FORÇADOS UTILIZANDO O PITOT-COLE E O ULTRA-SOM POR TEMPO DE TRÂNSITO**

FIGURA 4.1- Conduto forçado (medição de vazão – Pitot-Cole e ultra-som).....76

FIGURA 4.2- Perfil de velocidades.....78

FIGURA 4.3- Manômetro de coluna em U diferencial.....80

FIGURA 4.4-Tap instalado para fixação do Pitot-Cole .....80

FIGURA 4.5-Medidas do perfil de velocidades e vazão de escoamento com Pitot-Cole.....80

FIGURA 4.6-Instalação no conduto forçado dois sensores para medidas da vazão com o medidor de ultra-som tempo de trânsito.....80

### **PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES**

FIGURA 4.1- Conduto forçado e pontos de medida.....83

FIGURA 4.2- Manômetros de pressão e transdutores instalados entre a válvula borboleta.....89

FIGURA 4.3- Instalando os manômetros e transdutores entre a válvula borboleta...89

FIGURA 4.4 - Medição do comprimento do tubo.....89

FIGURA 4.5 - Manômetro de pressão e transdutor instalado antes da válvula borboleta.....89

## **MEDIDAS DE VAZÃO UTILIZANDO O MICROMOLINETE E O FLUTUADOR**

FIGURA 4.1- Trecho do canal para a realização das experiências.....	92
FIGURA 4.2- Batimetria e posições do micromolinete.....	92
FIGURA 4.3- Medição de vazão no canal de adução com o micromolinete.....	98
FIGURA 4.4- Medição de vazão pelo método do flutuador comparado com o micromolinete realizado no canal de adução.....	98
FIGURA 4.5- Medição de vazão no canal dos peixes com o micromolinete.....	98
FIGURA 4.6- Medição de vazão pelo método do flutuador .....	98

## **MEDIDAS DE VAZÃO NO CÓRREGO DA ONÇA UTILIZANDO MOLINETES**

FIGURA 4.1- Trecho do rio com a batimetria nas duas seções.....	101
FIGURA 4.2- Medição de vazão com micromolinete no rio da Onça.....	106
FIGURA 4.3- Medição de vazão com molinete hidrométrico no rio da Onça.....	106

## **MEDIDAS DE VAZÃO NO CONDUTO FORÇADO E CANAL DE FUGA**

FIGURA 4.1-. Conduto forçado e canal de fuga.....	109
FIGURA 4.2-. Medição de vazão no canal de fuga demonstrando os dois vertedores retangulares (com duas contrações e sem contração).....	113
FIGURA 4.3- Ultra-som por tempo de transito instalado na tubulação da BFT e anotações do vertedor em uma planilha.....	113

## **ENSAIO DO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE MANNING NO CANAL DE ADUÇÃO**

FIGURA 4.1- Trecho do canal de adução utilizando o molinete hidrométrico e micromolinete com a batimetria das duas seções.....	116
FIGURA 4.2- Nível de mangueira e micromolinete instalado no canal de adução...	122

## **LISTA DE TABELAS**

### **CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Tabela 2.1- Número de Reynolds.....	9
Tabela 2.2 - Rugosidade das paredes dos tubos.....	20
Tabela 2.3 – Valores de K em função do ângulo de abertura.....	24
Tabela 2.4- Manômetros de acordo com os elementos de recepção.....	29
Tabela 2.5 - Viscosidade cinemática x temperatura.....	32
Tabela 2.6 – Valores das posições padronizadas para o cálculo da velocidade.....	35
Tabela 2.7- Distância recomendada entre verticais de acordo com a largura do rio...40	
Tabela 2.8- Número e posição de pontos de medição na vertical recomendados de acordo com a profundidade do rio.....	41
Tabela 2.9 - Valores de rugosidade das paredes.....	58

### **CAPÍTULO 3- LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA MCH MIRETA BASTOS**

Tabela 3.1 – Dados principais do aproveitamento.....	60
--	----

### **CAPÍTULO 4- ENSAIOS PROPOSTOS**

#### **MEDIDAS DE PRESSÃO**

Tabela 4.1 - Valores lidos e calculados.....	73
--	----

#### **MEDIDAS DE VAZÃO EM CONDUTOS FORÇADOS UTILIZANDO O PITOT-COLE E O ULTRA-SOM POR TEMPO DE TRÂNSITO**

Tabela 4.1 – Ultra-som com dados no seu display indicando cálculo da distância dos sensores.....	77
Tabela 4.2 - Valores lidos e calculados.....	79

## **PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES**

Tabela 4.1 - Valores lidos e calculados.....88

## **MEDIDAS DE VAZÃO UTILIZANDO O MICROMOLINETE E O FLUTUADOR**

Tabela 4.1 – Valores lidos e calculados no canal de adução.....95

Tabela 4.2 - Valores lidos e calculados no canal dos peixes.....96

Tabela 4.3 – Perfil das seções dos canais com suas respectivas áreas.....97

Tabela 4.4 – Características de cada canal com os resultados de vazão.....97

## **MEDIDAS DE VAZÃO NO CÓRREGO DA ONÇA UTILIZANDO MOLINETES**

Tabela 4.1 - Valores lidos e calculados.....103

Tabela 4.2 – Perfil das seções do rio com suas respectivas áreas.....105

Tabela 4.3 – Características do rio e suas vazões.....106

## **MEDIDAS DE VAZÃO NO CONDUTO FORÇADO E CANAL DE FUGA**

Tabela 4.1 – Valores obtidos e calculados do vertedor com contração e ultra-som...111

Tabela 4.2 – Valores obtidos e calculados do vertedor sem contração e ultra-som...112

Tabela 4.3 – Comparação dos resultados de vazão.....112

## **ENSAIO DO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE MANNING NO CANAL DE ADUÇÃO**

Tabela 4.1 – Valores lidos e calculados no canal de adução.....119

Tabela 4.2 - Perfil de cada seção com as respectivas áreas (Cálculo do coeficiente de Manning).....121

Tabela 4.3 – Características do canal de adução e resultados de vazão.....121

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BFT	Bomba Funcionando como Turbina
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EFEI	Escola Federal de Engenharia de Itajubá
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS)
IEI	Instituto de Eletrotécnica de Itajubá
LABMCH	Laboratório Avançado de Microcentrais Hidrelétricas
LHDC	Laboratório Hidromecânico Didático Científico
LHPCH	Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas
MCH	Microcentral Hidrelétrica
MME	Ministério de Minas e Energia
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

## LISTA DE SÍMBOLOS

**A** [m<sup>2</sup>]- Área;

**A<sub>m</sub>** [m<sup>2</sup>]- área molhada;

**A<sub>méd</sub>** [m<sup>2</sup>]- área média das seções 1 e 2.

**b** – [m] largura do vertedor sem contração;

**b<sub>c</sub>** – [m] largura da veia contraída;

**B** – [m] largura da seção na superfície livre.

**C<sub>pc</sub>** - [adimensional] coeficiente de correção;

**D** – [m] diâmetro da tubulação;

**D<sub>c</sub>** – [m] dimensão característica ou diâmetro hidráulico;

**dV** – [m<sup>3</sup>] volume;

**E<sub>c</sub>** – [N.m] energia cinética;

**E<sub>g</sub>** – [N.m] energia potencial;

**E<sub>p</sub>** – [N.m] energia pressão;

**F** –[N] força perpendicular a área;

**f** – [adimensional] coeficiente de atrito;

**g** – [m/s<sup>2</sup>] aceleração da gravidade;

**H** – [m] altura de carga total;

**h** – [m] altura de líquido.

**h<sub>v</sub>** – [m] altura da crista do vertedor;

**H<sub>p</sub>** -[m] perda de carga total;

**H<sub>pd</sub>** -[m] perda de carga distribuída no trecho;

**H<sub>pL</sub>** - [m] perda de carga localizada na válvula;

**I<sub>a</sub>** - [adimensional] Declividade piezométrica

**K** - [adimensional] é o coeficiente de perda de energia

**L** -[m] comprimento da tubulação;

**L<sub>e</sub>** - [m] comprimento equivalente da válvula;

**L<sub>canal</sub>** -[m] largura do canal;

**n** - [rps] rotação da hélice

**P<sub>m</sub>** -[m] perímetro molhado.

**p** - [N/m<sup>2</sup>] pressão;

**Q** - [m<sup>3</sup>/s] vazão volumétrica;

**R<sub>h</sub>** - [m] raio hidráulico;

**Re** - número de Reynolds (adimensional);

**t** - [s] tempo;

**v** - [m/s] velocidade de escoamento;

**v<sub>máx.</sub>** - [m/s] velocidade máxima de escoamento;

**v<sub>méd.</sub>** - [m/s] velocidade média de escoamento;

**V** - [m<sup>3</sup>/s ou L/s] volume do líquido;

**X** [m]- altura do vertedor;

$X$  – [m] comprimento escolhido do trecho do rio ou canal; cota em relação à referência;

$z$  – [m] cota em relação à referência;

$\theta$  – ângulo;

$\rho$  - [Kg/m<sup>3</sup>] massa específica;

$\gamma$  - [N/m<sup>3</sup>] peso específico do líquido ;

$\nu$  – [m/s] viscosidade cinemática;

$\mu$  – [Pa.s] viscosidade absoluta;

$\varepsilon$  -[m] rugosidade da parede do tubo;

$\frac{\varepsilon}{D}$  - [adimensional] rugosidade relativa;

# CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A Hidráulica e a Hidrometria caminham juntas e estão presentes em praticamente todos os tipos de empreendimentos, como sistemas hidráulicos de geração de energia, obras de infra-estrutura, tais como canais, barragem, irrigação, saneamento básico, processos industriais, redes de monitoramento entre outros. Sendo uma parte da física que se dedica a estudar o comportamento dos líquidos em movimento e em repouso sendo responsável pelo conhecimento das leis que regem o transporte, a conversão de energia, a regulação e o controle do fluido agindo sobre suas variáveis (pressão, vazão, temperatura, viscosidade).

Ela pode ser dividida em três capítulos, para efeito de estudo apenas: a hidrostática que trata dos fluidos parados, a hidrocínética, que estuda os fluidos em movimento, levando em consideração os efeitos da velocidade e a hidrodinâmica que leva em consideração as forças envolvidas no escoamento dos fluidos (forças da gravidade, da pressão, da tensão tangencial, da viscosidade, da compressibilidade e outras).

Segundo (Vernnard et al, 1978) a hidrometria é uma das partes mais importantes da hidráulica, justamente porque ela cuida de questões tais como medidas de profundidades, de variação do nível da água, das seções de escoamento, das pressões, de ensaios de bombas, turbinas, das velocidades, das vazões ou descargas.

A hidrometria tem por fim estabelecer os métodos para a medição das grandezas que caracterizam os fenômenos hidráulicos, quais sejam a densidade do líquido, a pressão, a velocidade, a vazão que se escoam em uma determinada seção. (Bandini, 1961).

Dada a importância crescente de aperfeiçoamentos de estudos hidráulicos e hidrométricos e de profissionais cada vez mais capacitados foi firmado um convênio entre o Ministério de Minas e Energia (MME) e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), onde neste convênio previa a construção de uma Microcentral Hidrelétrica (MCH) para o Programa Luz para Todos do Governo Federal e também uma MCH toda repotencializada e o circuito desta MCH sendo todo preparado para estudos dos alunos de graduação da Engenharia Hídrica e Ambiental e de alunos de Pós-Graduação (Mestrado) na área de Energia. Desta forma a MCH apresenta-se de forma mais factível de se entender os ensinamentos de Hidráulica preparando os futuros profissionais para a demanda do campo.

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos onde o primeiro capítulo trata-se da introdução, o segundo uma revisão bibliográfica, o terceiro do laboratório da MCH Mireta Bastos, o quarto a padronização dos ensaios propostos e realizados, o quinto as conclusões e recomendações, o sexto as referências bibliográficas e o sétimo e último os anexos dessa dissertação.

## 1.1. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é apresentar uma proposta para estruturação didática de um laboratório para ensaios hidráulicos e hidrométricos em escala real, na microcentral hidrelétrica construída por ocasião do convênio 12/2005 firmado entre a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e o Ministério de Minas e Energia (MME).

### **1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolver uma revisão bibliográfica sobre assuntos relevantes da hidráulica e hidrometria, relacionados ao objetivo geral do trabalho;
- Propor roteiros para a padronização de ensaios na MCH utilizando os equipamentos e medidas disponíveis para serem aplicadas em várias disciplinas dos cursos de engenharias hídrica, ambiental e de mestrado na área de energia;
- Realizar testes possíveis apresentando resultados através dos roteiros propostos.

# CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1. PRINCÍPIOS BÁSICOS DE HIDRÁULICA

O termo hidráulica é designado o conjunto de técnicas ligados ao transporte de líquidos e em particular ao da água.

A hidráulica esteve presente ao longo de toda a história da humanidade, em função da necessidade essencial da água para a vida humana. Tendo em vista suas necessidades a história da hidráulica remonta ao início das primeiras sociedades urbanas, quando se tornou necessário efetuar-se a compatibilização da sua oferta e demanda.

Devido à oferta e demanda a formação das primeiras aglomerações humanas, procurou-se sempre efetuar sua implantação em lugares próximos de cursos d'água, entretanto, nem sempre a água estava disponível em dado local, nas quantidades demandadas. Tornou-se então essencial a implantação dos primeiros artefatos e obras de condução de água, que estão na base do que conhecemos hoje como "Engenharia Hidráulica". Pesquisas indicaram vestígios de obras hidráulicas datados de 4000 a 3000 a.C. (Baptista et al, 2003)

O primeiro vestígio mais antigo conhecido consiste de complexos sistemas de canais de irrigação e de navegação construídos na Mesopotâmia.

Os usos das águas subterrâneas encontram-se referências do antigo testamento na Pérsia, através de extensos túneis, com comprimentos superiores a quarenta quilômetros interligando grandes poços verticais com profundidades superiores a cem metros.

Os primeiros pensamentos científicos sobre hidráulica partiram-se dos gregos com Arquimedes e seus princípios de hidrostática e documentos do século II a.C de Hero da Alexandria, que expressam os princípios de medidas de vazão e o papel da velocidade no escoamento, entre outros.

A engenharia hidráulica também se destaca através dos romanos mais ligados aos empreendimentos de engenharia e tendo seus profissionais bastante respeitados, destacando-se o "Imperador Engenheiro", cognome dado a Adriano. (Baptista et al, 2003).

Os romanos construíram desde complexos sistemas prediais de água, até grandes obras de abastecimento de água e esgoto sanitário e pluvial.

No século XVIII as bases da mecânica dos fluidos foram assentadas de forma mais racional matematicamente por dois físicos, a saber, Bernoulli, quem primeiro formulou a principal lei dos movimentos dos líquidos chamada "Equação de Bernoulli" e, Leonard Euler, que estabeleceu as equações diferenciais gerais relativas aos movimentos dos líquidos perfeitos. (Delmée, 1982).

Em 1732, Henri Pitot apresentou um trabalho destinado à descrição de um aparelho capaz de medir a velocidade da água, que mais tarde viria a ser o Tubo de Pitot.

Trabalhos importantes sobre aerodinâmica realizados por Prandtl e Karman possibilitaram aplicações mais diversificadas de novos medidores de vazão.

No século XIX destacam-se os estudos e a introdução de conceitos

sobre viscosidade e turbulência destacando-se Hagen, Poiseuille e Reynolds. Em relação à resistência aos escoamentos e a perda de carga destacam-se Weisbach, Bresse e Darcy.

No século XX em função do grande desenvolvimento industrial tornou necessário o estudo dos escoamentos dos fluidos destacando-se Prandtl (Baptista et al, 2003).

Em razão da importância da água e das crescentes preocupações ambientais nas diversas atividades desenvolvidas pelo homem, está evoluindo progressivamente em todo mundo um novo conceito integrado de planejamento, gestão e uso dos recursos hídricos, onde, através de um conjunto de medidas técnicas, administrativas e legais, busca-se uma resposta eficaz às necessidades humanas e às exigências sociais para melhorar a utilização da água. Para um gerenciamento adequado dos potenciais hidráulicos disponíveis no mundo, é fundamental conhecer o comportamento dos rios, suas sazonalidades e vazões. (Ibipina et al, 2008).

Segundo (Pimenta, 1981) a hidrometria é a ciência que mede e analisa as características físicas e químicas da água, incluindo métodos, técnicas e instrumentação utilizados em hidrologia.

Dentro da hidrometria pode-se citar a fluviometria que abrange as medições de vazões e cotas de rios. Os dados fluviométricos são indispensáveis para os estudos de aproveitamentos hidroenergéticos, assim como para o atendimento a outros segmentos, como o planejamento de uso dos recursos hídricos, previsão de cheias, gerenciamento de bacias hidrográficas, saneamento básico, abastecimento público e industrial, navegação, irrigação, transporte, meio ambiente e muitos outros estudos de grande importância científica e sócio-econômica.

## 2.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Os conceitos fundamentais a serem apresentados terão como parâmetros o escoamento de água, portanto, o fluido será incompressível.

Serão baseadas nos conceitos voltados para os ensaios experiências hidráulicas propostas neste trabalho.

### 2.2.1. VAZÃO VOLUMÉTRICA

Por definição é o volume de líquido que atravessa uma certa seção do escoamento na unidade de tempo. Tem-se na equação 2.1 a vazão volumétrica.

$$Q = \left( \frac{V}{t} \right) \quad (2.1)$$

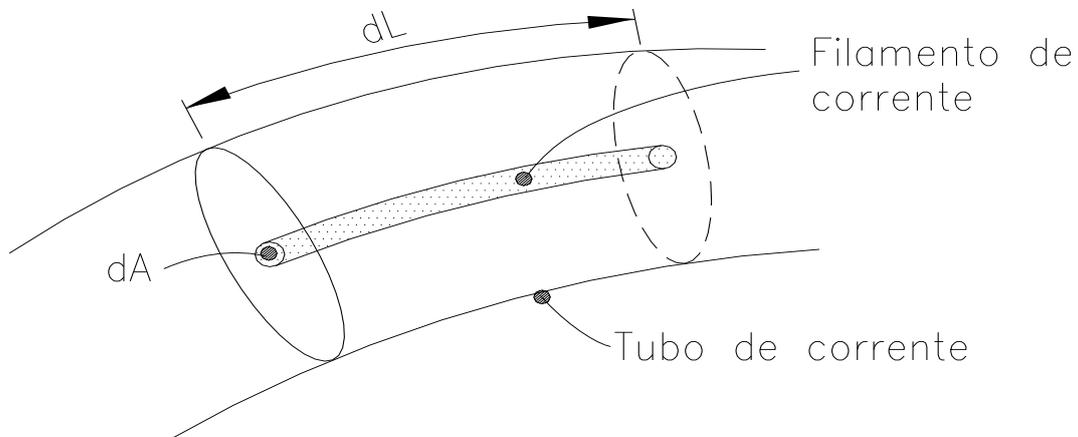
onde:

**Q** [m<sup>3</sup>/s] – vazão volumétrica;

**V** [m<sup>3</sup>] – volume do líquido;

**t** [s] – tempo.

A vazão pode ser expressa em função da velocidade do escoamento. Seja a figura 2.1 o filamento dentro do tubo de corrente.



**FIGURA 2.1- Tubo de corrente**

Seja  $dV$  o volume do líquido que atravessa a área  $dA$  em um intervalo de tempo  $dt$ . A vazão elementar será  $dQ$ , dada pela equação 2.2.

$$dQ = \frac{dV}{dt} \quad (2.2)$$

mas  $dV = (dL \cdot dA)$ , então

$$dQ = \left( \frac{dL \cdot dA}{dt} \right)$$

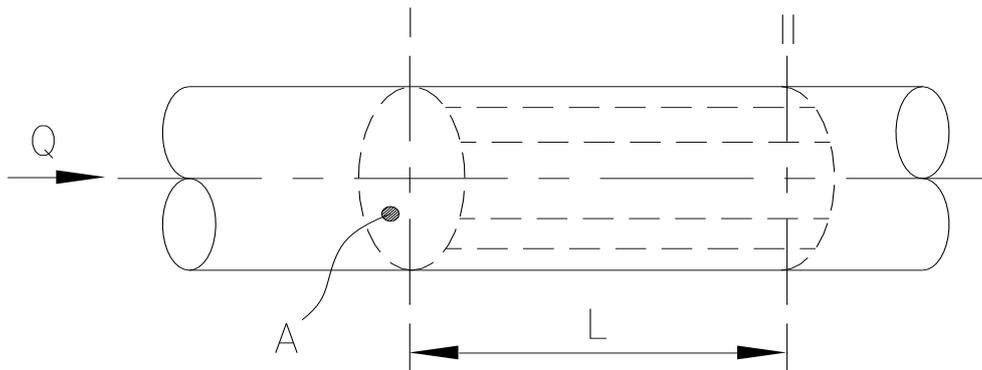
Como  $\frac{dL}{dt}$  é a velocidade  $v$  das partículas que atravessam a área  $dA$ , tem-se a equação 2.3.

$$dQ = (v \cdot dA) \quad (2.3)$$

Integrando a equação 2.3, tem-se

$$Q = \left( \int_A v \cdot dA \right) \quad (2.4)$$

A figura 2.2 apresenta o líquido deslocando com uma vazão  $Q$  em uma tubulação de uma posição I para posição II em um tempo  $t$ . A área da seção é  $A$ .

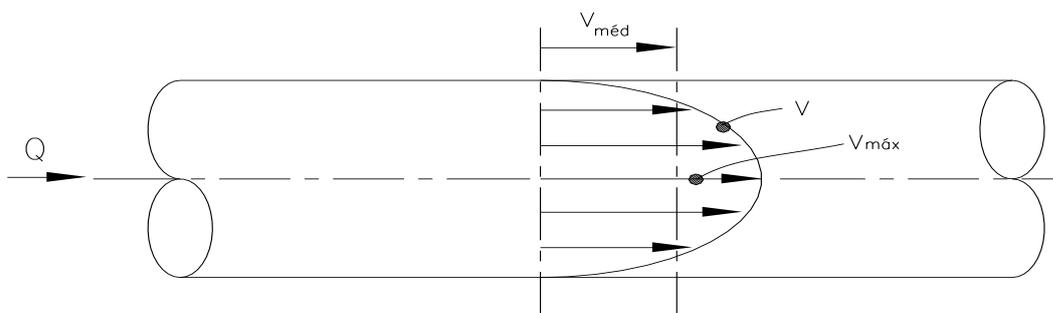


**FIGURA 2.2- Líquido se deslocando em uma tubulação (fonte: Daker, 1969)**

Por definição a vazão é:

$$Q = \frac{V}{t} = \left( \frac{A \cdot L}{t} \right) = (v_m \cdot A) \quad (2.5)$$

Na equação 2.5 a velocidade é uniforme na seção, portanto, a velocidade média de escoamento como mostra a figura 2.3, ilustra a velocidade média e o perfil de velocidades real.



**FIGURA 2.3- Velocidade média e perfil de velocidades (fonte: Daker, 1969).**

Das equações 2.4 e 2.5 tem-se

$$v_m = \left[ \left( \frac{1}{A} \right) \int_A v \cdot dA \right] \quad (2.6)$$

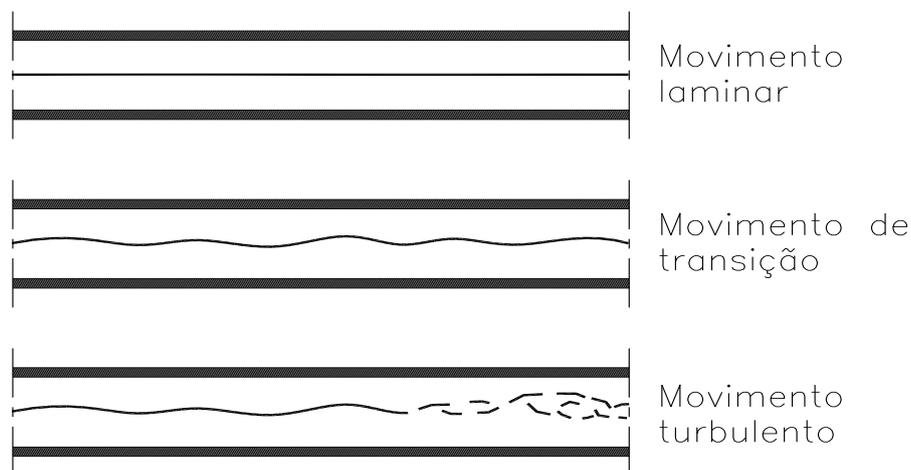
## 2.2.2. ESCOAMENTO LAMINAR E TURBULENTO

Os tipos de escoamentos foram baseados na experiência de Reynolds. Com os estudos experimentais e teóricos, Reynolds definiu os tipos de escoamento, que são:

- Laminar;
- Transitório;
- Turbulento.

No escoamento laminar, as partículas fluem ordenadamente seguindo uma trajetória definida e na forma de lâmina. No escoamento turbulento as partículas apresentam um movimento aleatório e caótico.

A figura 2.4 ilustra os tipos de escoamento, mostrando a trajetória das partículas.



**FIGURA 2.4- Visualização dos tipos de escoamento**

Reynolds desenvolveu a equação 2.7 para definir o tipo de escoamento.

$$\mathbf{Re} = \left( \frac{\rho \cdot \mathbf{D}_c \cdot \mathbf{v}_{\text{méd.}}}{\mu} \right) = \left( \frac{\mathbf{D}_c \cdot \mathbf{v}_{\text{méd.}}}{\nu} \right) \quad (2.7)$$

onde:

**Re [1]** – número de Reynolds (adimensional);

**$\mathbf{D}_c$  [m]** – dimensão característica ou diâmetro hidráulico;

**$\mathbf{v}_{\text{méd.}}$  [m/s]** – velocidade média de escoamento;

**$\mu$  [Pa s]** – viscosidade dinâmica;

**$\nu$  [m<sup>2</sup>/s]** – viscosidade cinemática.

A dimensão característica é definida conforme a equação 2.8.

$$\mathbf{D_c = (4 \cdot R_h)} \quad (2.8)$$

onde:

$\mathbf{D_c [m]}$  - dimensão característica;

$\mathbf{R_h [m]}$  - raio hidráulico.

O raio hidráulico é definido pela seguinte equação:

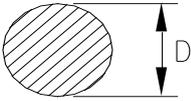
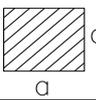
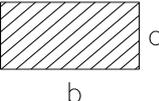
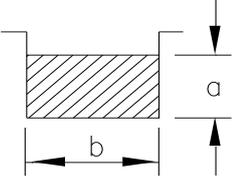
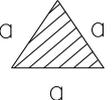
$$\mathbf{R_h = \left( \frac{A_m}{P_m} \right)} \quad (2.9)$$

onde:

$\mathbf{A_m [m^2]}$  – área molhada;

$\mathbf{P_m [m]}$  – perímetro molhado.

A figura 2.5 ilustra alguns exemplos para o cálculo da dimensão característica

SEÇÃO	$A_m$	$\phi P_m$	$R_h$	$D_c$
	$\frac{\pi D^2}{4}$	$\pi D$	$\frac{D}{4}$	$D$
	$a^2$	$4a$	$\frac{a}{4}$	$a$
	$ab$	$2(a+b)$	$\frac{ab}{2(a+b)}$	$\frac{2ab}{(a+b)}$
	$ab$	$2(a+b)$	$\frac{ab}{2a+b}$	$\frac{4ab}{2a+b}$
	$\frac{a^2\sqrt{3}}{4}$	$3a$	$\frac{a^2\sqrt{3}}{12}$	$\frac{a\sqrt{3}}{3}$

**FIGURA 2.5- Tabela de exemplos de dimensão característica (fonte: adaptado de Brunetti, 2005).**

A tabela 2.1 apresenta as faixas do número de Reynolds para tubulações.

**TABELA 2.1- Número de Reynolds (fonte: adaptado de Daker, 1969)**

Regime	Tubulações
Laminar	<b>Re</b> < 2000
Transitório	2000 < <b>Re</b> < 4000
Turbulento	<b>Re</b> > 4000

Segundo (Netto, 1998) o diâmetro do conduto, para o cálculo do número de Reynolds para os canais, adota-se freqüentemente, como dimensão linear característica, a fórmula 2.8. Assim, se o conduto for uma seção circular cheia, esse valor coincidirá com o diâmetro característico  $D_c$ . Então, para canais, usualmente tem-se a seguinte expressão para o número de Reynolds:

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot (4 \cdot R_h)}{\mu} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{Re} = \frac{4 \cdot R_h \cdot v}{\nu} \quad (2.11)$$

onde:

**Re [1]** - número de Reynolds (adimensional);

$\rho \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$  - massa específica;

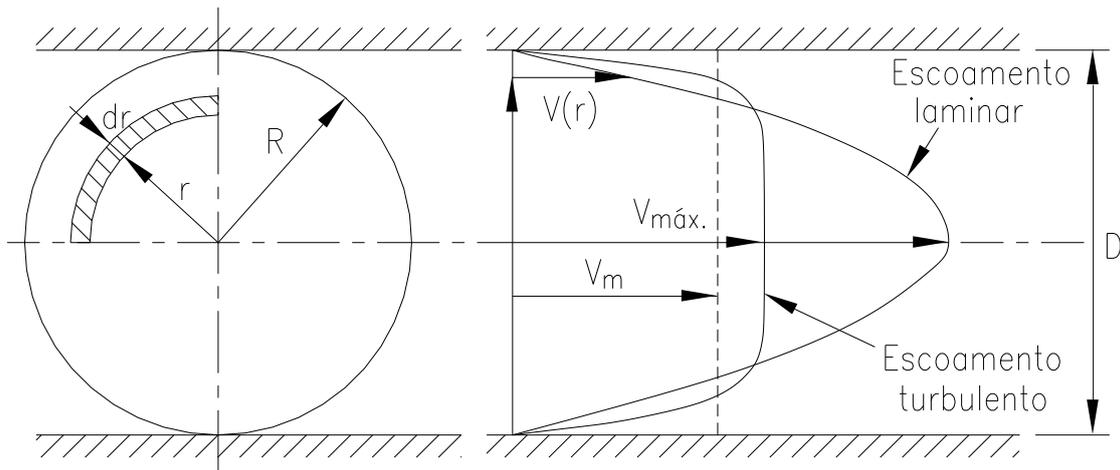
$v \left[ \text{m/s} \right]$  - velocidade;

$R_h \left[ \text{m} \right]$  - raio hidráulico;

$\mu \left[ \text{Pa s} \right]$  - viscosidade dinâmica;

$\nu \left[ \text{m}^2 / \text{s} \right]$  - viscosidade cinemática.

A figura 2.6 ilustra os perfis de velocidades para o escoamento laminar e para o escoamento turbulento em uma tubulação.



**FIGURA 2.6- Perfis de velocidades para escoamento laminar e turbulento (fonte: adaptado de Delmée, 1982).**

A diferença de perfis ocorre devido ao atrito do líquido nas paredes do tubo e da dissipação viscosa devido às ações internas das partículas (Hwang, 1981).

No caso do escoamento laminar, o perfil de velocidades é parabólico e a velocidade varia em função de  $r$  mostrado na equação 2.12.

$$v = (v_{\text{máx}}) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

Aplicando a equação 2.6, determina-se a velocidade média para o escoamento Laminar, equação 2.13.

$$v_m = \left( \frac{v_{\text{máx}}}{2} \right) \quad (2.13)$$

No escoamento turbulento, Prandtl aproximou-se o perfil de velocidades, para  $Re = 10^5$ , da equação 2.14.

$$v = \left[ v_{\text{máx}} \cdot \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{7}} \right] \quad (2.14)$$

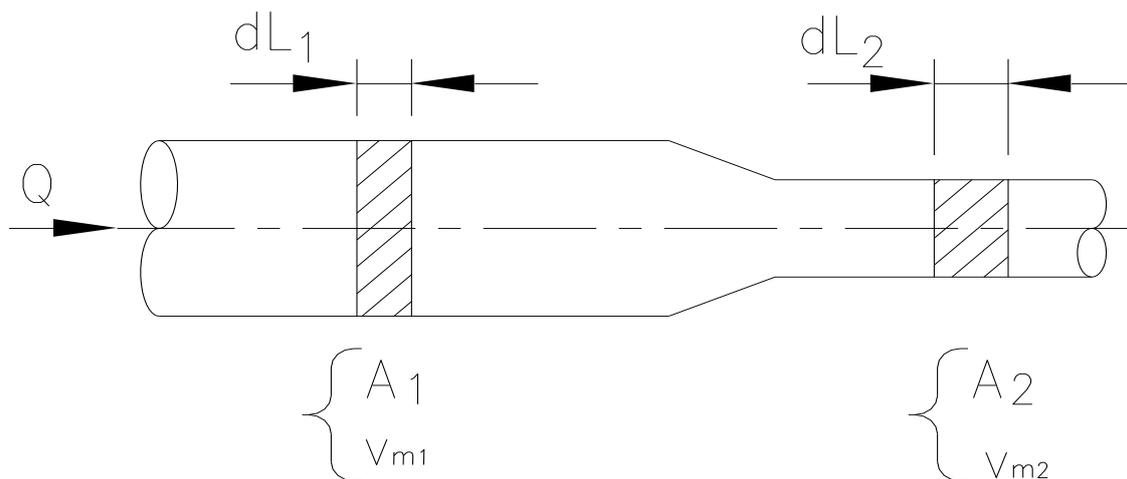
Aplicando a equação 2.6, tem-se a equação 2.15, válida para escoamento turbulento.

$$v_m = \left( \frac{98}{120} \cdot v_{\text{máx}} \right) \quad (2.15)$$

A equação 2.15 é aproximada e válida para  $Re = 10^5$  e tubos circulares. É importante salientar que em hidráulica, em geral, os escoamentos se enquadram na categoria dos turbulentos (Baptista et al, 2003).

### 2.2.3. EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE PARA REGIME PERMANENTE.

Seja a figura 2.7 o escoamento de água em uma tubulação.



**FIGURA 2.7- Escoamento em uma tubulação**

Pelo princípio da continuidade, tem-se que a vazão volumétrica na seção 1 é igual à vazão volumétrica na seção 2, equação 2.16.

$$\mathbf{Q_1 = Q_2} \quad (2.16)$$

ou seja:

$$\left( \frac{\mathbf{V_1}}{\mathbf{t}} \right) = \left( \frac{\mathbf{V_2}}{\mathbf{t}} \right)$$

$$\left( \frac{\mathbf{A_1 \cdot dL_1}}{\mathbf{t}} \right) = \left( \frac{\mathbf{A_2 \cdot dL_2}}{\mathbf{t}} \right)$$

Então:

$$\left( \mathbf{A_1 \cdot v_{méd1}} \right) = \left( \mathbf{A_2 \cdot v_{méd2}} \right) \quad (2.17)$$

A equação 2.17 é válida para líquidos em regime permanente.

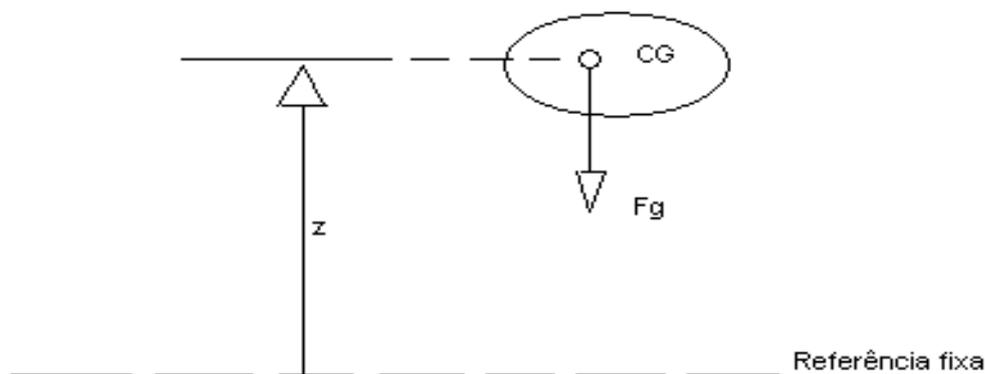
## 2.2.4. EQUAÇÃO DA ENERGIA PARA REGIME PERMANENTE.

As energias mecânicas associadas a um líquido são:

- Energia potencial:  $E_g$

É o estado de energia do sistema devido a sua posição no campo da gravidade em relação a um plano horizontal de referência (Brunetti, 2005).

Na figura 2.8 o peso do sistema é  $F_g$  e possui um centro de gravidade na cota  $z$  em relação à referência.



**FIGURA 2.8- Energia potencial**

A energia deve ser determinada pelo potencial de realização de trabalho dado pela equação 2.18.

$$E_g = (F_g \cdot z) = (m \cdot g \cdot z) \quad (2.18)$$

onde:

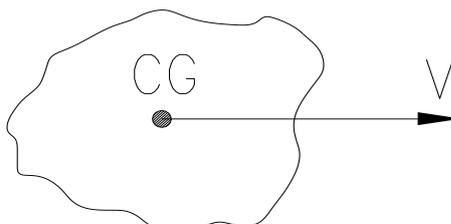
$E_g$  [N.m] – energia potencial;

$F_g$  [N] – força peso;

$z$  [m] – cota em relação à referência.

- Energia cinética:  $E_c$

A figura 2.9 ilustra um sistema de massa  $m$  e velocidade de escoamento  $v$ .



**FIGURA 2.9- Energia cinética**

A energia cinética é dada pela equação 2.19.

$$E_c = \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right) \quad (2.19)$$

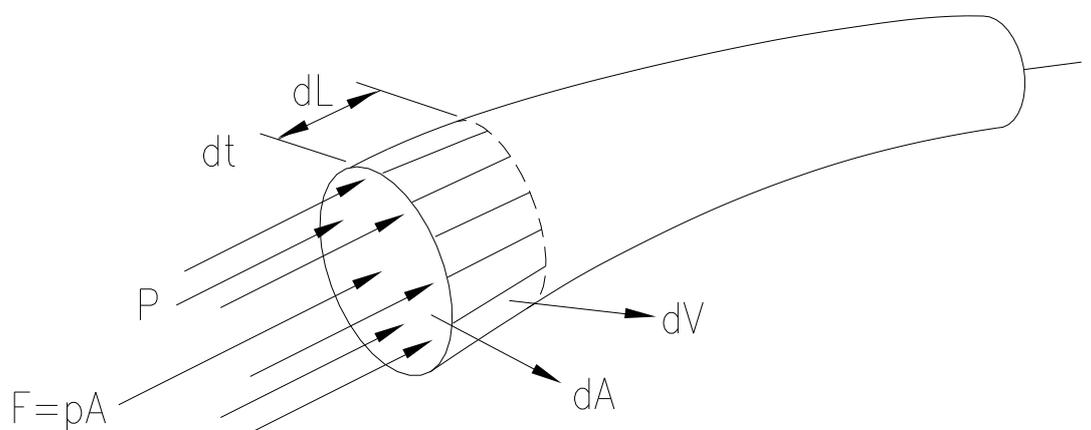
onde:

$E_c$  [N.m] – energia cinética;

$v$  [m/s] – velocidade de escoamento.

- Energia de pressão:  $E_p$

A figura 2.10 ilustra um tubo de cone representando trabalho das forças de pressão que atuam no escoamento do líquido.



**FIGURA 2.10- Energia de pressão (fonte: adaptado de Daker, 1969).**

Considerando que a pressão seja uniforme na seção, a força aplicada pelo líquido externo no líquido do tubo de corrente, na interface de área  $A$  será  $F = p \cdot dA$ . No intervalo de tempo  $dt$ , o líquido se deslocará de um  $dl$ , sob a ação da força  $F$ , produzindo uma energia apresentada na equação 2.20.

$$dE_p = (F \cdot dl) = (pA \cdot dl) = (p \cdot dV)$$

ou

$$E_p = \left( \int_v p \cdot dV \right) \quad (2.20)$$

onde:

$E_p$  [N.m] – energia de pressão

$p$  [N/m<sup>2</sup>] – pressão

$dV [m^3]$  – volume

A energia mecânica total de um sistema com líquido escoando será:

$$E = (E_g + E_c + E_p) \quad (2.21)$$

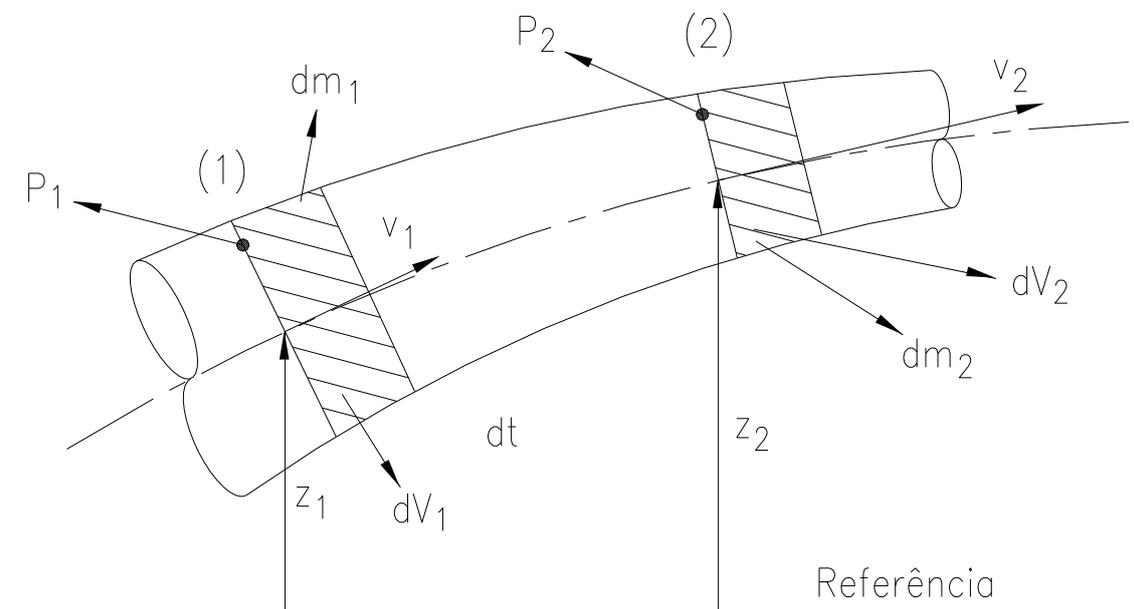
$$E = \left[ (m \cdot g \cdot z) + \left( \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \right) + \left( \int_v p \cdot dV \right) \right] \quad (2.22)$$

### 2.2.5. EQUAÇÃO DE BERNOULLI

Para o desenvolvimento da equação de Bernoulli, consideram-se as seguintes hipóteses:

- mesma linha de corrente;
- regime permanente;
- escoamento sem atrito;
- propriedades uniformes na seção;
- fluido incompressível (Líquido).

A figura 2.11 representa um tubo de corrente entre as seções 1 e 2.



**FIGURA 2.11- Tubo de corrente, escoamento de um líquido nas seções 1 e 2 (fonte: adaptado de Brunetti, 2005).**

Para um intervalo de tempo  $dt$ , escoará as massas de líquido  $dm_1$  e  $dm_2$ , respectivamente, nas seções 1 e 2. As energias correspondentes as seções 1 e 2 estão apresentadas nas equações 2.23 e 2.24.

$$dE_1 = \left[ (dm_1 \cdot g \cdot z_1) + \left( dm_1 \cdot \frac{v_1^2}{2} \right) + (p_1 \cdot dV_1) \right] \quad (2.23)$$

$$dE_2 = \left[ (dm_2 \cdot g \cdot z_2) + \left( dm_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} \right) + (p_2 \cdot dV_2) \right] \quad (2.24)$$

Nas hipóteses foi considerado o escoamento permanente e sem atrito, tem-se  $dE_1 = dE_2$ . Então:

$$\left[ (dm_1 \cdot g \cdot z_1) + \left( dm_1 \cdot \frac{v_1^2}{2} \right) + (p_1 \cdot dV_1) \right] = \left[ (dm_2 \cdot g \cdot z_2) + \left( dm_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} \right) + (p_2 \cdot dV_2) \right] \quad (2.25)$$

Como  $dV = \left( \frac{dm}{\rho} \right)$  e trata-se de um líquido ( $P_1 = P_2 = cte$ ), tem-se:

$$\left[ (g \cdot z_1) + \left( \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} \right) \right] = \left[ (g \cdot z_2) + \left( \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \right) \right] \quad (2.26)$$

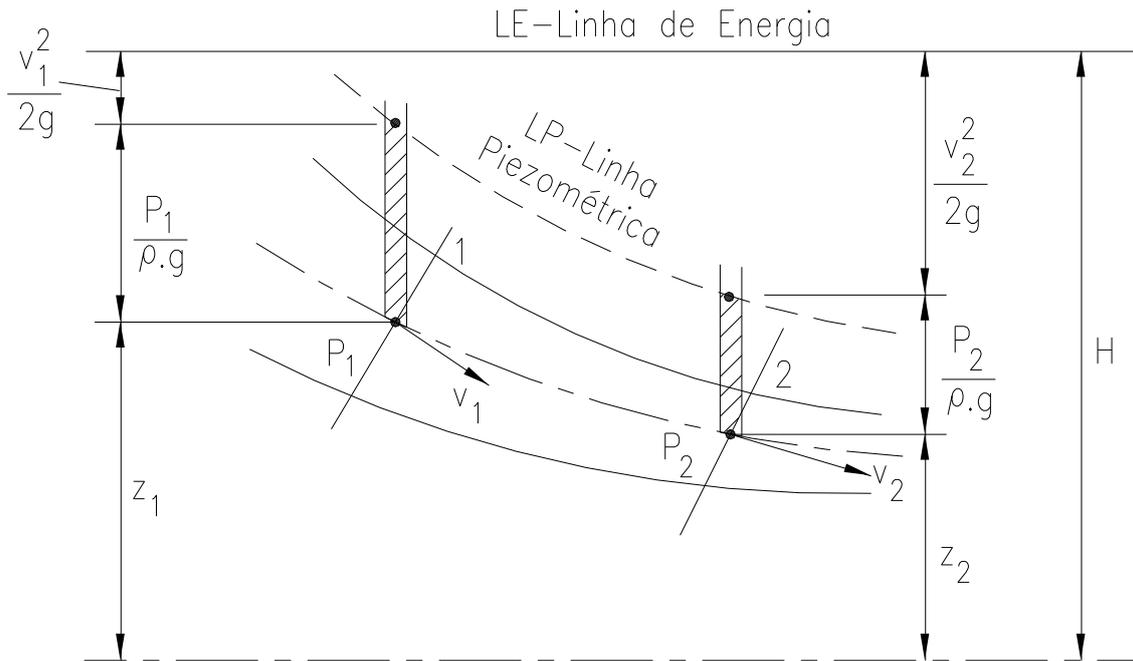
Dividindo a expressão por g tem-se:

$$\left[ (z_1) + \left( \frac{v_1^2}{2g} \right) + \left( \frac{p_1}{\rho \cdot g} \right) \right] = \left[ (z_2) + \left( \frac{v_2^2}{2g} \right) + \left( \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right) \right] \quad (2.27)$$

A equação 2.27 representa a equação de Bernoulli.

A figura 2.12 representa a equação de Bernoulli para líquidos, escoamento sem atrito e em um conduto circular.

Linha de Energia



**FIGURA 2.12- Representação da equação de Bernoulli, linha de energia e linha piezométrica, para escoamento ideal.**

Na equação 2.28 tem-se a altura de carga total

$$\left[ \left( \frac{p_1}{\rho \cdot g} \right) + \left( \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1) \right] = [H_1] = \left[ \left( \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left( \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_2) \right] = [H_2] \quad (2.28)$$

onde:

$H_1$  [m] – altura de carga total em 1;

$H_2$  [m] – altura de carga total em 2;

$\frac{p_1}{\rho \cdot g}$  [m];  $\frac{p_2}{\rho \cdot g}$  [m] – Alturas de pressão;

$\frac{v_1^2}{2 \cdot g}$  [m];  $\frac{v_2^2}{2 \cdot g}$  [m] – Alturas de velocidade;

$z_1$  [m];  $z_2$  [m] – Alturas potenciais.

A equação de Bernoulli pode ser adaptada para um escoamento real, ou, seja o líquido terá viscosidade e aparecerão as perdas de carga devido ao atrito das partículas do líquido e entre as paredes da tubulação. Desta forma, a equação 2.28 transforma na equação 2.29 ou 2.30.

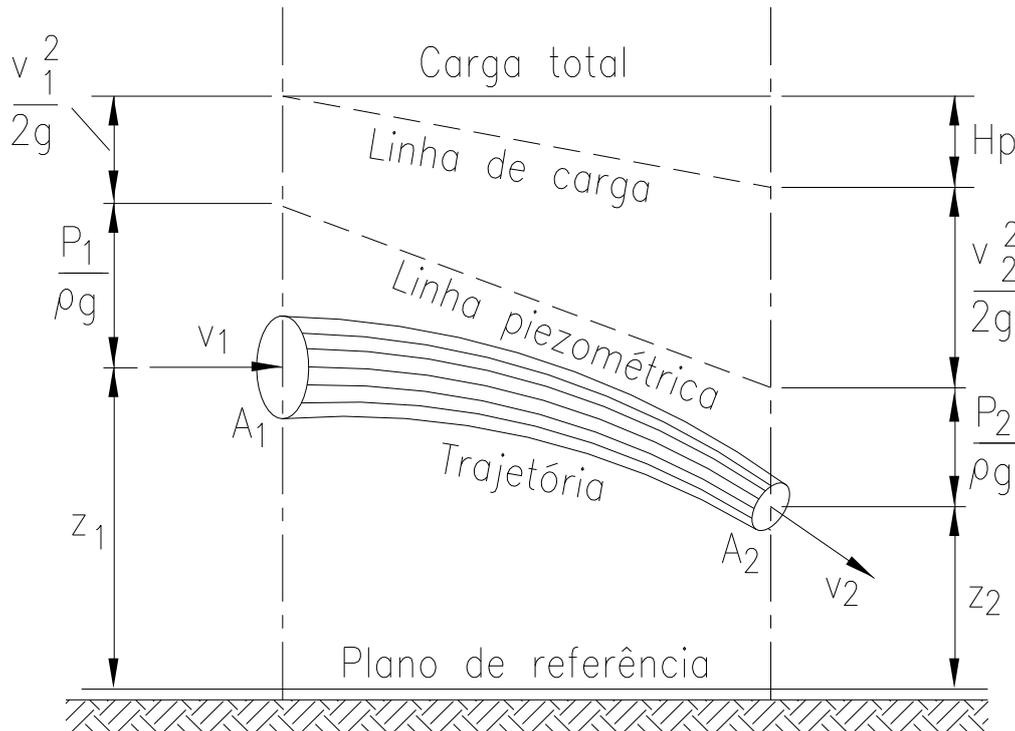
$$H_2 = (H_1 - H_{p_{1 \rightarrow 2}}) \quad (2.29)$$

$$\left[ \left( \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right) + \left( \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \right) + (z_2) \right] = \left[ \left( \frac{p_1}{\rho \cdot g} \right) + \left( \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \right) + (z_1 - H_{p_{1 \rightarrow 2}}) \right] \quad (2.30)$$

onde:

$H_{p_{1 \rightarrow 2}}$  [m] – perdas de cargas totais entre 1 e 2.

A figura 2.13 ilustra a equação 2.30.



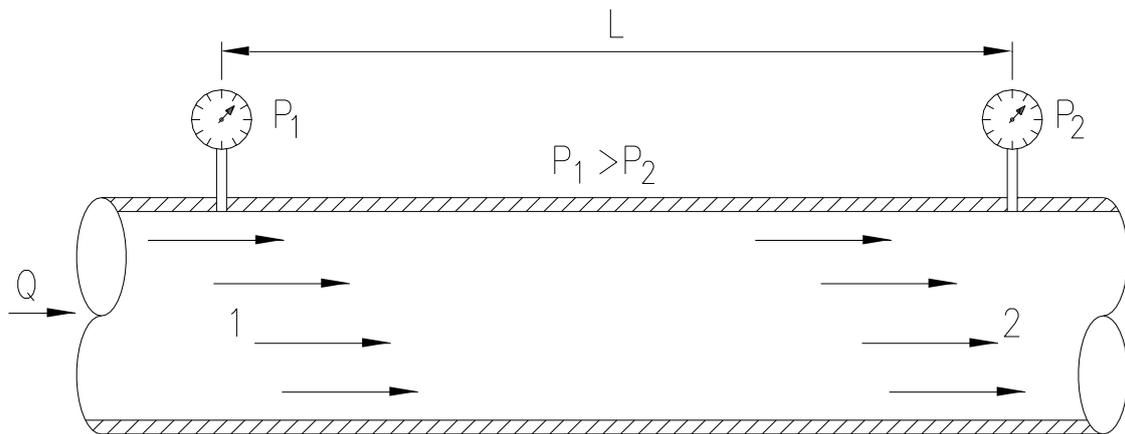
**FIGURA 2.13- Representação da equação de Bernoulli, linha de energia e linha piezométrica, para escoamento real.**

## 2.2.6. PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES

As perdas de carga ou perdas de energia de escoamento em uma tubulação ocorrem devido ao atrito entre as partículas e o atrito dessas partículas com a parede da tubulação.

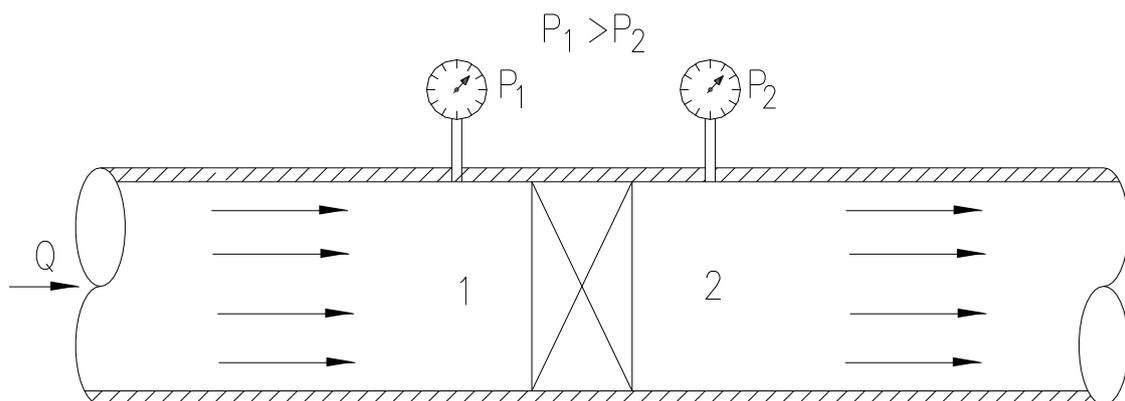
As perdas podem ser:

- ✓ Perdas distribuídas: são aquelas que ocorrem em um trecho reto de tubulação, como mostra a figura 2.14.



