

# **TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MISTURAS BENTONITA-ÁGUA EM CONDUTOS FORÇADOS**

**ALBERTO CARLOS DE MELO LIMA**

**Orientador: Prof. Dr. FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração em Hidráulica e Saneamento.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100035716



São Carlos

Estado de São Paulo

Setembro, 1996.

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Dissertação defendida e aprovada em 11-10-1996  
pela Comissão Julgadora:



---

Prof. Doutor **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **RODRIGO DE MELO PORTO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **JOSÉ TEIXEIRA FREIRE**  
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



---

Prof. Dr. **EDUARDO CLETO PIRES**  
Coordenador da área - Hidráulica e Saneamento



---

Prof. Dr. **JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico

Aos meus pais,

Roque e Miracy

À minha espôsa

Odilene

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry, pela orientação, compreensão e amizade a mim dedicado durante todas as fases deste trabalho, sem os quais não seria possível realizá-lo.

À CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, e FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pela bolsa de estudo concedida.

Ao Prof. Dr. Woodrow N. L. Roma, pelos equipamentos e técnicos do Laboratório de Fenômenos de Transporte da EESC-USP.

À Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria do Carmo Calijuri, pela autorização do uso dos equipamentos e Laboratório de Química do CHREA.

Ao Prof. Dr. Dante Contin Neto pela doação da bentonita em pó.

Ao Prof. Dr. José Teixeira Freire, do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, pelo auxílio nas propriedades físicas da bentonita.

Ao Prof. Dr. Orêncio do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, pela ajuda na determinação da granulometria da bentonita e da areia.

Ao Prof. Dr. Liren-Yu, pela amizade e colaboração na aquisição de material bibliográfico.

Ao Prof. Dr. Faria da área de materiais do IFSC pelos equipamentos e técnicos do laboratório de materiais avançados.

Aos técnicos Manoel Roncon e Geraldo Frigo pela ajuda na determinação do tamanho das partículas de bentonita.

Ao Sr. Osni Aparecido Rizato, técnico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do CHREA, USP, pela amizade e auxílio nas adaptações feitas na instação-piloto.

Aos funcionários da Secretaria do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC-USP, pela ajuda prestada , quando das minhas solicitações, com afabilidade.

Um agradecimento especial dedico ao amigo Julio Satto, que colaborou e ajudou-me muito na realização deste trabalho.

E finalmente, aos meus amigos, Marcelo Nakaema, Alan Cavalcanti, Felipe Ordoñez, Eveline Queirós, Sergio Ma, Ana Luiza e a todos com os quais tive uma das melhores fases da minha vida, e nunca esquecerei, nosso muito obrigado.

## SUMÁRIO

	Págs.
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - OBJETIVOS .....	9
3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 - Aspectos Reológicos .....	15
3.1.1 - Fluidos não-Newtonianos Independentes do Tempo ..	16
3.1.2 - Fluidos não-Newtonianos Dependentes do Tempo.....	18
3.1.3 - Fluidos não-Newtonianos Viscoelásticos .....	18
3.2 - A Bentonita .....	19
3.3 - escoamento Turbulento de Suspensões não-Newtonianas:	
Perfis de Velocidade e Fator de Atrito .....	22
3.4 - Medições de Velocidade Pontuais .....	35
4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
4.1 - Reservatório Abastecedor.....	39
4.2 - Reservatório Gravimétrico.....	41
4.3 - Motor - Bomba.....	41
4.4 - Tubulações.....	41
4.5 - Medidores .....	42

4.6 - Outros Aparelhos e Equipamentos Úteis na Obtenção dos Dados.....	43
4.7 - Preparação do Fluido não-Newtoniano .....	43
4.8 - Ensaios.....	44
4.8.1 - Procedimento Experimental.....	45
4.8.1.1 - Medição Direta do Tamanho da Partícula ....	45
4.8.1.2 - Picnometria a Hélio .....	48
4.8.1.3 - Vazão.....	48
4.8.1.4 - Perda de Carga .....	49
4.8.1.5 - Perfis de Velocidade.....	50
4.8.1.6 - Reologia.....	50
4.8.1.7 - Massa Específica.....	51
5 - RESULTADOS OBTIDOS.....	53
5.1 - Reologia.....	53
5.2 - Massa Específica.....	66
5.3 - Viscosidade Cinemática .....	68
5.4 - Perda de Carga.....	70
5.5 - Perfis de Velocidade .....	77
6 - CONCLUSÃO.....	87
7 - SUGESTÃO .....	89