**FIGURA 2.14- Perda de carga distribuídas entre os pontos 1 e 2.**

- ✓ Perdas localizadas: são perdas de pressão pelas peças e singularidades ao longo da tubulação, tais como, curvas, válvulas, derivações, reduções, expansões, etc. A figura 2.15 mostra a perda de carga localizada em uma válvula entre dois pontos.



**FIGURA 2.15- Perda de carga localizada entre os pontos 1 e 2**

- ✓ Perda de carga total: é a soma das perdas de carga distribuídas em todos os trechos retos da tubulação e as perdas de carga localizadas em todas as válvulas, junções, curvas, etc.

As perdas de carga distribuídas e localizadas no escoamento em tubulações podem ser determinadas através das medidas de pressão, como mostra a figura 2.14 e 2.15. Por outro lado, estas perdas podem ser calculadas

através de fórmulas experimentais ou empíricas, conhecendo-se as dimensões da tubulação, características do líquido e das conexões.

Neste trabalho será descrito a fórmula universal ou de Darcy-Weisbach e a determinação dos comprimentos equivalentes fórmula dos acessórios de tubulações ou pela fórmula de Borda Belanger para determinação de suas respectivas perdas de carga.

#### - Fórmula de Darcy-Weisbach

A fórmula de Darcy-Weisbach é usada para diâmetros acima de 50 [mm] e válida para líquidos, equação 2.31.

$$H_p = \left[ (f) \cdot \left( \frac{L}{D} \right) \cdot \left( \frac{v^2}{2g} \right) \right] = \left[ (f) \cdot \left( \frac{L}{D^5} \right) \cdot \left( \frac{8}{\pi^2 \cdot g} \right) \cdot (Q^2) \right] \quad (2.31)$$

onde:

**$H_p$  [m]** – perda de carga distribuída;

**$f$  [adimensional]** – coeficiente de atrito;

**$L$  [m]** – comprimento da tubulação;

**$D$  [m]** – diâmetro da tubulação;

**$v$  [m/s]** – velocidade média do líquido;

**$g$  [m/s<sup>2</sup>]** – aceleração da gravidade;

**$Q$  [m<sup>3</sup>/s]** – vazão.

#### - Coeficiente de atrito $f$ :

É um coeficiente sem dimensões, do qual é função do Número de Reynolds e da rugosidade relativa. A Rugosidade relativa é definida como

sendo:  $\left( \frac{\epsilon}{D} \right)$ .

onde:

**$\epsilon$  [m]** - rugosidade da parede do tubo;

**$D$  [m]** – diâmetro do tubo.

Os valores da rugosidade das paredes dos tubos para alguns materiais estão na tabela 2.2.

**TABELA 2.2- Rugosidade das paredes dos tubos (fonte: Porto, 2003).**

Material	$\varepsilon$ (m) – Tubos Novos	$\varepsilon$ (m)-Tubos Velhos
Aço galvanizado	0,00015 - 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 - 0,0030	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0005 – 0,0012
Aço soldado	0,00004 – 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento amianto	0,000013	-
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 – 0,0010	-
Concreto ordinário	0,0010 – 0,0020	-
Ferro forjado	0,00004 – 0,00006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 – 0,00050	0,0030 – 0,0050
Madeira com aduelas	0,0002 – 0,0010	-
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
Vidro	lisos	lisos
Plástico	lisos	lisos

A determinação do fator de atrito, normalmente é feita pelo diagrama de Moody, para tubos lisos e rugosos e ainda para escoamento laminar e turbulento. A figura 2.16 ilustra o diagrama de Moody.

Como em hidráulica os escoamentos são predominantemente turbulentos, neste trabalho propõe-se a equação desenvolvida por Nackabe.

Segundo Nackabe que explicitou o fator de atrito  $f$ , para escoamento turbulento, mostrado na equação 2.32.

$$f = \left[ 2 \log \left( 0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{D} + \frac{2,51}{\text{Re} \left( \sqrt{0,4(\text{Re})^{-0,3} + 0,0053} \right)} \right) \right]^{-2} \quad (2.32)$$

onde:

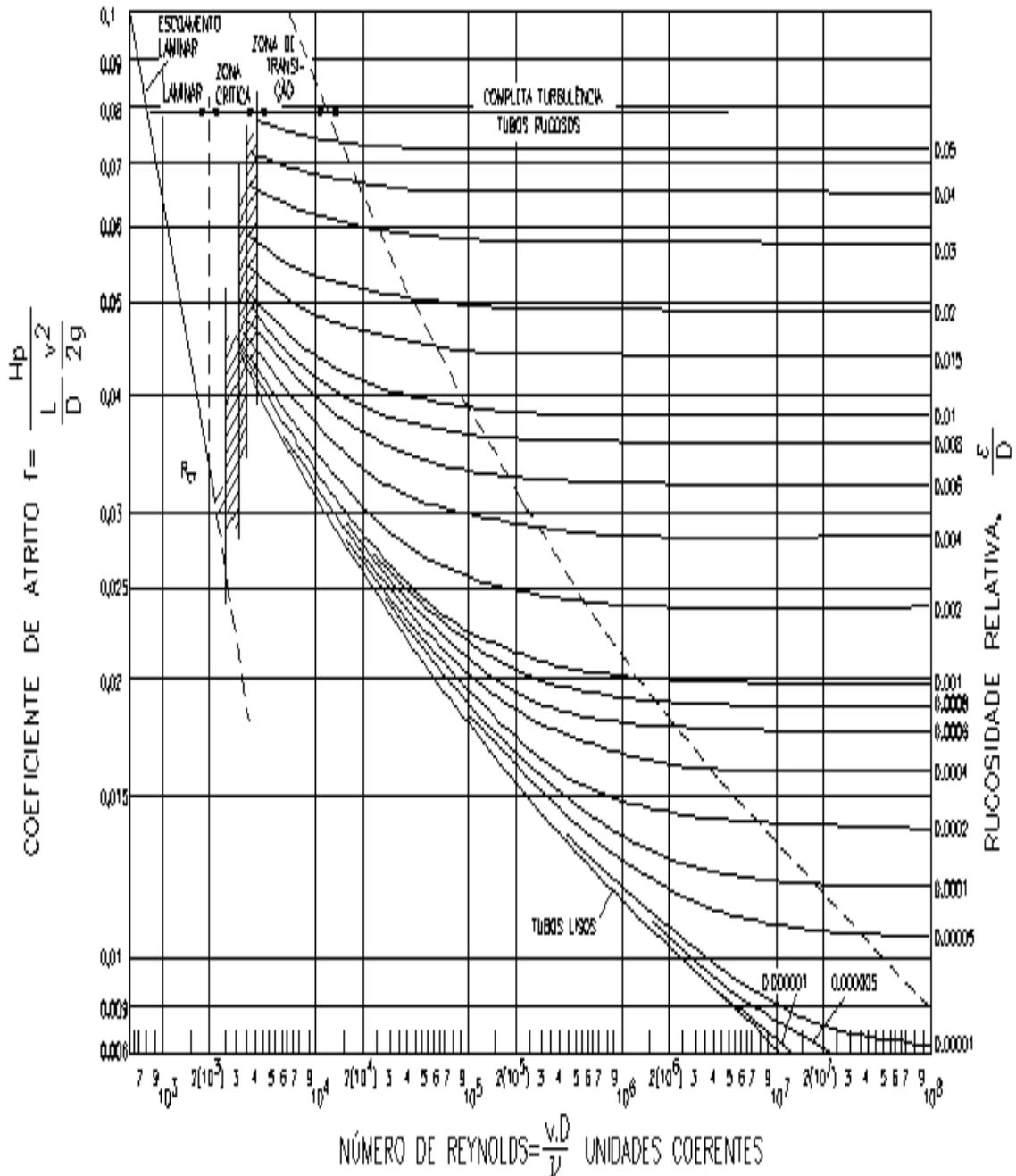
$f [1]$  – fator de atrito;

$\left( \frac{\varepsilon}{D} \right) [1]$  - rugosidade relativa;

$\varepsilon [m]$  - rugosidade absoluta;

$D [m]$  – diâmetro da tubulação e;

$\text{Re} [1]$  – número de Reynolds.



**FIGURA 2.16- Diagrama de Moody**

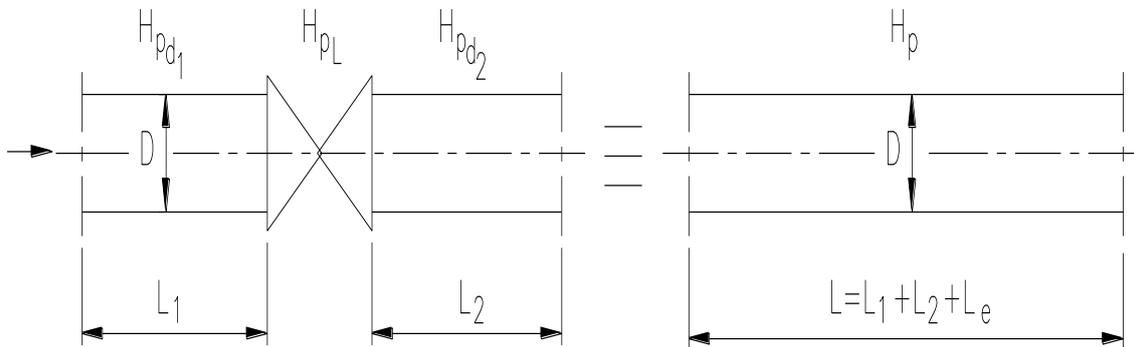
As perdas de carga localizadas podem ser determinadas pelo comprimento equivalente ou pela fórmula de Borda Belanger.

Uma tubulação que possui ao longo de sua extensão diversas singularidades equivale, sob o ponto de vista de perda de carga, a um encanamento retilíneo de comprimento maior sem singularidades.

O método do comprimento equivalente consiste em adicionar à extensão da canalização, para efeito de cálculo, comprimentos tais que correspondam à mesma perda de carga que causariam as peças existentes na canalização.

Seja a figura 2.17, uma tubulação de certo comprimento, que possui uma válvula ao longo de sua linha, terá uma perda de carga que será a soma da perda de carga ao longo da tubulação mais a perda de carga na válvula.

Assim determinado o comprimento equivalente, recai-se num dos processos de perda de carga distribuída.



**FIGURA 2.17- Comprimento equivalente**

onde:

**Hpd<sub>1</sub>** - perda de carga distribuída no trecho L1;

**Hpd<sub>2</sub>** - perda de carga distribuída no trecho L2;

**Hpl** - perda de carga localizada na válvula;

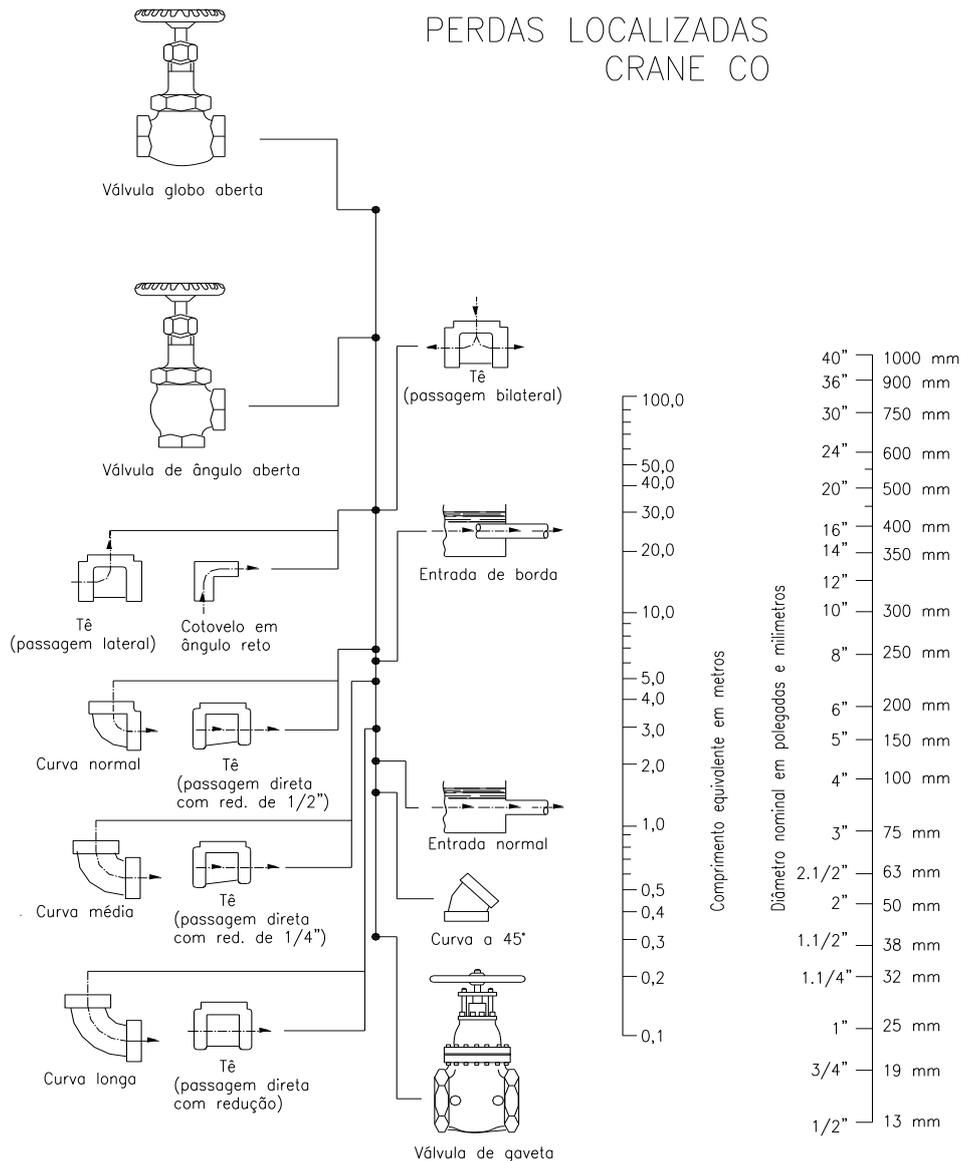
**Hp** - perda de carga total;

**Le** - comprimento equivalente da válvula.

ou por Darcy-Weisbach, tem-se:

$$\mathbf{H_p} = \left[ f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \right] = \left[ f \cdot \frac{(L_1 + L_2 + L_e)}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \right] = \left[ f \cdot \frac{(L_1 + L_2 + L_{eq})}{D^5} \cdot \frac{8}{\pi^2 \cdot g} \cdot Q^2 \right] \quad (2.33)$$

A figura 2.18 traz os comprimentos equivalentes de vários acessórios de tubulações



**FIGURA 2.18- Ábaco de comprimentos equivalentes. (fonte: Netto, 1998)**

O método de Borda Belanger pode ser expresso pela equação (2.34).

$$H_p = K \cdot \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (2.34)$$

onde:

$H_{pL}$  [m H<sub>2</sub>O]- perda de carga localizada na válvula;

$K$  [adimensional]- é o coeficiente de perda de energia localizada, que é função da geometria da singularidade e do número de Reynolds;

$v$  [m/s]- é a velocidade média do escoamento;

$g[m/s^2]$  - aceleração da gravidade.

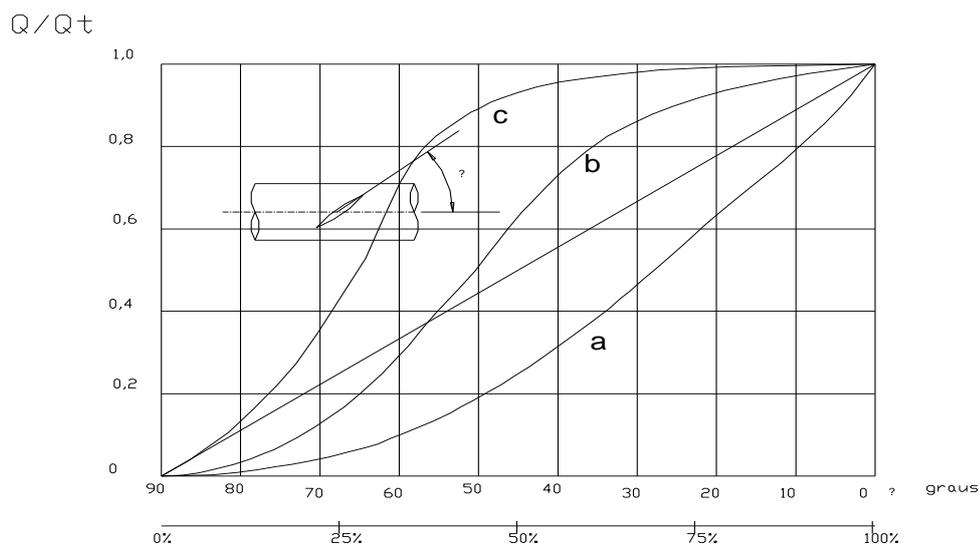
Segundo (Porto, 2003) o  $K$  é um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds, da rugosidade da parede e, em alguns casos, das condições do escoamento, como a distribuição da vazão em uma ramificação. A velocidade média de referência é  $V_{méd}$ , em geral nas peças em que há mudança de diâmetro, tomada como a velocidade média na seção de menor diâmetro.

Um exemplo dos valores de  $K$  é o da válvula borboleta apresentado na tabela (2.3), que nos mostra a relação de  $k$  em função do ângulo de abertura da válvula borboleta. Podemos ver que quanto maior o ângulo de abertura ou seja, quanto mais se abre a válvula, maior é o valor utilizado para  $k$ .

**TABELA 2.3 - Valores de  $k$  em função do ângulo de abertura**

Graus	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	65	70	90
K	0,15	0,24	0,52	0,90	1,54	2,51	9,31	10,8	32,6	118	256	751	$\infty$

fonte: (Baptista et al, 2003)



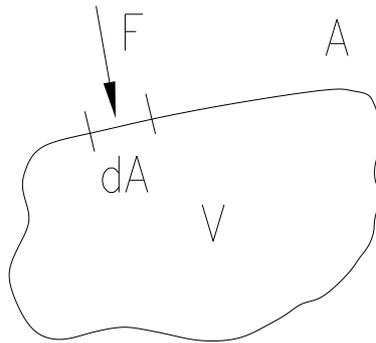
**FIGURA 2.19 - Características da válvula borboleta em relação a vazão e a abertura da válvula (fonte: Chapallaz et al, 1992)**

A figura 2.19 mostra características da válvula borboleta. A curva “a” representa a relação entre a vazão e a abertura da válvula se a perda de carga do sistema é desprezível em relação à perda criada pela válvula (válvula pequena em uma tubulação grande). Por outro lado as curvas “b” e “c” representam válvulas com perdas de carga relativamente pequenas em relação à perda de carga do sistema (válvula grande em relação à tubulação) (Chapallaz et al, 1992).

## 2.3. MEDIDAS DE PRESSÃO

### 2.3.1. CONCEITO

A pressão é a força normal que age sobre uma área. Considerando-se no interior de certa massa líquida, uma porção de volume  $V$ . Limitada pela superfície  $A$ , como mostra a figura 2.20, e se  $dA$  representa um elemento de área nessa superfície e  $dF$  a força que nela atua perpendicularmente, a pressão será a dada pela equação 2.35.



**FIGURA 2.20- Força e área em uma massa líquida (fonte: Bandini, 1961).**

$$p = \left( \frac{dF}{dA} \right)$$

(2.35)

Se a pressão for uniforme, então tem-se:

$$p = \left( \frac{F}{A} \right) \quad (2.36)$$

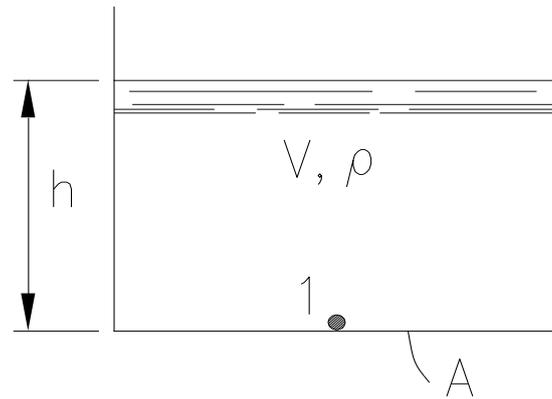
onde:

$p$  [N/m<sup>2</sup>] – pressão;

$F$  [N] – força perpendicular a área;

$A$  [m<sup>2</sup>] – área.

A pressão pode ser expressa em função da altura de líquido. Seja a figura 2.21 um reservatório de volume de líquido  $V$ , com massa específica  $\rho$  e uma altura de líquido  $h$ .



**FIGURA 2.21- Pressão em função de h**

A pressão no ponto 1 será:  $\mathbf{p} = \left( \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{A}} \right)$ .

A força  $\mathbf{F}$  representa o peso de líquido em 1. Obtendo-se:

$$\mathbf{F} = [\mathbf{m} \cdot \mathbf{g}] = [\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{g}] = [\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{g}] \quad (2.37)$$

Então a pressão será:

$$\mathbf{p} = \left[ \left( \frac{\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{g}}{\mathbf{A}} \right) \right] = [\boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{h}] \quad (2.38)$$

onde:

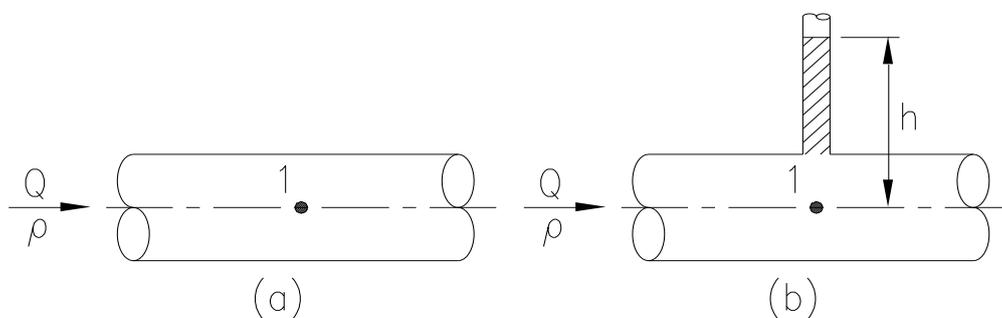
$\mathbf{p}[\mathbf{N}/\mathbf{m}^2]$  – pressão estática no ponto 1;

$\boldsymbol{\rho}[\mathbf{Kg}/\mathbf{m}^3]$  – massa específica do líquido;

$\mathbf{g}[\mathbf{m}/\mathbf{s}^2]$  – aceleração da gravidade;

$\mathbf{h}[\mathbf{m}]$  – altura de líquido.

Em uma tubulação, a pressão estática pode ser representada na figura 2.22.

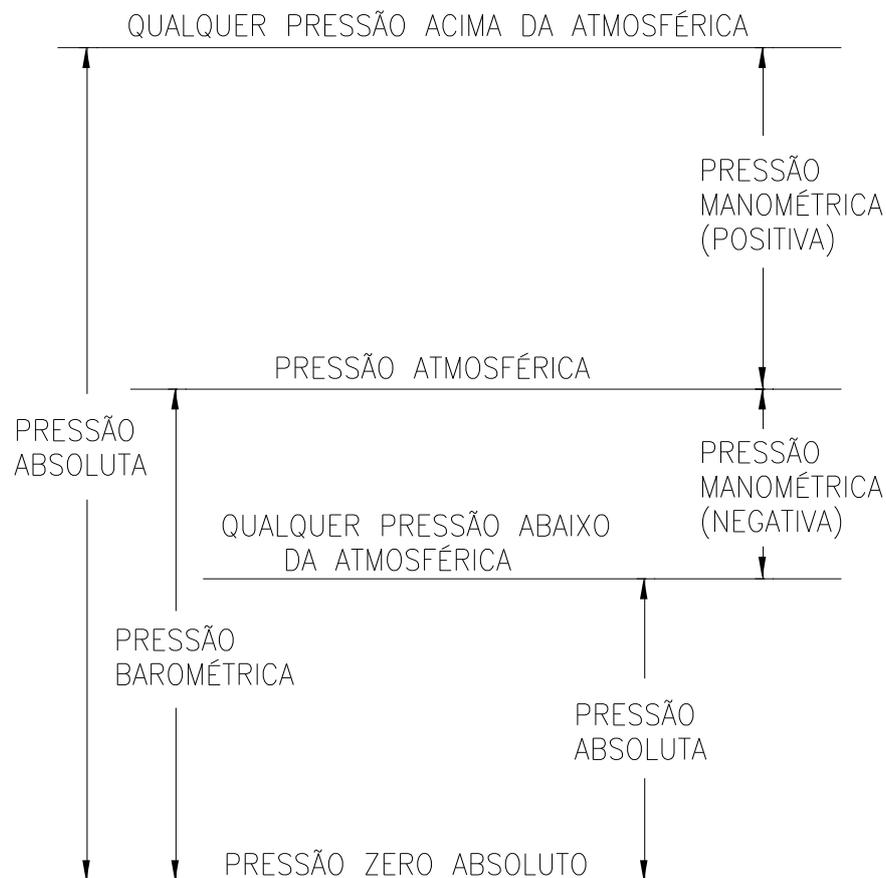


**FIGURA 2.22- Pressão em uma tubulação (fonte: adaptado de Brunetti, 2005)**

A pressão em  $p_1 = (\rho \cdot g \cdot h)$  representa a pressão estática positiva, ou seja, a pressão interna do líquido é maior que a pressão externa à tubulação.

Desta forma, podem-se mostrar as escalas de pressão. Se a pressão for medida em relação ao vácuo absoluto ou zero absoluto, ela é chamada de pressão absoluta (Brunetti, 2005). Caso ela seja medida em relação a atmosfera é chamada de pressão efetiva, pressão relativa ou pressão manométrica. A pressão manométrica pode ser positiva ou negativa, enquanto a pressão absoluta é sempre positiva.

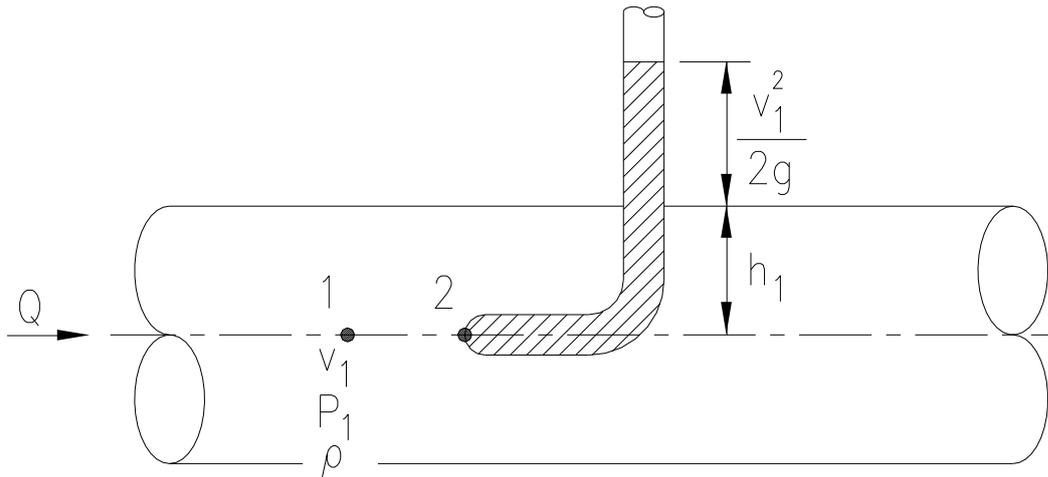
A figura 2.23 mostra as escalas de pressão.



**FIGURA 2.23- Escalas de pressão.**

Nas figuras 2.21 e 2.22 foram mostradas as pressões estáticas.

Entretanto, pode-se tratar em termos de pressões em movimento. A figura 2.24 ilustra o escoamento de um líquido em um canal.



**FIGURA 2.24- Tubo de Pitot, pressão de estagnação (fonte: adaptado de Vernard et al, 1978)**

Henri Pitot (1732) forneceu a base para a medida da pressão de estagnação com seu tubo de Pitot. Na figura 2.24 mostra o tubo de Pitot que é um pequeno tubo com a frente voltado para montante do escoamento e tem a função de medir a velocidade  $v_1$ . O líquido do tubo se eleva até a altura  $v_1^2/2g$  acima da superfície.

A pressão  $p_2$ , denominada de estagnação ( $v_2=0$ ) é dada pela expressão (2.39) ou (2.40).

$$p_2 = \left[ (p_1) + \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 \right) \right] \quad (2.39)$$

ou

$$\left( \frac{p_2}{\rho \cdot g} \right) = \left( \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \right) \quad (2.40)$$

onde:

$p_1 = (\rho \cdot g \cdot h_1)$ , denominada de pressão estática e  $\left( \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} \right)$  de pressão dinâmica.

Então, tem-se:

$$p_2 = \left[ (\rho \cdot g \cdot h_1) + \left( \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} \right) \right] = [(p_{\text{estática}}) + (p_{\text{dinâmica}})] \quad (2.41)$$

## 2.3.2 COMPOSIÇÃO DOS MEDIDORES DE PRESSÃO

Os medidores de pressão de um modo geral podem ser divididos em três partes, sendo fabricado pela associação destas partes ou mesmo incorporado a conversores e aí recebendo o nome de transmissores de pressão. As três partes são:

- Elemento de recepção: Aquele que recebe a pressão a ser medida e a transforma em deslocamento ou força (ex: Bourdon, fole, diafragma).
- Elemento de transferência: Aquele que amplia o deslocamento ou a força do elemento de recepção ou que transforma o mesmo em um sinal único de transmissão do tipo elétrica ou pneumática, que é enviada ao elemento de indicação (ex: links mecânicos, relé piloto, amplificadores operacionais).
- Elemento de indicação: Aquele que recebe o sinal do elemento de transferência e indica ou registra a pressão medida (ex: ponteiros, displays).

## 2.3.3. PRINCIPAIS TIPOS DE MEDIDORES

### 2.3.3.1. Manômetros

São dispositivos utilizados para indicação local de pressão e em geral divididos em duas partes principais: o manômetro de líquidos, que utiliza um líquido como meio para se medir a pressão, e o manômetro tipo elástico que utiliza a deformação de um elemento elástico como meio para se medir pressão.

A tabela 2.4 abaixo classifica os manômetros de acordo com os elementos de recepção.

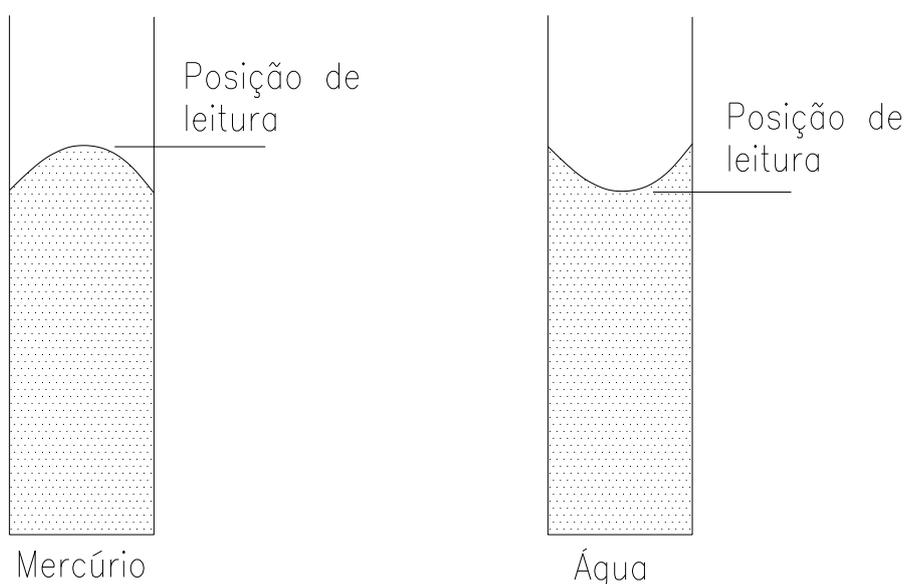
**TABELA 2.4- Manômetros de acordo com os elementos de recepção.**

TIPOS DE MANÔMETRO	ELEMENTOS DE RECEPÇÃO
MANÔMETROS DE LÍQUIDO	TIPO TUBO EM "U"
	TIPO TUBO RETO
	TIPO TUBO INCLINADO
MANÔMETRO ELÁSTICO	TIPO TUBO DE BOURDON TIPO C TIPO ESPIRAL TIPO HELICOIDAL
	TIPO DIAFRAGMA
	TIPO FOLE
	TIPO CÂPSULA

### 2.3.4. MANÔMETRO DE LÍQUIDO

Segundo (Souza et al, 2006) estes manômetros determinam a diferença entre a pressão de interesse e a atmosférica local através do deslocamento de uma coluna líquida, o que pode ocorrer em tubos de igual diâmetro ou não, utilizando um ou mais fluidos não miscíveis.

Na prática o mercúrio e a água são os líquidos mais utilizados para os manômetros de líquidos e tem diferentes formas de menisco conforme figura 2.25 abaixo. No caso do mercúrio, a leitura é feita na parte de cima do menisco, e para a água na parte de baixo do menisco. A formação do menisco é devido ao fenômeno de tubo capilar, que é causado pela tensão superficial do líquido e pela relação entre a adesão líquido-sólido e a coesão do líquido.



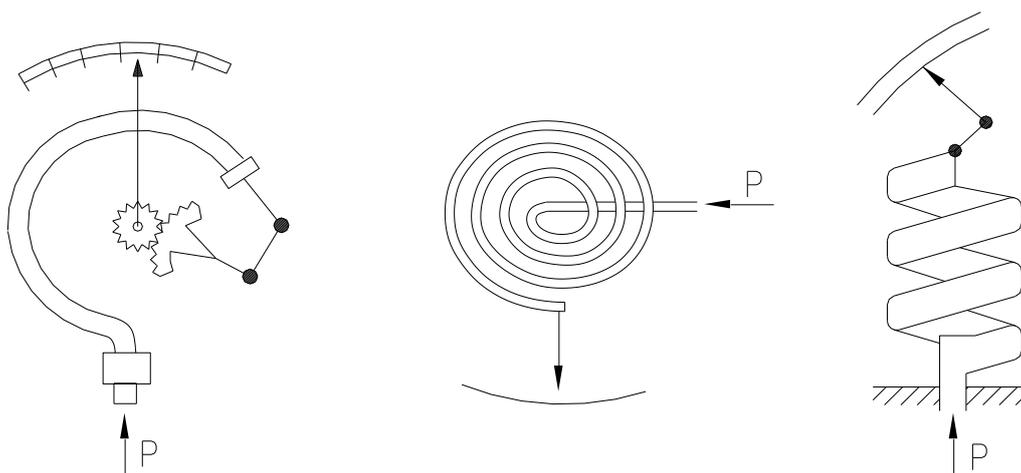
**FIGURA 2.25- Formas de meniscos de acordo com o líquido**

### 2.3.5. MANÔMETRO DE BOURDON

O manômetro de Bourdon é um dos medidores de pressão mais comuns, constituindo basicamente num tubo curvo, flexível e de seção transversal oval. Quando a pressão é aplicada a esse sistema, o tubo tende a se tornar circular havendo deflexão da extremidade livre.

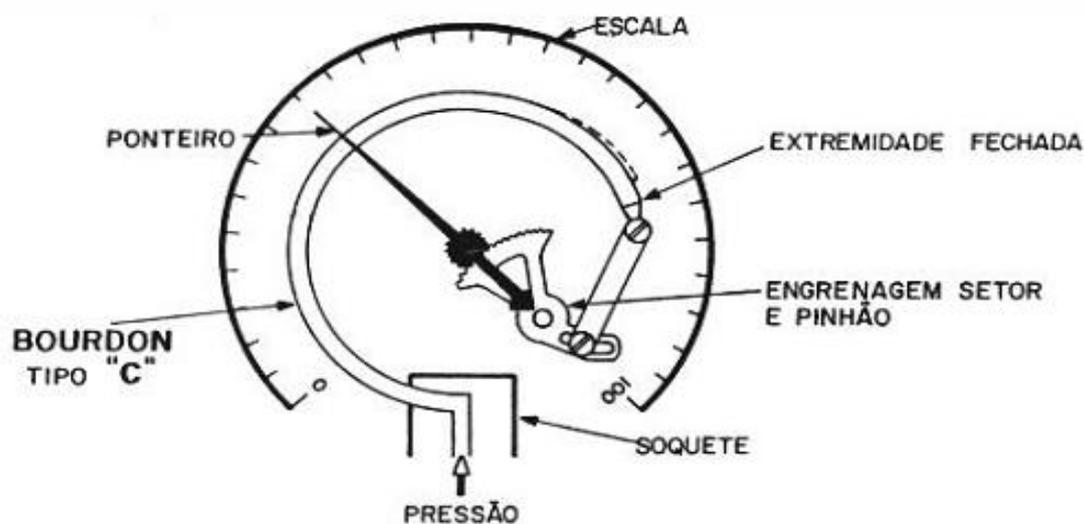
Segundo (Souza et al, 2006) essa deflexão é associada a pressão aplicada, sendo associada a um ponteiro que permite a medição.

.A figura 2.26 ilustra as formas mais comuns dos tubos de Bourdon.



**FIGURA 2.26- Tipo c, tipo espiral e tipo helicoidal, respectivamente**

A figura 2.27 ilustra o detalhamento do manômetro de Bourdon tipo "C".



**FIGURA 2.27- Detalhes de um manômetro tipo Bourdon "C"**

### 2.3.6. TRANSDUTORES DE PRESSÃO

A evolução da tecnologia possibilitou o desenvolvimento de dispositivos mais avançados do que os simples indicadores locais de pressão. Os transdutores ou também chamados de sensores elétricos de pressão convertem os valores em grandezas elétricas que são usadas, local ou remotamente, para leitura e/ou controle de processos. (Bega et al, 2006)

Os transdutores de pressão podem ser: transdutores potenciométricos, capacitivos, de deformação, óticos, indutivos, piezelétricos ou transdutor de fio ressonante.

### 2.3.7. CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE PRESSÃO

As calibrações de instrumentos são realizadas para assegurar as incertezas requeridas aos processos metrológicos, garantindo a rastreabilidade das medições e reduzindo os erros através das correções, o que gera melhorias na qualidade dos resultados aumentando a confiabilidade nas ações e decisões.

A calibração dos instrumentos deve ser realizada quando estes sofrem sobrecarga, quedas, mau uso ou desconfiança dos resultados das medições.

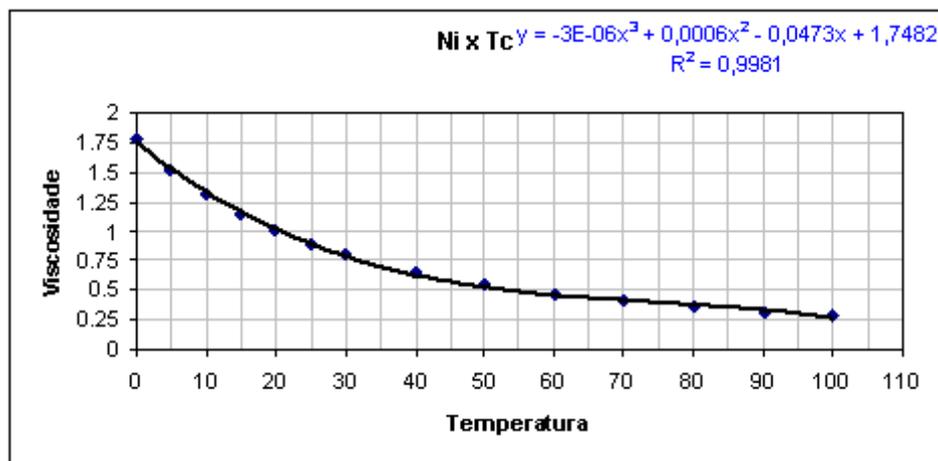
A importância da calibração é a de um instrumento fazer a medição, medindo com o mínimo de erro, isto é, um instrumento de medição de boa qualidade deve apresentar resultados com pequenos erros de medição pôr melhor que sejam as características de um instrumento de medição, este sempre apresentará erros. Sendo assim a perfeita caracterização desses erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser determinado de maneira segura.

Quando se realiza um ensaio de calibração envolvendo cálculos da viscosidade cinemática e este se relaciona com a temperatura, utiliza-se a tabela (2.5) abaixo para um valor mais exato do cálculo da viscosidade cinemática de acordo com a temperatura.

**TABELA 2.5- Viscosidade cinemática x temperatura (fonte: Macintyre, 1997).**

Temperatura (°C)	$\nu \cdot 10^6$ (m <sup>2</sup> /s)
0	1.785
5	1.519
10	1.306
15	1.139
20	1.003
25	0.893
30	0.8
40	0.658
50	0.553
60	0.474
70	0.413
80	0.364
90	0.326
100	0.294

A figura (2.28) abaixo ilustra o gráfico relacionando a temperatura e a viscosidade cinemática com sua respectiva equação.



**FIGURA 2.28- Viscosidade cinemática x temperatura (fonte: Macintyre, 1997).**

## 2.4. MEDIDAS DE VELOCIDADE - ESCOAMENTO E VAZÕES

### 2.4.1 ESCOAMENTO FECHADO (TUBULAÇÕES)

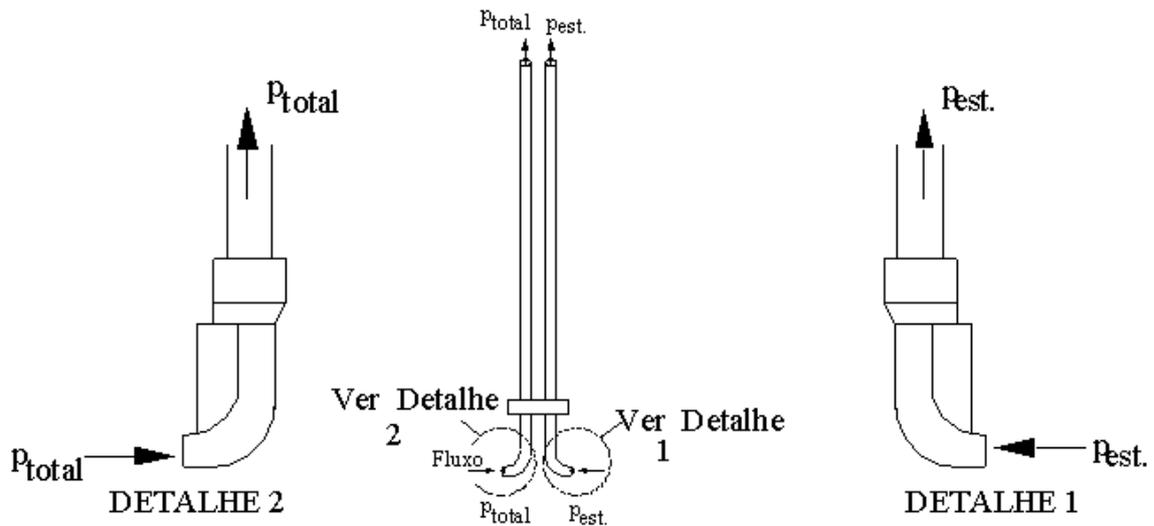
#### 2.4.1.1 Pitot, Pitot-Cole e Prandtl

Em 1732, Henri Pitot propôs o primeiro instrumento para medir velocidade de líquidos. O tubo de Pitot desta época era bem rudimentar. Aperfeiçoou muito o aparelho originalmente idealizado usando a medição decorrente de líquidos e gases em tubos fechados e pressurizados. (Filho et al,2000). Posteriormente surgiu outro instrumento semelhante chamado de tubo de Prandtl.

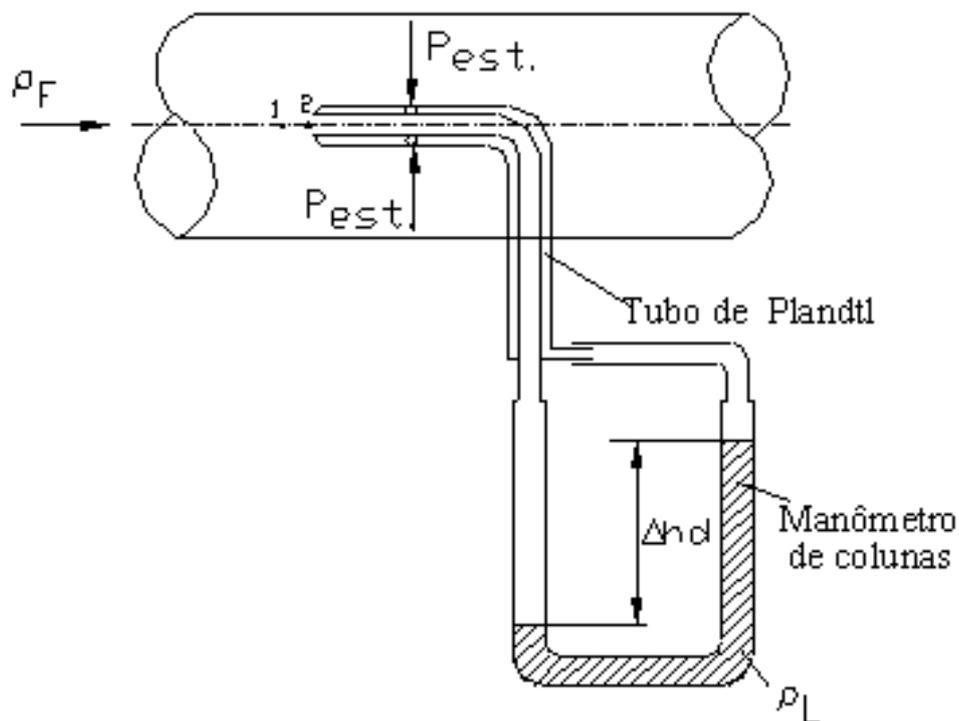
Com o tubo de Pitot e tubo de Prandtl, mede-se a velocidade de uma corrente fluída. O que diferencia um tubo do outro são suas pontas de prova, pois o Pitot possui várias pontas de prova, já o Prandtl sua ponta de prova é uma semi-esfera, exceto para o CETIAT (Centre Technique des Industries Aéronautique et Thermiques) que é tronco-cônica. (Souza et al, 2006).

Um tubo de Pitot consiste em um tubo de material transparente, com uma extremidade recurvada em direção a corrente da água de acordo com a figura 2.24.(Netto, 1998).

A figura 2.29 ilustra o tubo de Pitot-Cole e a figura 2.30 o tubo de Prandtl.



**FIGURA 2.29- Pitot-Cole e seus detalhamentos (fonte:Viana, 2000).**



**FIGURA 2.30- Tubo de Prandtl (fonte:Viana, 2000).**

A equação 2.42 mostra a determinação da velocidade de escoamento utilizando um Pitot-Cole, sendo que a medida da diferença da pressão total e estática  $\Delta H_d$  é obtida pelo manômetro de coluna em U diferencial. Na figura (2.31) são mostradas as posições padronizadas no diâmetro da tubulação tendo como referência o centro do mesmo.

Fórmula:

$$h = \left( \frac{v^2}{2g} \right) \text{ ou } v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.42)$$

Na realidade, porém deve-se introduzir um coeficiente de correção C. Resultando:

$$v = C_{pc} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (2.43)$$

Onde:

**v** [m / s]-velocidade medida;

**C<sub>pc</sub>** [a dim ensional]- coeficiente de correção;

**g** [m / s<sup>2</sup>]- aceleração de gravidade e;

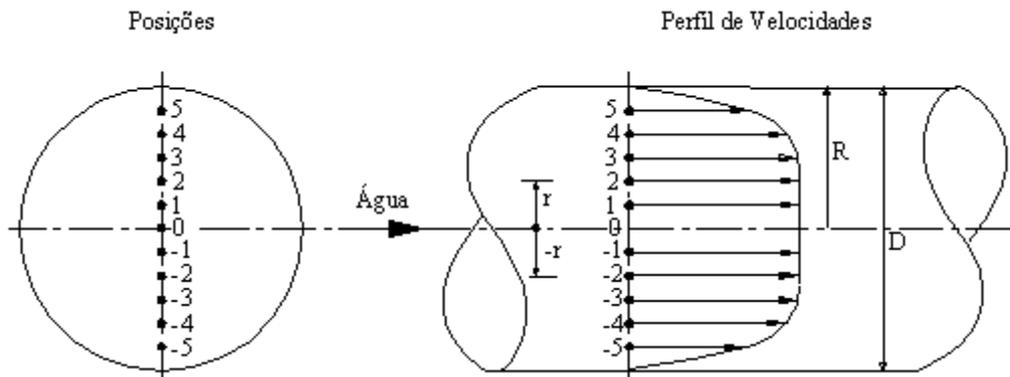
**h** [m]- diferença de pressão estática e dinâmica medida pelo manômetro diferencial em "U".

Para uma medição precisa em tubulação cilíndrica, deve-se proceder a uma exploração ao longo de vários raios. No mínimo quatro são recomendados (Delmée, 1982).

O cálculo das posições padronizadas de r em relação ao centro da tubulação é realizado de acordo com (Trokolanski, 1965), mostrados na tabela 2.6

**TABELA 2.6- Valores das posições padronizadas para o cálculo da velocidade. (fonte: adaptado de Trokolanski, 1965).**

Raio da tubulação em (m)		
Posições ( r )		
0	0	(0) . r
1	0.316	(0,316) . r
2	0.548	(0,548) . r
3	0.706	(0,706) . r
4	0.836	(0,836) . r
5	0.948	(0,948) . r
-1	-0.316	(- 0,316) . r
-2	-0.548	(- 0,548) . r
-3	-0.706	(- 0,706) . r
-4	-0.836	(- 0,836) . r
-5	-0.948	(- 0,948) . r
Parede		

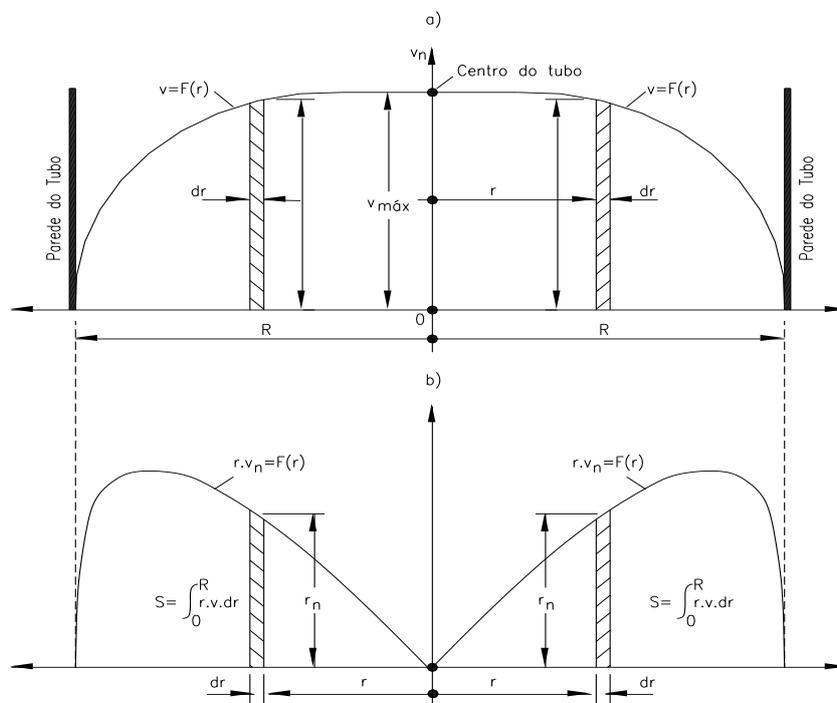


**FIGURA 2.31- Pitot, Pitot-Cole ou Prandtl e as posições padronizadas de medidas da velocidade de escoamento e seu perfil (fonte: Trokolanski, 1965)**

A velocidade média é determinada em cada raio  $R$  pela equação 2.44, onde ela é modificada em função de  $r$ , com seu limite de integração modificado de 0 a  $R$  (Viana, 2007).

$$v_m = \left( \frac{1}{A} \right) \int_A v \cdot dA = \left[ \left( \frac{2}{R^2} \right) \cdot \int_0^R r \cdot v \cdot dr \right] \quad (2.44)$$

onde:  $dA = 2\pi \cdot r \cdot dr$



**FIGURA 2.32- Perfil de velocidades em cada raio  $r$  em uma tubulação (fonte: Viana, 2000).**

A Figura 2.32(a) ilustra o perfil de velocidades em função do raio  $r$  da tubulação e mostra o a figura 2.32(b) o gráfico de  $v.r$  versus  $r$ . A integral  $\int_0^R v.dr$  da equação 2.44 é determinada pelo cálculo da área sob a curva  $v.r$  versus  $r$ . A vazão utilizando o Pitot-Cole pode ser determinado pela equação 2.45. (Viana, 2000).

$$Q = v \cdot A = v \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \quad (2.45)$$

## 2.4.2. MEDIDORES DE VAZÃO ULTRASSÔNICOS

Os medidores de vazão que usam a velocidade do som como meio auxiliar pode ser divididos em dois tipos principais:

- Medidores de efeito Doppler;
- Medidores por Tempo de Trânsito.

### 2.4.2.1 Ultrassônicos por tempo de trânsito

Os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito se baseiam na medição dos tempos que ondas acústicas emitidas simultaneamente no sentido do escoamento e contra o mesmo. Estes medidores podem ter o sistema emissor/receptor colocado externamente ao tubo, ou internamente, denominados, respectivamente, medidores de vazão ultrassônicos não intrusivos e medidores de vazão ultrassônicos intrusivos. (Souza et al, 2006).

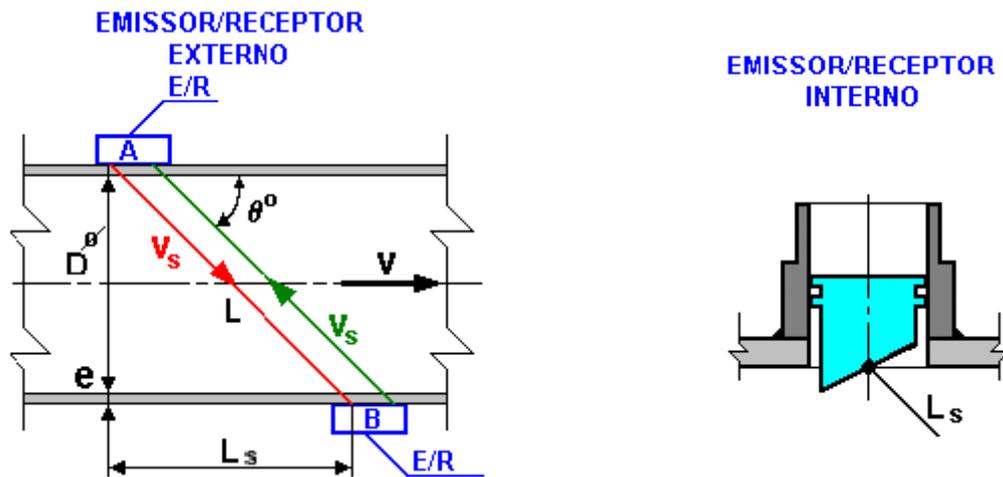
A figura 2.33 abaixo ilustra um medidor de vazão ultrassônico portátil por tempo de trânsito onde o sistema emissor/receptor é utilizado de forma não intrusiva, ou seja, externamente na tubulação. A figura 2.34 ilustra as características do emissor/receptor quando estes são utilizados de forma não intrusiva e intrusiva.



**FIGURA 2.33- Medidor ultrassônico não intrusivo (DCT 7088)  
(fonte: Souza et al, 2006)**

Segundo (Netto, 1998) os medidores ultrassônicos são modernos e de

alta precisão, que se aplicam tanto as tubulações como aos canais prismáticos e apresentam vantagens como à facilidade de instalação, sem necessidade de interromper o funcionamento não havendo nenhuma peça dentro do tubo, apenas peças ajustáveis externamente, conseqüentemente não havendo perda de carga.



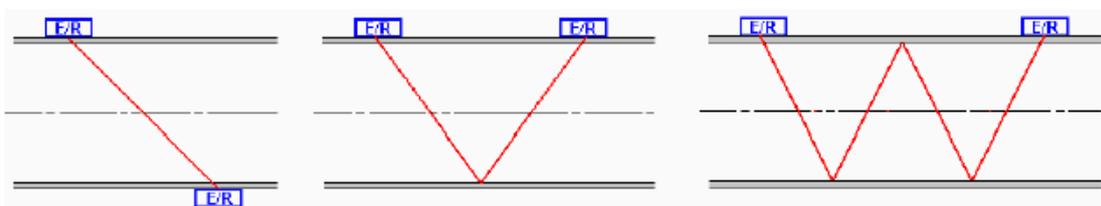
**FIGURA 2.34- Emissores / receptores interno e externo do ultrassom (fonte: Souza et al, 2006).**

A velocidade média do fluido será:

$$V = \left[ \left( \frac{\Delta t}{T^2} \right) \times \left( \frac{L}{2 \cos \theta} \right) \right] \quad (2.46)$$

onde: T e  $\Delta T$  são o tempo médio e a diferença entre os tempos de trânsito em ambos os sentidos.

Os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito podem também ser classificados em função da configuração do trajeto da onda ultrassônica dentro da tubulação. Em geral consideram-se três tipos, comumente denominada configuração “Z”, “V” ou “W”, conforme a figura 2.35.



**FIGURA 2.35- Classificação dos medidores de vazão ultrassônicos de acordo com a configuração do trajeto da onda dentro da tubulação (fonte: Souza et al, 2006).**

O tipo de configuração influencia diretamente sobre a qualidade do resultado obtido e é determinado em função de uma relação de compromisso

entre diversas variáveis, dentre as quais se podem citar: exatidão desejada, taxa de amostragem do medidor, comprimento do caminho e atenuação admissível.

Como mostrado anteriormente o valor da vazão é obtido através da diferença dos tempos de trânsito da onda ultrassônica no sentido de montante e no sentido de jusante. Dessa forma, a escolha da configuração adequada deve levar em consideração a obtenção de tempos significativamente maiores que o tempo de amostragem do medidor.

Sendo assim, se a tubulação é de pequeno diâmetro, é interessante aumentar o caminho a ser percorrido empregando as configurações “V” ou “W”. Já as tubulações de maior diâmetro (centenas de polegadas), a questão não se encontra em se obter um tempo adequado, mas no problema da atenuação do sinal, quando este percorre caminhos muito grandes, quando se dá preferência à configuração “Z” (Souza et al,2006)

O procedimento de configuração do medidor é de forma simples e rápida sendo realizadas em duas etapas.

A primeira etapa é digitar nos menus do display do medidor características da tubulação como os diâmetros interno e externo, material da tubulação, material de revestimento, se houver, espessura do revestimento, tipo de fluido, tipo de transdutor e método de montagem do transdutor para calcular o espaçamento dos transdutores a serem instalados.

A segunda etapa é digitar a unidade que se queira trabalhar, instalar os transdutores de acordo com o espaçamento fornecido pelo medidor e verificar o sinal transmitido pelos transdutores. Através disto o medidor de vazão está em condições de medir velocidade e fluxo.

#### **2.4.2.2 Medidor de espessura ultrassônico**

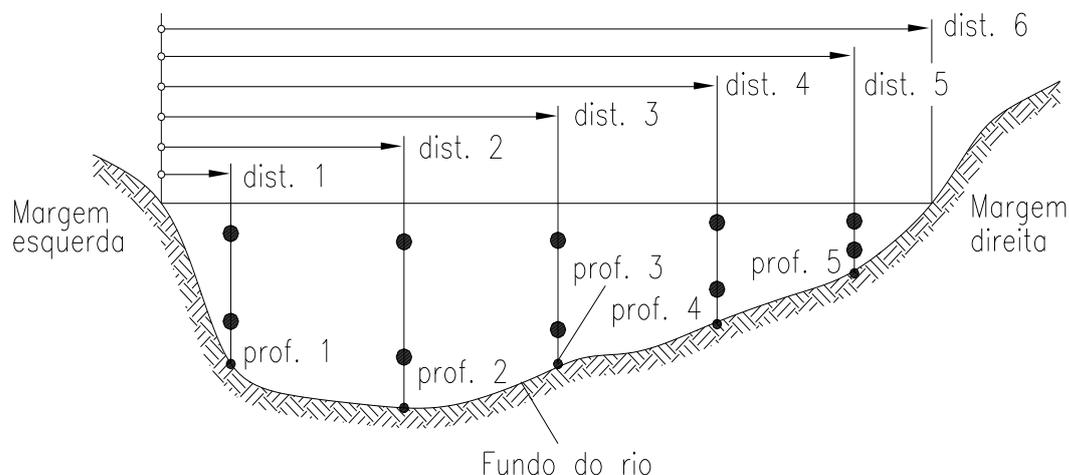
Estes instrumentos medem a espessura de metais e materiais não metálicos, por exemplo, alumínio, titânio, plástico, cerâmicas, vidros e outros condutores. O medidor de espessura ultrassônico é um aparelho que tem como princípio de funcionamento básico o princípio da onda ultrassônica na medição de espessura, que é similar ao da onda óptica. Os pulsos da onda ultrassônica transmitidos pela ponta de prova serão refletidos novamente quando alcançarem a interface. A espessura do objeto é determinada pela medição precisa do tempo que a onda ultrassônica passa pelo objeto.

#### **2.4.3. ESCOAMENTO LIVRE**

A medição de vazão em cursos d'água é realizada, normalmente, de forma indireta, a partir da medição de velocidade ou de nível. A velocidade da água é, normalmente, maior no centro de um rio do que junto às margens. Da mesma forma, a velocidade é mais baixa junto ao fundo do rio do que junto à superfície. Em função desta variação da velocidade nos diferentes pontos da seção transversal, utilizar apenas uma medição de velocidade pode resultar em uma estimativa errada da velocidade média. Por exemplo, a velocidade medida junto à margem é inferior à velocidade média e a velocidade medida junto à superfície, no centro da seção, é superior à velocidade média.

Portanto, a medição de vazão está baseada na medição de velocidade

em um grande número de pontos. Os pontos estão dispostos segundo linhas verticais com distâncias conhecidas da margem (dist.1, dist.2, dist.3.....) de acordo com a figura 2.36.



**FIGURA 2.36- Exemplo de medição de vazão em uma seção de um rio indicando as (\*) horizontais e verticais(Santos et al, 2001).**

\*Os pontos indicam as posições em que é medida a velocidade no caso de utilizar apenas dois pontos por vertical. (Santos et al, 2001).

Segundo (Santos et al, 2001) que recomenda através da tabela (2.7) as distâncias entre as verticais de acordo com a largura do rio e também o número e posição dos pontos de medição na vertical de acordo com a profundidade do rio através da tabela (2.8).

**TABELA 2.7 - Distância recomendada entre verticais de acordo com a largura do rio. (fonte: Santos et al, 2001).**

Largura do rio (m)	Distância entre as verticais (m)
< 3	0,3
3 a 6	0,5
6 a 15	1,0
15 a 30	2,0
30 a 50	3,0
50 a 80	4,0
80 a 150	6,0
150 a 250	8,0
> 250	12,0

**TABELA 2.8- Número e posição de pontos de medição na vertical recomendados de acordo com a profundidade do rio (fonte: Santos et al, 2001).**

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Número de pontos</b>	<b>Posição dos pontos</b>
0,15 a 0,60	1	0,6 profundidade
0,60 a 1,20	2	0,2 e 0,8 profundidades
1,20 a 2,00	3	0,2; 0,6; e 0,8 profundidades
2,00 a 4,00	4	0,2; 0,4; 0,6; e 0,8 profundidades
> 4,00	6	Superfície; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; profundidades e fundo

Para medição de vazão existem diversos instrumentos, mas os mais comuns para medição de velocidade de água em rios e canais são os molinetes hidrométricos.

### 2.4.3.1 Molinete

O molinete possui uma hélice que converte o movimento de translação por água em relação ao instrumento em um movimento de rotação desta hélice.

Os molinetes giram em velocidades diferentes de acordo com a velocidade da água, medindo assim sua velocidade.

A hélice do molinete está acoplada a uma rosca sem fim que aciona uma engrenagem, que por sua vez existem contatos elétricos, os quais fazem funcionar uma campainha ou fones de ouvido. (Viana et al, 2008). Conta-se o número de voltas da hélice durante um intervalo de tempo fixo, obtendo-se a rotação da mesma, que por sua vez relaciona com a velocidade do fluxo dada pela equação 2.47. A figura 2.37 apresenta um esquema de molinete.

A relação entre velocidade da água e velocidade de rotação do molinete é a sua equação. Esta equação é fornecida pelo seu fabricante, porém deve ser verificada periodicamente, porque pode ser alterada pelo desgaste das peças.

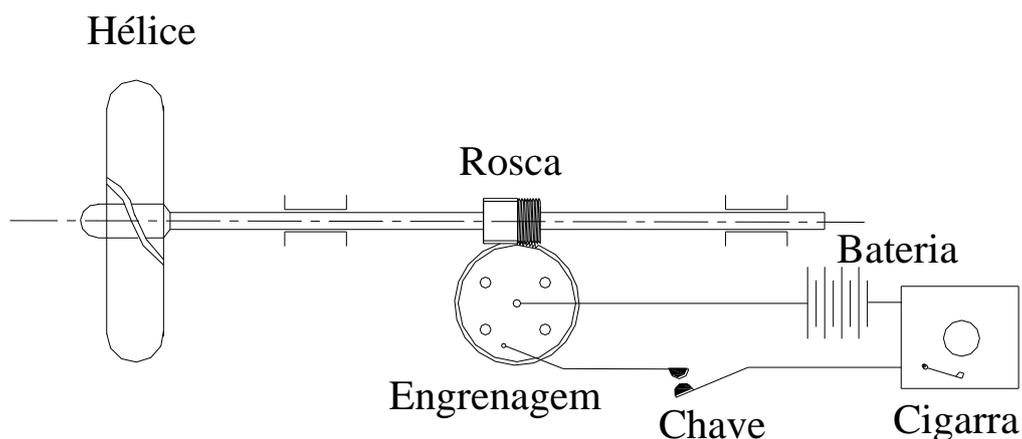
$$\mathbf{v = a \cdot n + b} \quad (2.47)$$

onde:

$\mathbf{v [m / s]}$  – velocidade de escoamento;

$\mathbf{n [rps]}$  – rotação da hélice;

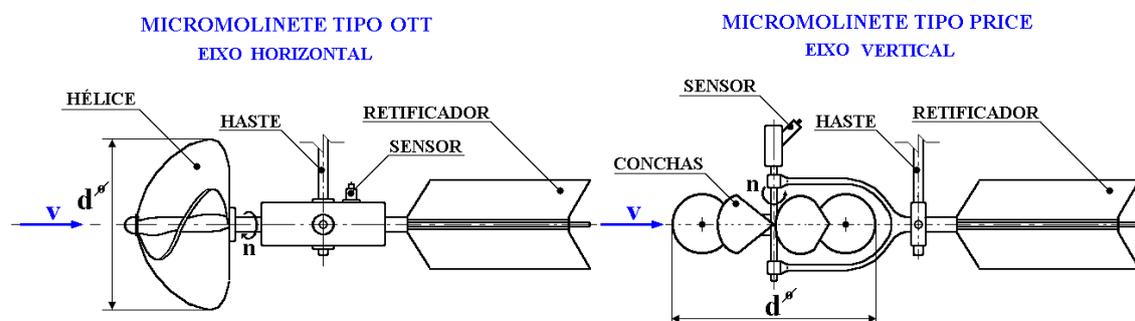
$\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$  – constantes do molinete (obtidas na calibração em laboratório).



**FIGURA 2.37- Esquema do molinete (fonte: Souza,1992).**

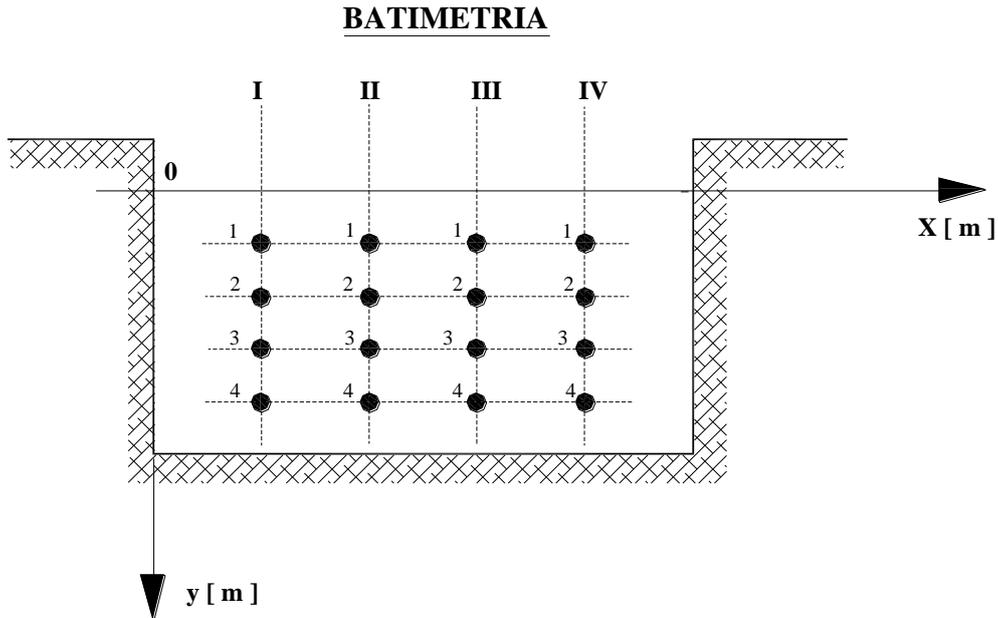
Os molinetes mais modernos vêm com o contador digital de parada automática. O aparelho registra todas as rotações da hélice, que é ajustado para emitir um impulso a cada revolução. Esses impulsos acionam um contador que fica acoplado a um cronômetro de contagem regressiva. Ajusta-se o tempo desejado para a medição, posiciona-se o molinete e, ao apertar um botão, o contador de impulsos e o cronômetro é acionado simultaneamente. Após o tempo pré-programado, o cronômetro regressivo atinge o zero e o contador pára, indicando o total de rotações da hélice no período. (Viana et al,2008)

A figura 2.38 mostra dois tipos de molinetes, um de eixo horizontal com hélice e o outro de eixo vertical com conchas.



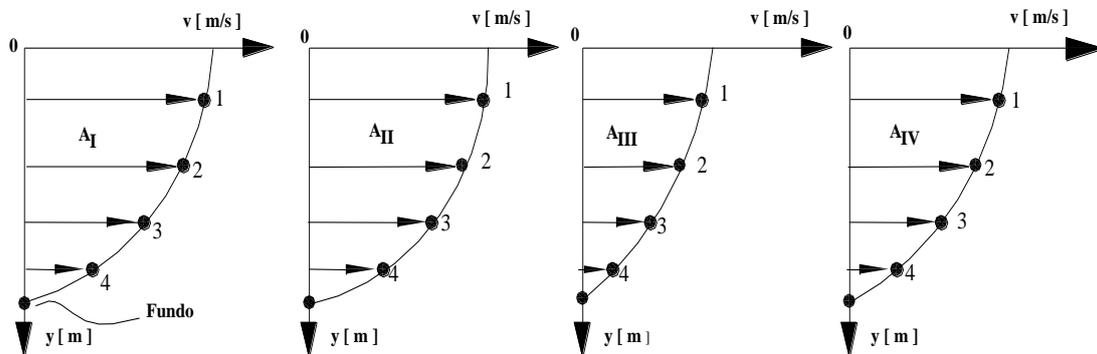
**FIGURA 2.38- Tipos de molinetes (fonte: Souza, 1992).**

O procedimento de medida da vazão através do molinete é realizado escolhendo um trecho reto de um rio ou canal. Através de piquetes instalados nas duas margens, amarra-se uma corda e a marca com fita crepe em várias seções de medidas, escolhendo uma das margens como referência dos eixos x, y. Como exemplo será utilizada a figura 2.39, que mostra um canal retangular com as seções de medidas de I a IV e as profundidades de 1 a 4.



**FIGURA 2.39- Seções de medidas em um canal (fonte: Viana et al, 2008).**

Com o molinete faz-se as medidas das velocidades em cada profundidade (1 a 4) em cada seção (I a IV). Com os resultados traçam os perfis de velocidade de cada seção, como mostra a figura 2.40.



**FIGURA 2.40- Perfis de velocidades de cada seção de medida (fonte: Viana et al, 2008).**

Como a vazão volumétrica é definida como sendo:

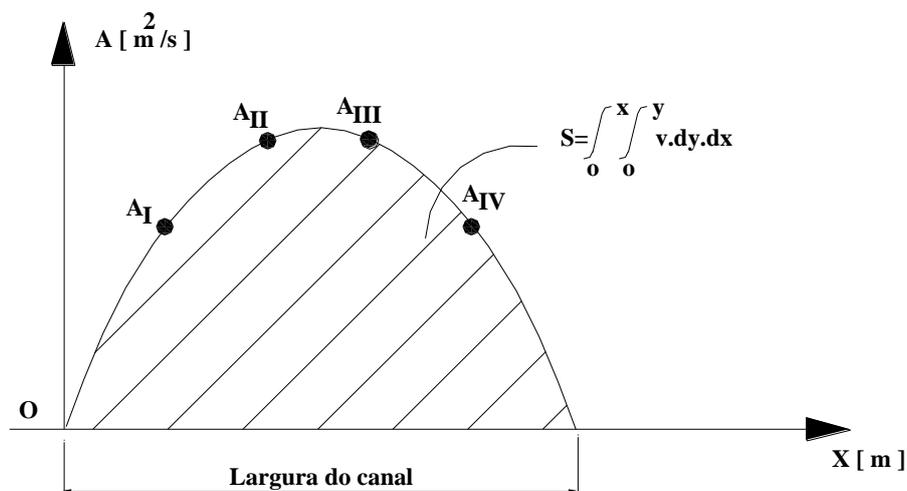
$$Q = \left( \int_A v \cdot dA \right) \quad (2.48)$$

Pode-se escrever para o caso da figura 2.38 a equação 2.49.

$$Q = \left( \int_0^x \int_0^y v \cdot dy dx \right) \quad (2.49)$$

A primeira integral  $\int_0^y v \cdot dy$  pode ser resolvida graficamente, determinando a área de cada perfil de velocidades da figura 2.40. O resultado de cada área [A] ( $m^2/s$ ) é transferido para um gráfico (x, A), onde a área sob a

curva representa a segunda integral  $\int_0^x \int_0^y \mathbf{dy} \cdot \mathbf{dx}$  e conseqüentemente a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), como mostra a figura 2.41.



**FIGURA 2.41- Gráfico profundidades x versus áreas dos perfis de velocidades. (fonte: Viana et al, 2008).**

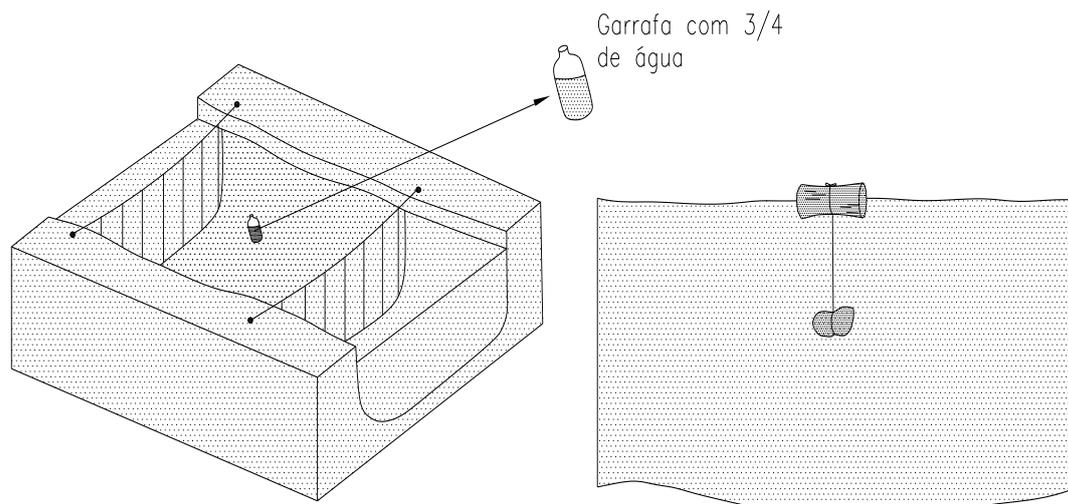
O uso dos molinetes hidrométricos de eixo vertical são mais difundidos na América do Norte e os molinetes hidrométricos de eixo horizontal na Europa. (Santos et al, 2001).

Existe entre os hidrometristas brasileiros uma preferência pelo molinete de eixo horizontal, sendo as marcas A.OTT, Amsher e Neypic as mais comuns, além de um modelo nacional fabricado pela empresa de Hidrologia S/A.

O micromolinete ou molinete quando bem calibrado sua precisão é de  $\pm 1\%$ . (Souza et al, 2006)

### 2.4.3.2. Flutuadores

São objetos flutuantes que servem para medir a velocidade de escoamento na superfície da água de um rio ou canal e ainda para determinarem a vazão correspondente. O objeto flutuante pode ser uma laranja ou uma garrafa de plástico com  $\frac{3}{4}$  com água de acordo com a figura 2.42 abaixo.



**FIGURA 2.42- Objeto flutuante - garrafa com  $\frac{3}{4}$  de água (fonte: Tiago Filho et al, 2000).**

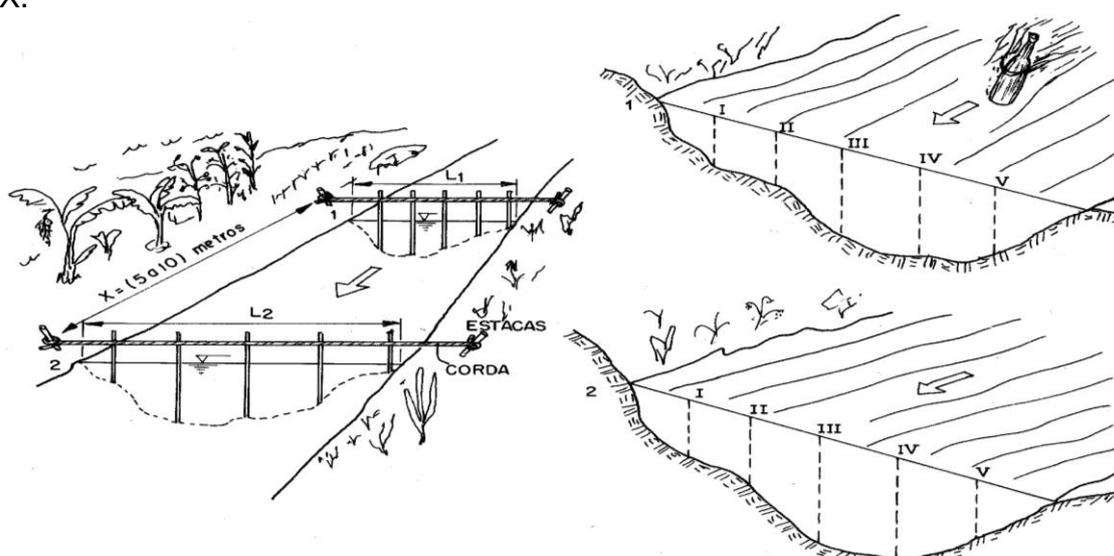
Os flutuadores podem ser de três tipos: Segundo (Bandini, 1961)

- Superficiais: Destinados a medir velocidades superficiais
- Semi-superficiais: Que consiste em um corpo submerso a certa profundidade ligados por uma corda a um pequeno flutuador de superfície, de volume desprezível.
- Bastões flutuantes: Cilindros ociosos lastrado na extremidade inferior.

O uso de flutuadores pode parecer uma técnica muito rudimentar, porém pode em alguns casos ser muito vantajosas. (Pimenta, 1981)

Quando utilizamos o método do flutuador:

O trecho do rio ou canal deve ser o mais reto possível. A figura 2.43 abaixo ilustra um canal ou rio, onde neste exemplo são escolhidas posições de I a V, por exemplo, para o flutuador percorrer cada uma delas no mesmo trecho X.



**FIGURA 2.43- Explicação do método flutuador e suas posições (fonte: Viana, 2008).**

Medindo-se com um cronômetro ou relógio o tempo do flutuador percorrer o trecho X em cada posição e considerando o escoamento uniforme podem-se obter as velocidades dadas pelas equações 2.50.

$$v_1 = \left( \frac{X}{t_1} \right); \quad v_2 = \left( \frac{X}{t_2} \right); \quad v_3 = \left( \frac{X}{t_3} \right); \quad v_4 = \left( \frac{X}{t_4} \right). \quad (2.50)$$

Onde:

$v_1; v_2; v_3; v_4$  [m/s].;

$X$  [m];

$t_1; t_2; t_3; t_4$  [s].

A velocidade média na superfície em m/s pode ser determinada pela equação 2.51.

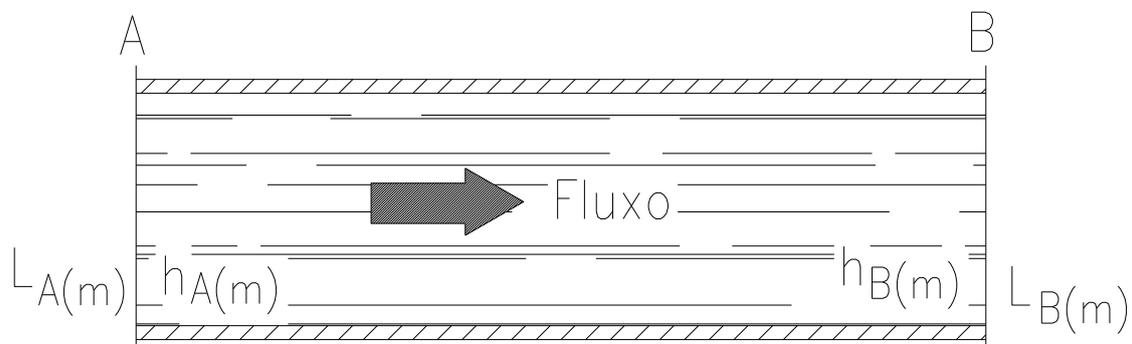
$$v_{ms} = \left( \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{4} \right) \quad (2.51)$$

Entretanto a equação 2.51 representa a velocidade média na superfície da água. Para determinar a velocidade média na seção considerada, depende do material do leito do rio ou canal. Como uma primeira aproximação será considerado como mostrado na equação 2.52.

$$v_{méd.} = (0,8 \cdot v_{ms}) \quad (2.52)$$

As seções  $A_1$  e  $A_2$  deverão ser determinadas, sendo que a seção média está mostrada na equação 2.55.

A figura 2.44 abaixo ilustra um escoamento de um canal aberto identificando as larguras e profundidades das seções A e B.



**FIGURA 2.44- Rio ou canal com explicação da sua profundidade e largura**

onde:

**L** Largura [m];  
**prof.** Profundidade [m].

$$(2.53) \quad A_{\text{méd.A}} = \left( \frac{L_A + h_A}{2} \right)$$

$$(2.54) \quad A_{\text{méd.B}} = \left( \frac{L_B + h_B}{2} \right)$$

$$A_{\text{méd.}} = \left( \frac{A_{\text{méd.A}} + A_{\text{méd.B}}}{2} \right) \quad (2.55)$$

A vazão de escoamento é dado pela expressão 2.56.

$$Q = (v_{\text{méd.}} \cdot A_{\text{méd.}}) \quad (2.56)$$

onde:

**Q**[m<sup>3</sup>/s] – vazão volumétrica;

**v<sub>méd</sub>** [m/s] – velocidade média de escoamento e;

**A<sub>méd</sub>** [m<sup>2</sup>] – área média das seções 1 e 2.

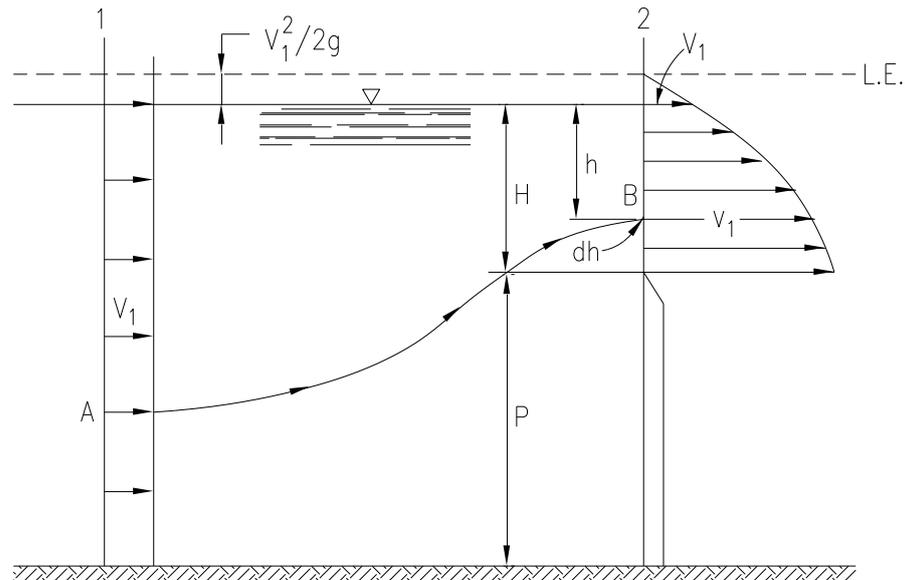
### 2.4.3.3 Teoria do vertedor e suas classificações

O vertedor encontra grande aplicação nas medidas de vazões de escoamentos grandes e pequenos. Ele pode ser definido de um modo geral como “qualquer obstrução regular sobre o qual o escoamento ocorre” (Vernnard et al, 1978)

Os vertedores usados para medidas de vazões têm formas simples.

Tendo em vista as dificuldades procedentes de formulação de um vertedor, algumas simplificações são feitas para seu equacionamento. Seja a figura 2.45 abaixo um escoamento por um vertedor retangular de parede delgada, onde serão consideradas as seguintes simplificações segundo (Vernnard et al, 1978).

- (01) a distribuição de velocidades à montante, ou seja, na seção 1 é uniforme;
- (02) todas as partículas fluidas se movem horizontalmente à medida que elas passam sobre a crista do vertedor, ou seja, na seção 2;
- (03) as pressões são nulas;
- (04) o efeito da viscosidade, da turbulência, dos escoamentos secundários e os efeitos de tensão superficial podem ser todos desprezados, ou seja, sem perdas.



**FIGURA 2.45 – Vertedor retangular de parede delgada (fonte: Vernard et al, 1978)**

Aplicando Bernoulli na linha de corrente AB tem-se teoricamente a equação 2.57:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_{1T}^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_{2T}^2}{2g} + z_2 \quad (2.57)$$

$$\frac{v_{1T}^2}{2g} + H = \frac{v_{2T}^2}{2g} + (H - h) \Rightarrow v_2 = \sqrt{2g \cdot \left( h + \frac{v_1^2}{2g} \right)} \quad (2.58)$$

Como a velocidade  $v_1$  está longe do vertedor, será considerada desprezível. Assim a equação 2.58 transforma na equação 2.59.

$$v_2 = \sqrt{2g \cdot h} \quad (2.59)$$

Considerando que a largura do vertedor é L, a vazão teórica será a equação 2.60:

$$Q_T = \int_A v \cdot dA = \int_0^H v_2 \cdot L \cdot dh = \sqrt{2g} \cdot L \cdot \int_0^H h^{1/2} \cdot dh = Q_T = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (2.60)$$

A vazão real será representada pela equação 2.61:

$$Q = C \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (2.61)$$

O valor de C corrige as considerações feitas. Desta maneira os vertedores possuem suas equações empíricas.

Os vertedores são largamente empregados nas medições de águas correntes (Daker, 1969)

Podem ser definidos como simples paredes, diques ou aberturas sobre as quais um líquido escoar. O termo aplica-se também, a obstáculos a passagem da corrente e aos extravassores de corrente. (Souza et al, 1983)

Segundo (Pimenta, 1981) o vertedor é o equipamento mais usado e, sem dúvida o que dá resultados mais exatos para a medição de vazão em condutos livres.

Os vertedores se classificam segundo vários critérios dos quais os mais importantes são:

- Quanto à forma: Retangular, triangular, trapezoidal também chamado de Cipolletti etc.
- Quanto à soleira: Espessa ou delgada

Soleira delgada quando a parte da soleira que está em contato com a água tem dimensões desprezáveis em relação à altura da lâmina vertente, ou de soleira espessa nos outros casos. (Lencastre, 1972)

Segundo (Lencastre, 1972) os vertedores de soleira delgada são exclusivamente empregados como medidores de vazão. Os vertedores de soleira espessa fazem parte, geralmente, das estruturas hidráulicas, podendo também ser utilizados como medidores de vazão.

- Quanto às condições de aproximação: Sem contração lateral, com uma ou duas contrações.

#### 2.4.3.4 Vertedores obtidos experimentalmente

##### • Vertedor retangular

Uma das equações empíricas mais utilizadas para vertedores retangulares é a de Francis, equação 2.62.

$$Q = \left[ \left[ 1,84 \cdot b \cdot (h_v)^{3/2} \right] \cdot \left[ 1 + 0,26 \cdot \left( \frac{b_c \cdot h_v}{L(h_v + x)} \right)^2 \right] \right] \quad (2.62)$$

onde:

**Q**[m<sup>3</sup>/s] – vazão volumétrica;

**b**[m] – largura do vertedor sem contração;

**b<sub>c</sub>** [m] – largura da veia contraída;

**h<sub>v</sub>** [m] – altura da crista do vertedor;

**L**[m] – largura do canal;

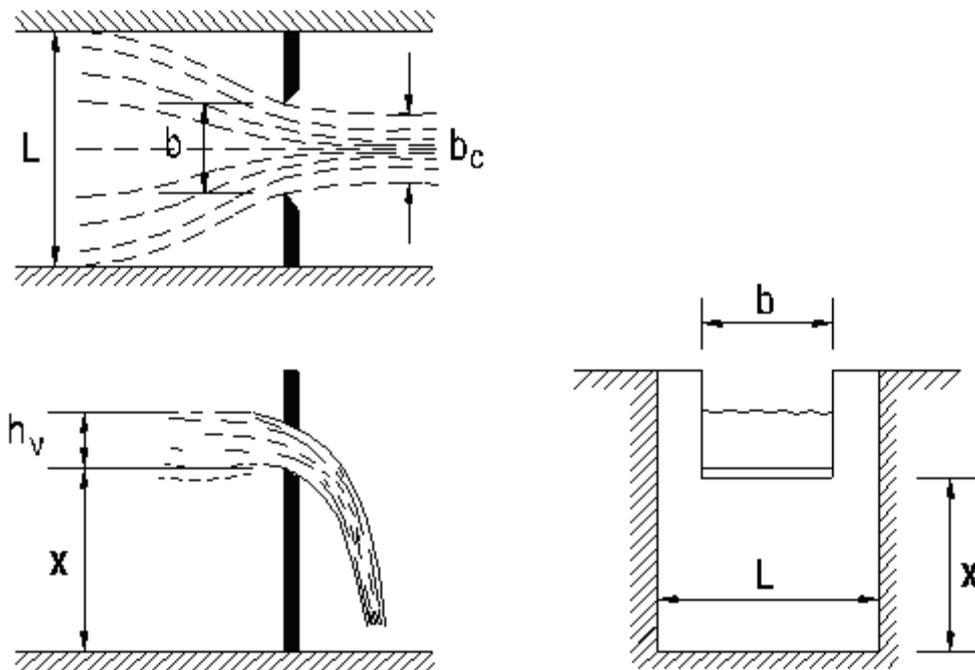
**Alt.**[m] – altura do vertedor.

As figuras 2.46 e 2.47 apresentam vertedores retangulares com parede delgada com contração e sem contração respectivamente.

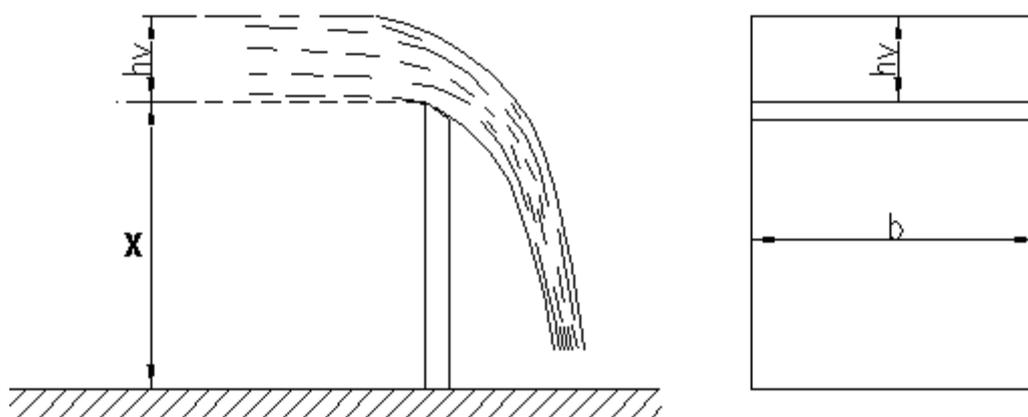
$$b_c = b = L \text{ (vertedor sem contração lateral);} \quad (2.63)$$

$$b_c = (b - 0,1 \cdot h_v) \text{ (vertedor com uma contração lateral);} \quad (2.64)$$

$$b_c = (b - 0,2 \cdot h_v) \text{ (vertedor com duas contrações laterais).} \quad (2.65)$$



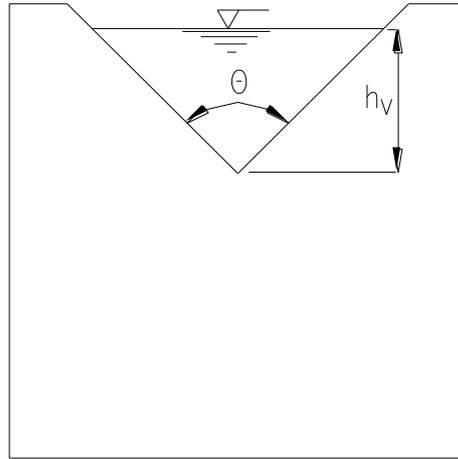
**FIGURA 2.46-** Vertedor retangular de parede delgada com duas contrações (fonte: Viana, 2008).



**FIGURA 2.47-** Vertedor retangular de parede delgada e sem contração. (fonte: Viana, 2008).

- Vertedor triangular

Para o cálculo de vazão utilizando os vertedores triangulares ilustrado na figura 2.48 pode-se utilizar a equação de Thompson 2.66.



**FIGURA 2.48- Vertedor triangular (fonte: Viana, 2008)**

$$Q = \left[ 0,32 \cdot \sqrt{2g} \cdot \text{tg} \cdot \frac{\theta}{2} \cdot (h_v)^{2,5} \right] \quad (2.66)$$

onde:

$Q[\text{m}^3/\text{s}]$  - vazão volumétrica;

$g[\text{m}^2/\text{s}]$  – aceleração da gravidade ( $g = 9,81\text{m/s}^2$ );

$\theta[\text{graus}]$  – ângulo e;

$h_v[\text{m}]$  – altura da crista do vertedor.

Para um ângulo  $\theta = 90^\circ$ , tem-se a equação 2.67.

$$Q = \left[ 1,417 \cdot (h_v)^{2,5} \right] \quad (2.67)$$

#### • Vertedor de parede espessa

O vertedor de parede espessa está apresentado na figura 2.49 abaixo, onde a equação 2.68 de Belanger é a mais utilizada.

$$Q = \left[ 0,385 \cdot L \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (h_v)^{1,5} \right] = \left[ 1,705 \cdot L \cdot (h_v)^{1,5} \right] \quad (2.68)$$

onde:

$Q[\text{m}^3/\text{s}]$  – vazão volumétrica;

$L[\text{m}]$  – largura do vertedor;

$g[m/s^2]$  – aceleração da gravidade e;

$h_v [m]$  – altura da crista do vertedor.

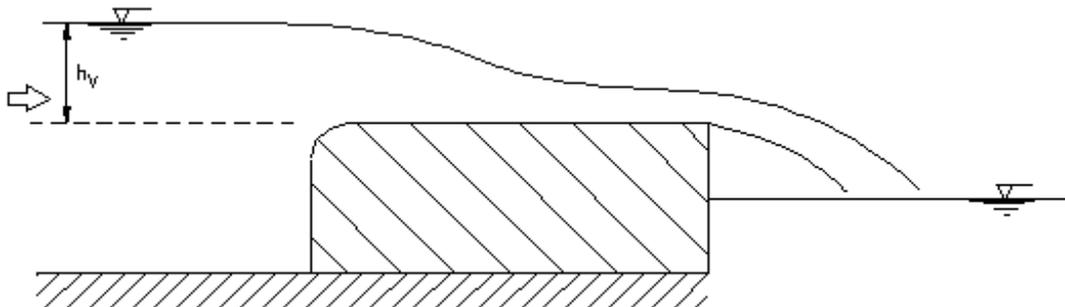


Figura 2.49- Vertedor de parede espessa (fonte: Viana, 2008).

#### 2.4.4. ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE CANAIS

Nos mais diversos tipos de canais, uma série de parâmetros é necessária para descrever geometricamente a seção e as declividades de interesse. Segundo (Porto, 2003) os principais elementos geométricos são:

- Área molhada ( $A_m$ ) é a área da seção reta do escoamento, normal à direção do fluxo.
- Perímetro molhado ( $P_m$ ): é o comprimento da parte da fronteira sólida da seção do canal (fundo e paredes) em contato com o líquido; a superfície livre não faz parte do perímetro molhado.
- Raio hidráulico ( $R_h$ ): é a relação entre a área molhada e o perímetro molhado.
- Altura d'água ( $y$ ): é a distância vertical do ponto mais baixo da seção do canal até a superfície livre.
- Altura de escoamento da seção ( $h$ ): é a altura do escoamento medida perpendicularmente ao fundo do canal.
- Largura de topo ( $B$ ): é a largura da seção do canal na superfície livre, função da forma geométrica da seção e da altura d'água.
- Altura hidráulica ou altura média ( $H_m$ ): é a relação entre a área molhada e a largura da seção na superfície livre. É a altura de um retângulo de área equivalente à área molhada de acordo com a equação 2.69 abaixo.

$$H_m = \left( \frac{A_m}{B} \right) \quad (2.69)$$

onde:

$A_m [m]$  – área molhada;

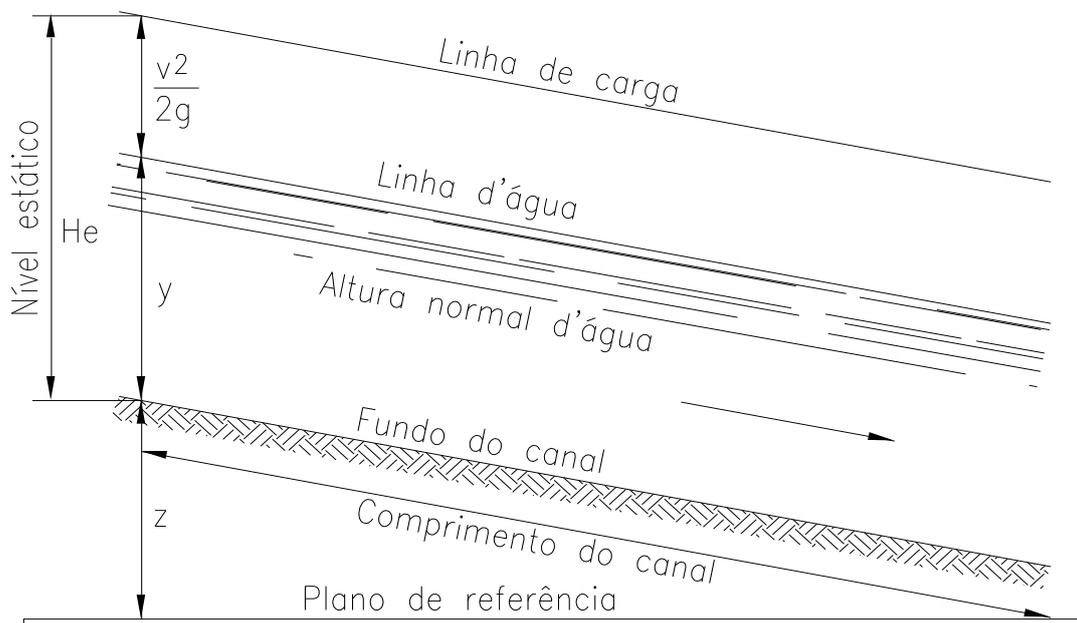
**B[m]** – largura da seção na superfície livre.

h) Declividade de fundo ( $I_0$ ): é a declividade longitudinal do canal. Em geral, as declividades dos canais são baixas, podendo ser expressas por:

$$I_0 = \text{tg } \alpha \cong \text{sen } \alpha \text{ onde:}$$

$[I_a]$  - Declividade piezométrica ou declividade da linha d'água.

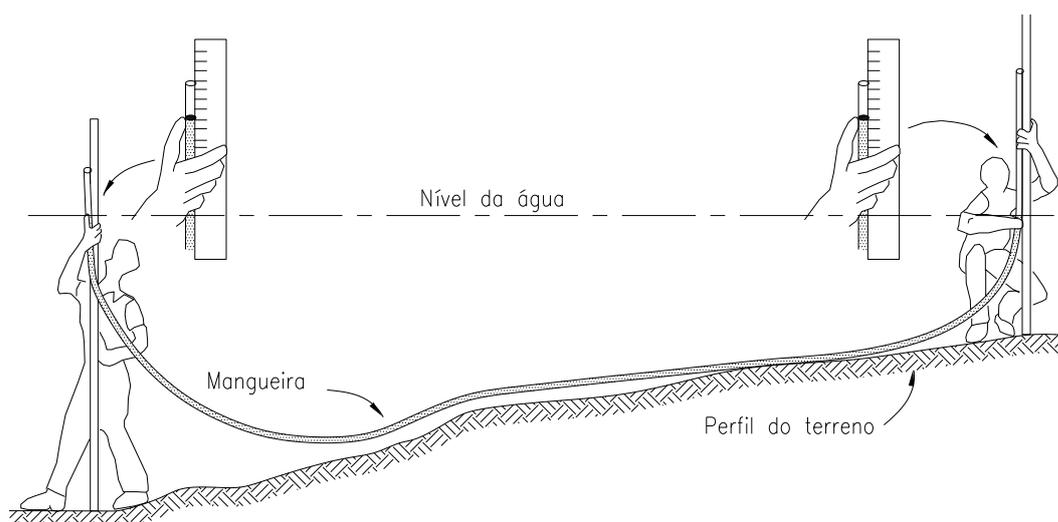
$[I_f]$  - Declividade da linha de energia: é a variação da energia da corrente no sentido do escoamento.



**FIGURA 2.50- Representação de elementos em um canal (fonte: Porto, 2003).**

Ainda segundo (Porto,2003), a declividade de fundo exerce notável influência no que diz respeito à distribuição de pressão hidrostática Figura 2.50, além de estar diretamente relacionada com as equações de resistência em canais, posteriormente abordadas neste trabalho.

Há diversas formas para medir a declividade de fundo, ( $I_0$ ), de um canal, através dos mais variados equipamentos. Podem ser utilizados desde aqueles mais modernos, como a estação total, mas que requerem técnicos qualificados para sua operação, ou, equipamentos alternativos que também são precisos o suficiente com a vantagem de ter construção e uso simples, que é o caso do nível de borracha ou de mangueira conforme ilustrado na figura 2.51 abaixo.



**FIGURA 2.51- Nível esquemático do nível de mangueira (fonte: Machado, 2006)**

Dentre os instrumentos alternativos para se determinar a declividade, o nível de mangueira é o que apresenta maior rendimento por ser possível fazer leituras mais espaçadas uma das outras e com rápida operação devido o material ser leve e de fácil manuseio. No entanto, sua funcionalidade é maior em áreas mais planas. Para locais onde a declividade é mais acentuada, torna-se necessário ter uma haste muito alta ou utilizar espaçamento muito curto entre as hastes, para que a água não transborde na extremidade da mangueira voltada para a parte mais baixa do terreno. (Machado, 2006)

A mangueira de nível consiste em uma estrutura que possui duas réguas de madeiras com graduação semelhantes conectadas por uma mangueira, presa à ponta de cada uma delas.

Enche-se a mangueira com o volume de água suficiente para não extravasar em nenhum dos lados e, em seguida, tampa-se a extremidade da mangueira em cada haste.

Antes de realizar a medição, devem-se juntar as duas hastes lado a lado de forma a igualar o nível, ajustando também o volume d'água desejado. A medição da distância horizontal entre os dois pontos é feita ao se afastar uma das réguas e permanecer com a outra fixada no ponto de partida. Deve-se estipular o valor desejado a ser obtido ou locomover a segunda régua até um ponto limite para que a água na mangueira não extravase.

Após estabilização do nível d'água nas duas réguas (com as duas extremidades das mangueiras destampadas), realizam-se as leituras de vertical um e vertical dois, que se referem, respectivamente, aos valores medidos na régua fixada no ponto inicial e na outra que se locomoveu. A subtração destes dois valores é a distância vertical. A distância horizontal entre as duas réguas é medida com trena e é representada por H. Repete-se o procedimento até que o terreno/canal que se quer medir tenha sido todo recoberto pelo aparelho.

Dessa forma, a declividade será a soma das diferenças nas leituras das réguas dividida pela soma das distâncias horizontais.

A figura 2.52 ilustra a representação geométrica da declividade.

$$I_o = \left[ \left( \frac{\sum_{i=1}^n (\text{vert}_n - \text{vert}_{n1})}{\sum_{i=1}^n \text{Horiz.}} \right) \right] \quad (2.70)$$

ou

$$I_o = \text{tg}\alpha \cong \text{sen}\alpha \quad (2.71)$$

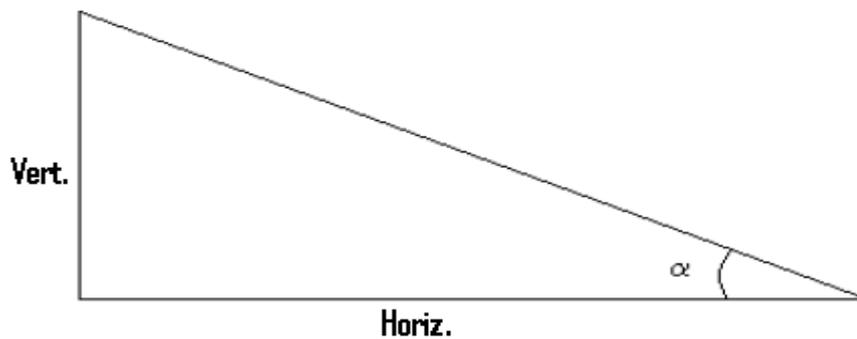


Figura 2.52- Representação geométrica da declividade

## 2.4.5 EQUAÇÕES DE RESISTÊNCIA

### 2.4.5.1. Manning

Segundo (Porto, 2003) que observou os cálculos em canais estão baseados em equações de resistência, equações que ligam a perda de carga em um trecho à velocidade média, ou vazão, através de parâmetros geométricos e da rugosidade do perímetro molhado.

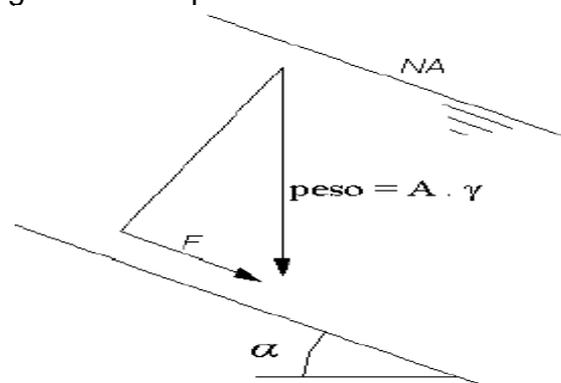


FIGURA 2.53- Ilustração de um esquema com trecho unitário com movimento uniforme (fonte: Porto, 2003).

Segundo (Netto, 1998), ao se tomar um trecho reto de comprimento unitário Figura 2.53, conjuntamente com a hipótese de escoamento permanente uniforme, tem-se que a declividade do fundo do canal será a mesma para a superfície livre das águas. Sendo  $\gamma$  o peso específico da massa líquida, a força que produz o movimento será a componente tangencial do peso do líquido.

$$\mathbf{F} = (\gamma \cdot \mathbf{A} \cdot \text{sen} \alpha) \quad (2.72)$$

Desde que o movimento seja uniforme, deve haver equilíbrio entre as forças aceleradoras e retardadoras, de modo que a força  $\mathbf{F}$  deve contrabalançar a resistência oposta ao escoamento pela resultante dos atritos. Esta resistência ao escoamento pode ser considerada proporcional aos seguintes fatores:

- $[\gamma]$  peso específico do líquido ;
- $[\mathbf{P}_m]$  perímetro molhado;
- comprimento do canal ( $= 1$ );
- uma certa função  $\alpha(\mathbf{v})$  da velocidade média, ou seja:

$$\mathbf{Res} = \gamma \cdot \alpha(\mathbf{v}) \quad (2.73)$$

Ao igualar as equações 2.72 e 2.73, tem-se:

$$(\gamma \cdot \mathbf{A} \cdot \text{sen} \alpha) = \gamma \cdot \alpha \cdot (\mathbf{v}). \text{ como:}$$

$$\mathbf{I}_0 = \text{tg} \alpha \cong \text{sen} \alpha \text{ obtém-se:}$$

$$\left[ \left( \frac{\mathbf{A}_m}{\mathbf{P}_m} \right) \cdot \mathbf{I}_0 \right] = \alpha \cdot (\mathbf{v}) \quad (2.74)$$

Sendo que a relação  $\left( \frac{\mathbf{A}_m}{\mathbf{P}_m} \right)$  é o raio hidráulico, chega-se a expressão

2.75:

$$[\mathbf{R}_h \cdot \mathbf{I}_0] = \alpha(\mathbf{v}) \quad (2.75)$$

Que é a expressão geral da resistência.