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	90
9 - APÊNDICE A.....	95
10 - APÊNDICE B.....	96
11 - APÊNDICE C .....	99
11.1 - Fluido: Água.....	99
11.2 - Fluido: Bentonita-Água a 2% de Concentração em Peso...	103
11.3 - Fluido: Bentonita-Água a 3% de Concentração em Peso...	107
11.4 - Fluido: Bentonita-Água a 4% de Concentração em Peso...	111
11.5 - Fluido: Bentonita-Areia-Água (Concentração de 3% de Bentonita e 0,75% de Areia em Peso).....	115
11.6 - Fluido: Bentonita-Areia-Água (Concentração de 3% de Bentonita e 1,5% de Areia em Peso).....	119



## TABELAS

Tabs.	Pags.
Tab.1 - Exemplos e aplicação do transporte de misturas nas engenharias .....	1
Tab.2 - Modelos reológicos mais comuns para fluidos viscosos.....	21
Tab.3 - Equações para o coeficiente de atrito no escoamento turbulento de fluidos que obedecem a lei de potência.....	32
Tab.4 - Tamanho médio da bentonita em pó .....	46
Tab.5 - Parâmetros reológicos do modelo de Herschell-Bulkley.....	54
Tab.5a - Parâmetros reológicos do modelo de Bingham.....	55
Tab.6 - Equações reológicas da viscosidade aparente ( $\eta$ ) em função da temperatura T ( $^{\circ}$ C) para concentrações (%) constantes.....	63
Tab.7 - Equações para a massa específica, $\rho_{mistura}$ em função da temperatura, T ( $^{\circ}$ C).....	67
Tab.8 - Equações obtidas para a viscosidade cinemática ( $\nu$ ) em função da temperatura T ( $^{\circ}$ C) para concentrações constantes da bentonita.....	69

## FIGURAS

Figs.	Pags.
Fig. 1 - escoamento saltitante com camada estacionária no fundo.....	13
Fig.2 - escoamento saltitante .....	13
Fig.3 - escoamento heterogêneo .....	13
Fig.4 - escoamento homogêneo .....	13
Fig.5 - Classificação do escoamento de misturas sólido-líquido .....	14
Fig.6 - Classificação de misturas não-sedimentáveis e de baixas sedimentação.....	15
Fig.7 - Diagramas reológicos dos fluidos conhecidos .....	19
Fig.8 - Representação esquemática da instalação-piloto .....	38
Fig.9 - Vista microscópica da amostra de bentonita em pó (120X).....	47
Fig.10 - Vista microscópica da amostra de bentonita em pó (500X).....	47
Fig.11 - Curva de calibração do picnômetro de 400 ml em função da temperatura.....	52
Fig.12 - Reograma da mistura de bentonita e água a 2% .....	57
Fig.13 - Idem, mistura de bentonita e água a 3%.....	57
Fig.14 - Idem, mistura de bentonita e água a 4%.....	58
Fig.15 - Idem, mistura de bentonita e água a 5%.....	58

Fig.16 - Idem, mistura de bentonita e água a 6%.....	59
Fig.17 - Curva da viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade da mistura de bentonita e água a 2%.....	60
Fig.18 - Idem, para mistura de bentonita e água a 3% .....	61
Fig.19 - Idem, para mistura de bentonita e água a 4% .....	61
Fig.20 - Idem, para mistura de bentonita e água a 5% .....	62
Fig.21 - Idem, para mistura de bentonita e água a 6% .....	62
Fig.22 - Viscosidade aparente em função da concentração para misturas de bentonita e água em temperaturas constantes.....	65
Fig.23 - Viscosidade aparente da mistura de bentonita e água em função da temperatura, para concentrações constantes.....	65
Fig.24 - Massa específica da mistura de bentonita e água em função da temperatura para concentrações constantes .....	66
Fig.25 - Viscosidade cinemática ( $\nu$ ) da mistura de bentonita e água em função da temperatura $T(^{\circ}\text{C})$ para concentrações constantes.....	68
Fig.26 - Coeficiente de atrito ( $f$ ) em função do número de Reynol- ds ( $Re$ ) para a água. Tubo de PRFV. $D= 50$ mm.....	71
Fig.27 - Idem, $D=75$ mm .....	71