### • Fórmula de Chezy

Em 1769, Antoine Chezy demonstrou que a força de resistência ao escoamento é proporcional ao quadrado da velocidade, sendo também

proporcional à superfície de contato “Líquido – Parede do Conduto”, ou seja, ao perímetro molhado. (Baptista et al , 2003).

Assim, propôs uma expressão da seguinte forma:

$$v = (c \cdot \sqrt{R_h} \cdot I_o) \quad (2.76)$$

\*O valor de  $c$  era, nessa época, suposto independente da rugosidade das paredes.

### • Fórmula de Manning

Diferentes fórmulas de origem empíricas são propostas para o cálculo do coeficiente  $c$  de Chézy, ligando-o ao raio hidráulico da seção segundo (Porto, 2003). Uma relação simples, e atualmente a mais empregada, foi proposta por Robert Manning (1816-1897) em 1889, através da análise de resultados experimentais obtidos por ele e outros pesquisadores. A relação empírica é da forma:

$$C = \left( \frac{(R_h)^{\frac{1}{6}}}{n} \right) \text{ onde substituindo na equação acima obtém-se a}$$

equação abaixo:

$$v = \left[ \left( \frac{1}{n} \right) \cdot (R_h)^{\frac{2}{3}} \cdot (I_o)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.77)$$

A equação acima é denominada Fórmula de Manning, válida para os escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugosos, com grande número de Reynolds. Nestas condições, o coeficiente  $n$  de Manning permanece constante para uma rugosidade dada, enquanto o coeficiente de Chézy é proporcional à rugosidade relativa da seção  $R_h/n$ . Por fim, chega-se à equação que será base de cálculo para os problemas sobre escoamentos livres:

$$\left[ \frac{n \cdot Q}{\sqrt{I_o}} \right] = \left[ A \cdot (R_h)^{\frac{2}{3}} \right] \text{ ou}$$

$$Q = \left[ \frac{A \cdot (R_h)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_o}}{n} \right] \quad (2.78)$$

Deve-se observar que a fórmula de Manning, além de ter uma origem empírica, carrega um coeficiente  $n$  que não é um adimensional. Seus valores para vários tipos de revestimentos em canais artificiais e cursos d'água naturais são tabelados de acordo com a tabela 2.9 abaixo.

**TABELA 2.9- Valores de rugosidade das paredes. (fonte: Porto, 2003)**

<b>Nº</b>	<b>Natureza das paredes</b>	<b>n</b>
<b>01</b>	Canais de chapas com rebites embutidos, juntas perfeitas e águas limpas. Tubos de cimento e de fundição em perfeitas condições.	0,011
<b>02</b>	Canais de cimento muito liso, de dimensões limitadas, de madeira aplainada e lixada, em ambos os casos; trechos retilíneos compridos e curvas de grande raio e água limpa. Tubos de fundição usados.	0,012
<b>03</b>	Canais de reboco de cimento liso, porém com curvas de raio limitados e águas não completamente limpas; construídos com madeira lisa, mas com curvas e raio moderado.	0,013
<b>04</b>	Canais com reboco de cimento não completamente liso; de madeira com no nº 2, porém com traçado tortuoso e curvas de pequeno raio e juntas imperfeitas.	0,014
<b>05</b>	Canais com paredes de cimento não completamente lisas, com curvas estreitas e águas com detritos; construídos de madeira não aplainada de chapas rebitadas	0,015
<b>06</b>	Canais com reboco de cimento não muito alisado e pequenos depósitos de fundo; revestidos por madeira não aplainada; de alvenaria construída com esmero; de terra, sem vegetação.	0,016
<b>07</b>	Canais com reboco de cimento incompleto, juntas irregulares, andamento tortuoso e depósitos no fundo; de alvenaria revestindo taludes não bem perfilados	0,017
<b>08</b>	Canais com reboco de cimento rugoso, depósitos no fundo, musgo nas paredes e traçado tortuoso	0,018
<b>09</b>	Canais de alvenaria em más condições de manutenção e fundo com barro, ou de alvenaria de pedregulhos; de terra, bem construídos, sem vegetação e curvas de grande raio	0,020
<b>10</b>	Canais de chapas rebitadas e juntas irregulares; de terra, bem construídos com pequenos depósitos no fundo e vegetação rasteira nos taludes.	0,022
<b>11</b>	Canais de terra, com vegetação rasteira no fundo e nos taludes.	0,025
<b>12</b>	Canais de terra, com vegetação normal, fundo com cascalhos ou irregular por causa de erosões; revestidos com pedregulhos e vegetação.	0,030
<b>13</b>	Álveos naturais, cobertos de cascalhos e vegetação.	0,035
<b>14</b>	Álveos naturais, andamento tortuoso.	0,040

# CAPÍTULO 3. LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA DA MCH MIRETA BASTOS

## 3.1. DESCRIÇÃO

A UNIFEI através do Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas-LHPCH vem desenvolvendo pesquisas em PCHs desde sua inauguração em 1985. Dentro das MCHs, uma atenção especial foi dada nas máquinas hidráulicas e elétricas de baixo custo. Entre as turbinas foram desenvolvidas pesquisas em Michell-Banki e Turgo, segundo (Tiago Filho, 1986), bombas centrífugas operando em reverso como turbinas segundo (Viana, 1987), máquinas com rotores de simples curvatura segundo (Mauad, 1995). Em termos de reguladores de carga eletro-eletrônicos pode-se destacar os trabalhos de (Bernardes et al, 1993) e (Viana et al, 1990). No caso dos motores de indução operando como geradores destacam-se trabalhos de (Medeiros, 2004).

Desta forma foi proposto ao MME em 2005 um projeto denominado “A Utilização de Bombas Operando como Turbinas e Geradores de Indução na Geração de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas”. Esse projeto foi aprovado, encontrando-se em andamento desde o início de 2006. A primeira fase foi realizada, sendo que utilizou-se a tecnologia de BFT e GI em um aproveitamento na Fazenda Boa Esperança, Serra Mantiqueira, na região de Delfim Moreira-MG, sul de Minas Gerais. A MCH era de 20kW, projetada e construída através do Convênio CEMIG/UNIFEI de 1992. A central operava com um grupo gerador, utilizando uma turbina Michell-Banki, mas com uma reforma simples possibilitou a colocação de um novo grupo gerador de 30kW com uma Bomba Operando com Turbina-BFT acionando um gerador de indução.

Para atender o grupo gerador com BFT/GI. Optou-se por um novo conduto forçado para atender somente a BFT, mantendo-se o antigo para atendimento da turbina Michell-Banki.

As reformas ocorreram na tomada d’água, no canal e um aumento da câmara de carga. Todas as grades e comportas foram substituídas. Foi realizada uma manutenção no conduto forçado que alimenta a turbina Michell-Banki e a casa de máquinas sofreu uma ampliação, assim como o canal de fuga.

Fazendo parte da primeira fase desse projeto, o circuito da MCH foi preparado para ser um laboratório de medidas hidráulicas e elétricas para atender o curso de Engenharia Hídrica, Ambiental e de Mestrado na área de Energia do Instituto de Recursos Naturais da UNIFEI. Este Laboratório foi denominado de Laboratório Avançado de Microcentrais Hidrelétricas-LABMCH inaugurado em 16 de dezembro de 2006.

A MCH Mireta Bastos é do tipo de desvio. Existe uma cachoeira, com uma queda bruta de 22 m e vazão do Córrego da Onça de  $1,2\text{m}^3/\text{s}$ . Essa vazão pode atingir valores de  $1,0\text{m}^3/\text{s}$  nas secas, mas não ultrapassa o valor de  $1,2\text{m}^3/\text{s}$ , pois a cachoeira se encontra próxima da nascente do rio. A tomada d’água se encontra a montante da cachoeira, sendo transmitida por um canal de concreto com 38 m até a câmara de carga, onde a água escoar por uma das

duas tubulações, alimentando a turbina que é do tipo Michell-Banki ou pela BFT. A linha de transmissão é de 150 m é trifásica, utilizando postes de eucalipto retirados da própria fazenda. Portanto, nesta central não foi necessário à utilização de transformadores. A rotação da turbina é mantida constante pelo regulador de carga eletro-eletrônico, que proporciona uma qualidade da energia gerada.

A tabela 3.1 ilustra os dados principais do aproveitamento utilizando a turbina Michell-Banki e a BFT (Bomba Funcionando como Turbina).

**TABELA 3.1- Dados principais do aproveitamento.**

DADOS PRINCIPAIS DO APROVEITAMENTO				
Vazão do Rio[m <sup>3</sup> /s]	Altura de Queda Bruta[m]	CANAL DE ADUÇÃO		TUBULAÇÃO FORÇADA Ø 14"
MEDIDA NA CHEIAS	NA ÉPOCA DAS	Comprim. [m]	Largura [m]	Comprimento [m]
1,2	22	38	1	43
DADOS DOS EQUIPAMENTOS				
TURBINA		GERADOR		REGULADOR
Tipo Michell-Banki		Tipo Síncrono, trifásico, 220[V]		Tipo Eletrônico de carga microp.
Fabricante BETTA		Fabricante BAMBOZZI		Fabricante GEN-UNIFEI
DADOS DO PROJETO				
n <sub>G</sub> [rpm]	n <sub>T</sub> [rpm]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	P <sub>el</sub> [kW]
1800	600	0,185	21,5	25
DADOS DOS EQUIPAMENTOS				
TURBINA		GERADOR		REGULADOR
Tipo BFT		Tipo Assíncrono, trifásico, 220 [V]		Tipo Eletrônico de carga microp.
Fabricante KSB Bombas		Fabricante Weg		Fabricante GEN-UNIFEI
DADOS DO PROJETO				
n <sub>G</sub> [rpm]	n <sub>T</sub> [rpm]	Q [m <sup>3</sup> /s]	H [m]	P <sub>el</sub> [kW]
1800	1800	0,280	21,5	40

As figuras 3.1 e 3.2 mostram a barragem de 5 m de largura e 0,4 m de altura, a tomada d'água e sua comporta, além do canal de adução de 1 m de largura e 38 m de comprimento.



**FIGURA 3.1- Barragem e comporta da tomada d'água (fonte: Viana, 2008)**

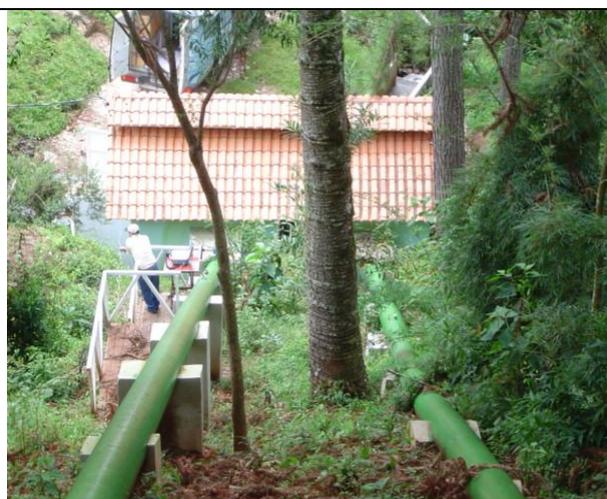


**Figura 3.2- Canal de adução e comporta desarenadora (fonte: Viana, 2008)**

As figuras 3.3 e 3.4 apresentam a câmara de carga, os blocos de ancoragem, os condutos forçados e a casa de máquinas.



**FIGURA 3.3 – Câmara de carga e blocos de ancoragem (fonte: Viana, 2008)**



**FIGURA 3.4 – Condutos forçados, blocos de apoio e casa de máquinas (fonte: Viana, 2008)**

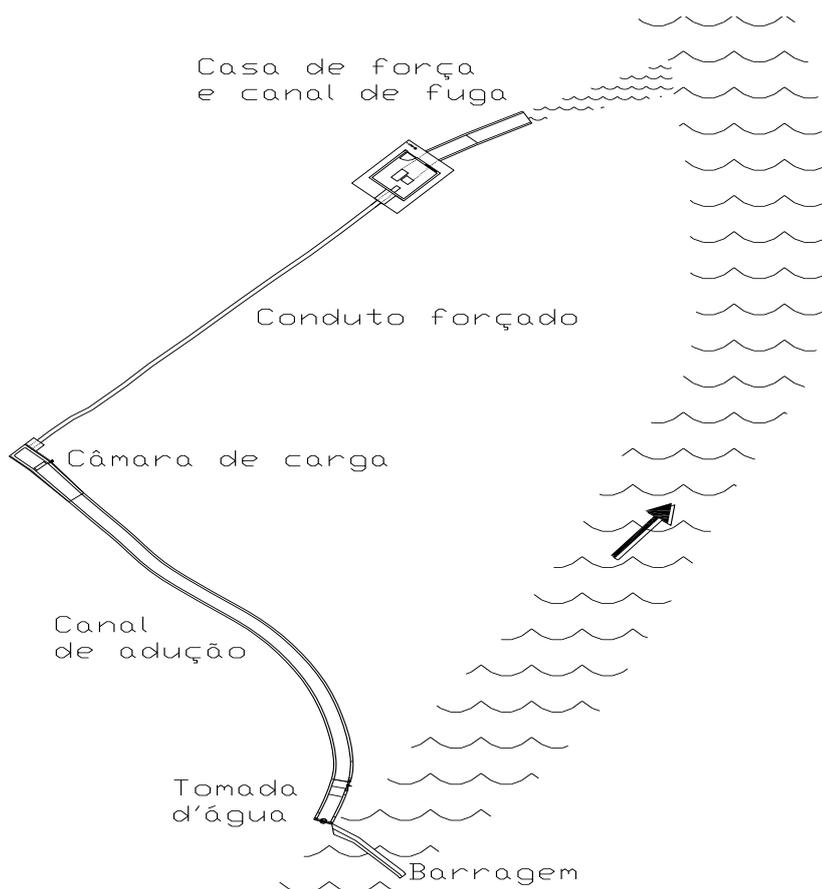
O grupo gerador com BFT/GI e o canal de fuga são mostrados na figura 3.5 e 3.6, enquanto que o arranjo geral está apresentado na figura 3.7.



**FIGURA 3.5 – Grupo gerador com BFT/GI (fonte: Viana, 2008)**



**FIGURA 3.6 – Canal de fuga (fonte: Viana, 2008)**



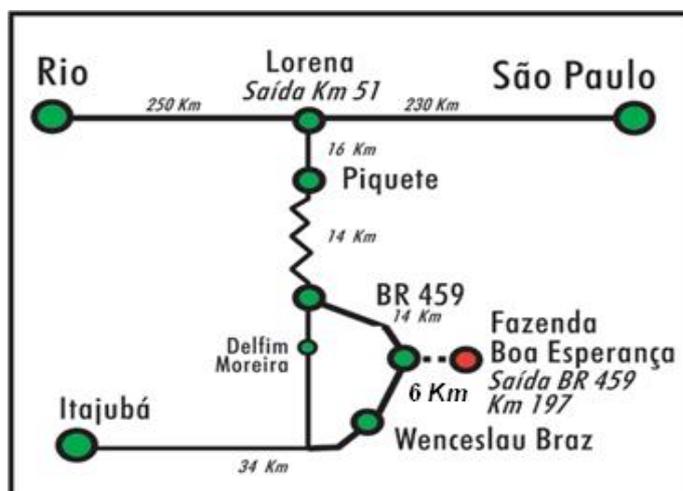
**FIGURA 3.7 – Arranjo geral da MCH Mireta Bastos (fonte: Viana, 2008)**

A MCH Mireta Bastos é um empreendimento que trouxe energia elétrica à fazenda, às famílias em torno da fazenda, além de movimentar economicamente a região, tanto na construção da central, em que se utilizou mão de obra local, quanto no aproveitamento da eletrificação no desenvolvimento de ecoturismo e geração de novos empregos. Sabe-se que atualmente o dono da fazenda, senhor Luiz Carlos, implementou também uma fábrica de gelo em sua propriedade.



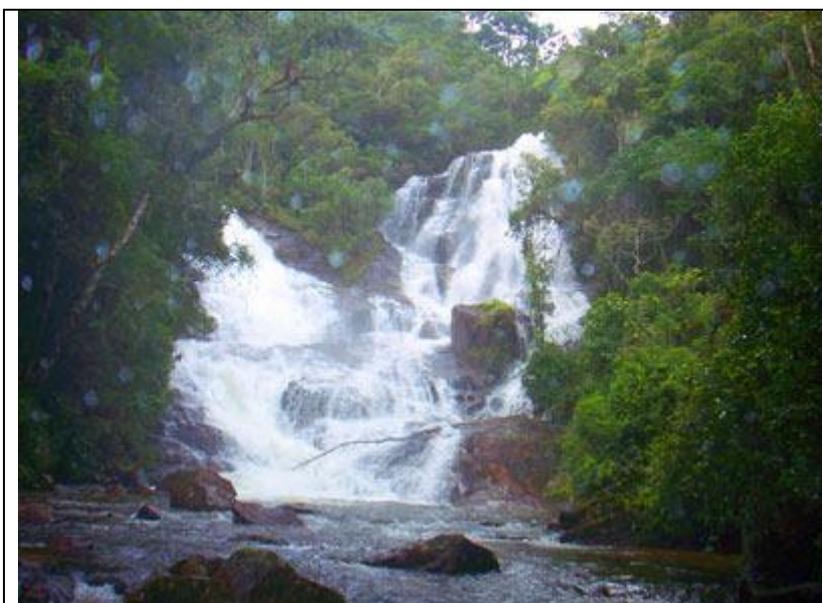
**FIGURA 3.8- Logo da Fazenda Boa Esperança (fonte: <http://www.fazendaboa.com>).**

A Fazenda Boa Esperança está localizada na Área de Proteção Ambiental da Mantiqueira, na cidade de Delfim Moreira – MG, a cerca de 280 km da cidade de São Paulo (Figura 3.9).



**FIGURA 3.9- Como chegar na fazenda (fonte: <http://www.fazendaboa.com>).**

Com 211 hectares e temperatura média anual de 16°C (Clima Tropical de Altitude, é cercada por área verde de Mata Atlântica preservada e por três rios – da Boa Vista, do Cambaú e da Onça, que dão origem a mais de sete cachoeiras (Figura 3.10), com quedas d'água de 3 a 70 metros.



**FIGURA 3.10- Cachoeira Formosa (fonte: <http://www.fazendaboa.com>).**

A fazenda oferece aos visitantes e hóspedes chalés e suítes com decoração rústica (Figura 3.11) e lareira. No restaurante Berro D'água, todos

têm o prazer de experimentar culinária mineira, disposta num fogão à lenha, onde são servidos também produtos da região, como mel e as trutas, produzidas na própria fazenda, em tanques com água desviada do Córrego da Onça. Em dias frios, pode-se usufruir de uma sauna à lenha, com piscina térmica (Figura 3.12). No verão, um mergulho nas águas frias dos rios. À noite, uma fogueira é montada nas proximidades de uma das cachoeiras (Figura 3.13), e são servidos caldos típicos do sul de Minas.



**FIGURA 3.11- Chalés da Fazenda Boa Esperança.**



**FIGURA 3.12- Sauna e piscina térmica.**



**FIGURA 3.13- Fogueira noturna e comida mineira.**

## 3.2. EXPERIÊNCIAS PRÁTICAS

A aplicação da teoria nos experimentos práticos possíveis na MCH envolvem parte das disciplinas das engenharias Hídrica e Ambiental como:

- Fenômenos de Transporte; (Hídrica e Ambiental).
- Hidráulica Geral I; (Hídrica).
- Hidráulica Geral II; (Hídrica).
- Hidrologia II; (Hídrica).
- Hidrometria Aplicada e; (Hídrica).
- Hidráulica de Canais. (Ambiental).

A MCH foi preparada como um Laboratório em escala real instalando suportes para molinetes no canal de adução (figura 3.14), tomadas de pressão, no conduto forçado, (figura 3.15), taps para colocação de sondas de Pitot e Prandtl (figura 3.16), além de suportes no canal de fuga para colocação de vertedores (figura 3.17).



**FIGURA 3.14 – Suporte para molinetes no canal de adução (fonte: Viana, 2008)**



**FIGURA 3.15 – Tomadas de pressão no conduto forçado**



**FIGURA 3.16 – Taps para colocação de sondas de Pitot e Prandtl (fonte: Viana, 2008).**



**FIGURA 3.17 – Suporte no canal de fuga para colocação de vertedores (fonte: Viana, 2008).**

Na entrada das turbinas existem pontos de tomadas de pressão (figura 3.18 e 3.19).



**FIGURA 3.18 – Instalação dos manômetros na entrada da turbina Michell-Banki (fonte: Viana, 2008)**

**FIGURA 3.19 – Manômetro de Bourdon e transdutor de pressão instalados na entrada da turbina Michell-Banki (fonte: Viana, 2008)**

As experiências atualmente possíveis de serem realizadas são:

- **Medidas de pressão:** Realizando experiências de pressão com manômetros de Bourdon, medidas de pressão com manômetros de colunas de líquido e medidas de pressão utilizando transdutores pontuais e diferenciais, além da medida de pressão barométrica.
- **Medidas de vazão em rios e canais:** Realizando medição de vazão utilizando molinetes no Córrego da Onça e no canal de adução, em canais e córregos utilizando flutuadores, utilizando tipos de vertedores no canal de fuga e medição de vazão por desnível no canal de adução, utilizando a formulação de Manning.
- **Medidas de vazão em condutos forçados:** Realizando medições de medidas de velocidades de escoamento e vazão utilizando tubo de Prandtl, tubo de Pitot-Cole e medidas de vazão utilizando ultra-som por tempo de trânsito.
- **Medidas de perdas de carga:** Realizando medições de medidas de perdas distribuídas em trechos retos de tubulação, medidas de perdas de cargas em canais (adução e de fuga) e medidas de perdas de carga localizadas em válvulas borboletas.

# **CAPÍTULO 4. PADRONIZAÇÃO DOS ENSAIOS PROPOSTOS E REALIZADOS**

## **4.1. PADRONIZAÇÃO DOS ENSAIOS**

A padronização dos ensaios a serem propostos foi realizada percebendo e seguindo os métodos de padronizações dos ensaios de bombas centrífugas realizados pelas melhores empresas do mercado internacional e nacional.

Os ensaios a serem realizados no Laboratório de Hidráulica deverão ter a seguinte padronização:

### **1 – INTRODUÇÃO**

Deve ser entendida por pessoas não especialistas no assunto e que não acompanharam os ensaios na prática, pois esta é a situação real da engenharia, chamando sempre a atenção para a importância do tipo de ensaio que foi realizado. Não deve conter detalhes sobre a teoria experimental, o método ou os resultados, nem antecipar sobre as conclusões. Não deve conter figuras.

### **2 - OBJETIVOS**

Devem ser apresentados de forma descritiva.

### **3 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

Devem conter neste item a descrição de todos os equipamentos utilizados no ensaio.

### **4- DESENVOLVIMENTO**

O desenvolvimento é uma parte muito importante do texto, onde são exigidos raciocínio lógico e clareza.

Deve conter os seguintes tópicos:

#### **4.1 - ESQUEMA DO BANCO DE ENSAIO**

Deve ser feito um desenho esquemático em AUTOCAD e a descrição do circuito considerado. Os desenhos devem ser o mais completo e legível possível sempre indicando os locais de coletas de dados e nomeando-os.

#### **4.2-PROCEDIMENTO PARA A OBTENÇÃO DAS GRANDEZAS**

Deve ser mostrado passo a passo como foram obtidas as grandezas de forma descritiva.

#### **4.3-ROTEIRO PARA OBTENÇÃO DAS GRANDEZAS**

Neste item serão demonstrados os cálculos realizados para obtenção das grandezas e obtenção dos resultados.

#### **5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS**

Neste Item devem conter os valores obtidos dos ensaios

#### **6-ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES**

Neste item devem conter claramente, concisamente e ordenadamente as deduções tiradas do resultado de cada ensaio. Observar se os objetivos foram atingidos e expressar o ponto de vista sobre o ensaio.

## **4.2. ENSAIOS PROPOSTOS**

De acordo com a padronização dos ensaios propõe-se a realização dos mesmos a seguir.

### **4.2.1- MEDIDAS DE PRESSÃO**

#### **1- INTRODUÇÃO**

O conceito de pressão em hidráulica é extremamente importante e sua medida não é diferente.

Desta forma neste experimento pretende-se medir a pressão estática ou manométrica de um escoamento de forma medida e aquisitada.

Esse experimento servira de base para outras medidas, como por exemplo, em medidas de vazão onde utiliza-se -à diferença de pressão, no caso, sondas de Pitot e Prandtl.

#### **2- OBJETIVOS**

- 2.1- Conhecer os vários tipos de medidores de pressão;
- 2.2- Realizar a calibração de um medidor de pressão;
- 2.3- Realizar medidas de pressão na entrada da turbina com dois tipos de medidores e;
- 2.4- Comparação dos Resultados.

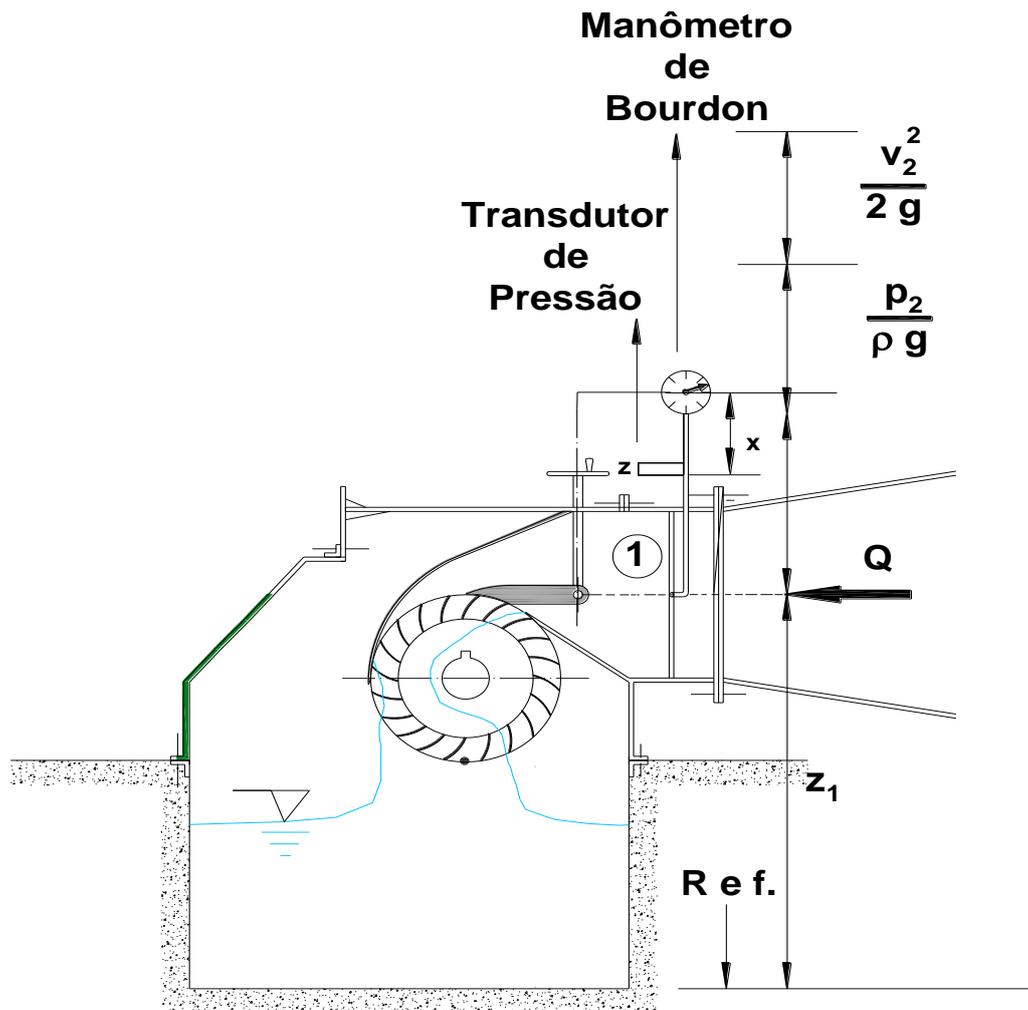
#### **3- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

- Circuito de calibração de pressão;
- Manômetro de Bourdon e;
- Transdutor de pressão.

#### **4- DESENVOLVIMENTO**

##### **4.1-Esquema do banco de ensaios**

A (figura 4.1) apresenta a entrada da turbina (Michell Banki), onde estão instalados um manômetro de Bourdon (MB) e um transdutor de pressão (Tp).



**FIGURA 4.1- Entrada da turbina Michell Banki com os medidores de pressão.**

## 4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas

Para as medidas de pressão será estabelecida várias vazões de escoamento na turbina e serão medidas as pressões nos dois medidores.

## 4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas

### 4.3.1- Manômetro de Bourdon

- **Pressão manométrica: Bourdon de acordo com a equação 1.**

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} = \frac{p_m}{\rho \cdot g} + x \quad (1)$$

onde:

$\frac{p_1}{\rho \cdot g}$  [m]- pressão a entrada da TMB;

$\frac{p_m}{\rho \cdot g}$  [m]- pressão lida no manômetro de Bourdon e;

$x$  [m]- distância do ponto 1 ao centro do manômetro.

obs: Neste caso  $x = 0,010$  (m)

### 4.3.2- Transdutor de pressão

• Pressão manométrica: Transdutor de pressão de acordo com a equação 2.

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} = \frac{p_{Tp}}{\rho \cdot g} + y \quad (2)$$

onde:

$\frac{p_1}{\rho \cdot g}$  [m]- pressão na entrada da MB (posição 1);

$\frac{p_{Tp}}{\rho \cdot g}$  [m]- pressão lida no transdutor e;

$y$  [m]- distância do ponto 1 a entrada do transdutor

obs: Neste caso  $z = 0$  (m)

## 5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS

A tabela 4.1 apresenta os valores medidos e os calculados.

**TABELA 4.1- Valores lidos e calculados**

Método medido		Método aqusitado		Diferença
Q	M. Bourdon	Q <sub>a</sub>	Transdutor	[%]
	$\frac{P_m}{\rho \cdot g}$		$\frac{p_1}{\rho \cdot g}$	$\frac{P_1}{P_m}$
[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[m <sup>3</sup> /s]	[m]	[adimensional]
0,100	22,9	0,1027	22,3	2,6
0,1277	22,8	0,1297	22,1	3,1
0,1458	22,3	0,1469	21,9	1,8
0,1722	22,0	0,1737	21,5	2,3
0,1829	21,5	0,1849	21,0	2,4
Distância do ponto 1 ao centro do manômetro		Distancia do ponto 1 ao centro do transdutor		
[m]		[m]		
0,010		0		
<b>Obs: Corrente do transdutor de 04 a 20 [mA]</b>				

A figura 4.2 ilustra a instalação dos medidores de pressão na entrada da TMB. O mesmo pode ser realizado no grupo gerador com BFT.



**FIGURA 4.2- Instalação dos medidores de pressão na entrada da TMB**

## 6- ANÁLISES DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Na Tabela 4.1 os valores obtidos das pressões da forma lida manual e da forma aqisitada, variando-se a vazão apresentaram uma pequena diferença.

A tabela 4.1 apresenta a relação dos valores medidos manualmente e aqisitados.

Nota-se que a diferença entre os valores medidos manualmente ficou entre 1,8 % e 3,1 %.

Pelos valores obtidos os melhores resultados são aqueles aqisitados, pois foram realizados com 1000 valores a cada segundo.

Conclui-se que com os dois medidores mesmo tendo sido calibrados em laboratório, o transdutor de pressão apresenta resultados melhores se comparados ao manômetro de Bourdon.

## **4.2.2- MEDIDAS DE VAZÃO EM CONDUTOS FORÇADOS UTILIZANDO PITOT-COLE E ULTRASOM POR TEMPO DE TRÂNSITO**

### **1- INTRODUÇÃO**

A medição de vazão em condutos forçados ou em tubulações de escoamento de água é bastante importante para avaliação de eficiência de uma central hidrelétrica ou de uma instalação de bombeamento.

A importância é de tal que vários métodos de medidas de vazão foram desenvolvidos nos últimos trezentos anos.

Nessa experiência pretende-se confrontar a medida de vazão com uma sonda de Pitot-Cole (método intrusivo), baseada no desenvolvimento de Pitot em 1732 e posteriormente aperfeiçoado por Cole.

Com um método mais moderno que é o do medidor ultra-som por tempo de trânsito, onde são colocados sensores externamente as paredes da tubulação. (método não intrusivo).

O Pitot-Cole ainda é muito utilizado para realizar a macromedição em redes de água na área de saneamento, principalmente por ser eficaz e ter custo baixo em relação ao medidor ultra-som.

### **2- OBJETIVOS**

2.1- Determinar o perfil de velocidades de escoamento em uma seção do conduto forçado através do Pitot-Cole;

2.2- Determinar a velocidade média e a vazão de escoamento através do Pitot-Cole;

2.3- Determinar a vazão de escoamento através de medidor do tipo ultra-som por tempo de trânsito e;

2.4- Confrontar os resultados utilizando os dois métodos.

### **3- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

• Calibre (medidor de diâmetro interno para tubulação através de um tap);

• Pitot-Cole calibrado na Universidade Federal de Itajubá (Unifei);

• Transdutor diferencial de pressão;

• Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito;

• Manômetro de coluna;

• Mangueira;

• Trena;

• Medidor de espessura ultra-sônico e;

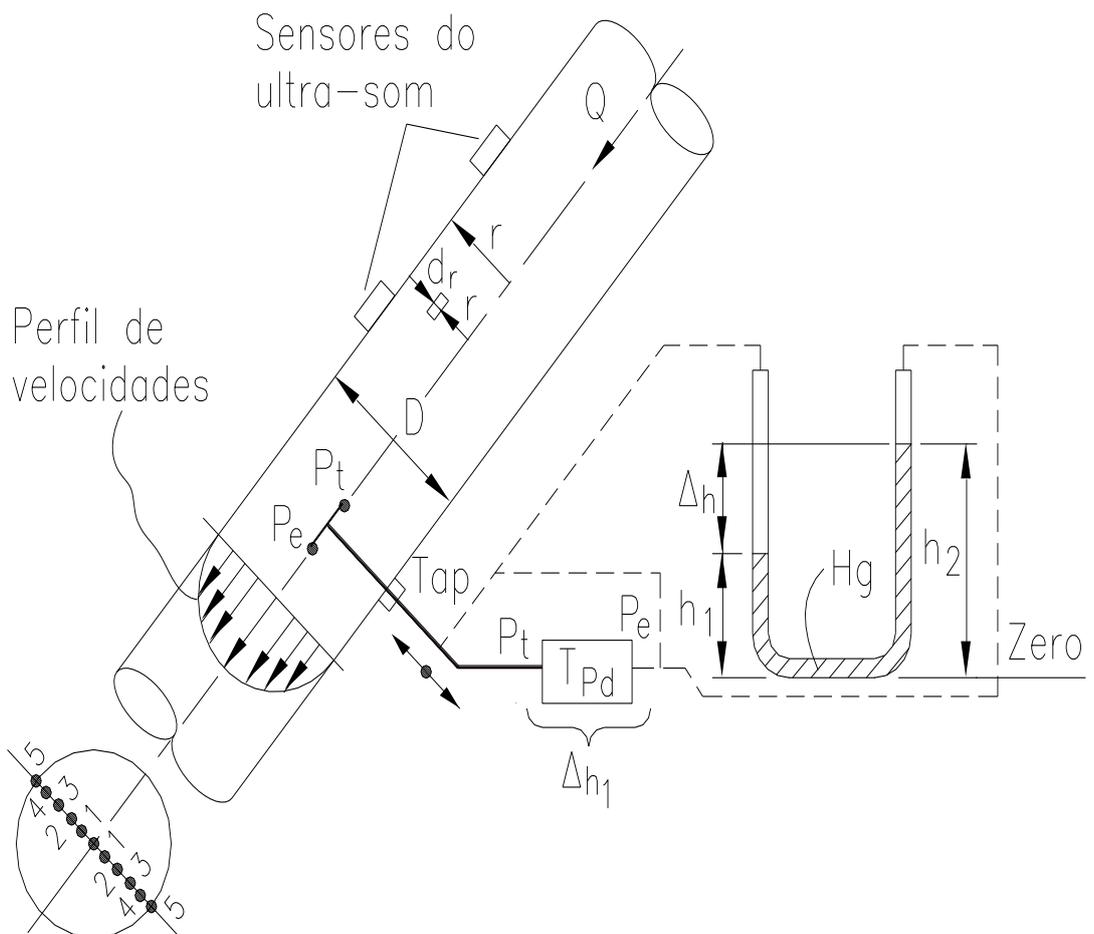
• Laptop.

## 4- DESENVOLVIMENTO

### 4.1-Esquema do banco de ensaios

A figura 4.1 ilustra parte da tubulação onde está instalado o tap para introdução do Pitot-Cole e o local da instalação dos sensores do ultra-som.

As posições de  $r$  de 1 a 5 em cada raio seção padronizadas conforme (Troskolanski, 1965), mostrado também na figura 4.1.



**FIGURA 4.1- Conduto forçado com medição de vazão com Pitot-Cole e ultra-som.**

### 4.2- Procedimento para a obtenção das grandezas

Primeiramente com um calibre levanta-se o diâmetro interno do conduto forçado no tap e determina-se as posições de  $r$  nos dois raios  $R$ . Em seguida instala-se o Pitot-Cole no tap e instala-se os sensores do medidor de vazão

ultra-som e através do medidor de espessura também ultra-som determina-se a espessura da tubulação.

O medidor de vazão ultra-som através do seu display e seu menu manual solicita dados do escoamento e da tubulação conforme tabela 4.1 e calcula a distância dos sensores.

**TABELA 4.1- Ultra-som com dados no seu display indicando cálculo da distância dos sensores.**

Dados da tubulação				
Diâmetro externo (m)	Espessura de revestimento (mm)	Tipo de fluido	Tipo de transdutor	
356,5	6,6	Água	Standart	
Método de montagem do transdutor	Material da tubulação	Material de revestimento	Unidades da taxa de fluxo escolhida pelo hidrometrista	
V	Aço carbono	Não possui	Q [m³/s]	v [m/s]
Resultados		Distância dos sensores (m)	Intensidade do sinal (%)	
		0,12	100	

Estando os dois medidores instalados passa-se a realizar as medições. No caso do Pitot mede-se as diferenças de pressão no manômetro de colunas e no transdutor de pressão aqusitado ou lido no display do mesmo, em cada posição padronizada de r.

Durante as medidas realizadas no Pitot-Cole faz-se várias leituras no display do medidor ultra-som para obter um valor médio.

### 4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas

- Vazão pelo Pitot-Cole

A velocidade de escoamento da água pode ser obtida pela expressão 3, utilizando o manômetro de colunas.

$$v_n = C_p \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (\Delta h) \cdot \left( \frac{\rho_{Hg}}{\rho_{H_2O}} - 1 \right)} \quad (3)$$

onde:

$v_n$  [m/s]- velocidade de escoamento da água na posição r;

$C_p$  [1]- Coeficiente do Pitot-Cole obtido na calibração do mesmo;  
 $g$  [m/s<sup>2</sup>]- aceleração da gravidade;  
 $\Delta h$  [m Hg]- diferença de cotas nas colunas de mercúrio;  
 $\rho_{Hg}$  [Kg/m<sup>3</sup>]- massa específica do mercúrio e;  
 $\rho_{H_2O}$  [Kg/m<sup>3</sup>]- massa específica da água.

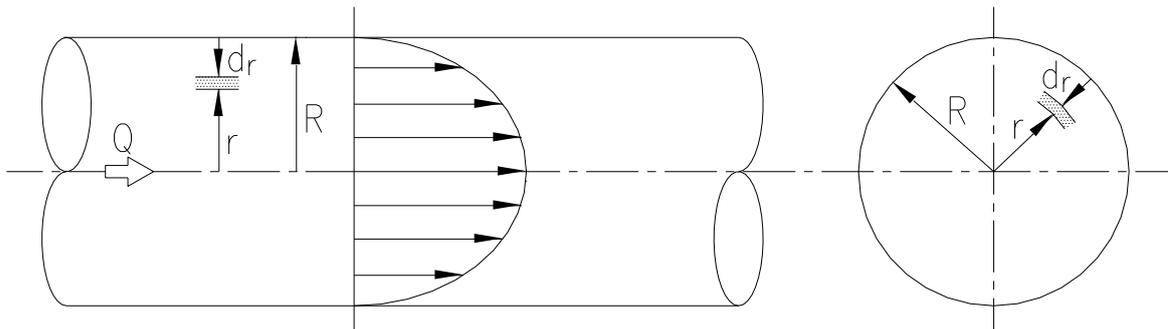
Para a utilização do transdutor de pressão tem-se a equação 4.

$$v_n = C_p \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_1} \quad (4)$$

onde:

$\Delta h_1$  [mca]- diferença de pressão do transdutor.

De posse das velocidades de escoamento obtêm o perfil de velocidades como mostra a figura 4.2.



**FIGURA 4.2- Perfil de velocidades**

A velocidade média pode ser obtida pela equação 5.

$$v_m = \left( \frac{1}{A} \right) \int_A v \cdot dA = \left[ \left( \frac{2}{R^2} \right) \cdot \int_0^R r \cdot v \cdot dr \right] \quad (5)$$

O valor da  $\int_0^R r \cdot v \cdot dr$  é determinado graficamente pela área sobre a curva  $r$  versus  $v_n \cdot r$  mostrado no capítulo 2. Pode ser obtido de varias maneiras como, por exemplo: planímetro, CAD e um software gráfico.

A vazão é obtida pela equação 6.

$$Q = v_m \cdot A = v_m \cdot \pi \cdot R^2 \quad (6)$$

onde:

$Q$  [m<sup>3</sup>/s]- vazão;

$v_m$  [m/s]- velocidade média de escoamento;

$A$  [m<sup>2</sup>/s]- área da seção do conduto forçado e;

$R$  [m]- raio interno do conduto forçado.

- Vazão pelo ultra-som

Serão realizadas várias medidas da vazão no display do equipamento.

## 5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS

A tabela 4.2 apresenta os valores medidos e calculados.

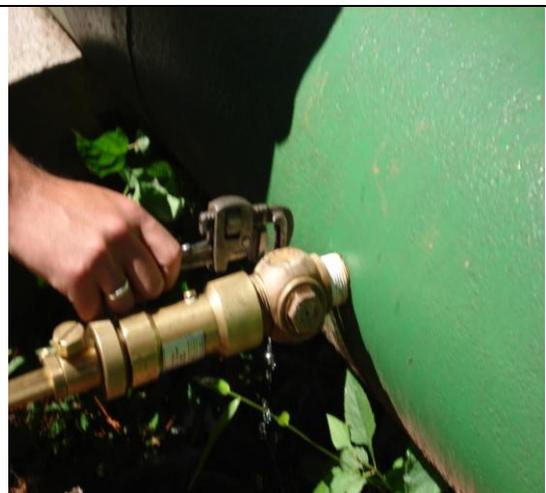
**TABELA 4.2- Valores medidos e calculados**

Posições no Pitot Cole $r$ (m) [0,17165]		$\Delta h$ Lida no manômetro de coluna (m)	$\Delta h_1$ Lida no transdutor (m)	$\Delta h_2$ Aquisitada pelo transdutor (m)	$V_n$ m/s	$V_{n1}$ (m)	$V_{n2}$ (m/s)
(+) 0,316.R	0,05424	0,49	0,47	0,46	2,669	2,614	2,586
(+) 0,548 R	0,09406	0,43	0,43	0,39	2,500	2,500	2,381
(+) 0,706.R	0,12118	0,36	0,34	0,32	2,287	2,223	2,157
(+) 0,836.R	0,14349	0,32	0,31	0,30	2,157	2,123	2,088
(+) 0,948.R	0,16272	0,23	0,23	0,20	1,828	1,828	1,705
(-) 0,316.R	0,05424	0,48	0,48	0,44	2,641	2,641	2,529
(-) 0,548 R	0,09406	0,38	0,39	0,40	2,350	2,381	2,411
(-) 0,706.R	0,12118	0,36	0,33	0,36	2,287	2,190	2,287
(-) 0,836.R	0,14349	0,28	0,26	0,29	2,017	1,944	2,053
(-) 0,948.R	0,16272	0,24	0,24	0,24	1,868	1,868	1,868
Resultados		$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q$ [m] média do ultrassom		$V$ [m/s] média do ultrassom
		(+) 0,20873	(+) 0,2055	(+) 0,2016			
		(-) 0,20420	(-) 0,20138	(-) 0,20388			
Obs: Os valores de $\Delta h_1$ do transdutor são médios;							
$\rho_{Hg} \quad 13,6 \cdot 10^3$ [Kg/m <sup>3</sup> ] e $\rho_{H_2O} \quad 10^3$ [Kg/m <sup>3</sup> ]							

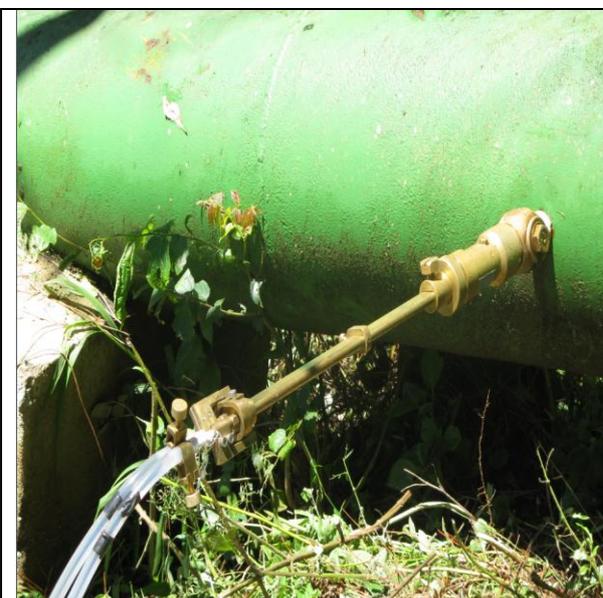
As figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram o ensaio de medidas de vazão entre o ultra-som por tempo de transito e o Pitot-Cole.



**FIGURA 4.3- Manômetro de coluna em U diferencial**



**FIGURA 4.4- Tap instalado para fixação do Pitot-Cole**



**FIGURA 4.5 – Medidas do perfil de velocidades e vazão de escoamento com Pitot-Cole**



**FIGURA 4.6- Instalação no conduto forçado dois sensores para medidas da vazão com o medidor de ultra-som tempo de trânsito**

## 6- ANÁLISES DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A determinação dos perfis de velocidades e das vazões pelo método gráfico com o Pitot-Cole foi realizada utilizando o software Table-Curve e suas curvas estão no anexo A.

A tabela 4.2 ilustra os valores lidos e calculados, bem como os resultados das vazões pelos métodos sugeridos nessa experiência.

Os resultados da vazão pelo método do Pitot-Cole utilizando as medidas da forma manual comparadas com a forma adquirida ficaram muito próximos um do outro.

A comparação com a medida da vazão com o ultra-som também ficou próximo dos obtidos com o Pitot-Cole.

A vazão média determinada com o Pitot-Cole foi de 0,20315 m<sup>3</sup>/s, que aproxima da vazão obtida pelo ultra-som, tendo uma relação de 0,985, ou seja, um desvio de 1,5%, que é um excelente resultado.

Os métodos de medidas de vazão com sondas de Pitot-Cole são muito bons, aliados ao desenvolvimento do sistema de aquisição de dados, mostraram-se bastante eficientes.

Também o método de medida de vazão utilizando um equipamento prático e moderno, que é o ultra-som por tempo de trânsito teve um resultado bastante satisfatório.

## **4.2.3- PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES**

### **1-INTRODUÇÃO**

As perdas de carga ou perdas de energia de escoamento em uma tubulação ocorrem devido ao atrito entre as partículas do líquido e o atrito das partículas com as paredes do tubo.

As perdas em um conduto são divididas em perdas distribuídas nos trechos retos e localizadas nos acessórios de tubulações (válvulas, reduções, tês etc.).

Para essa experiência medir-se-á as perdas distribuídas em um trecho reto do conduto forçado e as perdas localizadas em uma válvula borboleta instalada na entrada da turbina.

### **2-OBJETIVOS**

2.1- Medir a perda de carga distribuída em um trecho reto da tubulação.

2.2- Medir a perda de carga localizada de uma válvula borboleta.

2.3- Comparar as perdas de carga medidas com as calculadas através da equação universal e utilizando o comprimento equivalente para as perdas localizadas.

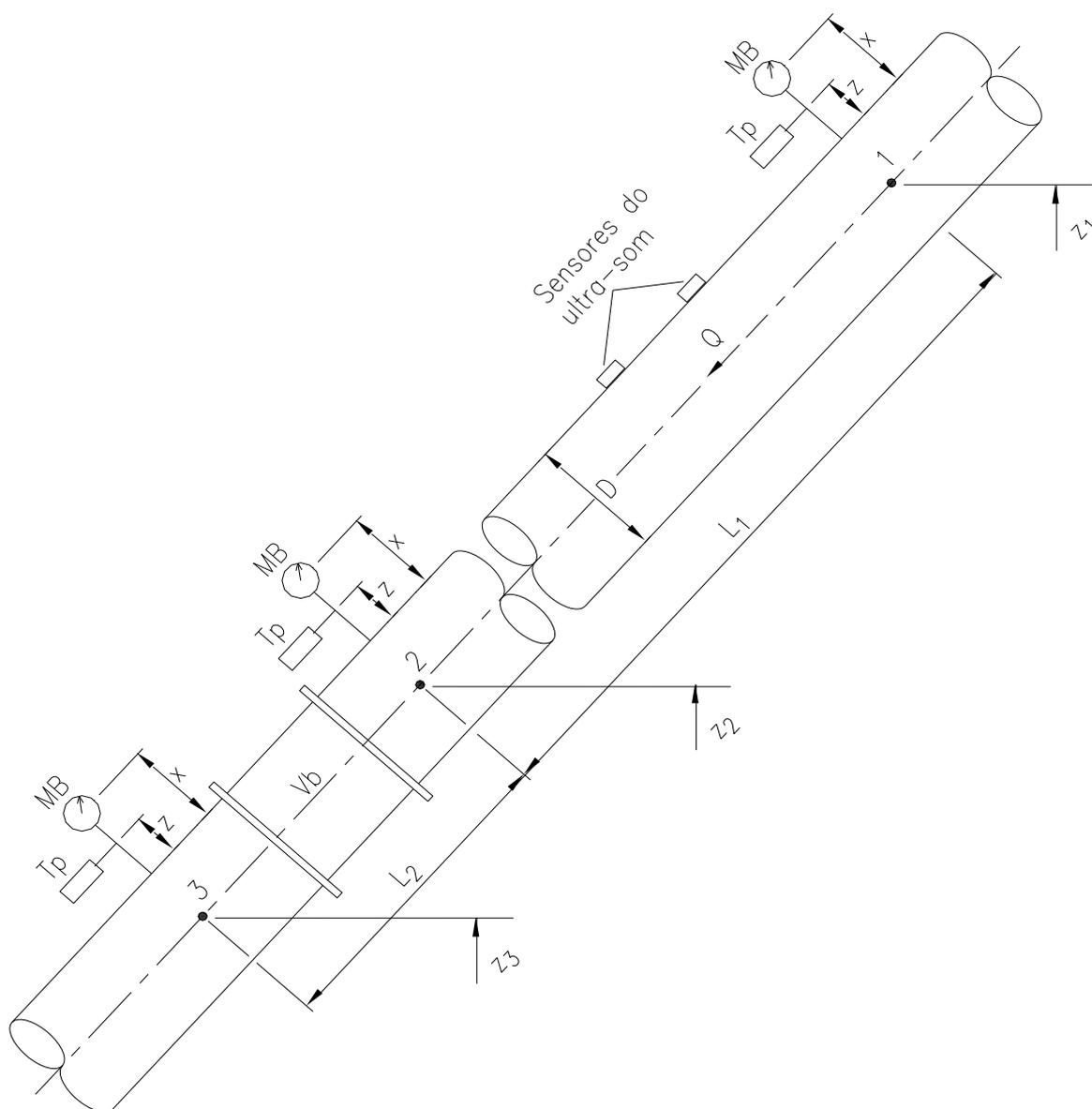
### **3-EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

- Três manômetros de Bourdon;
- Três transdutores de pressão;
- Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito;
- Computador Laptop;
- Sistema de aquisição de dados;
- Software Labview;
- Nível de mangueira e;
- Trena.

### **4-DESENVOLVIMENTO**

#### **4.1- Esquema do banco de ensaios**

A figura 4.1 apresenta o conduto forçado da MCH, onde serão determinadas as perdas de carga distribuídas e localizadas no trecho considerado.



**FIGURA 4.1- Conduto forçado e pontos de medidas.**

#### 4.2- Procedimento para obtenção das grandezas

O trecho reto considerado será entre as posições 1 e 2 para a determinação das perdas distribuídas no trecho  $L_1$  e as perdas localizadas no trecho  $L_1$  e as perdas localizadas no trecho  $L_3$ , onde esta instalada uma válvula borboleta.

Foram instalados medidores de pressão do tipo Bourdon e transdutor nas três posições. Estabele-se uma vazão na condição de máxima abertura na válvula borboleta, condição de operação da MCH.

Para a medida de vazão foram instalados sensores do medidor ultrassom.

A partir do estabelecimento da vazão medem-se as pressões nos três manômetros de Bourdon e aquisita-se as três medidas nos transdutores de pressão.

A vazão e medida do display do ultra-som e aquisitada no sistema de aquisição de dados.

As cotas geométricas  $z_1$ ,  $z_2$  e  $z_3$  são obtidas através de mangueiras transparentes de níveis e os comprimentos L1 e L3 são determinados com trena.

### 4.3- Roteiro para a obtenção das grandezas

#### 4.3.1-Perdas de carga medidas

- Perda de carga distribuída.

7: Aplicando Bernoulli entre 1 e 2 tem-se de acordo com a equação

$$H_{p_{1 \rightarrow 2}} = \frac{p_1}{\rho \cdot g} - \frac{p_2}{\rho \cdot g} + (z_1 - z_2) \quad (7)$$

onde:

$H_{p_{1 \rightarrow 2}} [m]$  – perda de carga distribuída em um trecho de comprimento  $L_1$ ;

$\frac{p_1}{\rho \cdot g} [m]$  – pressão medida no manômetro de Bourdon ou transdutor de pressão em 1;

$\frac{p_2}{\rho \cdot g} [m]$  – pressão medida no manômetro de Bourdon ou transdutor de pressão em 2 e;

$(z_1 - z_2) [m]$  – diferença de cotas geométricas entre 1 e 2.

obs: No caso em questão como as cotas x e z, respectivamente nos manômetros e transdutores de pressão são iguais, na determinação da diferença de pressão, elas se anularão.

- Perda de carga localizada.

Aplicando Bernoulli entre 2 e 3 tem-se a equação 8:

$$H_{p_{2 \rightarrow 3}} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} - \frac{p_3}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_3) \quad (8)$$

onde:

$H_{p_{2 \rightarrow 3}} [m]$  – perda de carga localizada entre 2 e 3;

$\frac{p_2}{\rho \cdot g} [m]$  – pressão medida no manômetro de Bourdon ou transdutor de pressão em 2;

$\frac{p_3}{\rho \cdot g} [m]$  – pressão medida no manômetro de Bourdon ou transdutor de pressão em 3 e;

$(z_1 - z_2) [m]$  – diferença de cotas geométricas entre 2 e 3.

- Perda de carga total de acordo com a equação 9.

$$H_p = H_{p_{1 \rightarrow 2}} + H_{p_{2 \rightarrow 3}} \quad (9)$$

onde:

$H_p [m]$  - perda de carga total;

$H_{p_{1 \rightarrow 2}} [m]$  - perda de carga distribuída e;

$H_{p_{2 \rightarrow 3}} [m]$  - perda de carga localizada.

#### 4.3.2- Perda de cargas calculadas

- Perda de carga distribuída

Da equação universal ou de Darcy-Weisback tem-se a equação

10:

$$\mathbf{H}_{p_{1 \rightarrow 2}} = \mathbf{f} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{D}} \cdot \frac{\mathbf{v}^2}{2\mathbf{g}} = \mathbf{f} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{D}^5} \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot \mathbf{g} \cdot \mathbf{Q}^2 \quad (10)$$

onde:

- $\mathbf{H}_{p_{1 \rightarrow 2}}$  [m] – perda de carga calculada entre 1 e 2;  
 $\mathbf{f}$  [adimensional] – coeficiente de atrito (tubulação);  
 $\mathbf{L}$  [m] – comprimento do trecho entre 1 e 2 (m);  
 $\mathbf{D}$  [m] – diâmetro interno da tubulação;  
 $\mathbf{v}$  [m/s] – velocidade média do líquido;  
 $\mathbf{g}$  [m/s<sup>2</sup>] – aceleração da gravidade e;  
 $\mathbf{Q}$  [m<sup>3</sup>/s] – vazão medida no ultra-som.

Para o cálculo de  $\mathbf{f}$ , por Nackab, para escoamento turbulento tem-se a equação 11:

$$\mathbf{f} = \left[ 2 \log \left( 0,27 \cdot \frac{\varepsilon}{\mathbf{D}} + \frac{2,51}{\mathbf{Re} \left( \sqrt{0,4(\mathbf{Re})^{-0,3} + 0,0053} \right)} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

)

onde:

- $\mathbf{f}$  [1] – fator de atrito;  
 $\left( \frac{\varepsilon}{\mathbf{D}} \right)$  [1] - rugosidade relativa;  
 $\varepsilon$  [m] - rugosidade absoluta (tabelada);  
 $\mathbf{D}$  [m] – diâmetro da tubulação e;  
 $\mathbf{Re}$  [1] – número de Reynolds.

O número de Reynolds é calculado pela equação 12.

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{D}}{\mu} = \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{D}}{\nu} \text{ ou}$$

$$\mathbf{Re} = \frac{4 \cdot \mathbf{Q}}{\pi \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{v}} \quad (12)$$

onde:

- $\mathbf{Re}$  = Número de Reynolds (adimensional);  
 $\rho$  = Massa Específica do líquido (Kg/m<sup>3</sup>);

$\mu$  = Viscosidade absoluta (Pa.s);  
 $\nu$  [m/s] - Viscosidade cinemática (tabelado em função da temperatura da água);  
 $V$  = Velocidade média (m/s);  
 $D$  = Diâmetro interno do tubo (m) e;  
 $Q$  = Vazão (m<sup>3</sup>/s).

- Perda de carga localizada

Para o cálculo da perda de carga localizada utilizar-se-á o método do comprimento equivalente. A equação 13 determina a perda de carga localizada.

$$H_{p_{2 \rightarrow 3}} = f \cdot \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = f \cdot \frac{L_{eq}}{D^5} \cdot \frac{\pi^2}{8g} \cdot Q^2 \quad (13)$$

onde:

$L_{eq}$  [m] – comprimento equivalente da válvula borboleta de diâmetro  $D$  (tabelado).

A equação 14 demonstra a perda de carga no trecho de 2→3.

$$H_{p_{2 \rightarrow 3}} = \frac{K \cdot v^2}{2g} = \frac{K \cdot 16 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot 2g} = \frac{k \cdot 8}{\pi^2 \cdot D^4} \cdot \frac{1}{g} \cdot Q^2 \quad (14)$$

onde:

$K$  [m] – valor de acordo com a abertura da válvula (tabelado).

- Perda de carga total está demonstrada de acordo com a equação 9.

$$H_p = H_{p_{1 \rightarrow 2}} + H_{p_{2 \rightarrow 3}} \quad (9)$$

## 5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS

A tabela 4.1 apresenta os valores medidos e calculados.

TABELA 4.1- Valores lidos e calculados

Valores Medidos									
$Q$ m <sup>3</sup> /h	$Q$ m <sup>3</sup> /s	$\frac{p_1}{\rho g}$ (m)	$\frac{p_2}{\rho g}$ (m)	$\frac{p_3}{\rho g}$ (m)	$\frac{p_1}{\rho g}$ (m)	$\frac{p_2}{\rho g}$ (m)	$\frac{p_3}{\rho g}$ (m)	$z_3 - z_2$ (m)	$z_2 - z_1$ (m)
Ultra-som		Manômetro de Bourdon			Transdutores de pressão (aquisitados)			Mangueira transparente	
860	0,2388	2,1	17,5	16	2,3	17,638	16,09	0,515	17,35
$L_1 = 33,14$ (m)			$L_2 = 0,825$ (m)			$D = 0,3433$ (m)			
Valores Calculados									
$H_{p_{1 \rightarrow 2}}$ (m)	$H_{p_{2 \rightarrow 3}}$ (m)	$H_p$ (m) Manômetro	$H_{p_{1 \rightarrow 2}}$ (m)		$H_{p_{2 \rightarrow 3}}$ (m)		$H_p$ (m) Transdutor		
Eq. 7	Eq. 8	Eq.8	Eq. 7		Eq. 8		Eq.9		
2,015	1,95	<b>3,965</b>	2,05		2,115		<b>4,165</b>		
$\frac{\varepsilon}{D}$ [adimensional]	$\frac{L_{eq}}{D}$ (m)		$f$			$Re. (10^5)$			
Tabelado			Eq.11			Eq. 12			
0,01	45		0,037			7,55			
Comprimento equivalente									
$H_{p_{1 \rightarrow 2}}$ (m)	$H_{p_{2 \rightarrow 3}}$ (m)		$H_p$ (m)						
1,3	0,565		<b>1,865</b>						

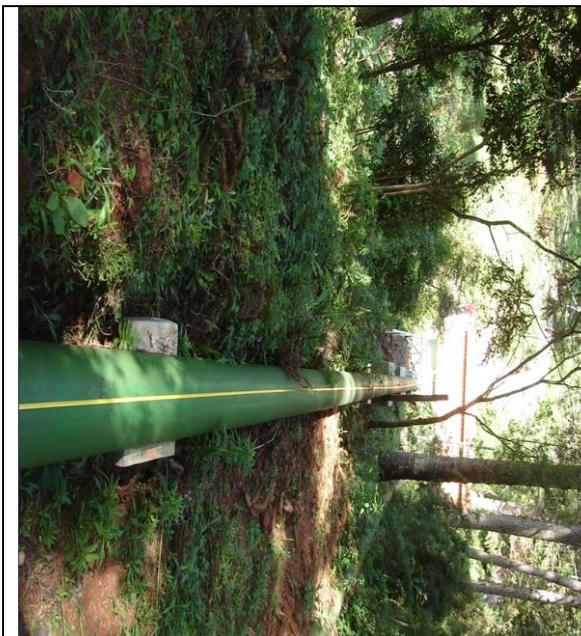
As figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 ilustram o ensaio de perda de carga



**FIGURA 4.2- Manômetros de pressão e transdutores instalados entre a válvula borboleta**



**FIGURA 4.3- Instalando os manômetros e transdutores entre a válvula borboleta**



**FIGURA 4.4 - Medição do comprimento do tubo**



**FIGURA 4.5 - Manômetro de pressão e transdutor instalado antes da válvula borboleta**

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A tabela 4.1 mostra que as pressões medidas e aquisitadas ao longo da tubulação ficaram bastante próximas, que mostra valores confiáveis.

Os valores calculados das perdas de carga nos trechos do tubo através das pressões medidas ficaram muito acima das calculadas.

No caso da perda de carga distribuída, a perda foi calculada considerando a rugosidade  $\epsilon$  para a tubulação nova de aço carbono. Isto não é verdade, pois a MCH opera a quatro anos e pode ter incrustações, que aumentariam a rugosidade, conseqüentemente o fator de atrito  $f$  e a perda de carga.

No caso da perda de carga localizada na válvula borboleta, a perda de carga foi calculada considerando o comprimento equivalente sobre o diâmetro igual a quarenta e cinco para a válvula totalmente aberta, mas a mesma provavelmente indicava estar aberta no seu controle externo, entretanto a montagem interna estava um pouco fechada, o que indica uma perda de carga medida maior.

## **4.2.4- MEDIDAS DE VAZÃO EM CANAIS UTILIZANDO UM MICROMOLINETE E UM FLUTUADOR**

### **1-INTRODUÇÃO**

Em hidráulica a medição de vazão é extremamente importante. Vários tipos de medidores são padronizados através de normas técnicas e outras em função das maiores incertezas não são aceitas.

Nessa experiência pretende-se apresentar um método de medida de vazão em canais normalizado e um método não normalizado e confrontá-los.

O local da MCH escolhido é o seu canal de adução e também o canal que alimenta o tanque de criação de trutas.

O método normalizado foi escolhido um micromolinete e o não normalizado o flutuador.

### **2-OBJETIVOS**

2.1- Medir a vazão no canal de adução e no canal dos peixes pelo método do micromolinete;

2.2- Medir a vazão no canal de adução e no canal dos peixes pelo método do flutuador;

2.3- Comparar os resultados obtidos pelos dois métodos.

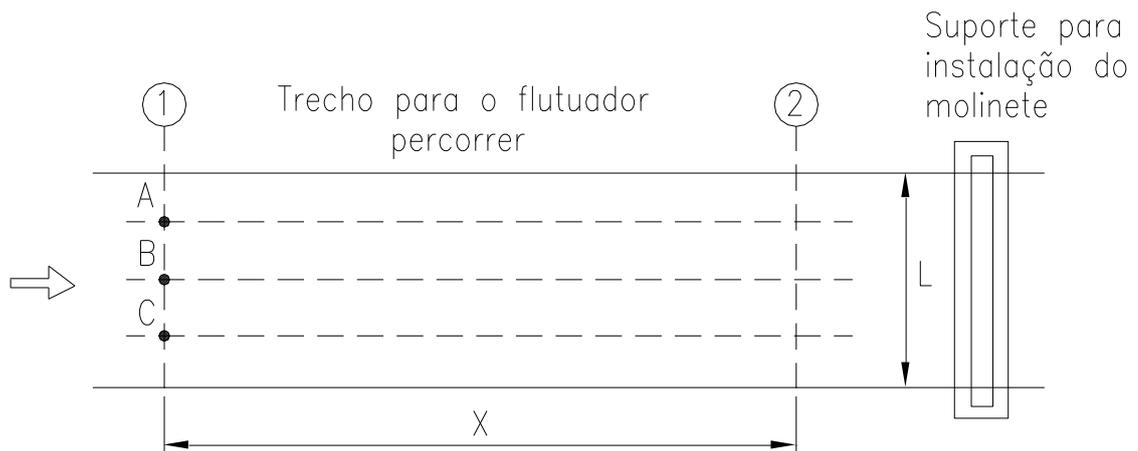
### **3-EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

- Micromolinete;
- Trena e fita crepe;
- Cronômetro;
- Flutuador (Laranja, Limão etc.).

### **4-DESENVOLVIMENTO**

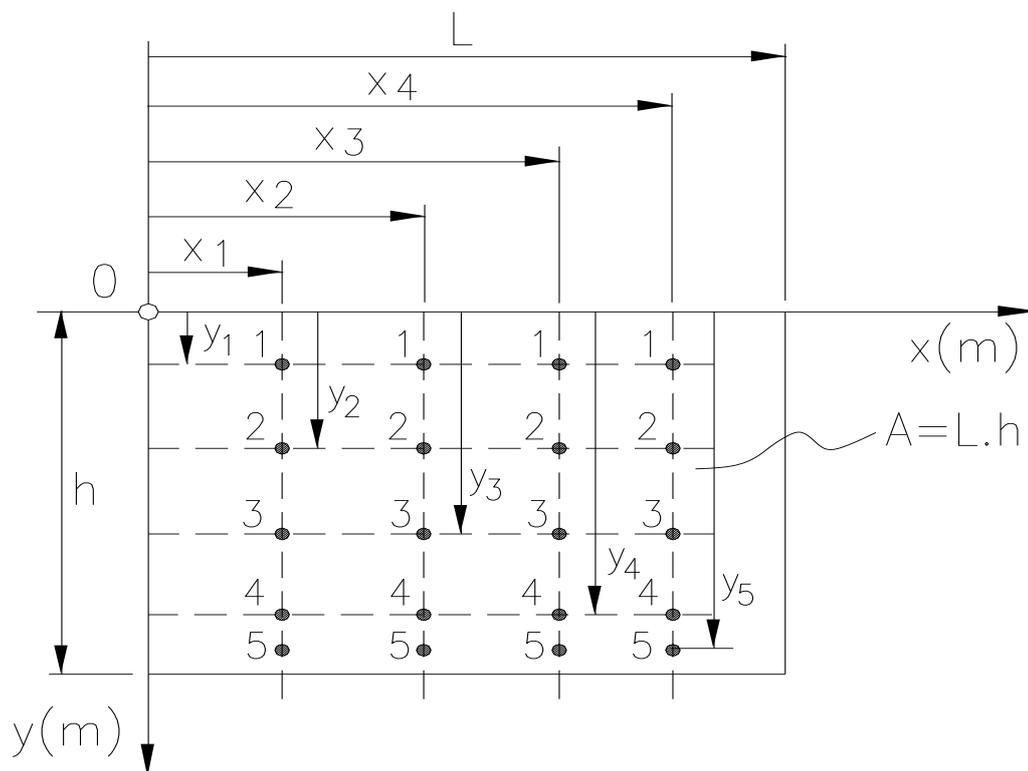
#### **4.1- Esquema do banco de ensaios**

A figura 4.1 ilustra parte do canal de adução onde será realizada a medida do flutuador e o local de instalação do micromolinete.



**FIGURA 4.1- Trecho do canal para a realização das experiências.**

A figura 4.2 mostra a seção do canal para a determinação da área molhada e da batimetria, bem como as referências em relação a profundidade ( $y$ ) e a largura do canal ( $x$ ).



**FIGURA 4.2- Batimetria e posições do micromolinete.**

#### 4.2- Procedimentos para a obtenção das grandezas

Como foi já citado a experiência é medir vazão através do flutuador e do micromolinete.

### 4.2.1- Flutuador

- Escolhe-se um trecho reto do canal definindo duas posições (1 e 2);
- Mede-se a distância  $x$  entre as posições 1 e 2.
- Escolhem-se três linhas de corrente (Margem esquerda – **A**, Margem direita – **C** e centro do canal – **D**);
- Disponibiliza-se um flutuador (Laranja, Limão etc.);
- Antes da posição **1**, na flor d'água deposita-se o flutuador (Linha A) e quando passar por **1** dispara-se o cronômetro e quando passar por **2** para-se o cronômetro, medindo-se o tempo  $t_A$ ; repete-se este mesmo procedimento para as linhas (**B** e **C**), obtendo-se os tempos  $t_B$  e  $t_C$ ;
- Com o valor de  $x$  medido com uma trena e com os tempos  $t_A$ ,  $t_B$  e  $t_C$  determinam-se as velocidades  $v_A$ ,  $v_B$  e  $v_C$ ;
- Determina-se a seção molhada do canal, posição **1** e posição **2**,  $A_1$  e  $A_2$ ;
- Determina-se a vazão.

### 4.2.2- Micromolinete

#### ➤ Canal de adução

- Instala-se o micromolinete no suporte existente no canal (Figura 4.1);
- Posiciona-se o micromolinete em  $(x, y)$  de cada seção (**I**, **II**, **III** e **IV**), figura 4.2, medindo-se a velocidade em cada ponto de  $y$  (**1,2,3,4** e **5**) utilizando-se a equação do micromolinete.

#### ➤ Canal dos peixes

- Posiciona-se o micromolinete em  $(x,y)$  de cada seção (**I**, **II** e **III**) medindo-se a velocidade de cada ponto de  $y$  (**1,2** e **3**), utilizando a equação do micromolinete.

## 4.3- Roteiros para a obtenção das grandezas

### 4.3.1-Flutuador no canal de adução e dos peixes

- Velocidades do flutuador de acordo com a equação 15.

$$v_A = \frac{x}{t_A}; v_B = \frac{x}{t_B} \text{ e } v_C = \frac{x}{t_C} \quad (15)$$

- Velocidade média na flor d'água de acordo com a equação 16.

$$v_M = \frac{v_A + v_B + v_C}{3} \quad (16)$$

- Velocidade média de escoamento de acordo com a equação 17.

$$v_m = 0,8 \cdot v_M \quad (17)$$

- Vazão de acordo com a equação 18.

$$Q = v_m \cdot A_M \quad (18)$$

Onde a área média é calculada pelas equações 19 e 20.:

$$A_M = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (19)$$

$$A_1 = L_1 \cdot h_1 ; A_2 = L_2 \cdot h_2 \quad (20)$$

#### 4.3.2-Micromolinete no canal de adução e dos peixes

- Velocidades de escoamento de cada ponto está demonstrada de acordo com a equação 21.

$$v_n = a + b \cdot n \quad (21)$$

onde:

$v_n$  [m/s]- velocidade de escoamento;

$n$  [rps]- número de voltas da hélice pelo tempo;

$a$  e  $b$  - constantes obtidas da calibração do micromolinete.

- Rotação de acordo com a equação 22

$$n = \frac{N}{t} = \frac{\text{número de voltas}}{\text{tempo}} \quad (22)$$

- Levantamentos dos perfis de velocidade de cada seção (I,II,III e IV) em relação a profundidade  $y$ ;

- Levantamento das áreas sob a curva  $A_I$ ;  $A_{II}$ ;  $A_{III}$  e  $A_{IV}$  dos perfis de velocidades em relação a  $x$ .

- Vazão de acordo com a equação 23.

$$Q = \int_A v \cdot dA = \int_0^x \int_0^y v \cdot dy dx \quad (23)$$

As áreas dos perfis de velocidades representam a  $\int_0^y v \cdot dy$  e a área sob a curva  $x[m]$  versus  $A [m^2/s]$  representa a segunda integral e conseqüentemente a vazão.

## 5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS

### 5.1-Canal de adução

A tabela 4.1 mostra os valores medidos e calculados para o canal de adução.

**TABELA 4.1- Valores lidos e calculados no canal de adução**

<b>Seção I</b>		<b>Micromolinete Hidrométrico</b>				<b><math>x_1 = 0,222 [m]</math></b>	
	01	02	03	04	05	06	
$y [m]$	0,025	0,162	0,299	0,436	0,573	0,710	
$t [s]$	40	40	40	40	40	40	
$N [r]$	214	219	218	188	147	0	
$n [rps]$	5,35	5,47	5,45	4,70	3,67	0	
$v [m/s]$	0,349	0,357	0,356	0,310	0,247	0	
<b>Seção II</b>						<b><math>x_2 = 0,444 [m]</math></b>	
	01	02	03	04	05	06	
$y [m]$	0,025	0,162	0,299	0,436	0,573	0,710	
$t [s]$	40	40	40	40	40	40	
$N [r]$	218	227	241	213	164	0	
$n [rps]$	5,45	5,68	6,03	5,33	4,10	0	
$v [m/s]$	0,356	0,369	0,391	0,348	0,273	0	

<b>Seção III</b>						$x_3= 0,666$ [m]
	01	02	03	04	05	06
y [m]	0,025	0,162	0,299	0,436	0,573	0,710
t [s]	40	40	40	40	40	40
N [r]	224	242	257	240	154	0
n [rps]	5,60	6,05	6,43	6,00	3,85	0
v [m/s]	0,365	0,392	0,415	0,389	0,258	0
<b>Seção IV</b>						$x_4= 0,888$ [m]
	01	02	03	04	05	06
y [m]	0,025	0,162	0,299	0,436	0,573	0,710
t [s]	40	40	40	40	40	40
N [r]	218	252	252	225	208	0
n [rps]	5,45	6,30	6,30	5,63	5,20	0
v [m/s]	0,355	0,407	0,407	0,366	0,340	0

## 5.2-Canal dos peixes

A tabela 4.2 mostra os valores medidos e calculados para o canal dos peixes.

**TABELA 4.2- Valores lidos e calculados (Canal dos peixes)**

<b>Seção I</b>					<b>Micromolinete Hidrométrico</b>	$x_1= 0,145$ [m]
	01	02	03	04		
y [m]	0,025	0,178	0,331	0,490		
t [s]	30	30	30	30		
N [r]	97	106	95	0		
n [rps]	3,223	3,533	3,167	0		
v [m/s]	0,221	0,239	0,216	0		
<b>Seção II</b>						$x_2= 0,290$ [m]
	01	02	03	04		
y [m]	0,025	0,178	0,331	0,505		
t [s]	30	30	30	30		
N [r]	104	106	102	0		
n [rps]	3,47	3,53	3,40	0		
v [m/s]	0,235	0,239	0,231	0		
<b>Seção III</b>						$x_3= 0,435$ [m]
	01	02	03	04		
y [m]	0,025	0,178	0,331	0,510		
t [s]	30	30	30	30		
N [r]	104	108	88	0		
n [rps]	3,47	3,60	2,93	0		
v [m/s]	0,235	0,243	0,202	0		

A tabela 4.3 ilustra o perfil de cada seção com suas respectivas áreas

**TABELA 4.3- Perfil de cada seção com as respectivas áreas**

Canal de adução			Canal dos peixes		
Perfil da seção			Perfil da seção		
Seções	Distância da margem	Área [m <sup>2</sup> ]	Seções	Distância da margem	Área [m <sup>2</sup> ]
<b>01</b>	0,0	0,0	<b>01</b>	0,0	0,0
<b>02</b>	0,222	0,203429	<b>02</b>	0,145	0,092024
<b>03</b>	0,444	0,218779	<b>03</b>	0,290	0,098491
<b>04</b>	0,666	0,227826	<b>04</b>	0,435	0,0928457
<b>05</b>	0,888	0,242503	<b>05</b>	0,580	0,0
<b>06</b>	1,110	0,0			

### 5.3-Comparação dos resultados

A tabela 4.4 ilustra as características de cada canal e seus respectivos resultados de vazão.

**TABELA 4.4- Características de cada canal e resultados de vazão.**

Canal de adução		Canal dos peixes	
Comprimento (m)	<b>3,96</b>	Comprimento (m)	<b>4,26</b>
Larguras (m)		Larguras (m)	
A	B	A	B
<b>1,091</b>	<b>1,109</b>	<b>0,485</b>	<b>0,557</b>
Profundidades		Profundidades	
A	B	A	B
<b>0,662</b>	<b>0,709</b>	<b>0,516</b>	<b>0,540</b>
Resultados de Vazão Q [m <sup>3</sup> /s]		Resultados de Vazão Q [m <sup>3</sup> /s]	
Micromolinete	Flutuador	Micromolinete	Flutuador
<b>0,19088</b>	<b>0,18289</b>	<b>0,04499</b>	<b>0,04880</b>

As figuras 4.3 e 4.4 demonstram os ensaios realizados no canal de adução entre o micromolinete e o flutuador.

As figuras 4.5 e 4.6 demonstram os ensaios realizados no canal dos peixes entre o método do micromolinete e do flutuador.



**FIGURA 4.3 - Medição de vazão no canal de adução com o micromolinete**



**FIGURA 4.4 - Medição de vazão pelo método do flutuador comparado com o micromolinete realizado no canal de adução**



**FIGURA 4.5- Medição de vazão no canal dos peixes com o micromolinete**



**FIGURA 4.6- Medição de vazão pelo método do flutuador**

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A tabela 4.4 apresenta todos os resultados obtidos para o micromolinete e flutuador para o canal de adução, bem como para o canal que alimenta o canal dos peixes.

Apesar do método do molinete ser normalizado e o método do flutuador não ser, os resultados ficaram muito bons.

Para o canal de adução o desvio entre um método e outro ficou em 4%, enquanto que para o canal dos peixes ficou em 8%, provavelmente por ser um canal de menor dimensão.

O micromolinete é um medidor de menor incerteza do que o flutuador, mas na falta desse equipamento o método do flutuador poderá ser utilizado para avaliar vazões em canais e até em pequenos córregos.

No anexo B estão os gráficos das áreas dos perfis de velocidades e das áreas (Vazões) utilizando o micromolinete no canal de adução e canal de alimentação dos peixes.

## **4.2.5- MEDIDAS DE VAZÃO NO CÓRREGO DA ONÇA UTILIZANDO MOLINETES**

### **1-INTRODUÇÃO**

O córrego da onça tem uma vazão média de 1,0 m<sup>3</sup>/s, sendo de 0,8 m<sup>3</sup>/s na estiagem e 1,2 m<sup>3</sup>/s nas cheias. Com uma vazão de 0,250 m<sup>3</sup>/s retirada desse córrego a MCH Mireta Bastos gera 30 kW de potência.

O córrego da onça passa pela fazenda Boa Esperança, em Delfim Moreira-MG onde se localiza o laboratório de hidráulica. Desta forma, o córrego servirá de experimento para medidas de vazões a vau utilizando molinetes hidrométricos.

### **2-OBJETIVOS**

2.1- Medição a vau utilizando o micromolinete hidrométrico com suas três diferentes hélices;

2.2- Medição a vau utilizando molinete hidrométrico;

2.3-Comparação dos resultados.

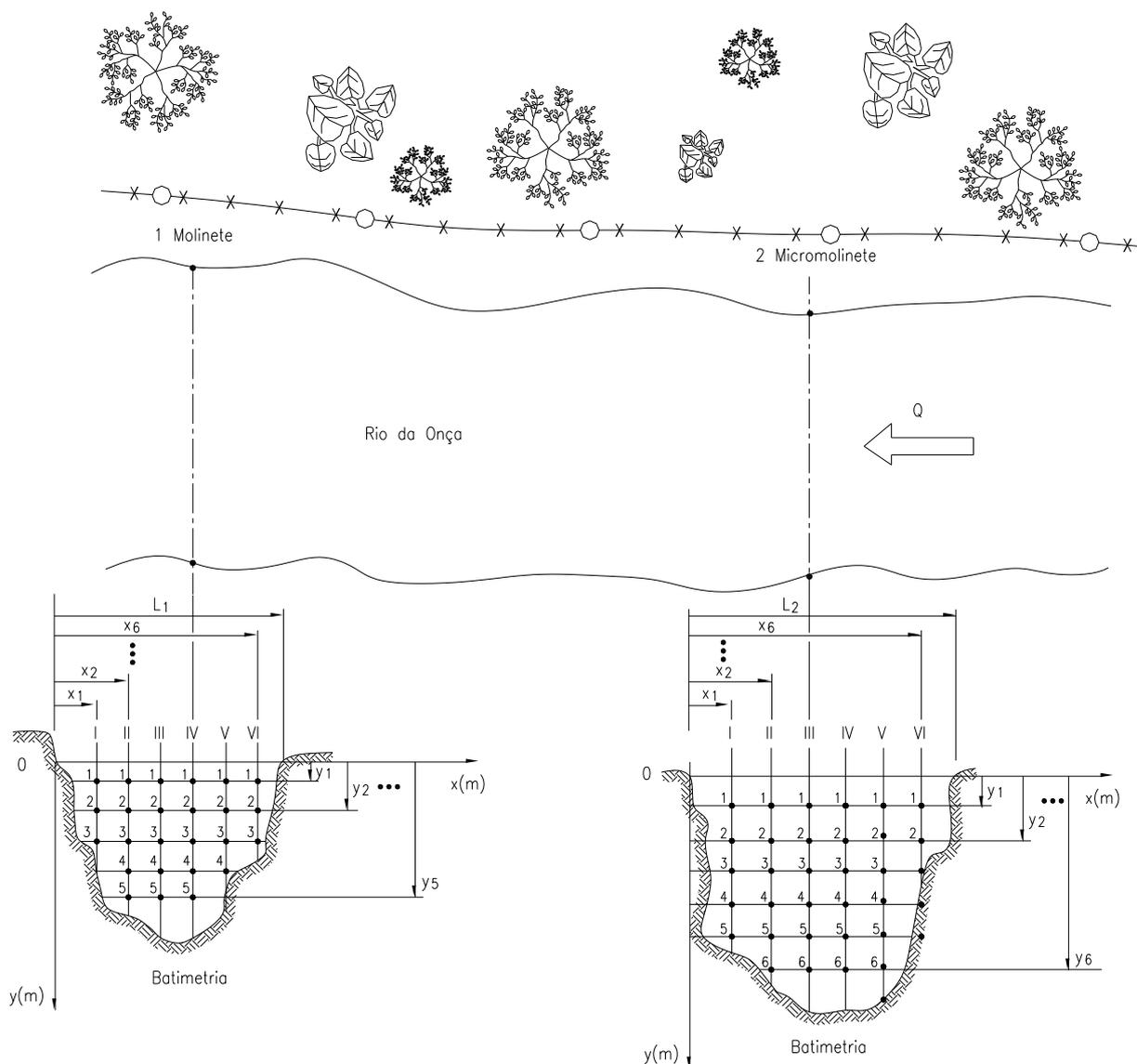
### **3-EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

- Quatro estacas;
- Duas cordas;
- Duas calças bota;
- Molinete hidrométrico
- Micromolinete hidrométrico;
- Trena e fita crepe;
- Cronômetro;
- Máquina fotográfica.

### **4-DESENVOLVIMENTO**

#### **4.1- Esquema do banco de ensaios**

A figura 4.1 ilustra um trecho do rio com as duas seções de estudos.



**FIGURA 4.1- Trecho do rio e batimetria nas duas seções.**

#### **4.2- Procedimentos para a obtenção das grandezas**

- Escolhem-se duas seções do córrego da Onça;
- Instalam-se as estacas nas duas seções (margem direita e margem esquerda);
- Amarram-se as duas cordas nas estacas;
- Dividem-se as posições  $x$  na largura  $L$  de cada seção e as posições  $y$  de profundidade em cada seção (Batimetria);
- Entra-se dentro d'água com cada molinete em cada seção;
- Posiciona-se cada molinete em  $(x,y)$  de cada seção (I, II, III.....VI), figura 4.1, medindo-se as velocidades em cada ponto utilizando-se a equação de cada molinete.

## 4.3- Roteiros para a obtenção das grandezas

### 4.3.1-Micromolinete no rio

- Velocidades de escoamento de cada ponto

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot \mathbf{n}$$

onde:

$\mathbf{v}_n$  [m/s]- velocidade de escoamento;

$\mathbf{n}$  [rps]- número de voltas da hélice pelo tempo;

$\mathbf{a}$  e  $\mathbf{b}$  - constantes obtidas da calibração do micromolinete.

- Rotação de acordo com a equação 22.

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{N}}{\mathbf{t}} = \frac{\text{número de voltas}}{\text{tempo}} \quad (22)$$

- Levantamentos dos perfis de velocidade de cada seção (I,II,III e IV) em relação a profundidade  $\mathbf{y}$ ;

- Levantamento das áreas sob a curva

$\mathbf{A}_I$ ;  $\mathbf{A}_{II}$ ;  $\mathbf{A}_{III}$  e  $\mathbf{A}_{IV}$  dos perfis de velocidades em relação a  $\mathbf{x}$ .

- Vazão de acordo com a equação 23.

$$\mathbf{Q} = \int_A \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = \int_0^x \int_0^y \mathbf{v} \cdot dy dx \quad (23)$$

As áreas dos perfis de velocidades representam a  $\int_0^y \mathbf{v} \cdot dy$  e a área sob a curva  $\mathbf{x}$ [m] versus  $\mathbf{A}$  [m<sup>2</sup>/s] representa a segunda integral e conseqüentemente a vazão.

### 4.3.2-Molinete no rio

- Velocidades de escoamento de cada ponto

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{c} + \mathbf{d} \cdot \mathbf{n}$$

onde:

$\mathbf{v}_n$  [m/s]- velocidade de escoamento;

**n** [rps]- Dez voltas da hélice pelo tempo medido num cronômetro;  
**ced** - constantes obtidas da calibração do micromolinete.

- Rotação de acordo com a equação 24.

$$n = \frac{N}{t} = \frac{10}{\text{tempo}} \quad (24)$$

- Levantamentos dos perfis de velocidade de cada seção (I,II,III e IV) em relação a profundidade **y**;

- Levantamento das áreas sob a curva

**A<sub>I</sub>**; **A<sub>II</sub>**; **A<sub>III</sub>** e **A<sub>IV</sub>** dos perfis de velocidades em relação a **x**.

- Vazão de acordo com a equação 25.

$$Q = \int_A v \cdot dA = \int_0^x \int_0^y v \cdot dy dx \quad (25)$$

As áreas dos perfis de velocidades representam a  $\int_0^y v \cdot dy$  e a área sob a curva  $x$ [m] versus **A** [m<sup>2</sup>/s] representa a segunda integral e conseqüentemente a vazão.

## 5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS

### 5.1-Molinetes no rio do Onça.

A tabela 4.1 mostra os valores medidos e calculados para o rio da Onça utilizando o micromolinete e molinete hidrométricos.

**TABELA 4.1 - Valores lidos e calculados no rio do Onça.**

Seção I	Micromolinete Hélice 01								
	x <sub>1</sub> = 1,5 [m]								
	01	02	03	04	05	06	07	08	09
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,625	0,710	
t [s]	30	30	30	30	30	30	30	30	
N [r]	20	11	07	03	10	09	06	0	
n [rps]	0,666	0,366	0,233	0,100					
v [m/s]	0,091	0,074	0,066	0,059	0,072	0,070	0,065	0	
Seção II	x <sub>2</sub> = 2,5 [m]								
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,625	0,725	0,780
t [s]	30	30	30	30	30	30	30	30	30
N [r]	276	208	134	104	72	90	05	03	0

n [rps]	9,200	6,933	4,466	3,466	2,400	3,000	0,166	0,100	0
v [m/s]	0,578	0,449	0,308	0,251	0,190	0,224	0,063	0,059	0
<b>Seção III</b>							<b>x<sub>3</sub>= 3,5 [m]</b>		
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,550		
t [s]	30	30	30	30	30	30	30		
N [r]	519	466	353	297	137	109	0		
n [rps]	17,30	15,53	11,76	9,90	4,56	3,63	0		
v [m/s]	1,041	0,940	0,725	0,618	0,314	0,261	0		
<b>Seção IV</b>							<b>x<sub>4</sub>= 4,5 [m]</b>		
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,450			
t [s]	30	30	30	30	30	30			
N [r]	248	261	227	157	40	0			
n [rps]	8,266	8,700	7,566	5,233	1,333	0			
v [m/s]	0,525	0,550	0,485	0,352	0,129	0			
<b>Seção V</b>							<b>x<sub>5</sub>= 5,5 [m]</b>		
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,560		
t [s]	30	30	30	30	30	30	30		
N [r]	200	195	154	167	128	49	0		
n [rps]	6,666	6,500	5,133	5,566	4,266	1,633	0		
v [m/s]	0,434	0,424	0,346	0,371	0,297	0,146	0		
<b>Seção VI</b>							<b>x<sub>6</sub>= 6,5 [m]</b>		
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,350				
t [s]	30	30	30	30	30				
N [r]	88	60	51	16	0				
n [rps]	2,933	2,000	1,700	0,533	0				
v [m/s]	0,221	0,167	0,150	0,084	0				
<b>Seção I</b>			<b>Molinete Hidrométrico</b>			<b>x<sub>1</sub>= 1,0 [m]</b>			
	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	<b>08</b>	<b>09</b>
y [m]	0,10	0,20	0,36						
T médio [s]	6,75	7,63	0						
N [r]	10	10	10						
n [rps]	1,481	1,310	0						
v [m/s]	0,420	0,377	0						
<b>Seção II</b>							<b>x<sub>2</sub>= 1,5 [m]</b>		
y [m]	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,66			
t médio [s]	4,26	4,60	5,83	8,09	10,52	0			
N [r]	10	10	10	10	10	10			
n [rps]	2,347	2,173	1,715	1,236	0,950	0			
v [m/s]	0,638	0,595	0,479	0,358	0,286	0			
<b>Seção III</b>							<b>x<sub>3</sub>= 2,0 [m]</b>		
y [m]	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,76		
t médio [s]	3,33	3,10	3,28	4,95	6,75	11,61	0		
N [r]	10	10	10	10	10	10	10		
n [rps]	3,003	3,225	3,048	2,020	1,481	0,861	0		
v [m/s]	0,804	0,860	0,815	0,556	0,420	0,264	0		
<b>Seção IV</b>							<b>x<sub>4</sub>= 2,5 [m]</b>		

y [m]	0,10	0,20	0,30	0,350	0,51				
t médio [s]	3,61	3,80	3,93	5,13	0				
N [r]	10	10	10	10	10				
n [rps]	2,770	2,631	2,544	1,949	0				
v [m/s]	0,745	0,710	0,688	0,538	0				
<b>Seção V</b>						<b>x<sub>5</sub>= 3,0 [m]</b>			
y [m]	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,66			
t médio [s]	3,34	3,23	3,39	5,99	15,11	0			
N [r]	10	10	10	10	10	10			
n [rps]	0,801	0,827	0,790	0,468	0,661	0			
v [m/s]	0,801	0,827	0,790	0,468	0,214	0			
<b>Seção VI</b>						<b>x<sub>6</sub>= 3,5 [m]</b>			
y [m]	0,10	0,20	0,30	0,35	0,51				
t médio [s]	3,22	2,93	3,17	3,41	0				
N [r]	10	10	10	10	10				
n [rps]	3,105	3,412	3,154	2,932	0				
v [m/s]	0,830	0,907	0,842	0,786	0				
<b>Seção VII</b>						<b>x<sub>7</sub>= 4,0 [m]</b>			
y [m]	0,062	0,222							
t médio [s]	7,98	0							
N [r]	10	10							
n [rps]	1,253	0							
v [m/s]	0,363	0							

A tabela 4.2 ilustra as áreas dos melhores gráficos para cada seção do micromolinete e molinete.

**TABELA 4.2 – Perfil da seção do rio com as melhores áreas.**

<b>Rio do Onça (Perfil da seção)</b>						
Seção	<b>Micromolinete</b>			<b>Molinete</b>		
	Distância da margem	Área Table-Curve	Área AutoCAD	Distância da margem	Área Table-Curve	Área AutoCAD
01	0	0	0	0	0	0
02	1,5	0,04580	0,040	1,0	0,07685	0,1137
03	2,5	0,18267	0,190	1,5	0,21936	0,2743
04	3,5	0,32829	0,340	2,0	0,33751	0,4188
05	4,5	0,17745	0,180	2,5	0,21265	0,2855
06	5,5	0,17875	0,180	3,0	0,27751	0,3549
07	6,5	0,04842	0,052	3,5	0,30151	0,3637
08	7,5	0	0	4,0	0,03282	0,051
09				4,5	0	0

## 5.2-Comparação dos resultados

A tabela 4.11 ilustra as características do rio e seus respectivos resultados de vazão.

**TABELA 4.3- Características do rio e resultados de vazão.**

Rio do Onça			
Micromolinete		Molinete	
Comprimento (m)	<b>7,5</b>	Comprimento (m)	<b>4,5</b>
Resultados de Vazão Q [m <sup>3</sup> /s]		Resultados de Vazão Q [m <sup>3</sup> /s]	
Hélice 01		Hélice	
Table-Curve	Autocad	Table-Curve	Autocad
<b>0,90861</b>	<b>0,91500</b>	<b>0,89963</b>	<b>0,90500</b>

As figuras 4.2 e 4.3 ilustram os ensaios de vazão no rio da Onça utilizando o micromolinete e molinete hidrométrico respectivamente



**FIGURA 4.2 - Medição de vazão com micromolinete no rio da ONÇA**



**FIGURA 4.3 -Medição de vazão com molinete hidrométrico no rio da ONÇA**

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A tabela 4.3 compara os resultados das medidas de vazão com o micromolinete (hélice 01) e do molinete no córrego da Onça.

Também são utilizados para a determinação da vazão o software Table-Curve e o Auto-cad.

Em termos de resultados entre os dois equipamentos, há uma proximidade muito grande, pois ambos foram calibrados recentemente.

Em termos de procedimento de cálculos, também houve diferenças mínimas, que mostra que métodos diferentes podem ser utilizados para tal.

No anexo C encontram os gráficos das áreas dos perfis de velocidades e das áreas (Vazões) utilizando os molinetes no córrego da Onça (Table-Curve e Auto-Cad).

## **4.2.6- MEDIDAS DE VAZÃO NO CONDUTO FORÇADO E CANAL DE FUGA**

### **1-INTRODUÇÃO**

O conduto forçado da MCH Mireta Bastos tem a função de conduzir a água para a casa de máquinas, ou seja, para o engolimento da turbina. Ao passar pela turbina a energia hidráulica é transformada em energia utilizável de eixo, que por sua vez é transformada em energia elétrica gerada.

Após a água passar pela turbina ela sai no nível de jusante e alimenta o canal denominado de fuga. A água passa pelo canal de fuga e retorna ao córrego da Onça.

Para a experiência em questão medir-se-á a vazão que passa pelo conduto forçado utilizando um ultrassom não intrusivo por tempo de trânsito e no canal utilizar-se-á a medição através de vertedores no

### **2-OBJETIVOS**

2.1- Medir a vazão no conduto forçado utilizando um ultrassom tempo de trânsito;

2.2- Medir a vazão no canal de fuga utilizando vertedores retangulares;

2.3- Comparação dos resultados de medição de vazão do conduto forçado e do canal de fuga.

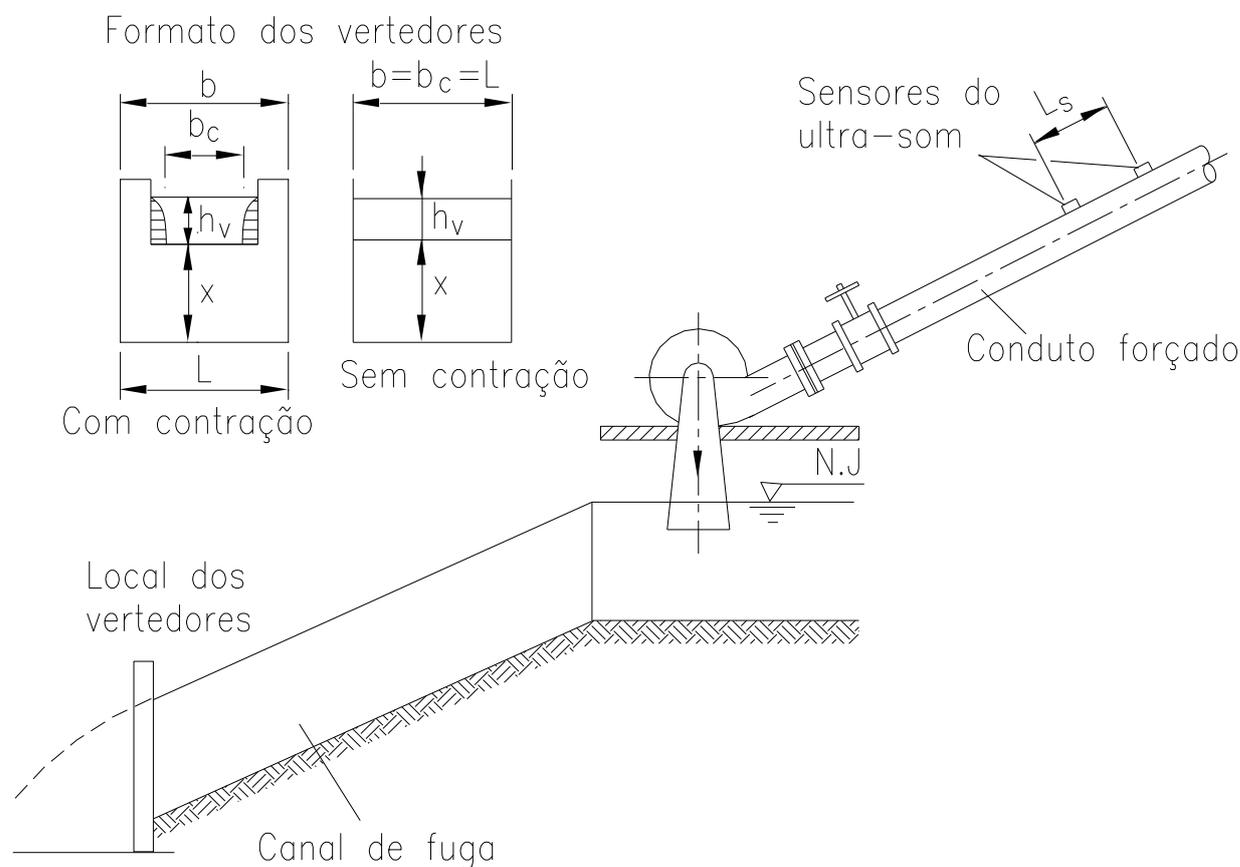
### **3-EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

- Vertedor retangular sem contração;
- vertedor retangular com duas contrações;
- ultrassom por tempo de trânsito não intrusivo;
- Trena;
- calculadora e;
- Máquina fotográfica.

### **4-DESENVOLVIMENTO**

#### **4.1- Esquema do banco de ensaios**

A figura 4.1 ilustra o conduto forçado onde será instalado o medir ultrassom e o canal de fuga onde serão instalados os vertedores retangulares.



**Figura 4.1 – Conduto forçado e canal de fuga.**

#### 4.2- Procedimentos para a obtenção das grandezas

- Inicialmente instala-se o medidor ultrassom no conduto forçado estabelecendo-se as condições solicitadas (diâmetro externo do tubo, espessura etc.);
- Instala-se no local do canal de fuga o primeiro medidor vertedor (retangular sem contração);
- Com valores da largura ( $L$ ), altura ( $x$ ), medidos, mede-se a altura da crista do vertedor ( $h_v$ );
- Determina-se a vazão no ultrassom e compara-se com a vazão do vertedor sem contração;
- Retira-se o vertedor retangular sem contração e instala-se o vertedor com duas contrações;
- Mede-se a largura ( $L$ ), altura ( $x$ ), largura ( $b$ ) e a altura da crista do vertedor ( $h_v$ );
- Determina-se a vazão pelo vertedor e compara-se com a vazão do ultrassom.

### 4.3- Roteiros para a obtenção das grandezas

#### 4.3.1- Vertedores

A equação 26 de Francis para vertedores retangulares é:

$$Q = 1,84 \cdot b \cdot h_v^{\frac{3}{2}} \cdot \left[ 1 + 0,26 \left( \frac{bc \cdot h_v}{L(h_v + x)} \right)^2 \right] \quad (26)$$

onde:

**Q (m<sup>3</sup>/s) – vazão;**  
**h<sub>v</sub> (m) – altura da crista do vertedor;**  
**x (m) – altura do vertedor;**  
**bc (m) – largura da veia contraída ;**  
**b (m) – largura do vertedor e;**  
**L (m) – largura do canal.**

Para vertedor retangular sem contração tem-se a equação:

$$bc = b = L \quad (27)$$

onde:

**bc (m) – largura da veia contraída ;**  
**b (m) – largura do vertedor e;**  
**L (m) – largura do canal.**

Para vertedor com contração e no caso duas contrações tem-se a equação 28:

$$bc = b - 0,2 \cdot h_v \quad (28)$$

onde:

**bc (m) – largura da veia contraída ;**  
**b (m) – largura do vertedor e;**  
**L (m) – largura do canal.**

#### 4.3.2- Ultra-som

A medida de vazão com ultrassom requer os dados da tubulação e a forma de instalar os sensores como: diâmetro externo, espessura da

parede do tubo, líquido, material da tubulação, etc. Com esse valores e a forma de instalação (**V**, **Z** ou **W**), o display do aparelho em seu menu informa a distancia ( $L_s$ ) dos sensores.

## 5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS

### 5.1-Vertedor Retangular com e sem contração comparado com ultra-som.

A tabela 4.1 ilustra os valores obtidos e calculados.

**TABELA 4.1- Valores obtidos e calculados do vertedor com contração e ultra-som.**

Nº	Vertedor com contração			Q [m³/s]			
	L= 0,985 [m]	x= 0,372 [m]					
	b= 0,663 [m]	b <sub>c</sub> = 0,985 [m]					
	h <sub>v</sub> [m]	b <sub>c</sub> [m]					
01	0,285	0,6060		0,18904			
02	0,292	0,6046		0,19604			
03	0,300	0,6030		0,20388			
04	0,303	0,6024		0,20744			
05	0,305	0,6020		0,22000			
06	0,304	0,6016		0,20849			
Nº	Ultra-Som						
	01	02	03	04	05	06	Média
I	0,18432	0,18927	0,18814	0,18834	0,18925	0,19033	0,18827
II	0,19592	0,19678	0,19798	0,19632	0,19599	0,19618	0,19652
III	0,20498	0,20201	0,20399	0,20418	0,20599	0,20327	0,20403
IV	0,20963	0,20714	0,20688	0,20898	0,20836	0,20798	0,20816
V	0,22247	0,22119	0,22388	0,21947	0,22090	0,21986	0,22129
VI	0,20873	0,20788	0,20655	0,20899	0,20978	0,21056	0,20874
<b>Q [m³/s]</b>							

A tabela 4.2 ilustra os valores obtidos e calculados do vertedor sem contração e do ultra-som.

**TABELA 4.2- Valores obtidos e calculados do vertedor sem contração e ultra-som.**

Nº	Vertedor sem contração							
	L=b=b <sub>c</sub> = 0,985 [m]				x= 0,445 [m]			
	h <sub>v</sub> [m]				Q= [m <sup>3</sup> /s]			
01	0,215				0,18566			
02	0,213				0,19638			
03	0,229				0,20457			
04	0,231				0,20732			
05	0,239				0,21848			
06	0,232				0,20871			
Nº Q [m <sup>3</sup> /s]	Ultra-Som							
	01	02	03	04	05	06	07	Média
I	0,1869	0,1883	0,1867	0,1894	0,1869	0,1865	0,1865	0,1871
II	0,1953	0,1972	0,1982	0,1943	0,1941	0,1958	0,1997	0,1964
III	0,2041	0,2079	0,2039	0,2052	0,2064	0,2058	0,2024	0,2051
IV	0,2099	0,2074	0,2044	0,2088	0,2079	0,2064	0,2078	0,2075
V	0,2229	0,2199	0,2234	0,2234	0,2237	0,2218	0,2199	0,2221
VI	0,2040	0,2074	0,2021	0,2013	0,2064	0,2074	0,2089	0,2054

## 5.2-Comparação dos resultados

A tabela 4.3 ilustra a tabela comparando os resultados.

**TABELA 4.3- Comparação dos resultados de vazão.**

Vertedor com contração	Ultra-som	Diferença
Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	[%]
0,18904	0,18827	0,40
0,19604	0,19652	0,24
0,20388	0,20403	0,07
0,20744	0,20816	0,34
0,22000	0,22129	0,58
0,20849	0,20874	0,11
Vertedor sem contração	Ultra-som	Diferença
Q [m <sup>3</sup> /s]	Q [m <sup>3</sup> /s]	[%]
0,18566	0,1871	0,81
0,19638	0,1964	0,03
0,20457	0,2051	0,28
0,20732	0,2075	0,11
0,21848	0,2221	1,65
0,20871	0,2054	1,58

As figuras 4.2.e 4.3 ilustram o ensaio de vazão do canal de fuga entre o método do vertedor comparado com o método do ultra-som por tempo de trânsito no canal de fuga.



**FIGURA 4.2 - Medição de vazão no canal de fuga demonstrando os dois vertedores retangulares (com duas contrações e sem contração)**



**FIGURA 4.3 – Ultra-som por tempo de trânsito instalado na tubulação da BFT e anotações do vertedor em uma planilha**

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O ensaio reproduziu as condições operacionais para a obtenção da vazão em tubulação utilizando o medidor ultrassônico por tempo de trânsito e no canal de fuga utilizando dois tipos de vertedores retangular sendo um com duas contrações e outro sem contração. Além disso, proporcionou a familiarização com os procedimentos de ensaio e os equipamentos de medida.

Dentre as grandezas obtidas após o tratamento dos dados de comparação da vazão utilizando estes dois métodos considerou-se o mais importante o medido através do ultrassom por tempo de trânsito na tubulação da BFT, pois, este possui erro máximo de 1% quando em perfeito estado de conservação e todas as medidas adicionadas no aparelho e medidas de forma correta. O método do vertedor apresentou resultados muito próximos em relação ao ultrassom, mas geralmente para este tipo de ensaio confia-se mais no ultrassom, pois qualquer folga que houver no vertedor haverá vazamento já que se trata de vertedores com peças removíveis ocasionando um resultado de vazão diferente da vazão real que estará passando por ele.

## **5.2.7 ENSAIO DO CÁLCULO DO COEFICIENTE DE MANNING NO CANAL DE ADUÇÃO.**

### **1-INTRODUÇÃO**

O canal de adução da Microcentral Hidrelétrica Mireta Bastos é aberto, todo de concreto, de forma retangular com comprimento de trinta e oito metros.

Quando foi construído o canal de adução constatou-se com a estação total que a declividade do canal não é constante, apresentando irregularidades em seu traçado.

Na entrada do canal está disposta uma grade de retenção de materiais flutuantes auto limpante, comporta permitindo o ensecamento do sistema, desarenador, uma comporta e um extravasor lateral.

Ao longo do canal existem grades de retenção de materiais flutuantes como folhas, galhos entre outros.

No final do canal de adução, logo após a entrada dos dois condutos forçados possui uma comporta desarenadora que pode atuar também como um extravasor no caso de uma parada brusca da turbina e grade junto à mureta do desarenador, para retenção de materiais flutuantes.

Este canal foi todo preparado para serem realizados ensaios de medidas hidráulicas de vazão ou comparações de medidas de vazão entre métodos diferentes.