Fig.28 - Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizado ( $Re^*$ ). Mistura de bentonita e água a 2%.....	72
Fig.29 - Idem, mistura de bentonita e água a 3%.....	72
Fig.30 - Idem, mistura de bentonita e água a 4%.....	73
Fig.31 - Idem, mistura de bentonita e água a 5%.....	73
Fig.32 - Idem, mistura de bentonita-água 3% e areia 0,75%.....	74
Fig.33 - Idem, mistura de bentonita-água 3% e areia 1,5%.....	74
Fig.34 - Perfis de velocidade experimentais para a água, $D=75\text{mm}$ .....	79
Fig.35 - Idem, mistura de bentonita e água a 2%.....	80
Fig.36 - Idem, mistura de bentonita e água a 3%.....	80
Fig.37 - Idem, mistura de bentonita e água a 4%.....	81
Fig.38 - Idem, mistura de bentonita e água a 3% e areia a 0,75%.....	81
Fig.39 - Idem, mistura de bentonita e água a 3% e areia a 1,5%.....	82
Fig.40 - Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela eq. de Brodkey (1961). $V \approx 2,70 \text{ m/s}$ .....	82
Fig.41 - Idem, $V \approx 3,80 \text{ m/s}$ .....	83
Fig.42 - Idem, eq. de Brodkey et al. (1961), mistura de bentonita-areia e água.....	83
Fig.43 - Idem, eq. de Bogue e Metzner (1963), $V=2,70 \text{ m/s}$ .....	84

Fig.44 - Idem,  $V=3,80$  m/s.....84

Fig.45 - Idem, mistura de bentonita-areia e água.....85

**FOTOS**

Fotos	Págs.
Foto 1 - Reservatórios abastecedor e gravimético, com revestimentos de lâ de rocha e sistema de retôrno e agitação da mistura .....	40
Foto 2 - Desviador de escoamento, instalado na parte superior da estrutura que suporta os reservatórios abastecedor/gravimétrico.....	42

## SÍMBOLOS

$C(\xi, f)$	- Fator de correção empírico da eq. 07.
$D$	-Diâmetro do tubo.
$dv/dy$	-Gradiente de velocidade ou taxa de deformação.
$f$	-Coeficiente de atrito.
$I(n, Re^*)$	-Variável quantitativa.
$K$	-Índice de consistência dos fluidos que obedecem a lei de potências.
$K_{hb}$	-Índice de consistência de Herschell-Bulkley.
$L$	-Distância entre duas tomadas de pressão no tubo.
$M$	-Função das propriedades das paredes do tubo e da turbulência na eq. 09.
$m$	-Constante maior do que 2
$m_{bentonita}$	-Massa da bentonita.
$n$	-Parâmetro reológico onde é expoente na relação entre viscosidade e gradiente de velocidade.
$n_{hb}$	-Índice de comportamento de Herschell-Bulkley.
$P_{lido}$	-Peso lido na balança.
$P_{corrigido}$	-Peso corrigido.
$Q_{mistura}$	-Vazão em massa da mistura
$R$	-Raio do tubo.
$y$	-Distância da parede ao centro da tubulação.
$R^2$	-Coeficiente de determinação.
$Re^*$	-Número de Reynolds generalizado.
$r$	-Distância do centro da tubulação ao limite da superfície da subcamada viscosa ( $r = 0,95.R$ ).