### **2-OBJETIVOS**

2.1- Medir a vazão no canal de adução utilizando o micromolinete;

2.2- Medir a vazão no canal de adução utilizando o molinete hidrométrico;

2.3- Cálculo do coeficiente de Manning afim de encontrar o coeficiente de rugosidade da parede do canal de adução;

2.4- Comparação dos resultados de medição de vazão através dos dois molinetes e comparação do coeficiente de rugosidade da parede do canal encontrado comparado com o tabelado.

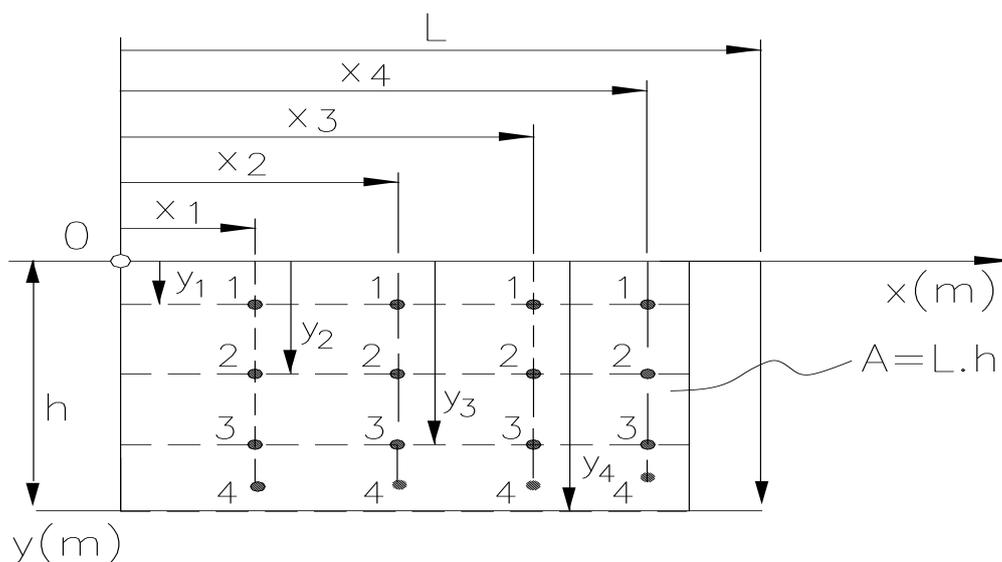
### **3-EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

- Micromolinete hidrométrico (OTT);
- Molinete hidrométrico (Hidromec);
- Trena;
- Fita adesiva;
- Utilização dos softwares Table-Curve e Auto-cad;
- Cronômetro Hanhart;
- Planilha para anotações de dados;
- Máquina fotográfica e;
- Nível de mangueira.

## 4-DESENVOLVIMENTO

### 4.1- Esquema do banco de ensaios

A figura 4.1 mostra a seção do canal para a determinação da área molhada e da batimetria, bem como as referências em relação a profundidade ( $y$ ) e a largura do canal ( $x$ ) para ambos aparelhos.



**FIGURA 4.1- Trecho do canal de adução utilizando o molinete hidrométrico e micromolinete com a batimetria para as seções.**

### 4.2- Procedimentos para a obtenção das grandezas

- Instala-se o micromolinete no suporte existente no canal;
- Posiciona-se o micromolinete em ( $x$ ,  $y$ ) de cada seção (I, II, III e IV), figura 4.17, medindo-se a velocidade em cada ponto de  $y$  (1,2,3 e 4) utilizando-se a equação do micromolinete.
- Instala-se o molinete no suporte existente no canal ;
- Posiciona-se o molinete em ( $x$ ,  $y$ ) de cada seção (I, II, III e IV), medindo-se a velocidade em cada ponto de  $y$  (1,2,3,4 e 5) utilizando-se a equação do molinete.
- Mede-se a declividade do canal com um nível de mangueira.
- Medição do perímetro molhado do canal.
- Medição da área molhada do canal.

### 4.3- Roteiros para a obtenção das grandezas

#### 4.3.1-Micromolinete no canal

- Velocidades de escoamento de cada ponto

$$v_n = a + b \cdot n$$

onde:

$v_n$  [m/s]- velocidade de escoamento;

$n$  [rps]- número de voltas da hélice pelo tempo;

$a$  e  $b$  - constantes obtidas da calibração do micromolinete.

- Rotação

$$n = \frac{N}{t} = \frac{\text{número de voltas}}{\text{tempo}} \quad (22)$$

- Levantamentos dos perfis de velocidade de cada seção (I,II,III e IV) em relação a profundidade  $y$ ;

- Levantamento das áreas sob a curva

$A_I$ ;  $A_{II}$ ;  $A_{III}$  e  $A_{IV}$  dos perfis de velocidades em relação a  $x$ .

- Vazão

$$Q = \int_A v \cdot dA = \int_0^x \int_0^y v \cdot dy dx \quad (23)$$

As áreas dos perfis de velocidades representam a  $\int_0^y v \cdot dy$  e a área sob a curva  $x$ [m] versus  $A$  [m<sup>2</sup>/s] representa a segunda integral e conseqüentemente a vazão.

### 4.3.2-Molinete no canal

- Velocidades de escoamento de cada ponto

$$v_n = c + d \cdot n$$

onde:

$v_n$  [m/s]- velocidade de escoamento;

$n$  [rps]- Dez voltas da hélice pelo tempo medido num cronômetro;

$c$  e  $d$  - constantes obtidas da calibração do micromolinete.

- Rotação

$$n = \frac{N}{t} = \frac{10}{\text{tempo}} \quad (24)$$

- Levantamentos dos perfis de velocidade de cada seção (I,II,III e IV) em relação a profundidade  $y$ ;

- Levantamento das áreas sob a curva

$A_I$ ;  $A_{II}$ ;  $A_{III}$  e  $A_{IV}$  dos perfis de velocidades em relação a  $x$ .

- Vazão

$$Q = \int_A \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = \int_0^x \int_0^y \mathbf{v} \cdot dy dx \quad (25)$$

As áreas dos perfis de velocidades representam a  $\int_0^y \mathbf{v} \cdot dy$  e a área sob a curva  $x[m]$  versus  $A [m^2/s]$  representa a segunda integral e conseqüentemente a vazão.

### 4.3.3-Cálculo do coeficiente de Manning

- Cálculo da área do canal de acordo com a equação 29.

$$A = \text{larg} \cdot X_{\text{prof}} \quad (29)$$

onde:

$A (m^2)$  – área do canal;

$\text{larg} \cdot (m)$  – largura do canal e;

$h(m)$  – profundidade do canal.

- Cálculo do raio hidráulico de acordo com a equação 30.

$$Rh = \frac{A_{\text{molhada}}}{P_{\text{molhado}}} \quad (30)$$

onde:

$A_{\text{molhada}} (m^2)$  – área molhada ;

$P_{\text{molhado}} (m)$  – perímetro molhado e;

$Rh(m)$  – raio hidráulico .

- Cálculo da declividade do fundo do canal de acordo com a equação 31.

$$I_o = \frac{\text{Vert.}}{\text{Horiz.}} \quad (31)$$

onde:

**Vert.(m) – leituras verticais e;**

**Horiz.(m) – leituras horizontais.**

- Cálculo do coeficiente de rugosidade da parede do canal de acordo com a equação 32.

$$Q = \frac{A \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_o}}{n} \quad (32)$$

onde:

**Q(m<sup>3</sup>/s) – vazão;**

**A (m<sup>2</sup>) – área do canal; Rh(m) – raio hidráulico ;**

**I<sub>o</sub>(m/m) – declividade do canal e;**

**n – coeficiente de rugosidade da parede do canal.**

## 5- VALORES OBTIDOS E CALCULADOS

### 5.1-Canal de adução

A tabela 4.1 mostra os valores medidos e calculados para o canal de adução.

**TABELA 4.1- Valores lidos e calculados no canal de adução**

<b>Seção I</b>		<b>Micromolinete Hélice 01</b>					<b>x<sub>1</sub>= 0,22 [m]</b>	
	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>	<b>07</b>	
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,580	
t [s]	30	30	30	30	30	30	30	
N [r]	198	231	220	210	199	171	0	
n [rps]	6,60	7,70	7,33	7,00	6,63	5,70	0	
v [m/s]	0,4304	0,4932	0,4723	0,4532	0,4323	0,3790	0	
<b>Seção II</b>		<b>x<sub>2</sub>= 0,44 [m]</b>						
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,580	
t [s]	30	30	30	30	30	30	30	

N [r]	159	111	189	116	207	190	0
n [rps]	5,30	3,70	6,30	3,86	6,90	6,33	0
v [m/s]	0,3562	0,2648	0,4133	0,2743	0,4475	0,4152	0
<b>Seção III</b>							<b>x<sub>3</sub>= 0,66 [m]</b>
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,580
t [s]	30	30	30	30	30	30	30
N [r]	142	138	136	144	163	132	0
n [rps]	4,73	4,60	4,53	4,80	5,43	4,40	0
v [m/s]	0,3238	0,3162	0,3124	0,3276	0,3638	0,3048	0
<b>Seção IV</b>							<b>x<sub>4</sub>= 0,88 [m]</b>
y [m]	0,025	0,125	0,225	0,325	0,425	0,525	0,580
t [s]	30	30	30	30	30	30	30
N [r]	160	159	156	157	157	125	0
n [rps]	5,33	5,30	5,20	5,23	5,223	4,16	0
v [m/s]	0,3581	0,3562	0,3505	0,3524	0,3524	0,2915	0
<b>Seção I Molinete Hidrométrico</b>							<b>x<sub>1</sub>= 0,10 [m]</b>
y [m]	0,062	0,162	0,262	0,362	0,422	0,582	
t médio [s]	5,56	5,85	6,65	6,98	6,46	0	
N [r]	10	10	10	10	10	10	
n [rps]	1,79	1,70	1,50	1,43	1,54	0	
v [m/s]	0,5001	0,4779	0,4263	0,4083	0,4371	0	
<b>Seção II</b>							<b>x<sub>2</sub>= 0,40 [m]</b>
y [m]	0,062	0,162	0,262	0,362	0,422	0,582	
t médio [s]	6,20	6,34	5,74	5,88	6,02	0	
N [r]	10	10	10	10	10	10	
n [rps]	1,61	1,57	1,74	1,69	1,66	0	
v [m/s]	0,4534	0,4449	0,4859	0,4757	0,4660	0	
<b>Seção III</b>							<b>x<sub>3</sub>= 0,70 [m]</b>
y [m]	0,062	0,162	0,262	0,362	0,422	0,582	
t médio [s]	6,06	6,29	5,74	6,81	7,39	0	
N [r]	10	10	10	10	10	10	
n [rps]	1,64	1,58	1,74	1,46	1,35	0	
v [m/s]	0,4628	0,4480	0,4859	0,4173	0,3881	0	
<b>Seção IV</b>							<b>x<sub>4</sub>= 1,0 [m]</b>
y [m]	0,062	0,162	0,262	0,362	0,422	0,582	
t médio [s]	6,18	6,72	6,62	7,81	8,24	0	
N [r]	10	10	10	10	10	10	
n [rps]	1,61	1,48	1,51	1,27	1,21	0	
v [m/s]	0,4549	0,4220	0,4281	0,3699	0,3530	0	

A tabela 4.2 ilustra o perfil de cada seção com suas respectivas áreas

**TABELA 4.2- Perfil de cada seção com as respectivas áreas**

Canal de adução					
Perfil da seção (Micromolinete)			Perfil da seção (Molinete)		
Seções	Distância da margem	Área [m <sup>2</sup> ]	Seções	Distância da margem	Área [m <sup>2</sup> ]
01	0,0	0,0	01	0,0	0,0
02	0,222	0,24237	02	0,10	0,21144
03	0,444	0,19549	03	0,30	0,24345
04	0,666	0,17484	04	0,70	0,19220
05	0,888	0,18765	05	1,0	0,18790
06	1,110	0,0	06	1,10	0,0

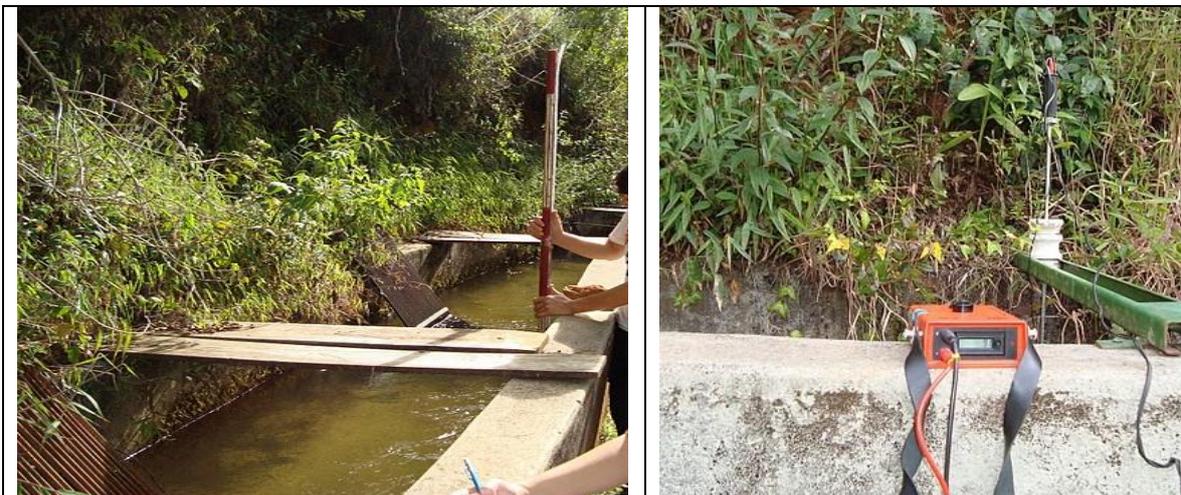
## 5.2-Comparação dos resultados

A tabela 4.3 ilustra as características do canal de adução e seus respectivos resultados de vazão.

**TABELA 4.3- Características do canal de adução e resultados de vazão.**

Canal de adução			
Cálculo da declividade (Nível de mangueira)			
Leitura vertical		Leitura horizontal	
V1	0,640	L1	1,95
V2	0,670	L2	6,22
V3	0,670	L3	9,95
V4	0,660	L4	8,74
V5	0,735	L5	9,36
V6	0,760	L6	1,60
V7	0,750		
V8	0,760		
V9	0,770		
V10	0,720		
V11	0,740		
V12	0,740		
Características			
Área molhada	Perímetro molhado	Raio hidráulico	Largura do canal
0,638	2,26	0,2823	1,10
Profundidade do canal	Declividade	Coefficiente de rugosidade da parede do canal	
0,580	$1,322 \times 10^{-4}$	0,015	
Vazão Micromolinete [m <sup>3</sup> /s]		Vazão Molinete [m <sup>3</sup> /s]	
Table-Curve	AutoCAD	Table-Curve	Auto-CAD
0,20045	0,20400	0,20095	0,20900

A figura 4.2 ilustra o ensaio do cálculo do coeficiente de Manning no canal de adução.



**FIGURA 4.2 – Nível de mangueira e micromolinete instalado no canal de adução**

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

De posse dos resultados encontrados pode-se concluir que o objetivo principal deste ensaio foi alcançado, pois obteve valores próximos de vazão quando esta foi comparada por entre dois diferentes instrumentos, sendo eles o micromolinete e molinete hidrométricos pelo método gráfico de integrais.

Para a medição de vazão do canal utilizando o molinete obteve-se uma vazão de aproximadamente 0,20095 m<sup>3</sup>/s e micromolinete de 0,20045 m<sup>3</sup>/s. O micromolinete apresenta três hélices de tamanhos diferentes, sendo, escolhida a de número um pois é ideal para velocidades até 01 m/s e rotações até 15 rps.

Nota-se uma pequena diferença entre as vazões calculadas pelos métodos do gráfico das integrais utilizando o Table-Curve e AutoCAD. Os dois métodos estimam a vazão real do canal de formas diferentes e justamente por se tratar de uma estimativa do valor real da vazão, os dois métodos estão sujeitos a apresentar erros em seus resultados finais.

Estes erros, porém, foram minimizados desde a realização das medidas em campo (realizando as medidas com atenção e cuidados para se evitar interferências nas respostas do molinete e micromolinete – o posicionamento adequado dos instrumentos, à frente do operador, a realização de várias medidas, entre outros cuidados) até os cálculos mostrados acima (utilizando o maior número possível de casas decimais, por exemplo).

Desta forma, para fins de cálculos e de engenharia, pode-se considerar suficientes e pertinentes os valores obtidos de vazão.

Utilizando-se os mesmos valores de área molhada média, raio hidráulico médio e declividade de fundo obtidos no item 5.2 deste ensaio, e os valores de vazão encontrados pelo método do molinete (para micromolinete Ott e molinete Hidromec), foi possível, isolando-se o  $n$  na fórmula de Manning encontrando o valor 0,015 para o coeficiente de rugosidade do canal.

O valor de  $n$  encontrado demonstra um valor muito aproximado do tabelado (0,014) ideal para este canal. Este fato reforça a hipótese de que o coeficiente de rugosidade adotado na fórmula de Manning para cálculo de vazão está correto pois de acordo com a tabela (2.8) o valor de 0,015 calculado no dia do ensaio apresenta as características de canais com paredes de cimento não completamente lisas, com curvas estreitas e águas com detritos, exatamente como o canal apresentava no dia do ensaio.

Os gráficos das áreas dos perfis de velocidades e das áreas (Vazões) utilizando os molinetes no canal de adução para o cálculo do coeficiente de Manning estão no anexo D.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A MCH Mireta Bastos além de gerar energia para as necessidades da Fazenda Boa Esperança foi preparada para ser um laboratório de medidas hidráulicas proporcionando um aprendizado prático em complemento as questões teóricas.

O local da Central está inserido em uma posição de rara beleza proporcionando aos alunos uma vista da cachoeira, do córrego da Onça, das araucárias, em uma condição de preservação da natureza, o que deverá ter um acréscimo de aprendizado a todos.

Em relação as propostas de ensaio essa dissertação mostra as várias possibilidades de medidas, comparando as formas tradicionais, mais eficazes, com a forma moderna, utilizando equipamentos e sistemas de aquisição de dados de última geração o crescem ao ensinamento.

Os resultados obtidos nos testes realizados mostraram bastante coerência nas suas comparações, onde conclui-se que na vida prática, os profissionais terão muitas possibilidades de escolherem instrumentação e métodos de cálculos para resolverem os problemas acerca dos assuntos tratados nesse trabalho.

Outras experiências podem ser propostas na área de hidráulica como por exemplo ressaltos hidráulicos e de dissipadores de energia em canais de fuga, utilizando poucos recursos para suas realizações.

No caso dos dois grupos geradores da microcentral é possível realizar testes de eficiência, onde os conceitos apresentados neste trabalho serão bases, mas não fazem parte dessa proposta.

O local também é propício para estudos de topografia e georreferenciamento, além de pesquisas ambientais da fauna, flora, da qualidade da água, das nascentes e muitas outras.

Por fim espera-se que as engenharias da UNIFEI, principalmente as engenharias hídrica e ambiental utilizem esse laboratório em escala natural e ao ar livre, sendo uma poderosa ferramenta de ensino totalmente a disposição dos professores que ministram as disciplinas relativas aos assuntos tratados nesse trabalho, bem como outros temas relacionados aos Recursos Naturais.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANDINI, A. **Hidráulica**. São Carlos: Escola de Engenharia, 1961.

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. Belo Horizonte: Editora UFMG/Escola de Engenharia da UFMG, 2ª ed., 2003.

BEGA, E. A., et al. **Instrumentação industrial**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2ª ed., 2006.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Pearson., 2005. 410p.

CHAPALLAZ, J.M.; GHALI,J.D.; EICHENBERGER,P.; FISCHER,G. – **Manual on pump used as turbines** MHPG Series, 1992.

DAKER, A. **A água na agricultura hidráulica aplicada a agricultura**. Livraria Freitas Bastos S:A, Volume 1,1969.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. São Paulo: Edgar Blucher, 2ª ed.,1982.

HWANG, N.H.C. **Fundamentos de sistemas de engenharia hidráulica**. Prentice Hall do Brasil, 1981.

IBIPINA, A. V., et al. **Evolução da hidrometria no Brasil**. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/srh/acervo/publica/doc/oestado/texto/121-138.html> >.Acesso em: 2008.

LENCASTRE, A. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Edgar Blucher, Editora da Universidade de São Paulo.,1972.

MACHADO, R.L. **Recuperação de voçorocas em áreas rurais**, EMBRAPA, 2006.

MACINTYRE, J. A. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2ª ed., 1997.

NETTO, A.J. M, **Manual de hidráulica**. São Paulo: Edgar Blucher, 8ª ed.,1998.

PIMENTA, C. F. **Curso de hidráulica geral**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos-SP: EESC-USP, 2ª ed., 2003.

PROSSIGA, .Disponível em:<[http://www4.prossiga.br/recursosminerais/glossario/glossario\\_h.html](http://www4.prossiga.br/recursosminerais/glossario/glossario_h.html) >. Acesso em: 2008.

RICARDO, M. et. al. **Projeto de repotenciação da MCH MIRETA BASTOS**. Unifei, Itajubá-MG, 2006.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria aplicada**.Curitiba:Instituto de tecnologia para o desenvolvimento,2001.

SOUZA, O. A. D. **Bomba funcionando como turbina**. Trabalho de Diploma. Unifei, Itajubá-MG, 2003.

SOUZA, Z.;Bortoni, E.C. . **Instrumentação para sistemas energéticos e industriais**, Gráfica e Editora Novo Mundo Ltda,Unifei,Itajubá-MG,2006.

SOUZA, Z.; FUCHS, R. D.; SANTOS, A. H. M. **Centrais hidro e termelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Itajubá-MG: Escola Federal de Engenharia, 1983.

SOUZA, Z. **Centrais hidrelétricas: Dimensionamento de componentes**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1992. 196 p.

TIAGO FILHO, G. L.; VIANA, A. N. C.; LOPES, J. D. **Microusinas hidrelétricas: Construção e operação**. Itajubá- MG: LHPCH – UNIFEI, 2000.

TROSKOLANSKI, A. T. **Dês mesures hydraulics**. Editora Dunot. Paris, 1965.

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

VIANA, A.N.C; **Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas**. Dissertação de Mestrado. EFEI. Itajubá/MG. Dez./1987. 95 pp.

VIANA, A. N. C. **Curso de hidráulica das tubulações**. Itajubá-MG: Fupai, 2000.

VIANA, A. N. C. **XVII Simpósio brasileiro de recursos hídricos: MCH - Um laboratório em escala natural para medidas hidráulicas**: São Paulo-SP, 2007.

VIANA, A. N.C.; RICARDO, M. **VI Simpósio brasileiro sobre pequenas e médias centrais hidrelétricas**. Belo Horizonte- MG, 2008.

Water Measurement Manual. Dever:**A water recourses technical**. Publication, 3ª ed, 1997.

## **7. Anexos**

## ANEXO A – Gráficos das áreas dos perfis de velocidades e das áreas (Vazões) utilizando o Pitot-Cole.

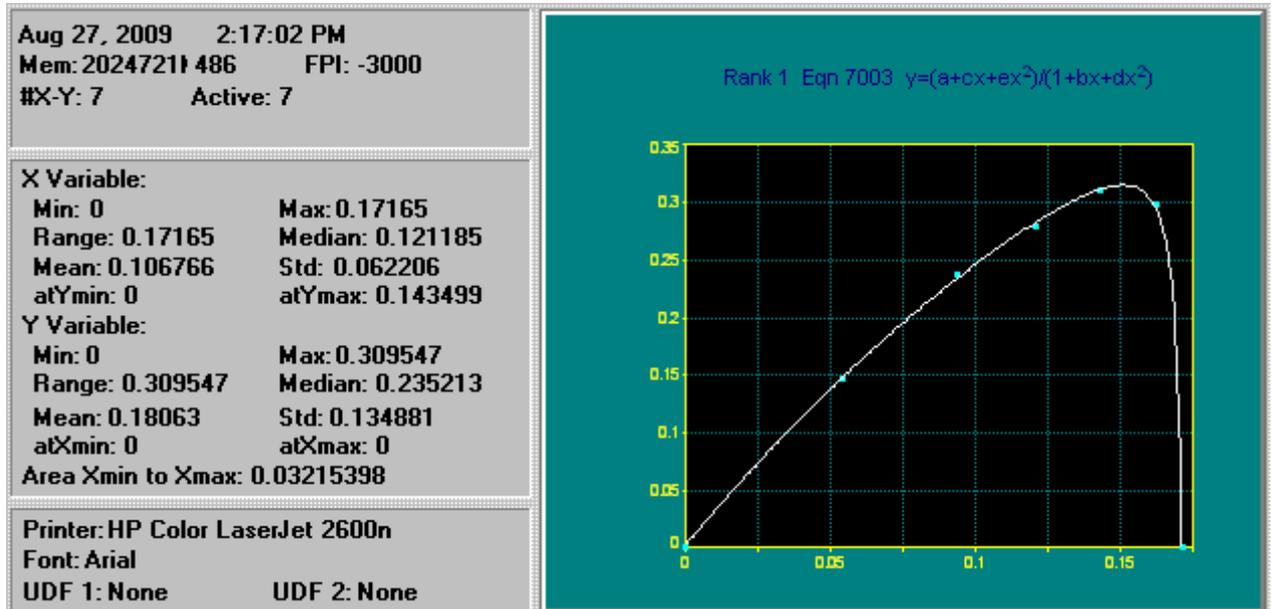


GRÁFICO - ÁREA POSITIVA DE MEDIDAS LIDAS DE DIFERENÇA DE PRESSÃO ATRAVÉS DO MANÔMETRO DE COLUNA COM O CPC (0.8609).

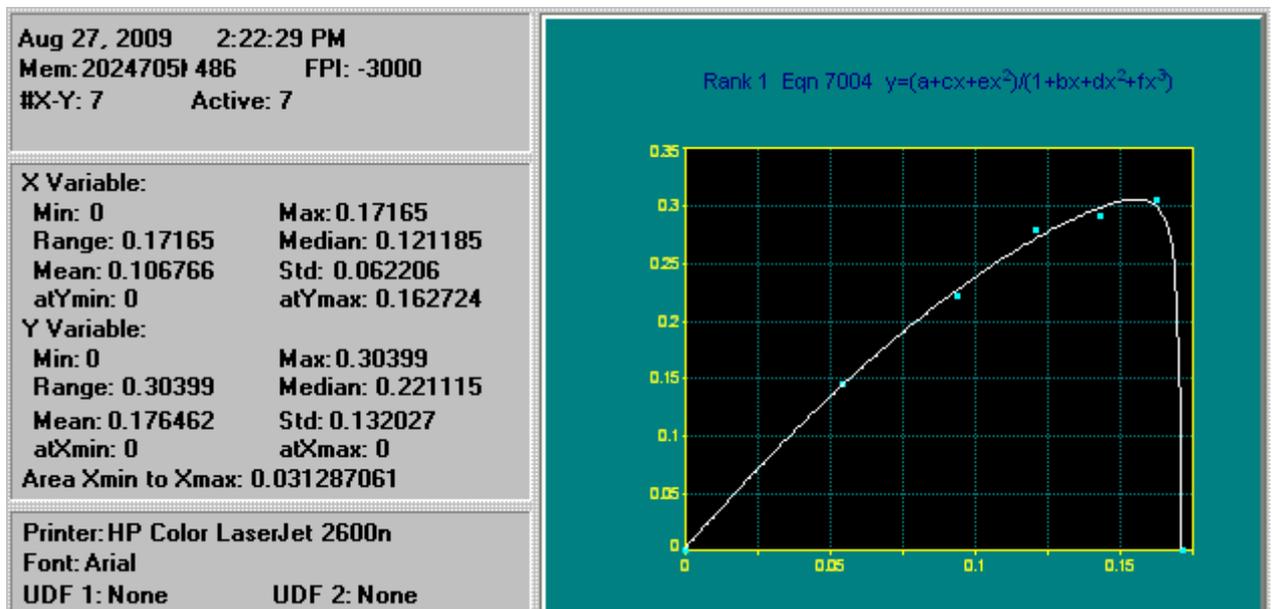


GRÁFICO - ÁREA NEGATIVA DE MEDIDAS LIDAS DE DIFERENÇA DE PRESSÃO ATRAVÉS DO MANÔMETRO DE COLUNA COM O CPC (0.8609).

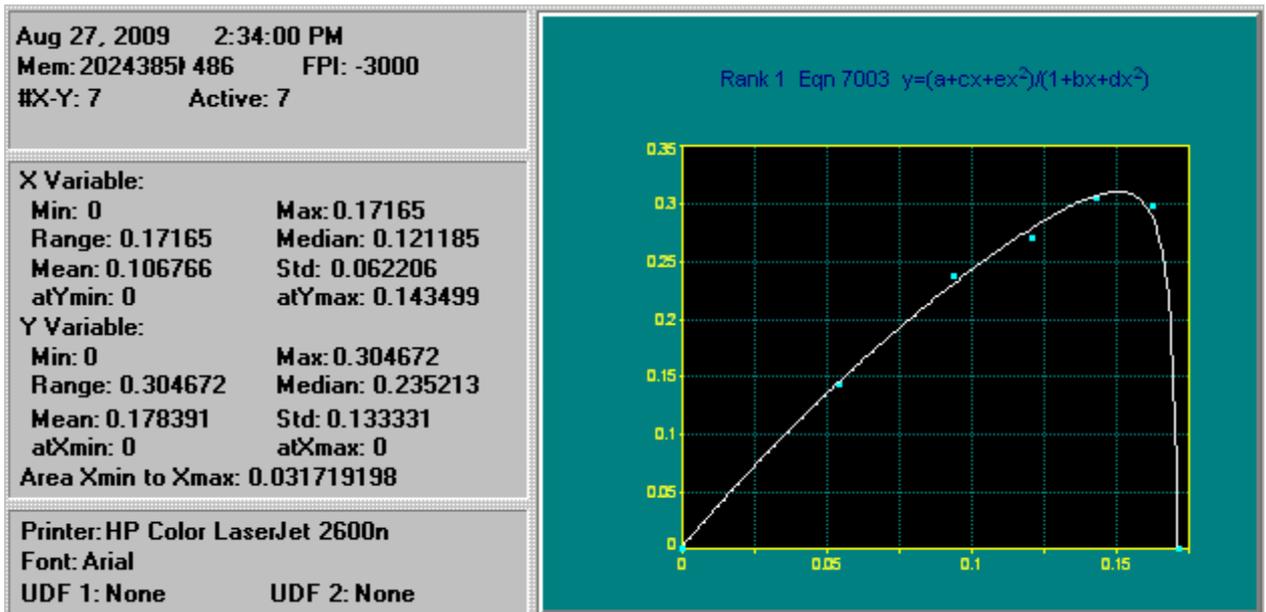


GRÁFICO - ÁREA POSITIVA DE MEDIDAS LIDAS DE DIFERENÇA DE PRESSÃO ATRAVÉS DO TRANSDUTOR DIFERENCIAL COM O CPC (0.8609).

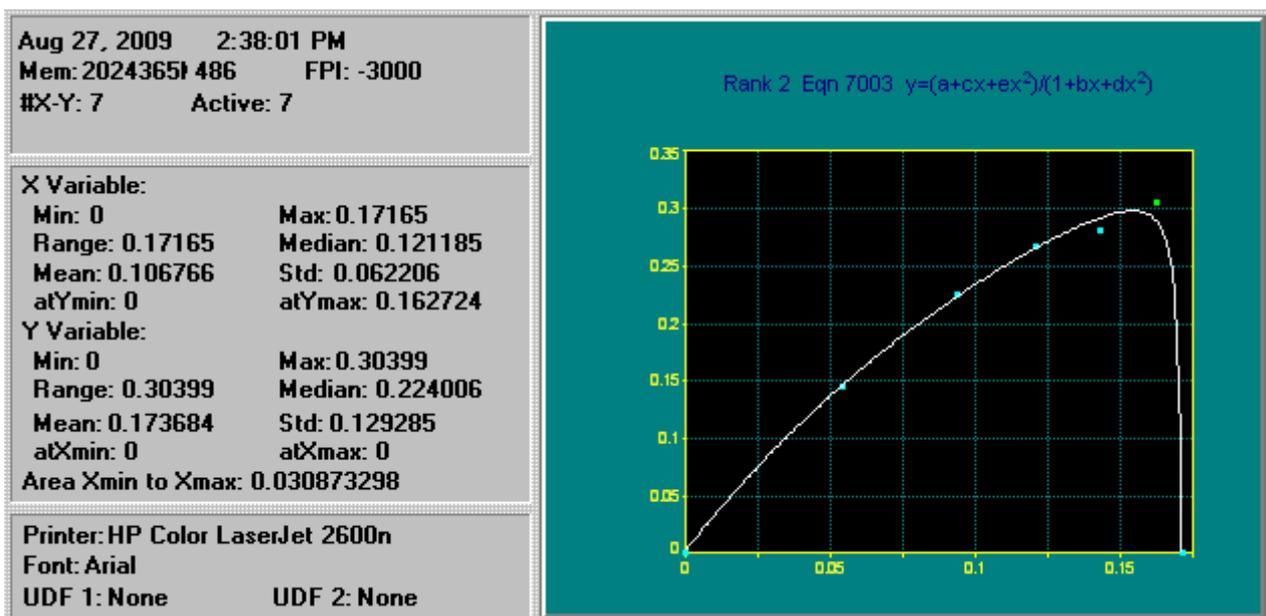


GRÁFICO- ÁREA NEGATIVA DE MEDIDAS LIDAS DE DIFERENÇA DE PRESSÃO ATRAVÉS DO TRANSDUTOR DIFERENCIAL COM O CPC (0.8609).

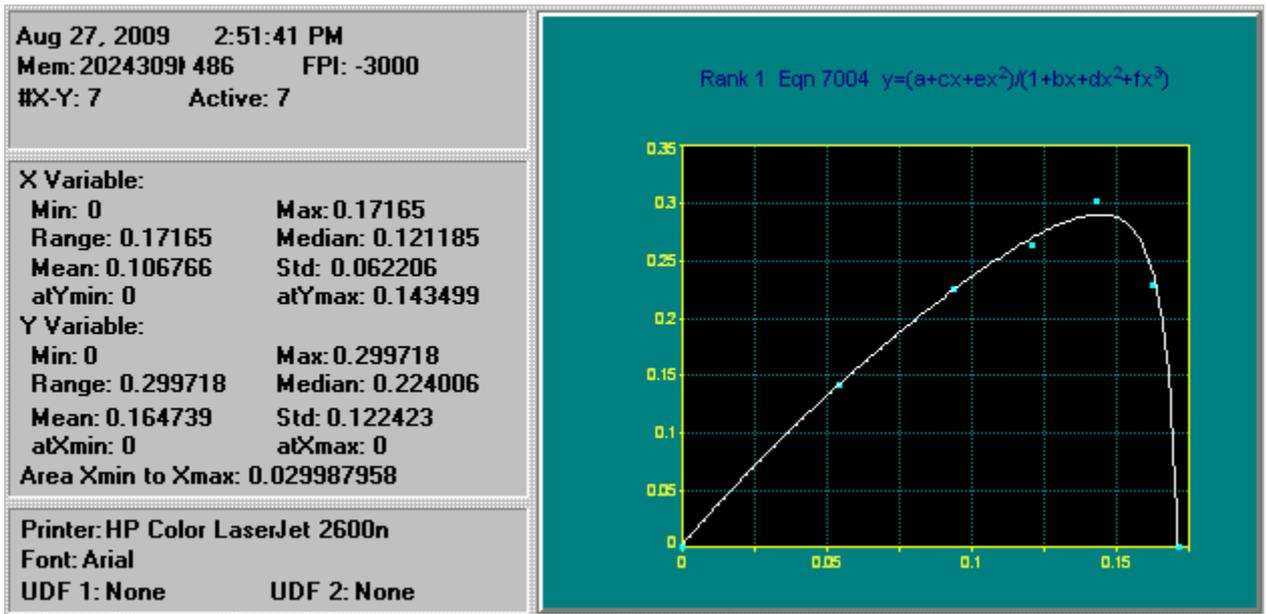


GRÁFICO- ÁREA POSITIVA DE MEDIDAS AQUISITADAS DE DIFERENÇA DE PRESSÃO ATRAVÉS DO TRANSDUTOR DIFERENCIAL COM O CPC (0.8609).

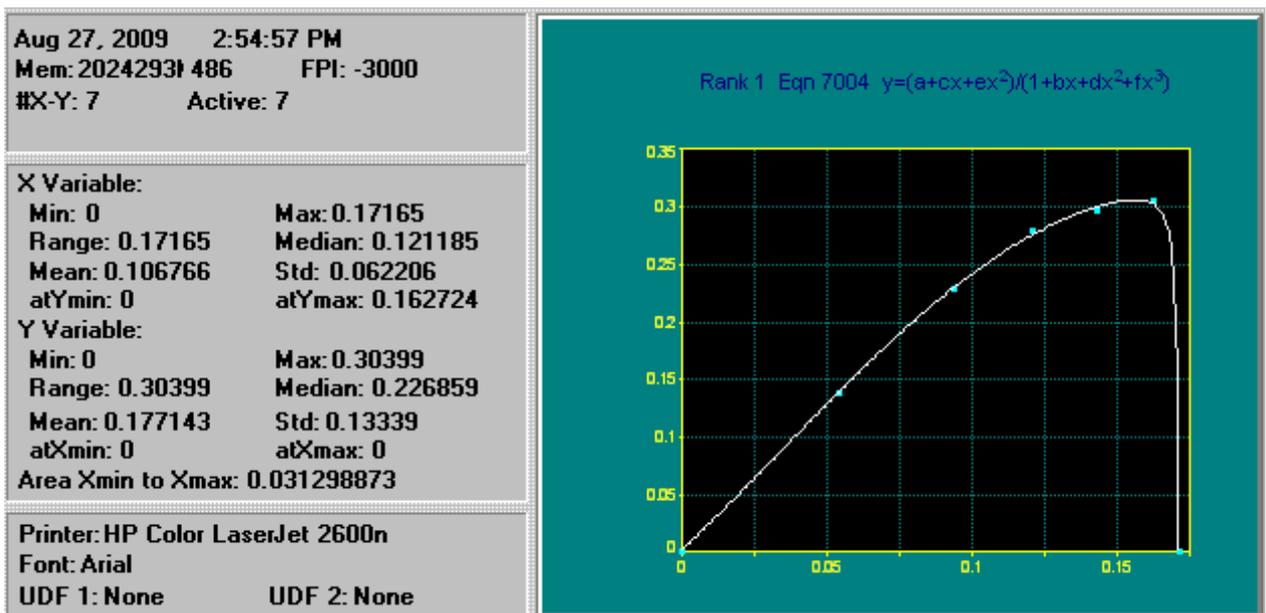


GRÁFICO- ÁREA NEGATIVA DE MEDIDAS AQUISITADAS DE DIFERENÇA DE PRESSÃO ATRAVÉS DO TRANSDUTOR DIFERENCIAL COM O CPC (0.8609).

## ANEXO B – Gráficos das áreas dos perfis de velocidades e das áreas (Vazões) utilizando o micromolinete no canal de adução e canal de alimentação dos peixes.

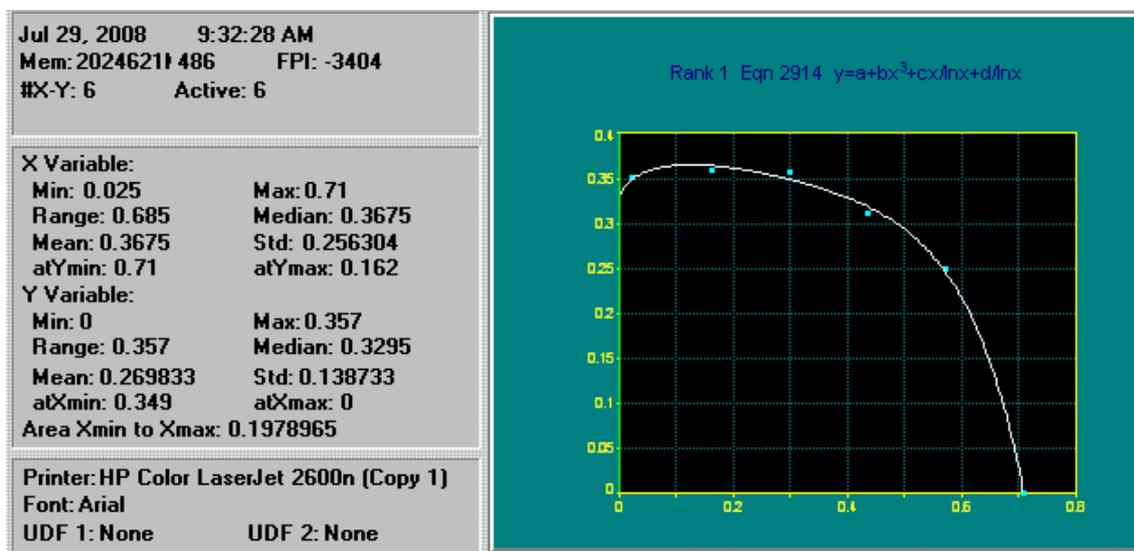


Gráfico - Medição da área do canal de adução na seção 01 com a hélice 01 através do Table-Curve para comparação com método do Flutuador.

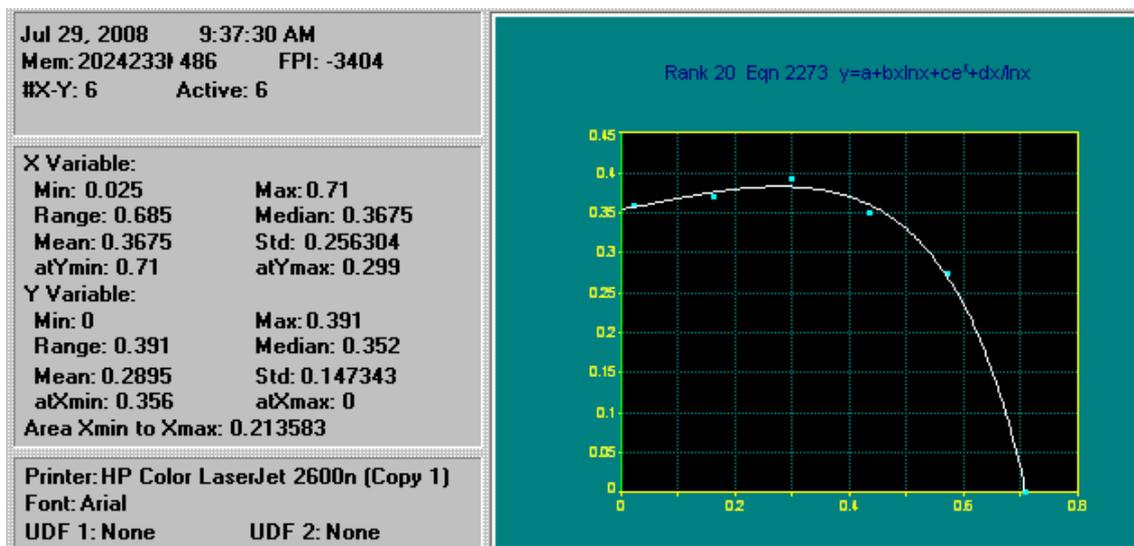


Gráfico - Medição da área do canal de adução na seção 02 com a hélice 01 através do Table-Curve para comparação com método do Flutuador.

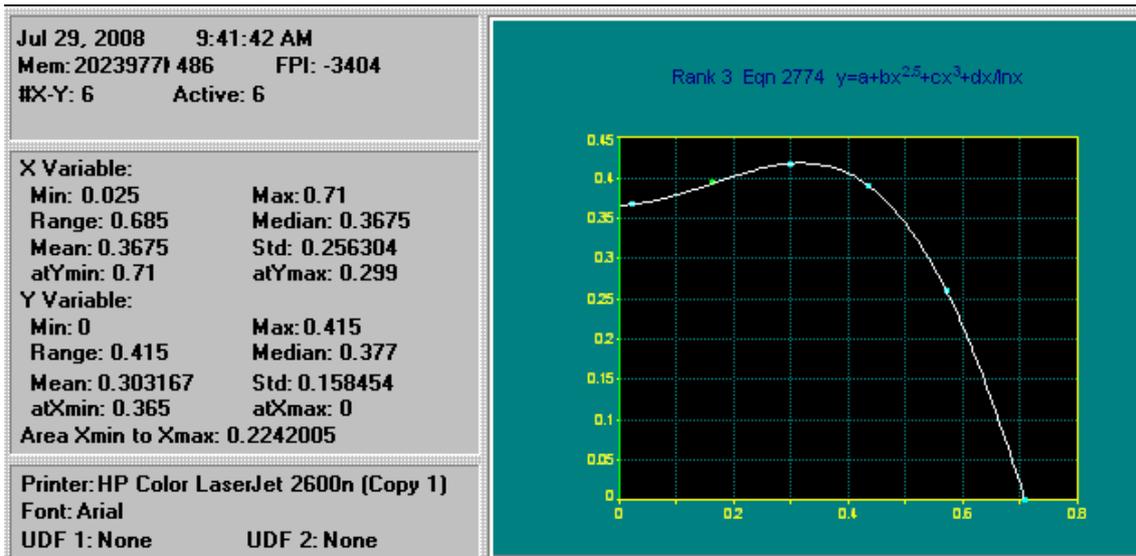


Gráfico - Medição da área do canal de adução na seção 03 com a hélice 01 através do Table-Curve para comparação com método do Flutuador.

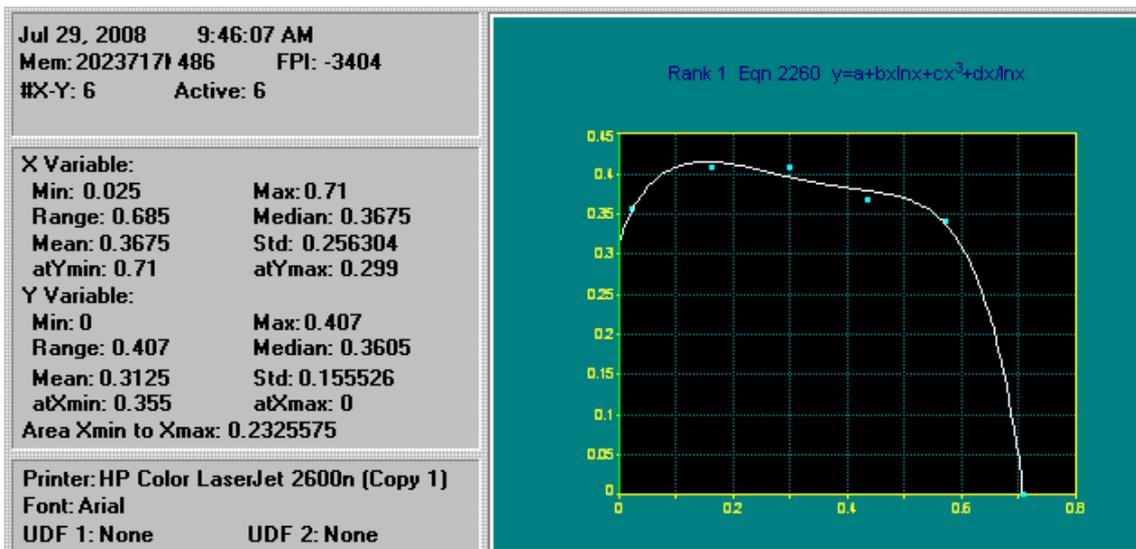


Gráfico - Medição da área do canal de adução na seção 04 com a hélice 01 através do Table-Curve para comparação com método do Flutuador

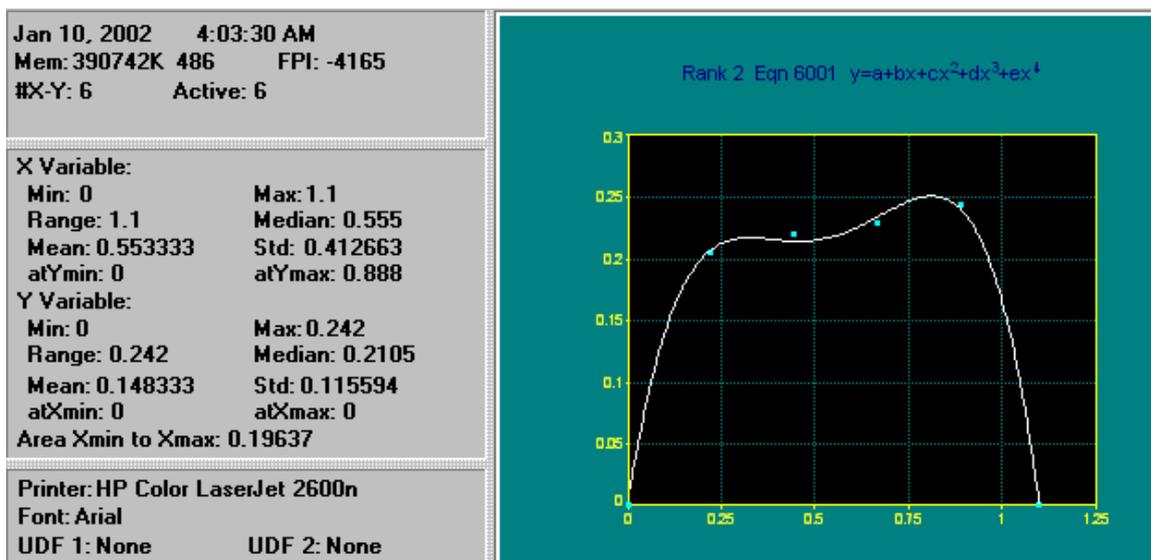


FIGURA - Medição da vazão no canal de adução com a hélice 01 utilizando o software Table-Curve para comparação de vazão com o método Flutuador.

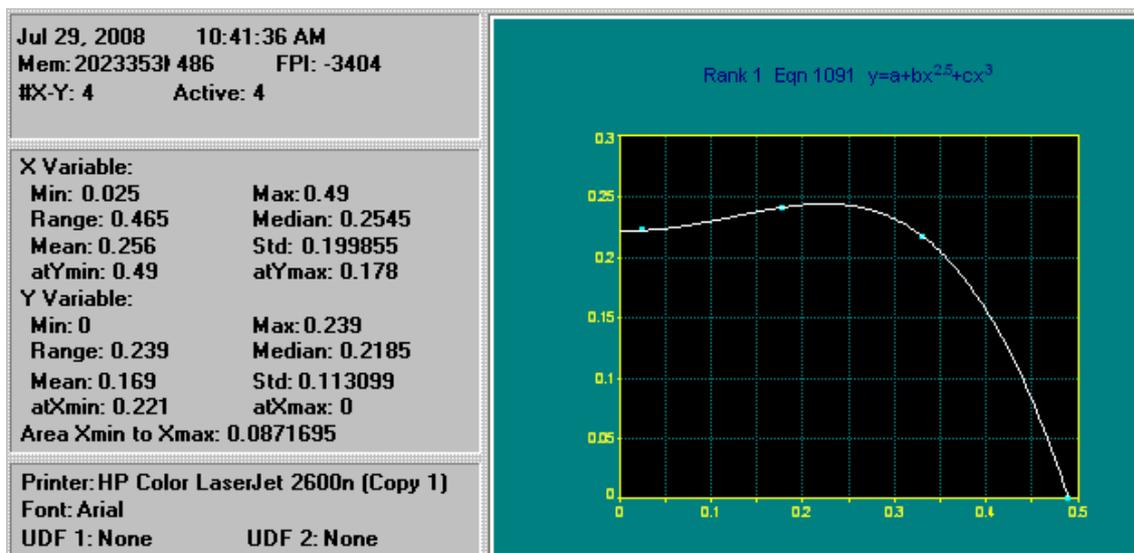


Gráfico- Medição da área do canal dos peixes na seção 01 com a hélice 01 através do Table-Curve para comparação com método do Flutuador

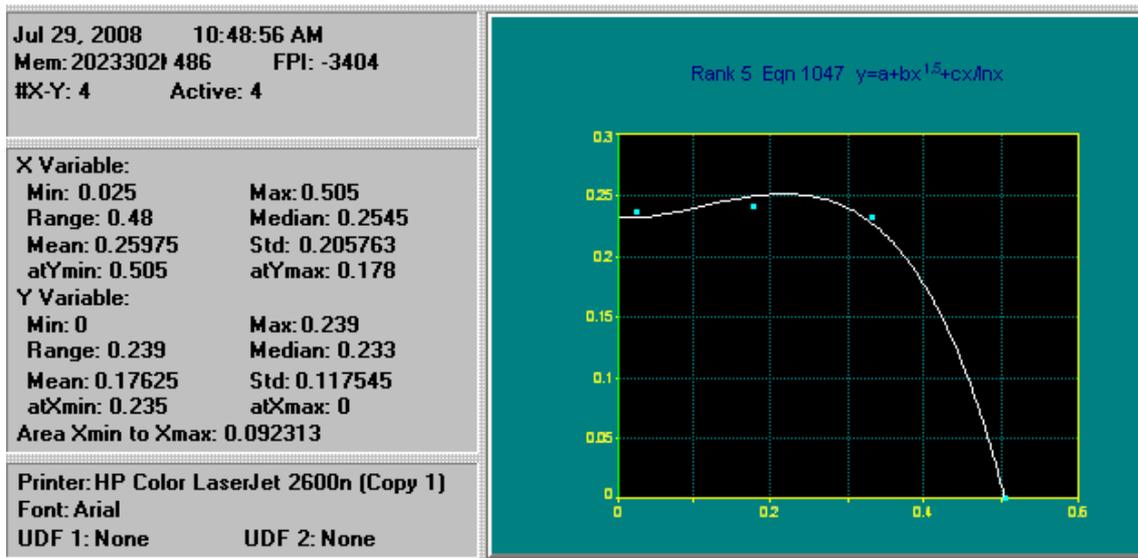


Gráfico- Medição da área do canal dos peixes na seção 02 com a hélice 01 através do Table-Curve para comparação com método do Flutuador

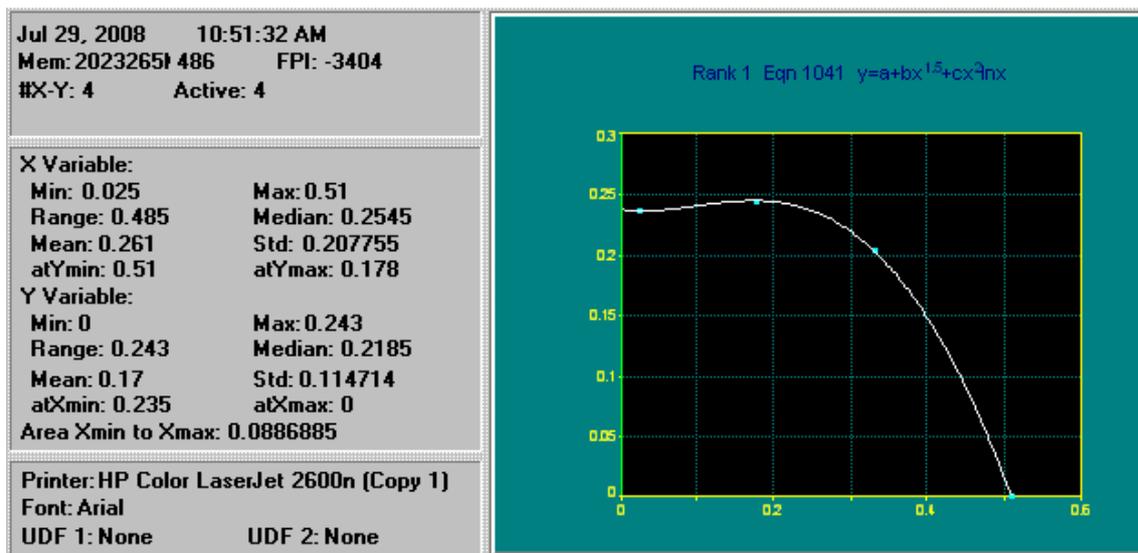


Gráfico- Medição da área do canal dos peixes na seção 03 com a hélice 01 através do Table-Curve para comparação com método do Flutuador

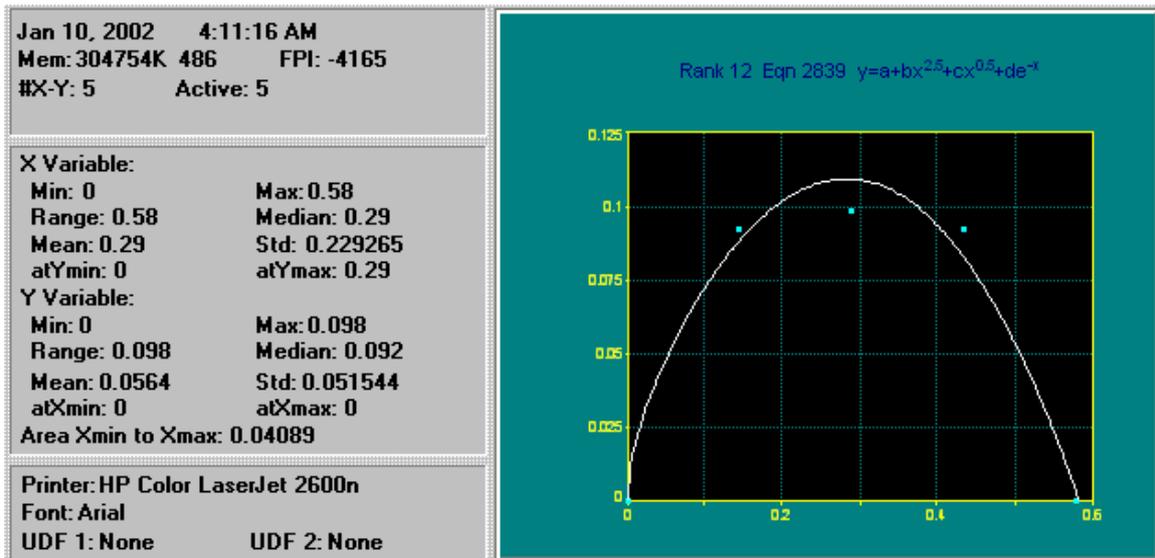


FIGURA - Medição da vazão no canal dos peixes com a hélice 01 utilizando o software Table-Curve para comparação de vazão com o método Flutuador.

## ANEXO C – Gráficos das áreas dos perfis de velocidades e das áreas (Vazões) utilizando os molinetes no córrego da Onça (Table-Curve e Auto-Cad).

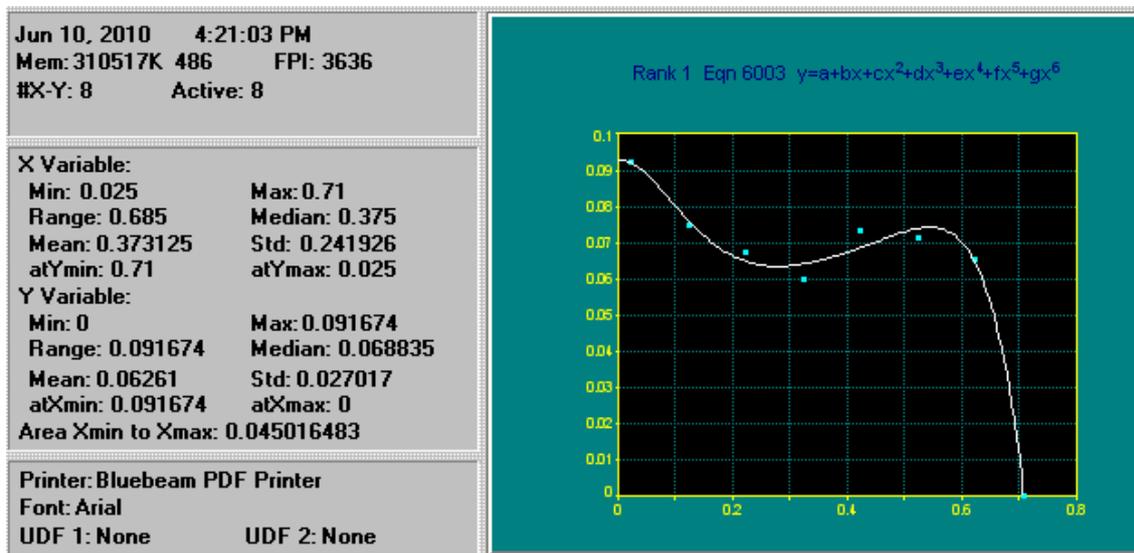


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 01 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO TABLE-CURVE.

Medição de vazão no rio utilizando o micromolinetete

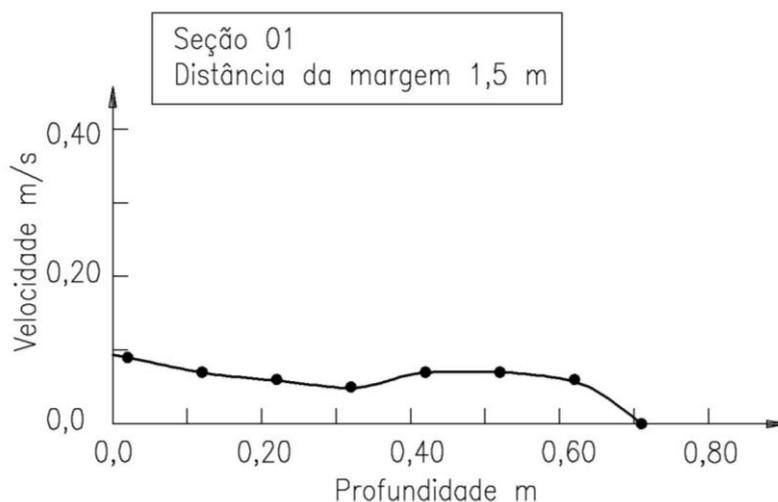


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 01 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

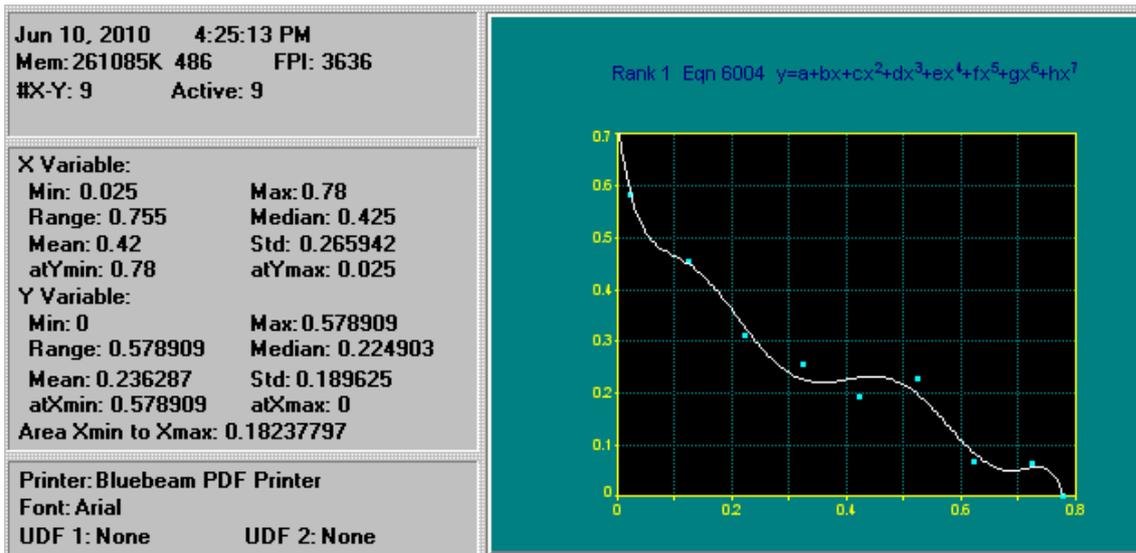


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 02 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO TABLE-CURVE.

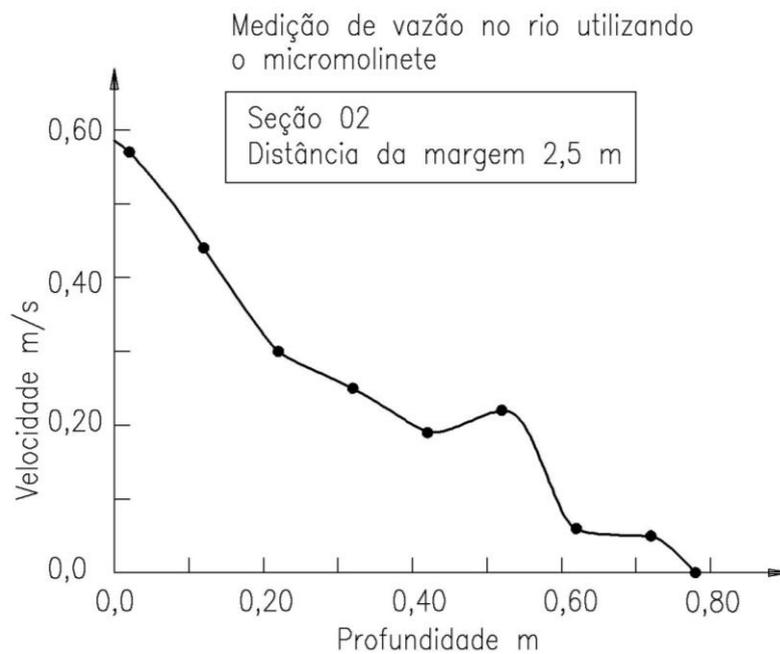


GRÁFICO- MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 02 COM HÉLICE 01 ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

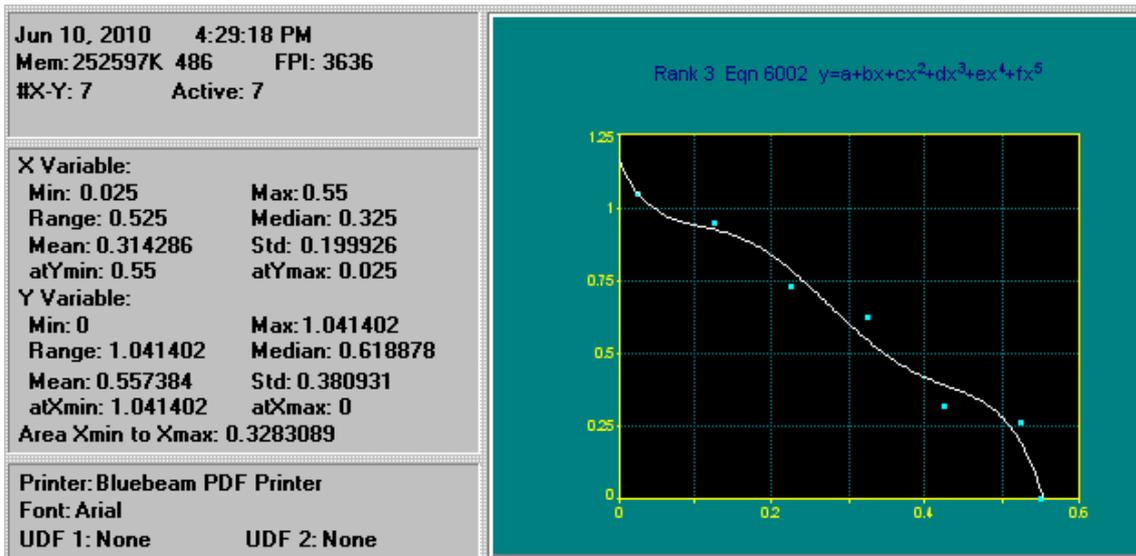


GRÁFICO- MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 03 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO TABLE-CURVE.

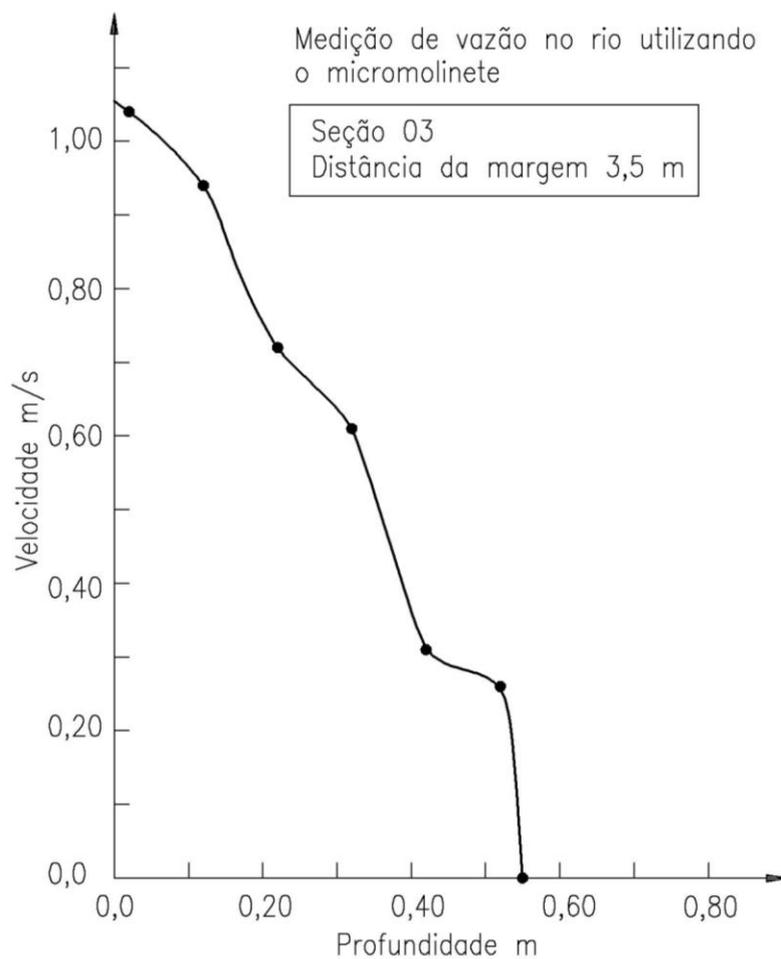


GRÁFICO- MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 03 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

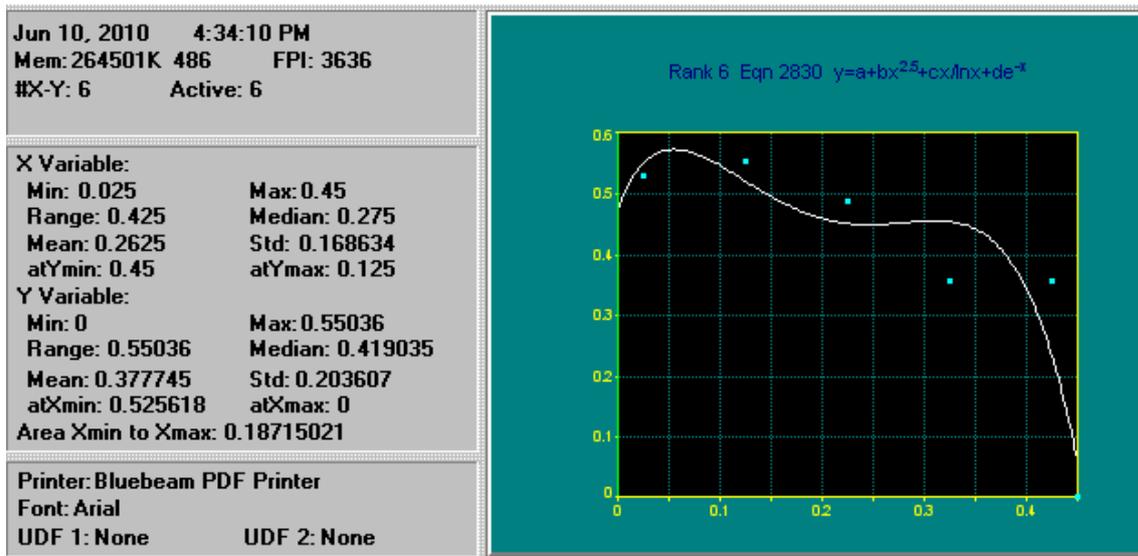


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 04 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

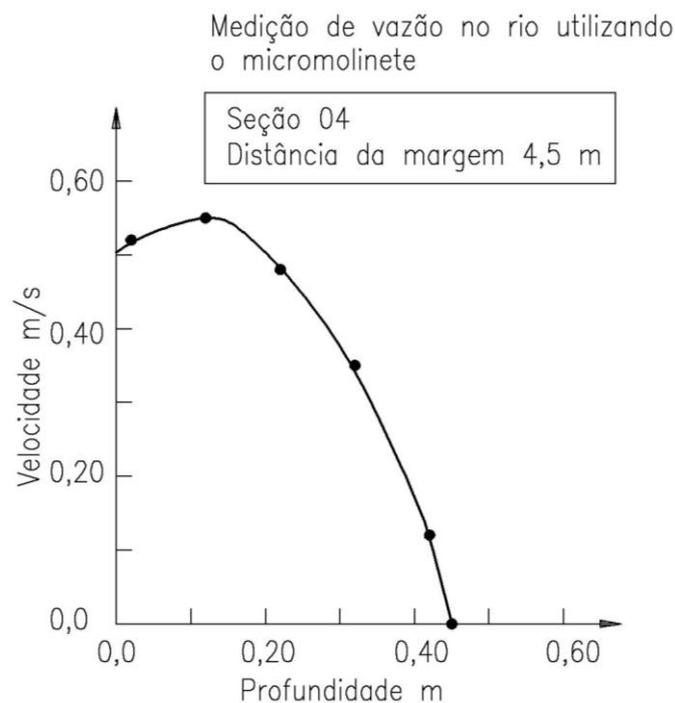


GRÁFICO- MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 04 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

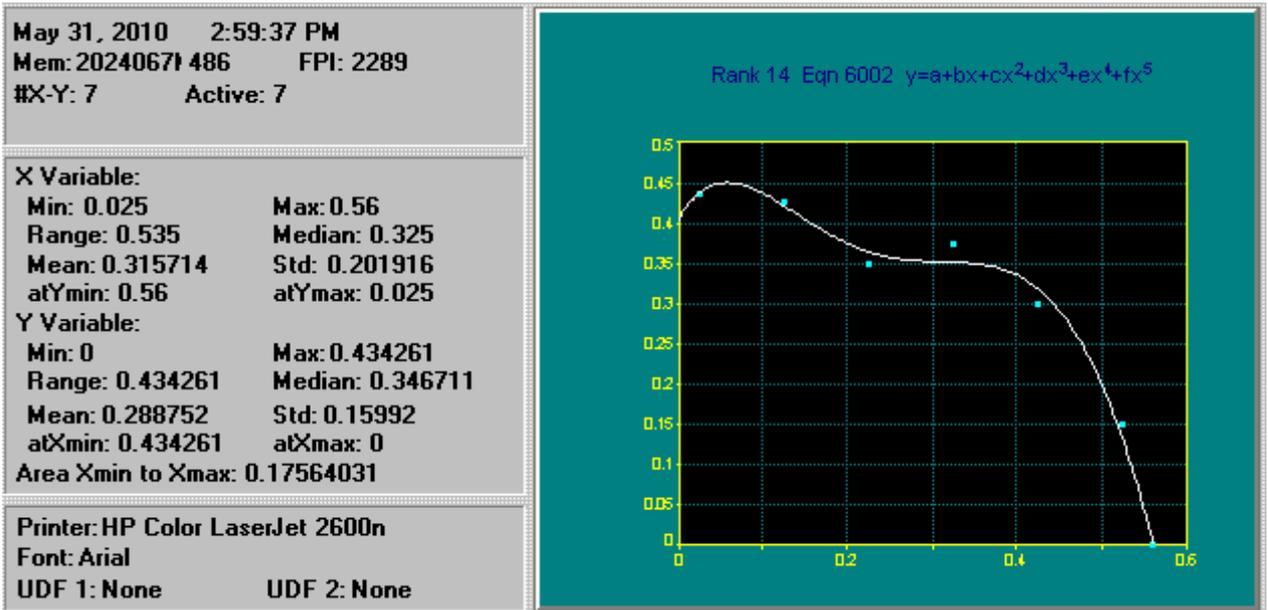


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 05 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

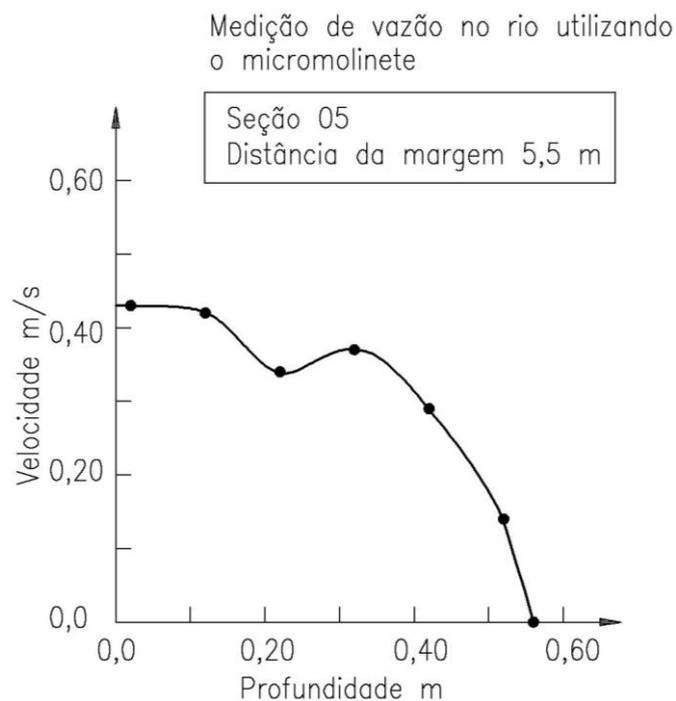


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 05 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

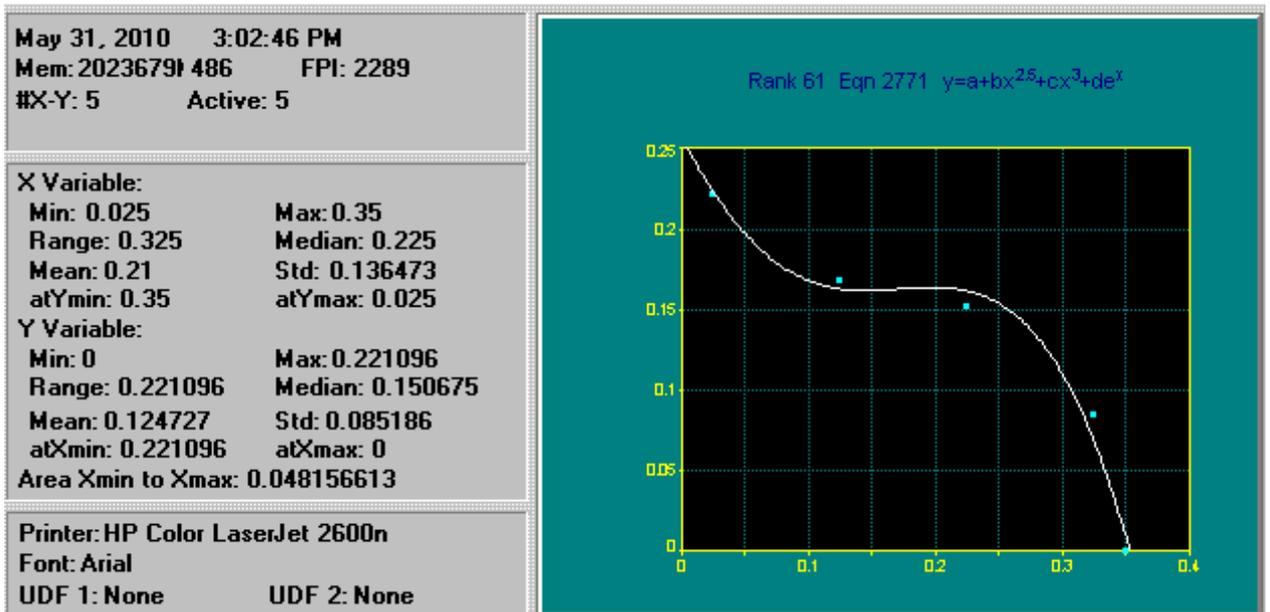


GRÁFICO- MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 06 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

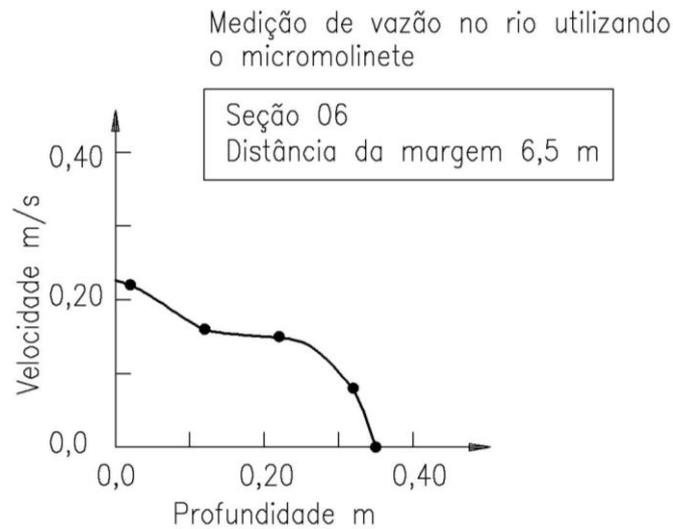


GRÁFICO- MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 06 COM A HÉLICE 01 ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

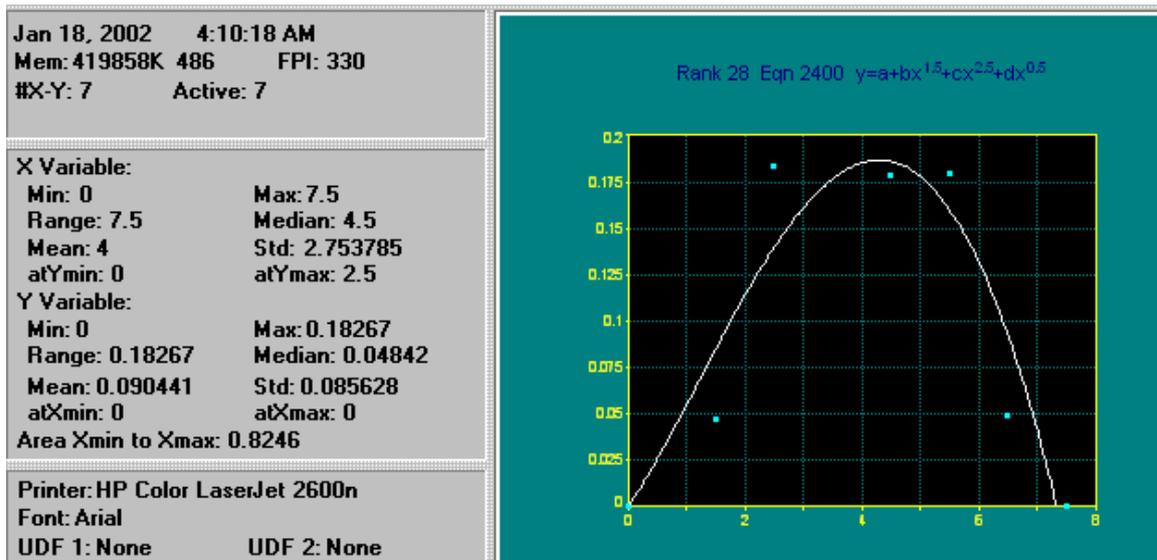


FIGURA - MEDIÇÃO DA VAZÃO COM A HÉLICE 01 DO MICROMOLINETE UTILIZANDO O PROGRAMA DE COMPUTADOR TABLE-CURVE.

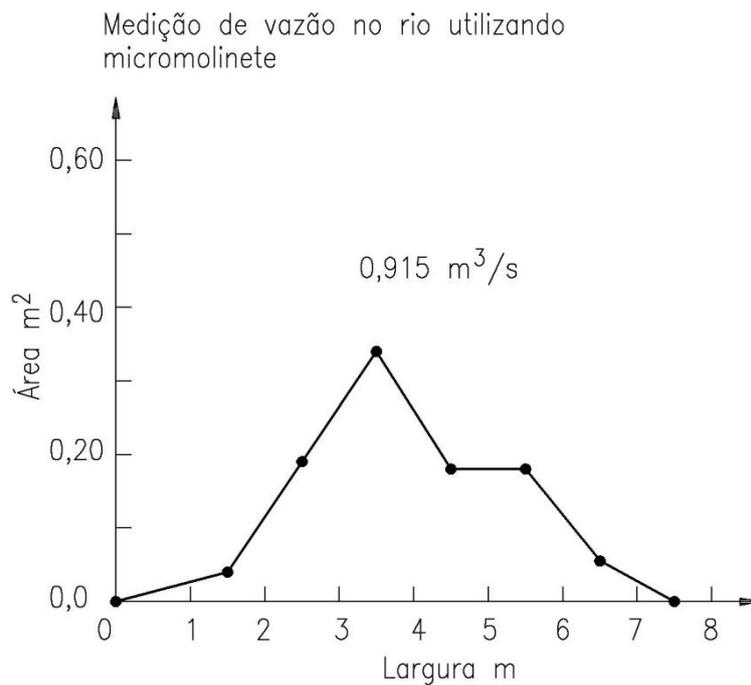


FIGURA - MEDIÇÃO DA VAZÃO COM A HÉLICE 01 UTILIZANDO O PROGRAMA DE COMPUTADOR AUTOCAD

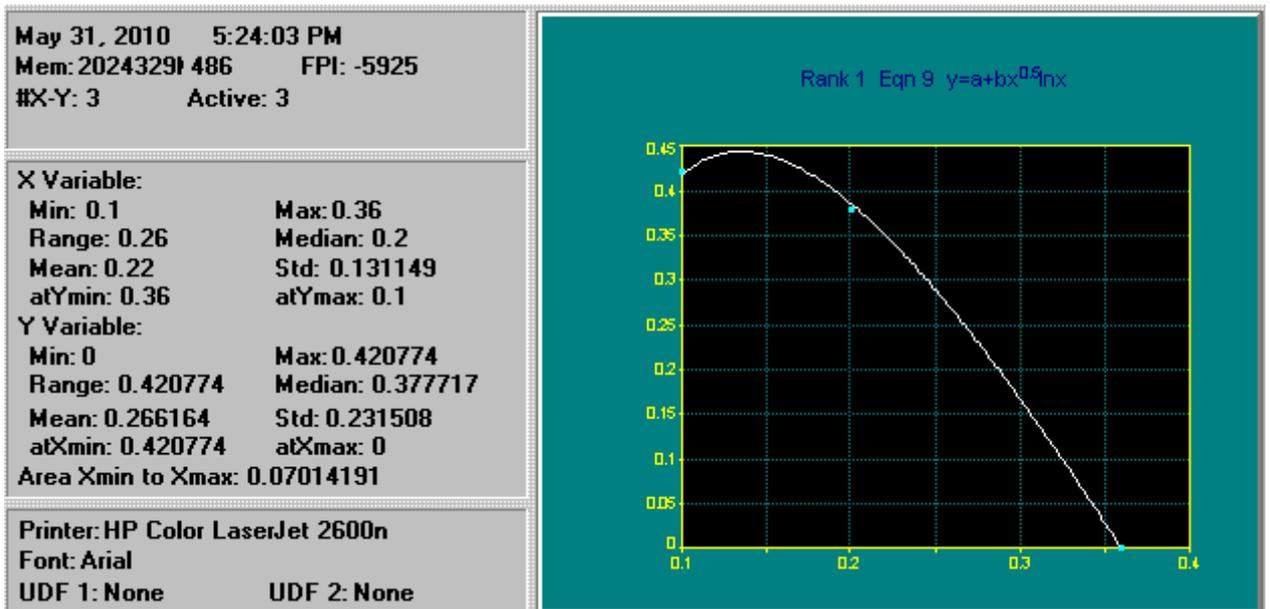


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 01 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

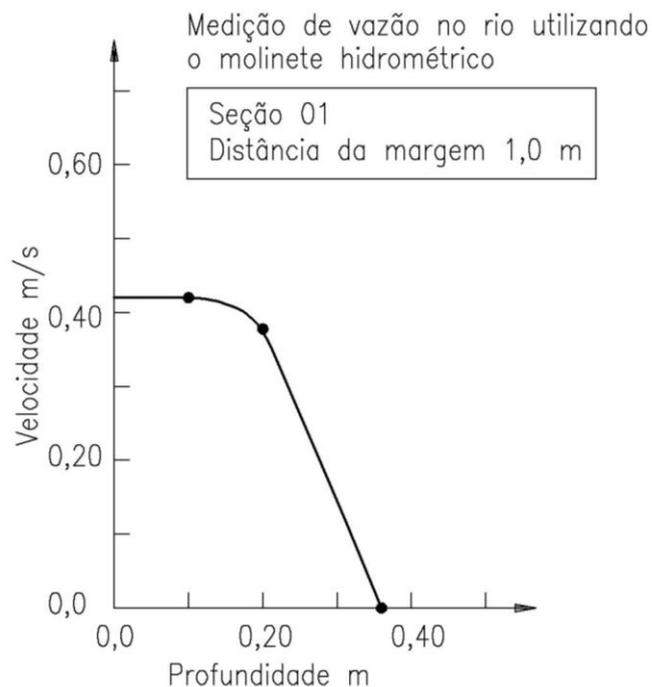


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 01 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

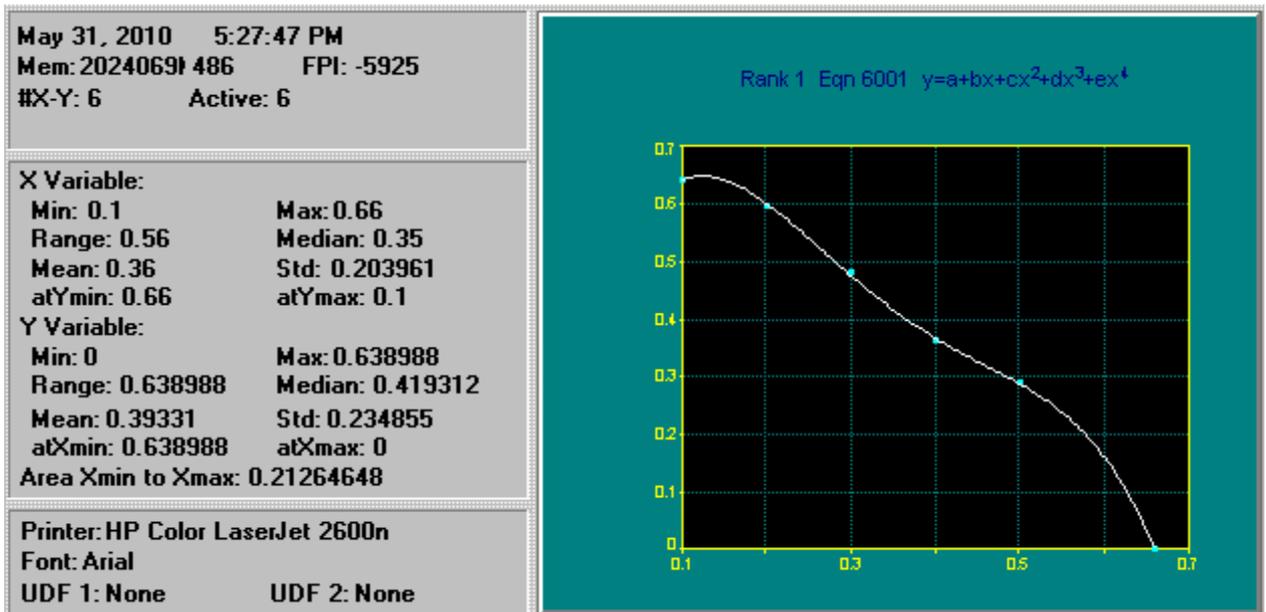


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 02 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

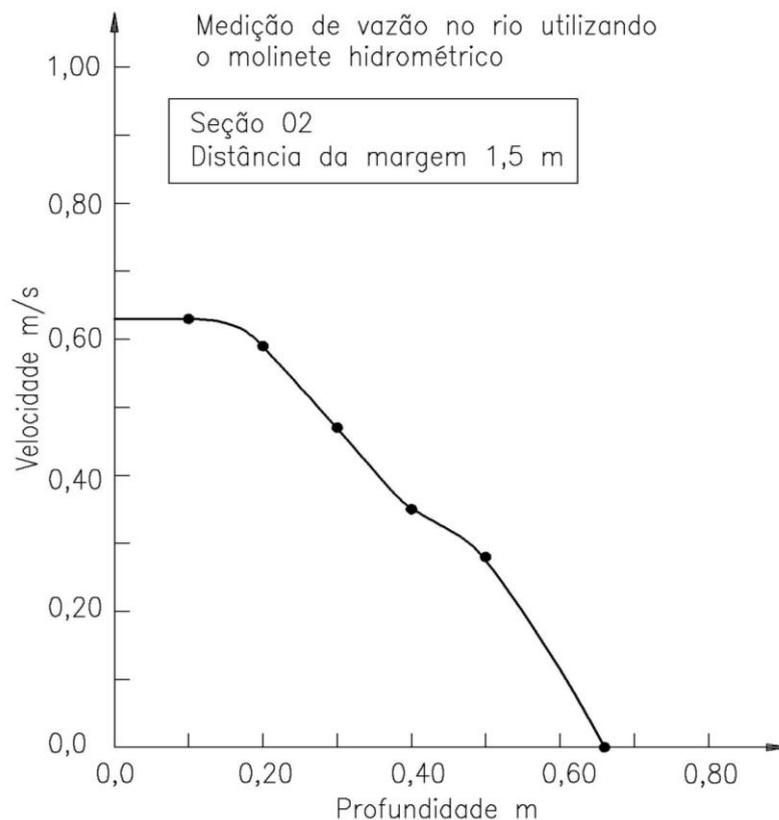


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 02 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

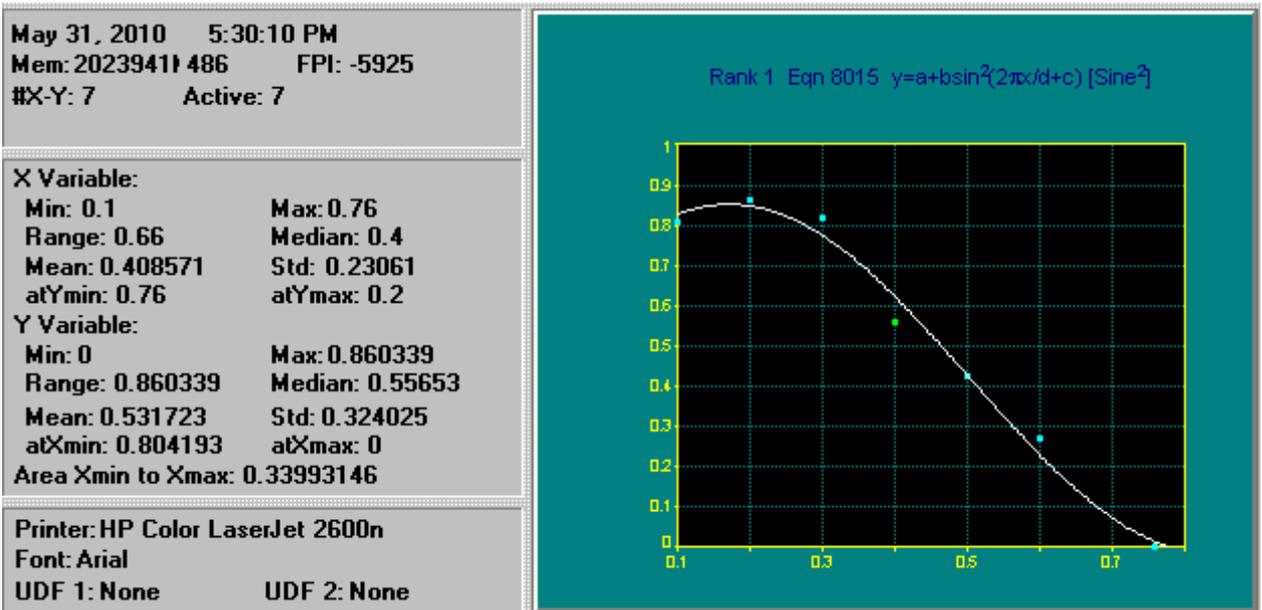


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 03 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

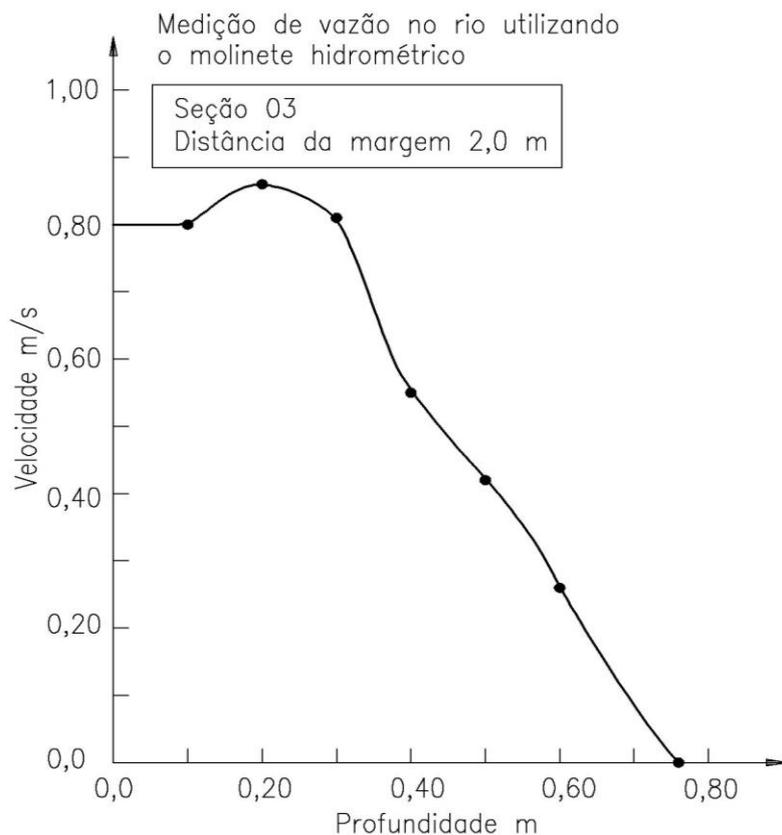


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 03 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

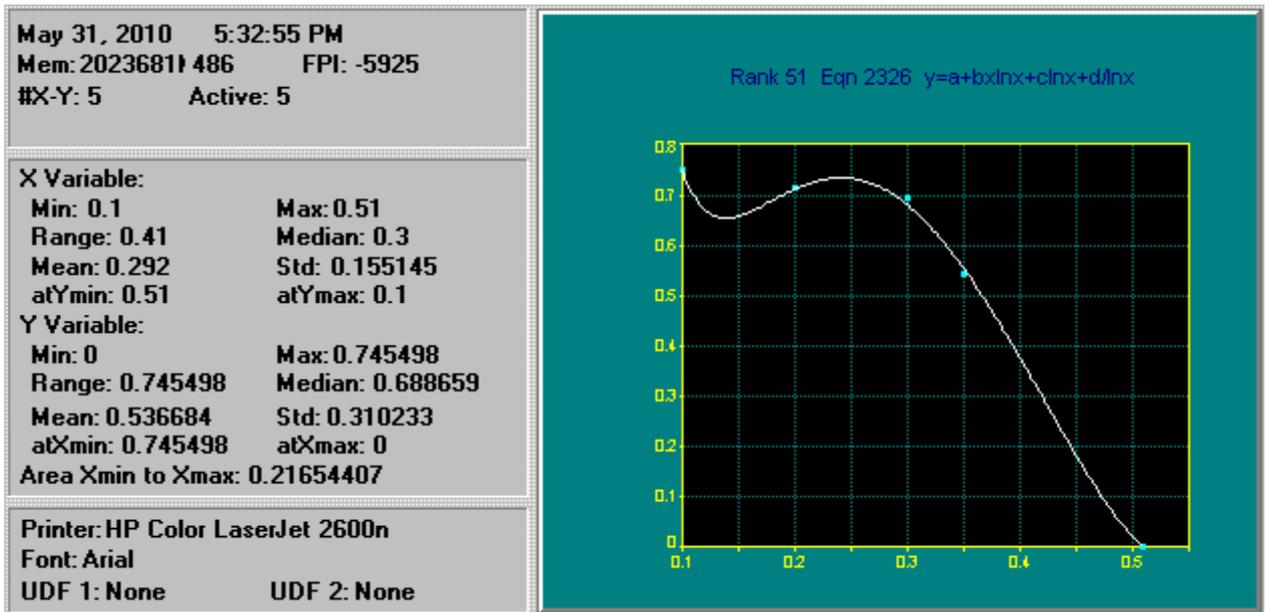


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 04 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

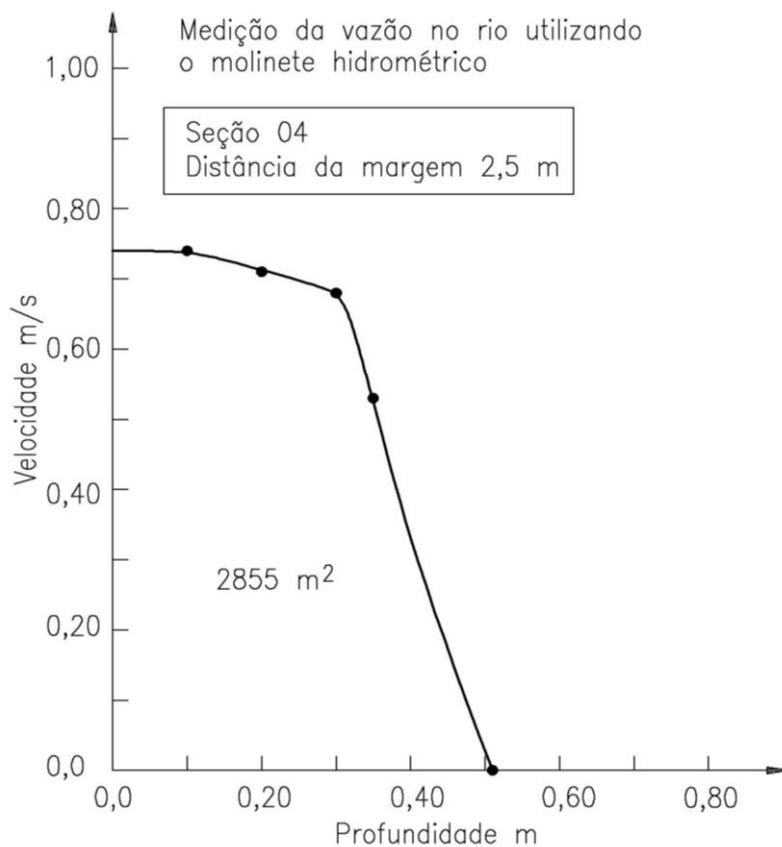


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 04 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

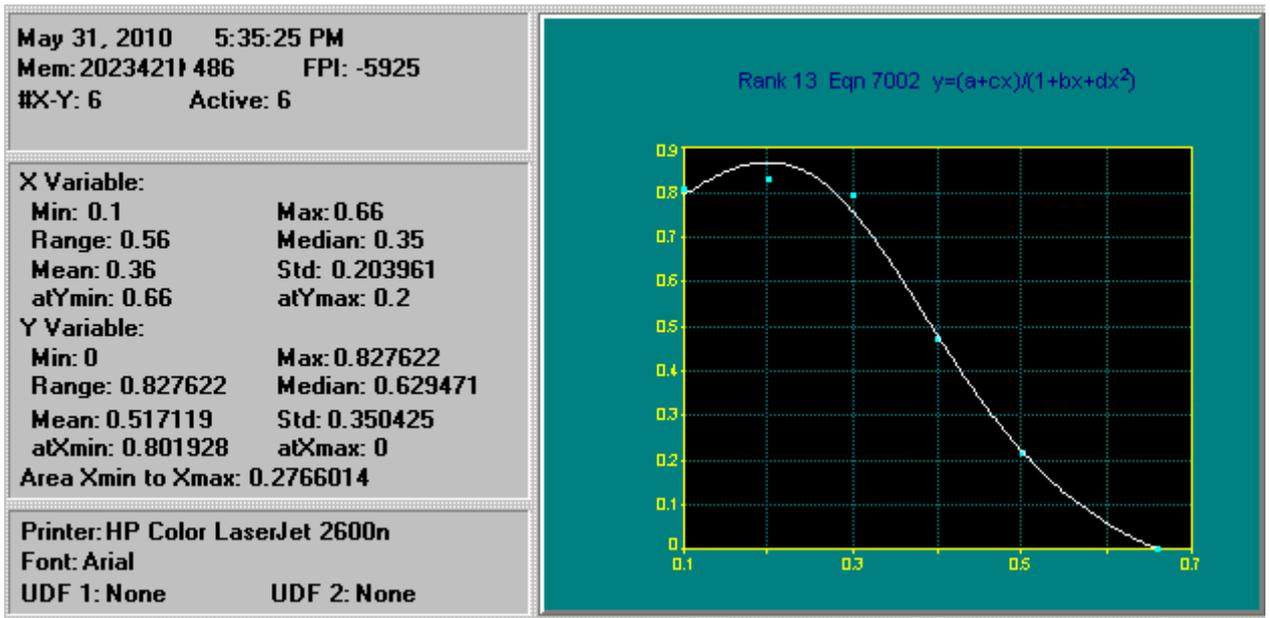


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 05 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

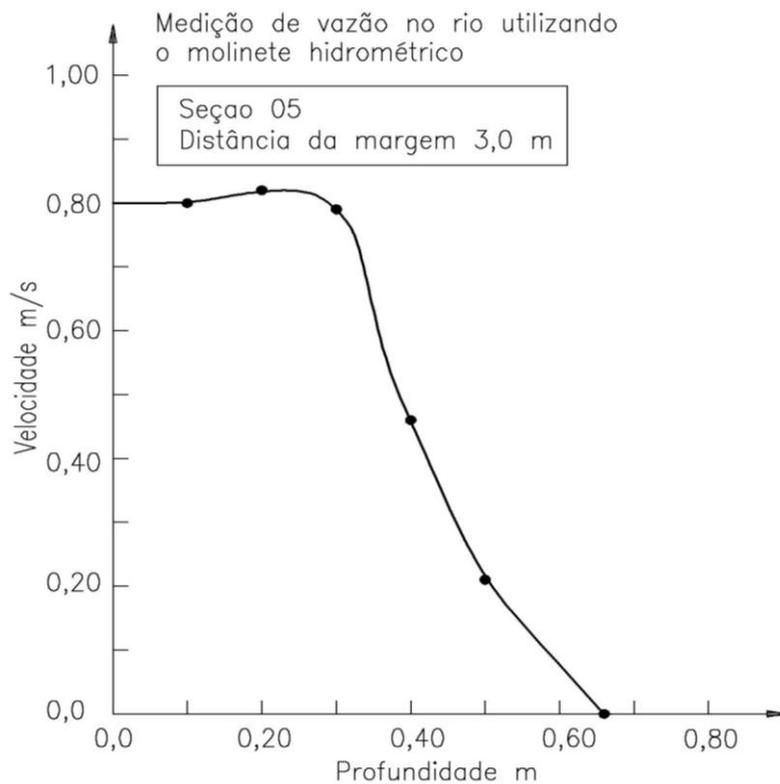


GRÁFICO- MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 05 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

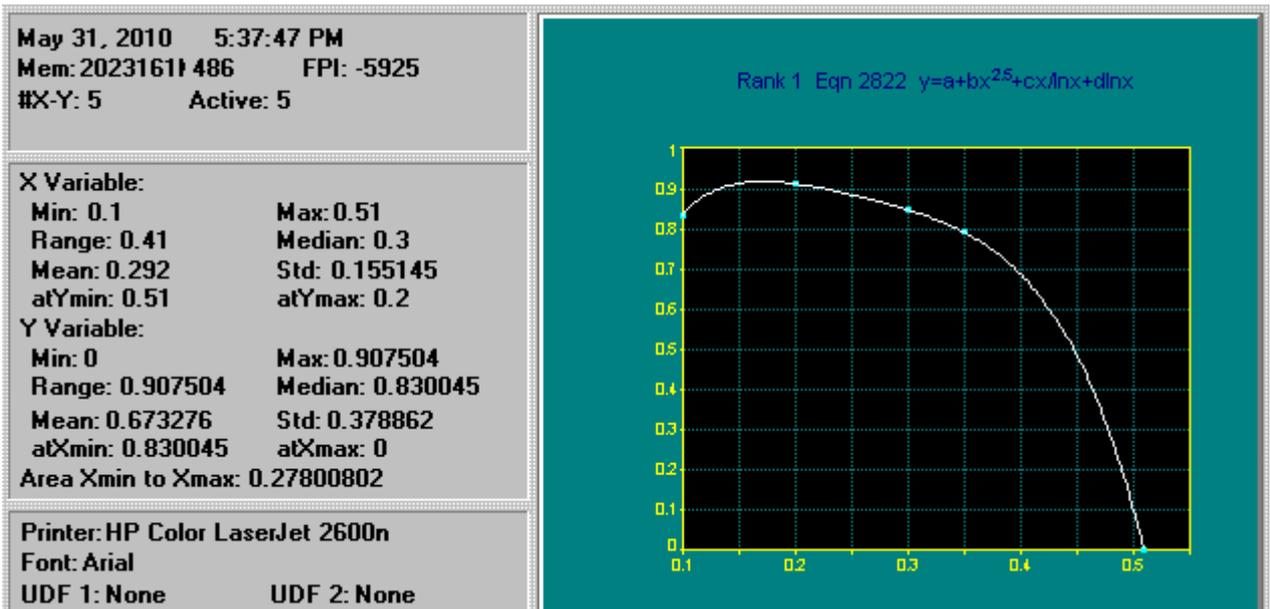


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 06 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

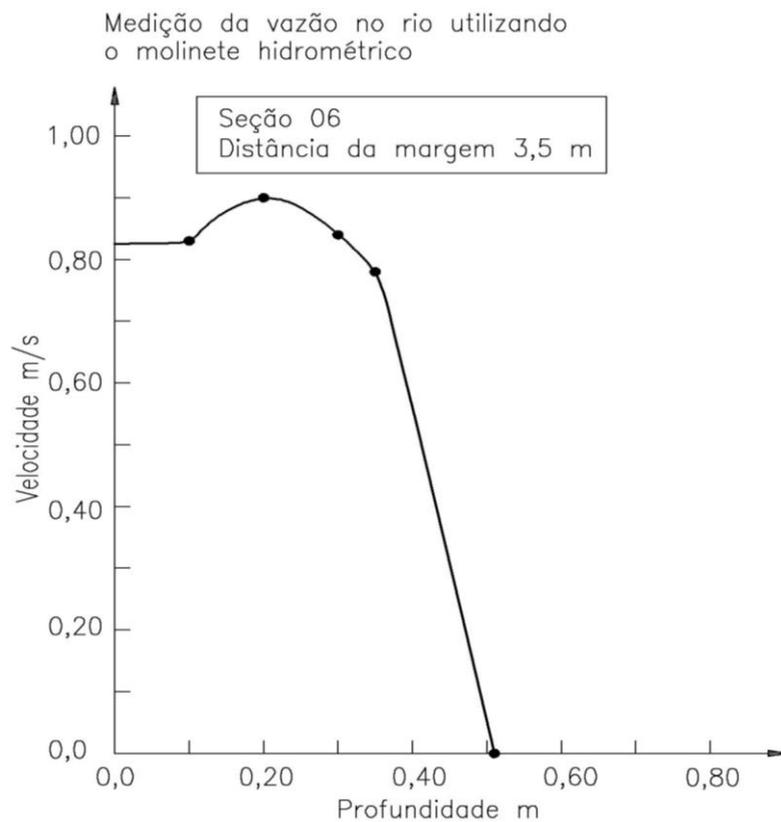


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 06 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

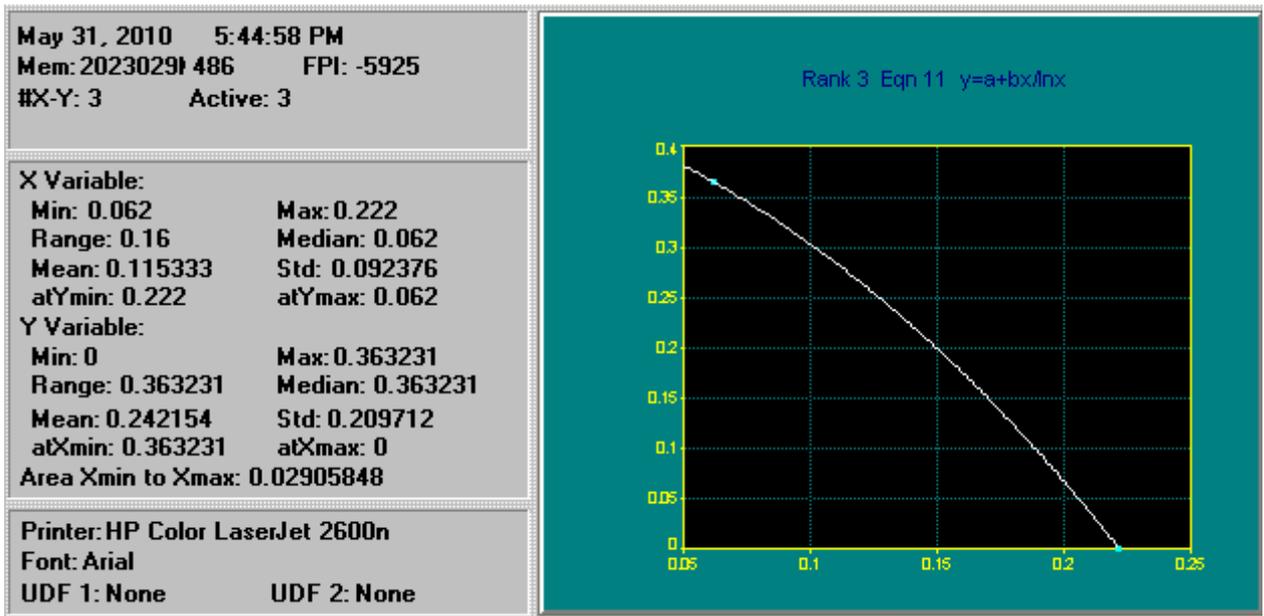


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 07 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO TABLE-CURVE

Medição da vazão no rio utilizando o molinete hidrométrico

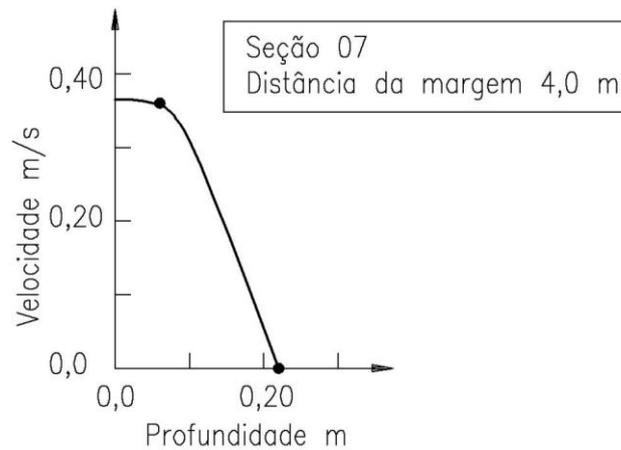


GRÁFICO - MEDIÇÃO DA ÁREA DO RIO NA SEÇÃO 07 COM A HÉLICE DO MOLINETE HIDROMÉTRICO ATRAVÉS DO AUTO-CAD.