$s$	-Adimensional da eq. 03.
$T$	-Temperatura ( $^{\circ} C$ )
$U$	-Velocidade média em um ponto.
$U_{\max}$	-Velocidade máxima do escoamento.
$u_*$	-Velocidade de atrito.
$u^+$	-Velocidade adimensionalizada.
$u^* , u^{**}$	-1ª e 2ª derivadas da velocidade em relação ao raio.
$V_{\text{mistura}}$	-Volume da mistura de benonita e água.
$V_{\text{picnômetro}}$	-Volume do picnômetro
$y^+$	- Adimensional na eq. 07.
$y_o^+$	- Adimensional na eq. 05.
$\alpha$	-Constante da eq.12.
$\beta$	-Constante da eq.14.
$\delta$	-Altura da subcamada viscosa.
$\Delta P$	-Desnível entre as colunas de mercúrio do manômetro.
$\varepsilon$	-Rugosidade absoluta.
$\eta$	-Viscosidade aparente.
$\kappa$	-Constante de von-Kármán.
$\mu$	-Viscosidade plástica de Bingham.
$\mu_{\text{abs}}$	-Viscosidade absoluta.
$\mu_c$	-Viscosidade plástica de Casson.
$\nu$	-Viscosidade cinemática.
$\rho$	-Massa específica do fluido.
$\rho_{\text{água}}$	-Massa específica da água.
$\rho_{\text{mistura}}$	-Massa específica da mistura de bentonita e água.
$\xi$	= $y/R$ - Distância radial.



$\tau$	-Tensão de cisalhamento.
$\tau_c$	-Tensão cisalhante inicial de Casson.
$\tau_{hb}$	-Tensão de cisalhamento inicial de Herschell-Bulkley.
$\tau_o$	-Tensão de cisalhamento inicial.
$\tau_w$	-Tensão de cisalhamento na parede.

## RESUMO

A argila bentonítica é amplamente utilizada em transporte de sólidos produzidos durante perfuração de poços. O presente trabalho teve por objetivo estudar o escoamento de misturas bentonita-água e determinar suas propriedades reológicas e parâmetros hidráulicos úteis nos projetos de instalações de recalque de misturas sólido-liquido.

Foi montado um circuito fechado de tubulações para estudar dados de perda de carga e perfis de velocidade. Realizaram-se ensaios com misturas bentonita-água sob várias concentrações, algumas transportando areia.

Observaram-se que a reologia da mistura bentonita-água é melhor descrita pela formulação de Herschell-Bulkley para fluidos não-Newtonianos. O coeficiente de atrito para descrever a perda de carga da mistura bentonita-água observada em tubulações no laboratório coloca-se entre as previsões de Tomita (1959) e Szilas et al. (1981). A variação da velocidade da mistura na seção transversal do tubo é melhor aproximada pela equação de Bogue-Metzner (1963).

## ABSTRACT

The bentonite clay is extensively used in transport of solids produced during in water well drilling. This research is aimed at studying the flow of bentonite clay-water mixture through the determination of its rheological properties and its hydraulic parameters useful in the design of pumping installations. A closed pipeline circuit was set up in the laboratory to observe head-loss and velocity profiles. Flow experiments were conducted with bentonite-water mixtures at various concentrations, some transporting sand. It was observed that the rheology of bentonite-water mixture is described well by the Herschell-Bulkley formulation for non-Newtonian fluids. Friction factors for describing the head-loss of the mixtures observed experimentally in the pipelines lie between the prediction of Tomita (1959) and Szilas et al. (1981). The variation of mixture velocity in the cross-section of the pipes is approximated closely by the Bogue-Metzner (1963) model.

## 1 - INTRODUÇÃO

Em diversos processos industriais, utilizam-se condutos forçados para o transporte hidráulico de misturas de lamas, fluidos de perfuração, pastas, concreto e polímeros. Estes sistemas semelhantes a oleodutos, estão recebendo atualmente maior atenção, devido aos menores custos que apresentam a médio e longo prazos do que outros sistemas de transportes.

Como ilustração da importância do escoamento sólido-líquido e seu campo de aplicação, a tabela 1 mostra sua diversidade e contribuição às engenharias civil, mecânica, química e de minas.

Tabela 1: Exemplos e aplicação do transporte de misturas nas engenharias (Zandi, I., 1971).

<b>CAMPO</b>	<b>EXEMPLOS</b>	<b>SISTEMA DE ESCOAMENTO</b>
Transporte de água	Transporte de carvão, minério, areia, argila, cimento, peixe, cinzas, madeira cortada, etc.	Escoamento através de canais e tubos.
Processos Industriais	Tinta, polpa de papel, resfriamento de reatores nucleares, propelentes de combustível sólido, etc.	Escoamento através de tubos e condutos forçados.
Construção e Navegação	Dragagem e aterro	Escoamento através de tubos

Tabela 1: Continuação

<b>CAMPO</b>	<b>EXEMPLOS</b>	<b>SISTEMA DE ESCOAMENTO</b>
Conservação e Recursos Hídricos	Erosão do Solo e Sedimentação	Escoamento através de canais
Saneamento	Sedimentação, Lodo de Esgoto, Coleta de Resíduos Sólidos.	Escoamento através de canais e tubos.