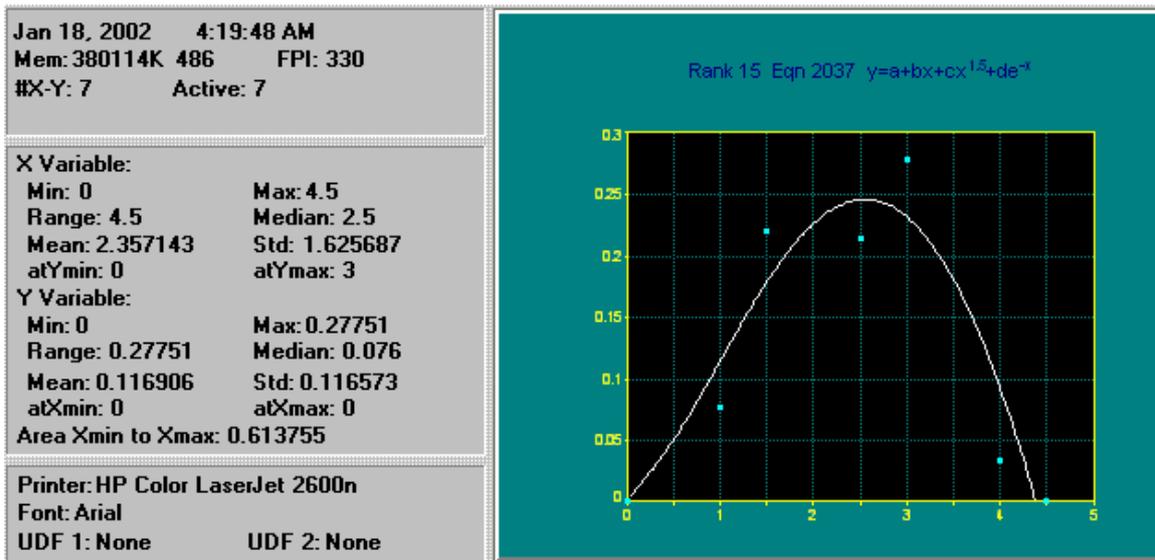


FIGURA - MEDIÇÃO DA VAZÃO COM MOLINETE HIDROMÉTRICO UTILIZANDO O PROGRAMA DE COMPUTADOR TABLE-CURVE.

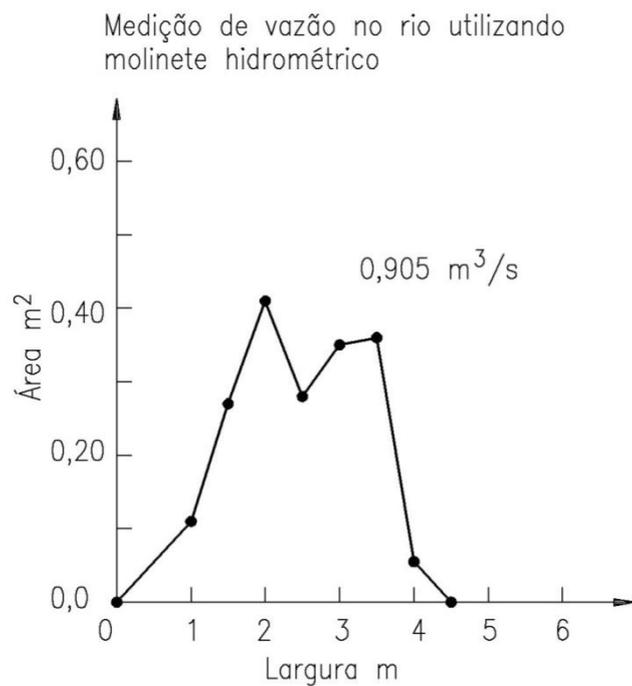


FIGURA - MEDIÇÃO DA VAZÃO COM MOLINETE HIDROMÉTRICO UTILIZANDO O PROGRAMA DE COMPUTADOR AUTOCAD.

## ANEXO D – Gráficos das áreas dos perfis de velocidades e das áreas (Vazões) utilizando os molinetes no canal de adução para o cálculo do coeficiente de Manning.

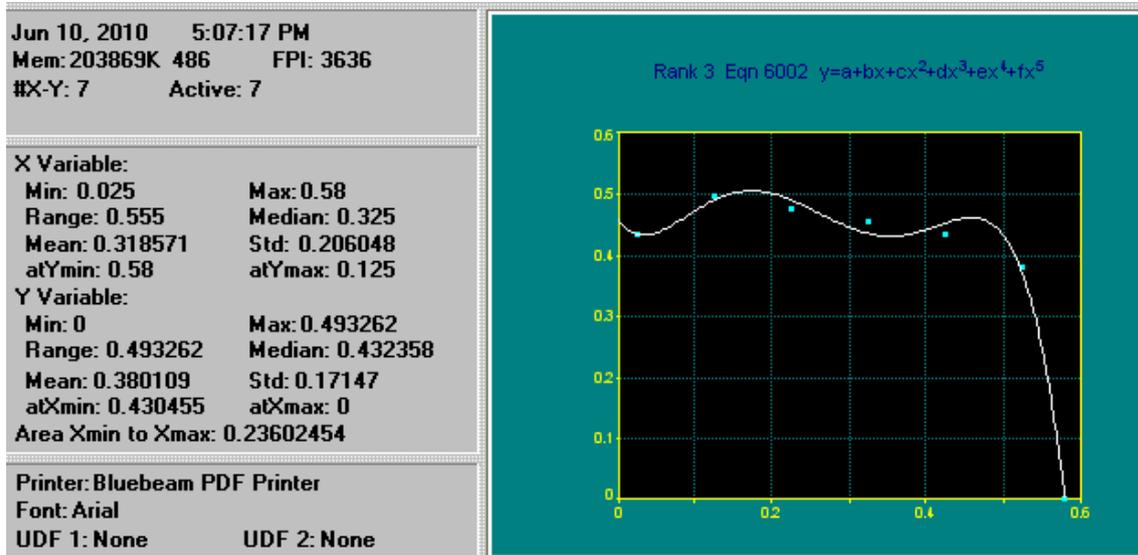


Gráfico- Medição da área 01 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico

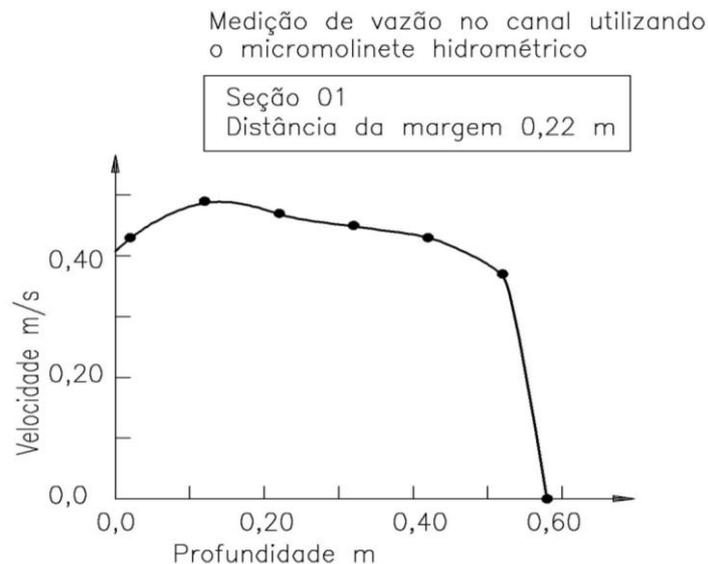


Gráfico - Medição da área 01 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico utilizando o software Autocad.

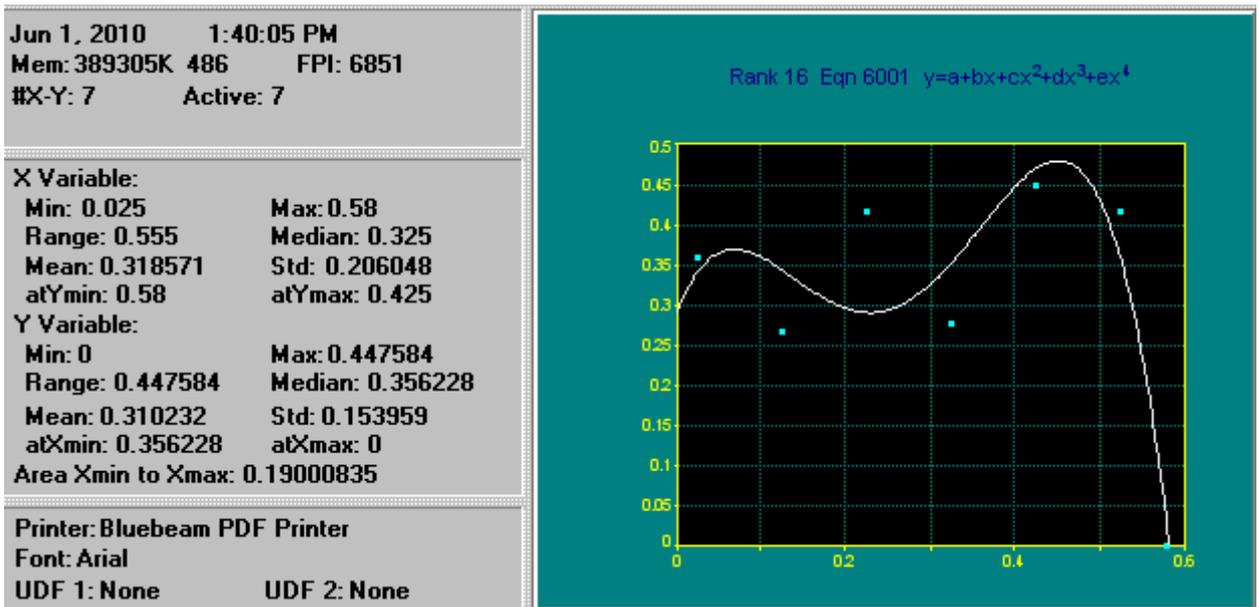


Gráfico- Medição da área 02 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico

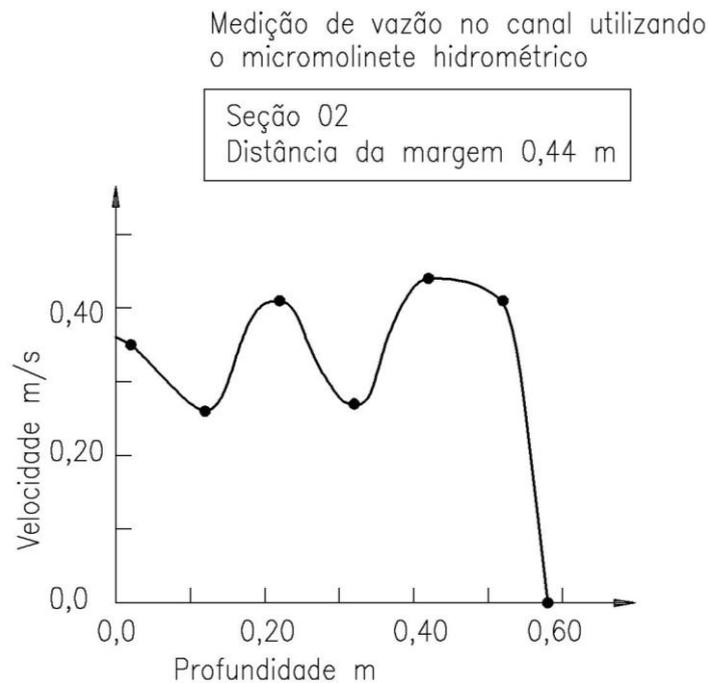


Gráfico - Medição da área 02 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico utilizando o software AutoCAD.

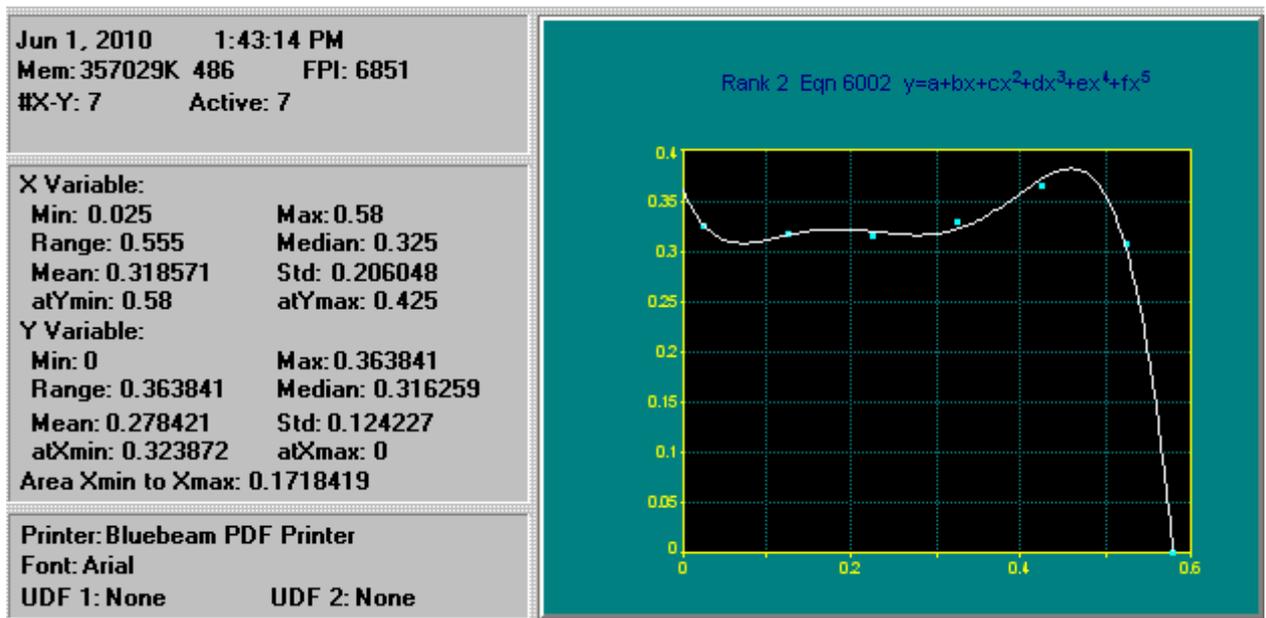


Gráfico- Medição da área 03 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico

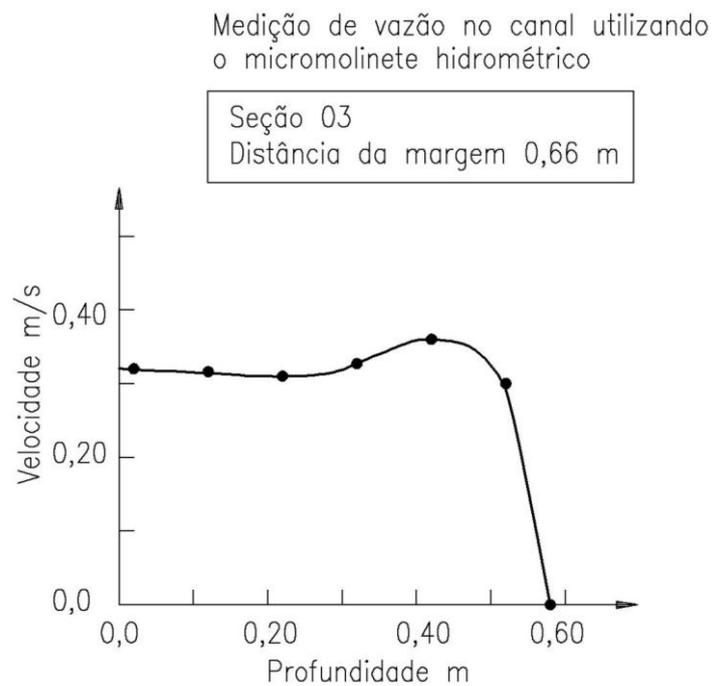


Gráfico - Medição da área 03 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico utilizando o software AutoCAD.

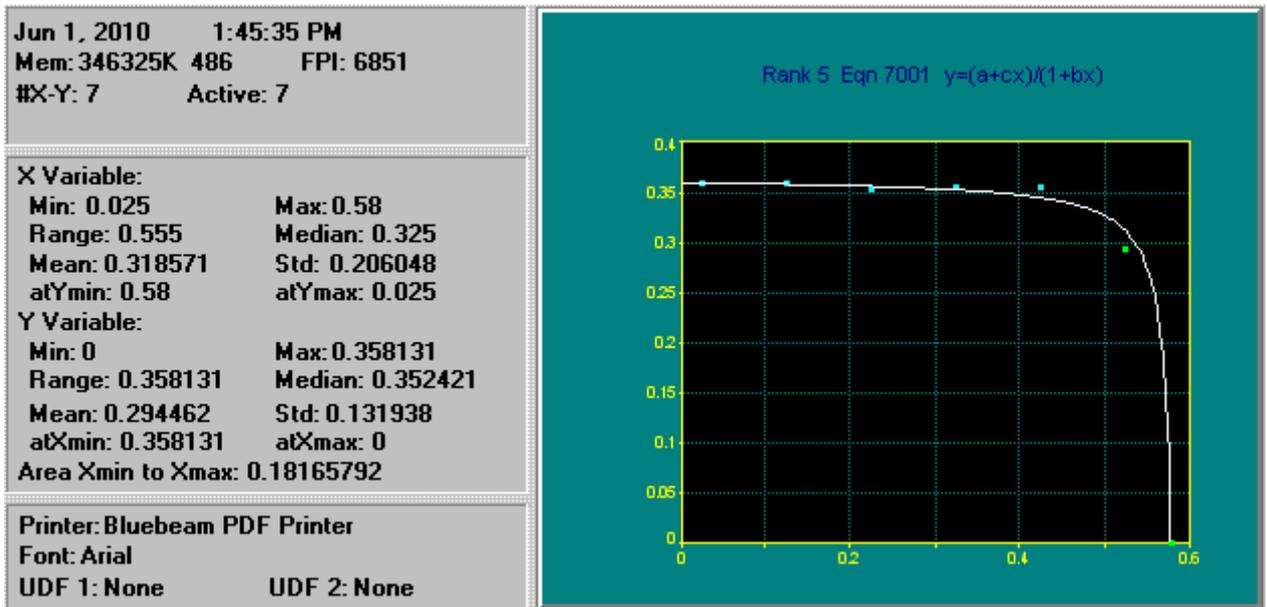


Gráfico- Medição da área 04 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico

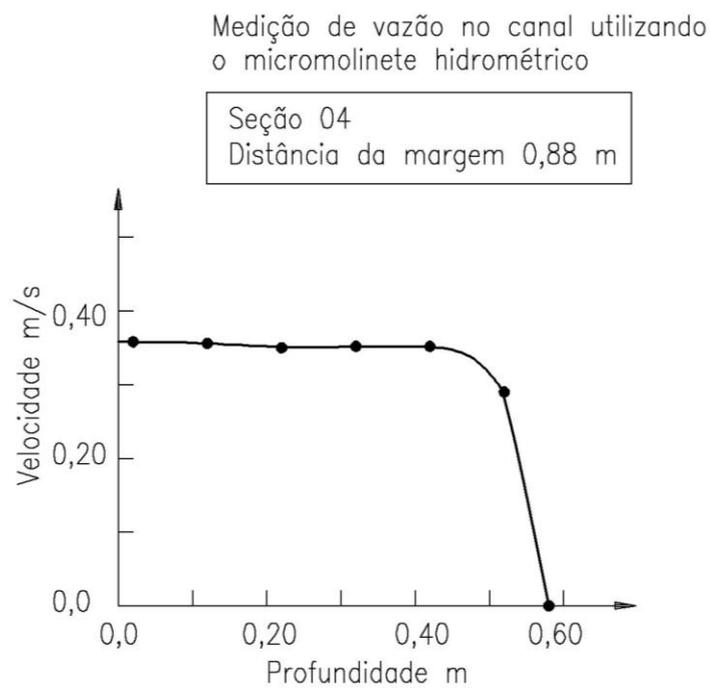


Gráfico- Medição da área 04 do canal de adução através do micromolinete para comparação com método do molinete hidrométrico utilizando o software AutoCAD.

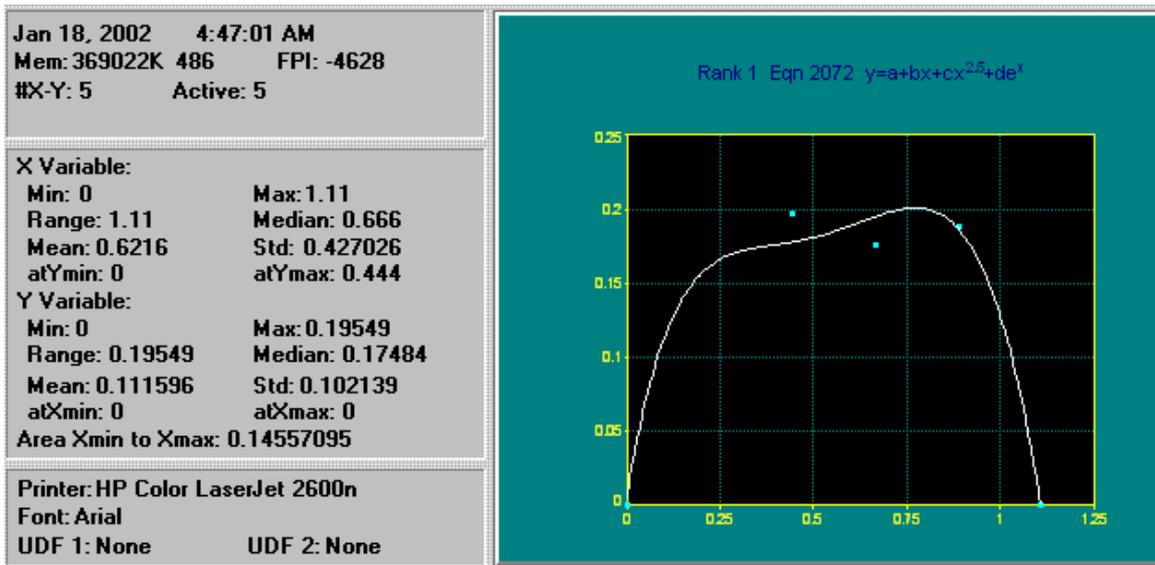


FIGURA - Medição da vazão no canal de adução utilizando o software Table-Curve com o micromolinete.

Medição de vazão no canal de adução  
utilizando micromolinete

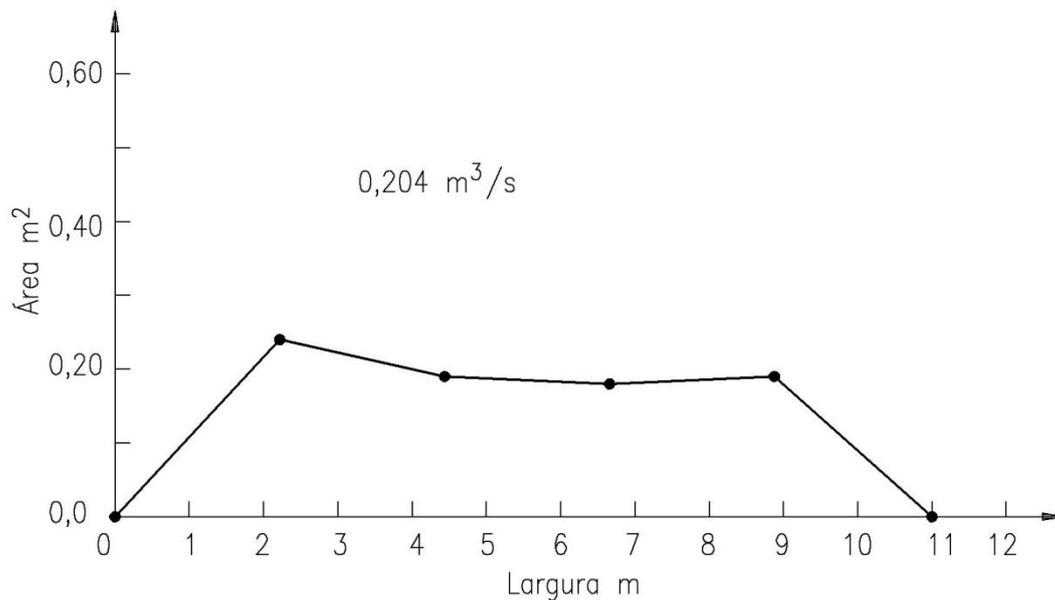


FIGURA - Medição da vazão no canal de adução utilizando o software AutoCAD com o micromolinete.

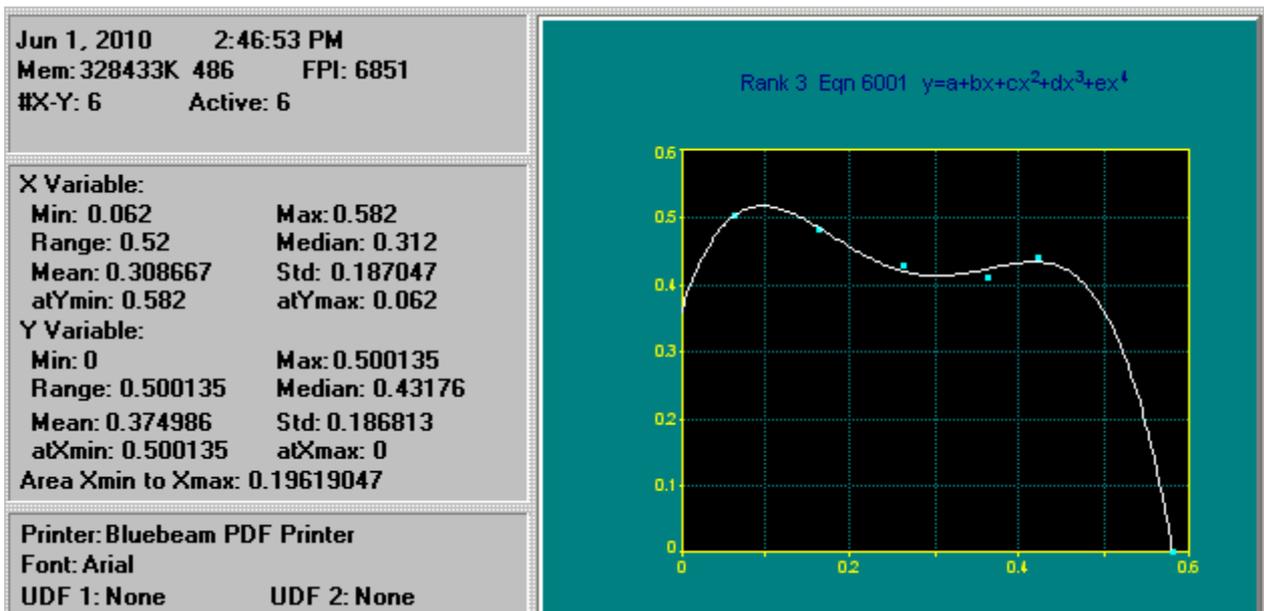


Gráfico- Medição da área 01 do canal de adução através do molinete para comparação com método do micromolinete

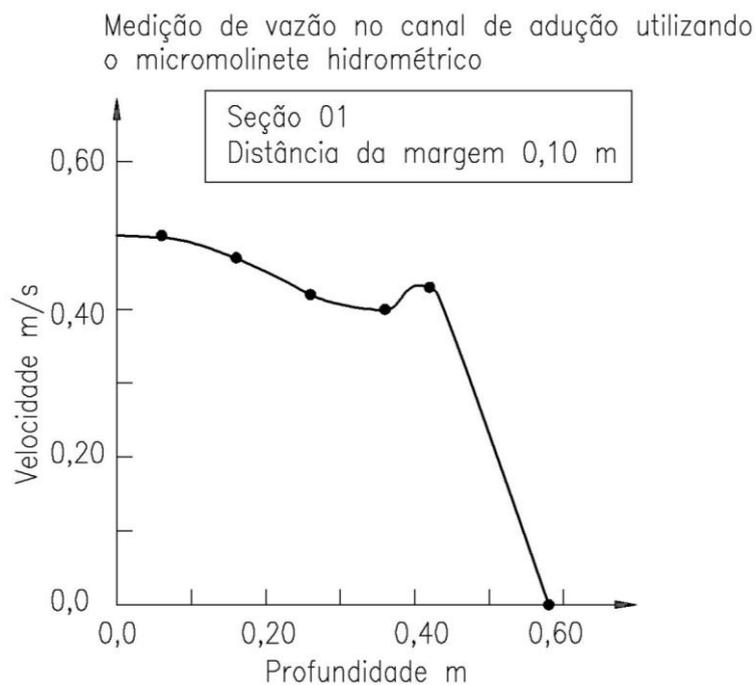


Gráfico - Medição da área 01 do canal de adução através do molinete hidrométrico para comparação com método do micromolinete utilizando o software AutoCAD.

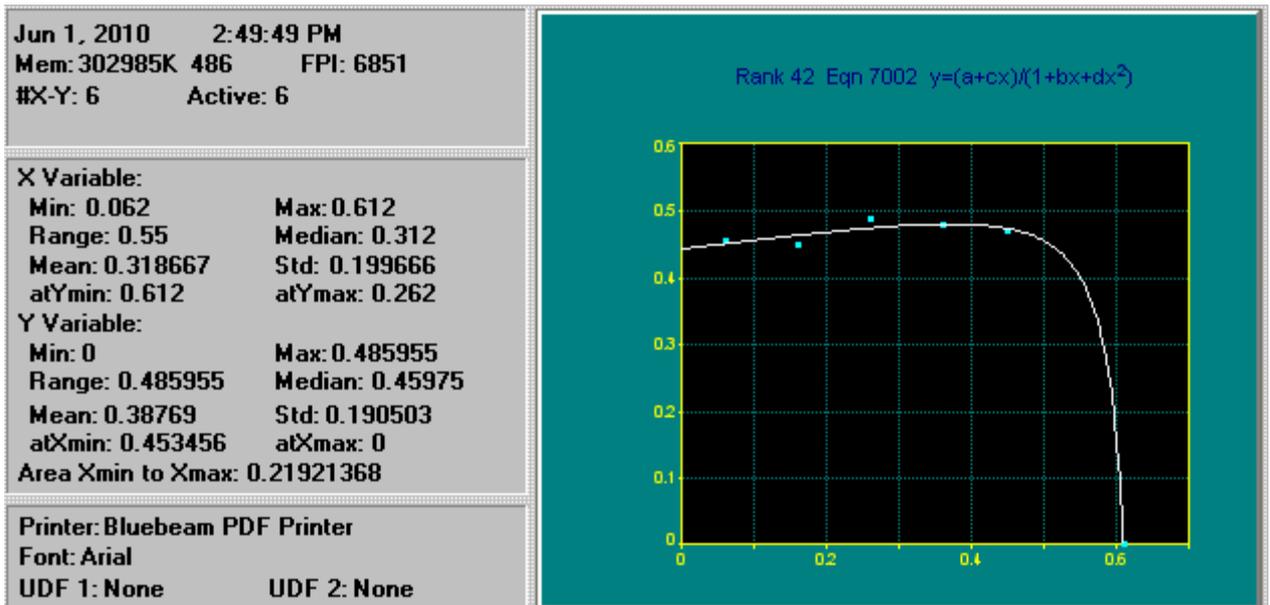


Gráfico- Medição da área 02 do canal de adução através do molinete para comparação com método do micromolinete

Medição de vazão no canal de adução utilizando o micromolinete hidrométrico

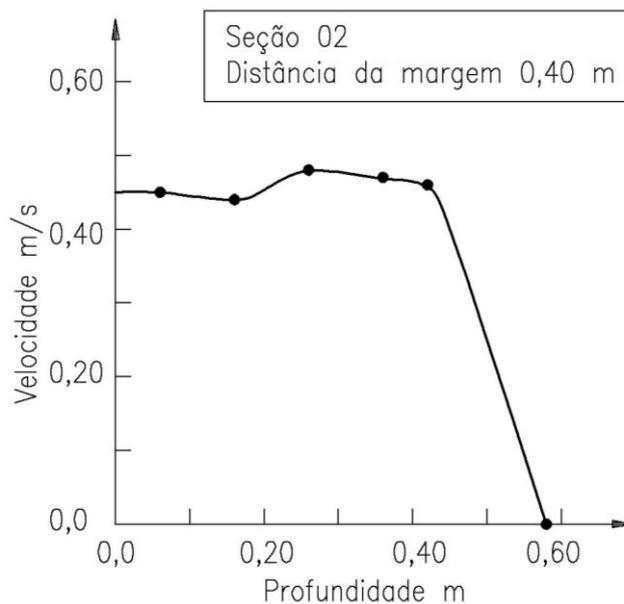


Gráfico- Medição da área 02 do canal de adução através do molinete hidrométrico para comparação com método do micromolinete utilizando o software AutoCAD.

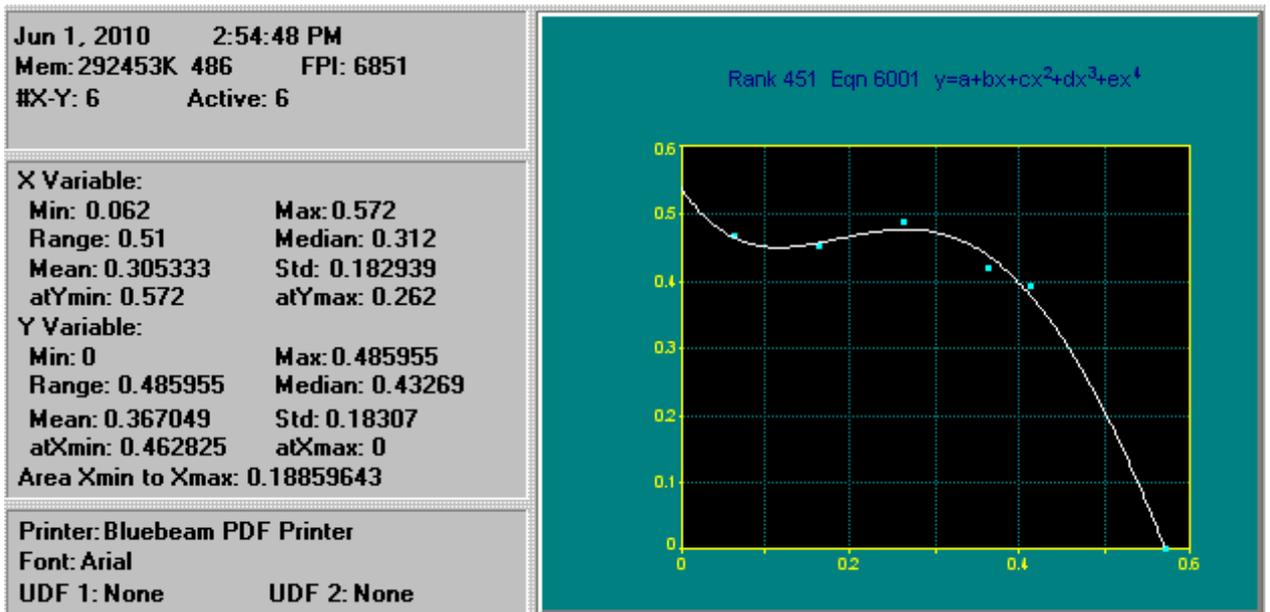


Gráfico- Medição da área 03 do canal de adução através do molinete para comparação com método do micromolinete

Medição de vazão no canal de adução utilizando o micromolinete hidrométrico

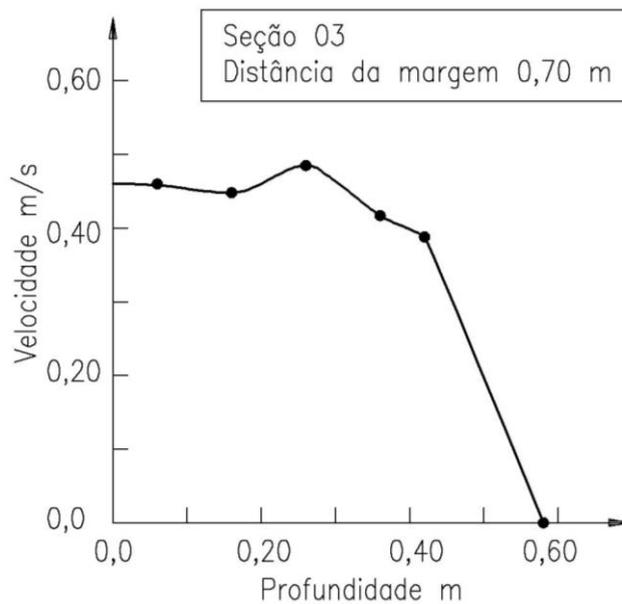


Gráfico- Medição da área 03 do canal de adução através do molinete hidrométrico para comparação com método do micromolinete utilizando o software AutoCAD.

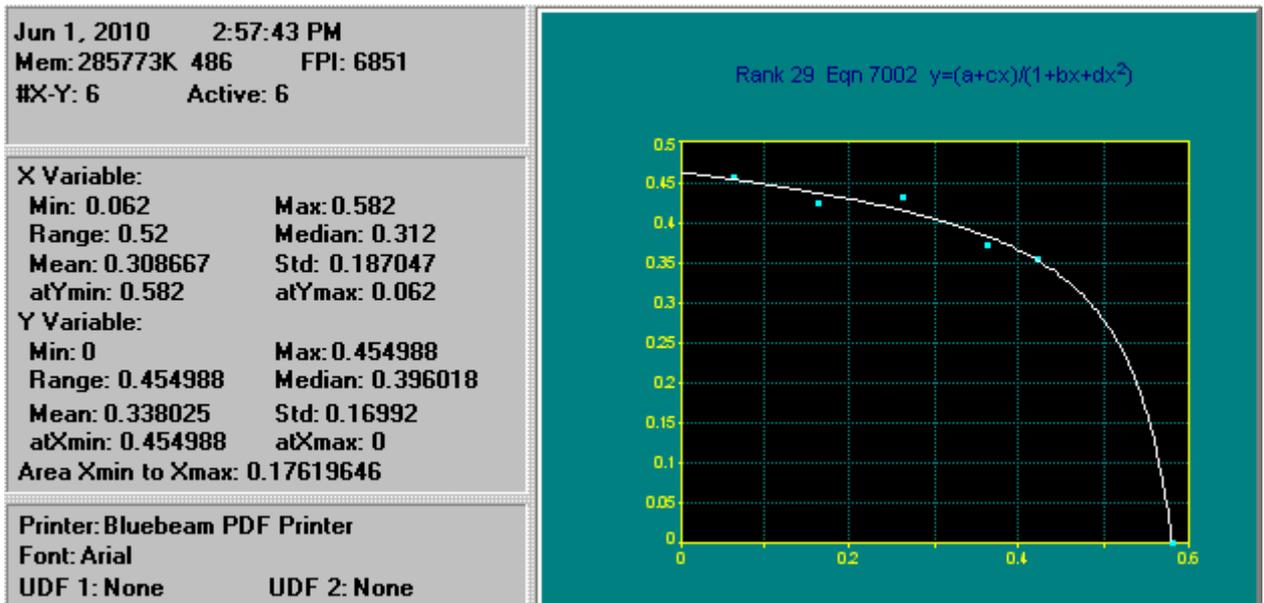


Gráfico- Medição da área 04 do canal de adução através do molinete para comparação com método do micromolinete

Medição de vazão no canal de adução utilizando o micromolinete hidrométrico

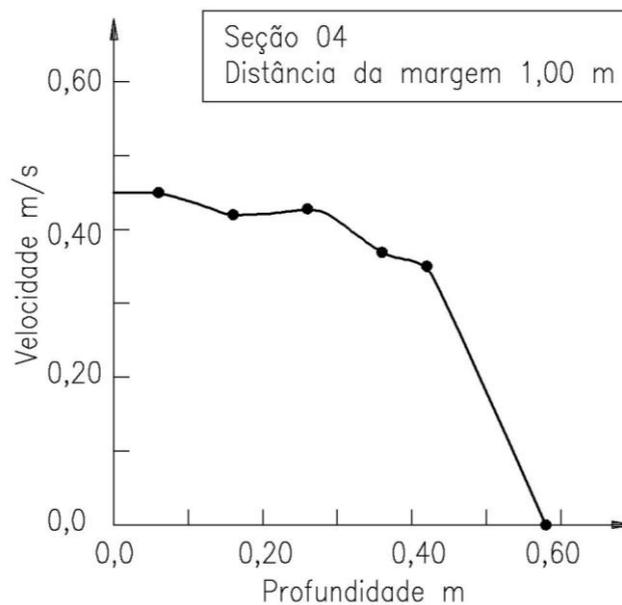


Gráfico- Medição da área 04 do canal de adução através do molinete hidrométrico para comparação com método do micromolinete utilizando o software AutoCAD.

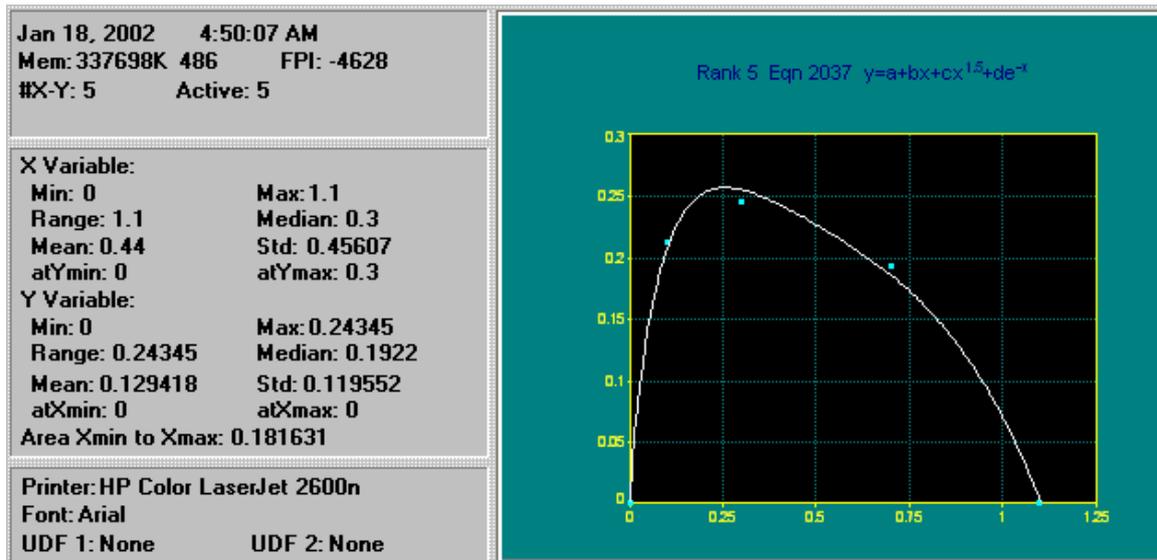


FIGURA - Medição da vazão no canal de adução utilizando o software Table-Curve com o molinete hidrométrico.

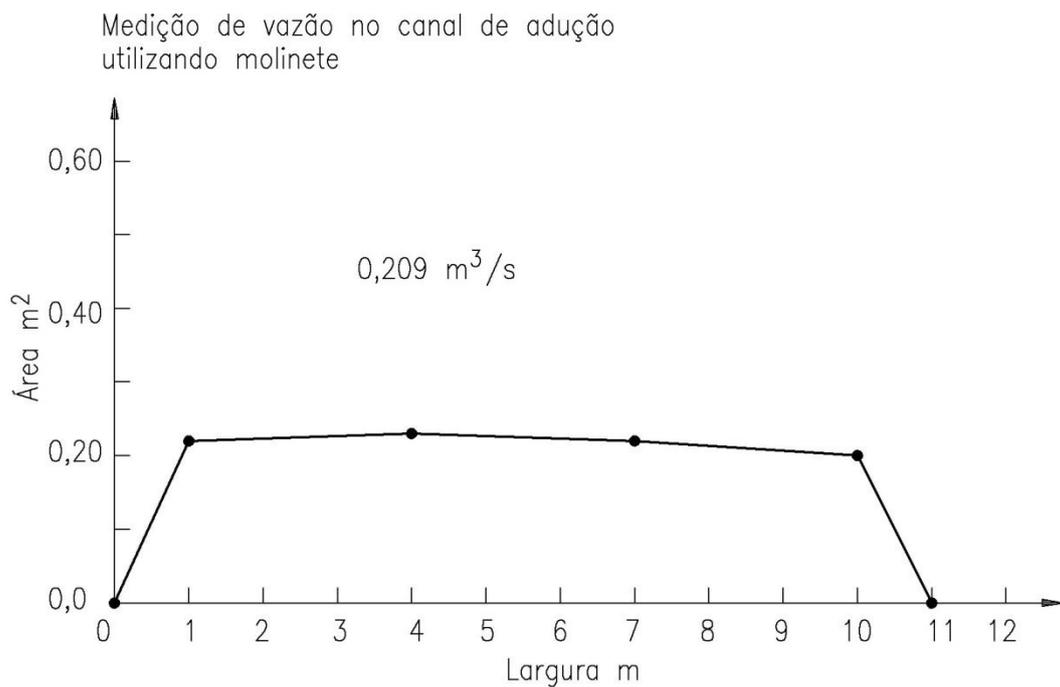


FIGURA- Medição da vazão no canal de adução utilizando o software AutoCAD com o molinete hidrométrico.

## ANEXO E- Características dos instrumentos utilizados nos ensaios

### ➤ ENSAIO DE PERDA DE CARGA

TABELA - Dados dos transdutores utilizados.

Transdutor 01 (Depois da válvula)	Transdutor 02 (Antes da válvula)	Transdutor 03 (Antes da válvula)
Marca: Gulton.	Marca: Gulton.	Marca: Gulton.
Modelo: GTP 1000.	Modelo: GTP 1000.	Modelo: GTP 1000.
Alimentação: 12 a 36 Vcc.	Alimentação: 12 a 36 Vcc.	Alimentação: 12 a 36 Vcc.
Saída: 04 a 20 mA.	Saída: 04 a 20 mA.	Saída: 04 a 20 mA.
Classe: A2.	Classe: A2.	Classe: A2.
Faixa: 0 a 50 mCa.	Faixa: 0 a 50 mCa.	Faixa: 0 a 50 mCa.
Número de Série: 39722.	Número de Série: 4485.	Número de Série: 4487.

TABELA - DADOS DOS MANÔMETROS UTILIZADOS.

Manômetro de Bourbon 01 (Antes da válvula)	Manômetro de Bourbon 02 (Depois da válvula)	Manômetro de Bourbon 03 (Depois da válvula)
Marca: Homis Indústria Brasileira.	Marca: Homis Indústria Brasileira.	Marca: Homis Indústria Brasileira.
Faixa: 0 a 80 mCa	Faixa: 0 a 100 mCa	Faixa: -10 a 10 mCa
Número de Série: C 19	Número de Série: 195862	Número de Série: 5

### ➤ ENSAIOS DE MEDIDAS DE VAZÃO NO RIO DO ONÇA

TABELA- Dados do Micromolinete e Molinete hidrométricos utilizado para as medições.

Tipo de Velocímetro	MICROMOLINETE
Marca	A-OTT
Hélice 01	VELOCIDADES até 01 (m/s) e ROTAÇÕES até (15 rps)
Número da Hélice	1-171685
Tipo de Velocímetro	MOLINETE
Marca	HIDROMEC
Número do corpo	2399
Número da Hélice	4-162
Diâmetro da Hélice (cm)	12,4

### ➤ ENSAIO DE MEDIDAS DE VAZÃO EM CONDUTO FECHADO COMPARANDO A VAZÃO DO PITOT-COLE COM O ULTRA-SOM POR TEMPO DE TRÂNSITO.

TABELA- Manômetro de coluna conectado ao Pitot-Cole.

Instrumento	Manômetro de coluna
Marca	Salcas
Modelo	MCU
Escala	0 - 1000
Número de série	9536

TABELA- Medidor de espessura ultrassônico.

Instrumento	Medidor de espessura
Marca	Homis
Modelo	TTP 100
Número de Série	076025

➤ **ENSAIO DE MEDIDAS DE VAZÃO NO CANAL DE ADUÇÃO E CANAL DOS PEIXES COMPARANDO OS MÉTODOS DO MICROMOLINETE E DO FLUTUADOR**

TABELA- Dados do Micromolinete de hélice 01 utilizado para o ensaio.

Tipo de Velocímetro	MICROMOLINETE
Marca	A-OTT
Hélice 01	VELOCIDADES até 01 (m/s) e ROTAÇÕES até (15 rps)
Número da Hélice	1-171685

➤ **ENSAIOS DE MEDIDAS DE VAZÃO PELO MÉTODO DO VERTEADOR COMPARADO COM O MÉTODO DO ULTRASSOM POR TEMPO DE TRÂNSITO.**

TABELA - Dados do Ultrassom utilizados para medir a velocidade e a vazão no conduto forçado da Bomba Funcionando como Turbina.

Aparelho	Medidor de vazão Ultrassônico Portátil por Tempo de Trânsito
Marca	Polysonics
Modelo	DCT 7088
Serial-número SOS - número	51852 2139207

TABELA - Medidor de espessura ultrassônico.

Instrumento	Medidor de espessura
Marca	Homis
Modelo	TTP 100
Número de Série	076025
Hélice 01	VELOCIDADES até 01 (m/s) e ROTAÇÕES até (15 rps)
Número da Hélice	1-171685