Dada essa diversidade, tem o transporte hidráulico inúmeras vantagens em relação a outros modos de transporte, como por exemplo:

- Exige pouca mão-de-obra na operação e manutenção da linha.
- Pode-se ter todo o conjunto automatizado, sem depender da ação humana.
- Ocupa pouco espaço no solo
- Não depende das condições climáticas para operar.
- Não polui o meio ambiente.
- Pode vencer acidentes geográficos inacessíveis ao transporte rodoviário e ferroviário.
- Usa energia elétrica para a sua operação.

Como desvantagens:

- Possui custo inicial muito alto
- Há restrições para determinados tipos de sedimentos em que não podem ser transportados devido as condições fixas das instalações.

- Haverá parada total do sistema, se houver acidente em trecho de linha.

- Requer muita água para sua operação.

**WASP et al. (1971)**, enfatizaram que o conhecimento da perda de carga de uma mistura, que apesar de ser importante é somente uma pequena parte das informações necessárias para o desenvolvimento de um projeto de sistema de transporte hidráulico e apresentaram um resumo das principais decisões que devem ser tomadas para obter-se um sistema de transporte de misturas bem-sucedido. Segue-se abaixo (Wasp et al. 1971), a lista de informações relevantes:

## **1 - Processo**

### **A) Hidráulica**

1-Seleção do fluido carreador (normalmente é a água).

2-Seleção do tamanho ótimo da partícula e concentração de sólidos.

3-Determinação da velocidade mínima de operação como uma função do diâmetro.

4-Determinação da perda de pressão como função do diâmetro e da velocidade e a rugosidade.

### **B) Corrosão-Erosão**

1-Estabelecer a vida útil da tubulação (normalmente de 20 a 50 anos).

2-Escolha do inibidor e/ou controle do pH e oxigênio.

3-Seleção do tipo de metal.

- a) Em função da velocidade.
- b) Em função do tamanho da partícula.

### C) Operação-Estabilidade

- 1-Estabelecer a necessidade e suscetibilidade de quando iniciar e parar o processo de bombeamento.
- 2-Selecionar a máxima inclinação permissível da tubulação.

### D) Degradação da partícula

- 1-Estabelecer os efeitos do bombeamento no tamanho da partícula (normalmente nenhum).

## 2 - Considerações Mecânicas

### A) Mecânica

- 1-Número e locação das estações de bombeamento.
- 2-Seleção da bomba (usualmente de deslocamento positivo).
- 3-Seleção do acionador.
- 4-Contrução da tubulação (acima do solo ou enterrado).
- 5-Controle por automatização.
  - a) Unidade de automação.
  - b) Sincronização das estações de bombeamento com deslocamento positivo.
- 6-Projetos juntos das estações de bombas de deslocamento positivo para controle da pulsação e vibração.

### **3 - Fatores Econômicos**

- A) Investimento.
- B) Custo operacional.
- C) Manutenção das bombas.
- D) Custo dos inibidores.
- E) Otimização dos custos dos tubos e energia das bombas.

### **4 - Operacional**

- 1- Seleção do modo de operação e procedimentos de emergência.
- 2- Técnicas para iniciar e interromper o bombeamento.
- 3- Assistência em locais isolados.

Segundo **SANTANA et al. (1979)**, o Brasil já vem empregando esse sistema de transporte há algumas décadas, desde que pôs em operação em 1977, o maior mineroduto conhecido, transportando 12 milhões de toneladas/ano de minério de ferro a uma distância de 400 Km em tubulações de 20 polegadas de diâmetro.

Como exemplo mais recente, cita-se o emprego pela Petrobrás de lama como fluido para perfuração de poços de petróleo. Entre as aplicações do transporte de misturas em recursos hídricos, menciona-se o processo de perfuração de poços, que utiliza a lama como fluido transportador das partículas sólidas desagregadas do solo ou rocha durante a rotação da broca. Devido à viscosidade da lama e da velocidade com que circula pela broca, essas partículas sólidas são cobertas em toda



a sua superfície por lama e transportadas pelo escoamento na direção vertical e posteriormente separadas da lama no nível do solo.

Entretanto, apesar de já estar sendo utilizado há algum tempo, o estudo desse tipo de transporte é, essencialmente semi-empírico, pois envolvem além das propriedades dos líquidos e sólidos a interação entre ambos, como se verifica da extensa coletânea de publicações sobre o assunto. A aplicação das equações fundamentais para escoamento de misturas multifásicas torna-se complexa por vários fatores ausentes no caso de escoamento unifásico.

Segundo **GOVIER & AZIZ (1972)**, não há relações conhecidas para determinar os perfis de velocidade de sólidos, mas métodos de aplicabilidade limitada foram propostos para determinar o perfil de velocidade da água e de concentrações de misturas sólido-líquido.

A necessidade de controlar os processos que envolvem misturas sólido-líquido e de projetos que facilitem o manuseio das lamas tem favorecido o acúmulo de muitos dados experimentais, e, em torno destes, facilitado a desenvolver correlações empíricas proveitosas ao assunto. Mas, em vista das incertezas envolvidas buscam-se em instalações-piloto, mais experimentos, especialmente no que diz respeito à distribuição dos perfis de velocidades, onde sua determinação é fundamental nas reduções dos custos de energia para bombeamento determinados pela sua perda de carga distribuída.

Visto isso, o presente trabalho almejou ampliar os conhecimentos sobre o escoamento bifásico em condutos forçados utilizando bentonita. Este material, que é uma argila, foi escolhido como material de ensaio por ter grande uso na indústria de minas, como fluido de perfuração de poços, como foi dito anteriormente e também por possuir a característica de alterar suas propriedades reológicas com a mudança da concentração da mistura de bentonita-água, podendo ser Newtoniana ou não-Newtoniana (Cheng, 1965).

Por este fato, fez-se uma revisão bibliográfica no capítulo 3, abordando teóricamente o assunto sobre a classificação dos diversos regimes do escoamento bifásico de misturas, bem como sobre reologia. Continuando no capítulo 3, apresentam-se as formulações existentes para o perfil de velocidades e fator de atrito. Também destacam-se alguns trabalhos que tratam de medidores de velocidades pontuais de misturas com concentração elevada, com o intuito de mostrar a importância desses medidores para o estudo do escoamento de fluidos não-Newtonianos.

Com relação aos perfis de velocidade é sabido que, quanto mais o perfil de velocidade de uma mistura é não-Newtoniana, mais o perfil de velocidades achata-se em seu núcleo central e tem, nessa região, seu gradiente de velocidades próximo de zero (Bloodworth et al., 1992). Por isso torna-se essencial conhecer os perfis de velocidades para que se possa caracterizar a adequação do fluido para o transporte das misturas, pois quanto mais próximo de zero chegar o gradiente de velocidade, melhor. Outra razão é a prática, segundo Nakae (1994), do conceito moderno de **energy saving**, de tendência mundial, na economia de

energia para bombear, porquê a perda de carga seria menor, se o gradiente de velocidade é baixo.

No capítulo 4, apresentam-se a instalação-piloto de ensaios, seus componentes e os procedimentos experimentais para a determinação das propriedades reológicas da mistura de bentonita-água e os instrumentos utilizados para esse fim, além dos métodos utilizados para as medidas hidráulicas.

No capítulo seguinte, faz-se uma análise dos resultados dos ensaios reológicos da mistura de bentonita-água e de bentonita-areia-água que mostram que o modelo de Herschell-Bulkley teve melhor desempenho para descrever o comportamento dessas misturas e principalmente para obtenção da viscosidade aparente.

## 2 - OBJETIVOS

A estrutura do escoamento turbulento transportando sedimentos em tubos, apesar de ser amplamente conhecida, apresenta aos pesquisadores um desafio no campo da mecânica dos fluidos. A formulação do problema de escoamento envolve parâmetros como forma e tamanho das partículas, natureza das paredes da tubulação, densidades e distribuição das partículas, que apresentam grande variabilidade (Darby,R.,1986). As diversas correlações conhecidas (Brodkey et al.,1961; Bogue e Metzner, 1963; Zandi e Rust, 1965; Szilas et al., 1981 e Swamee, 1993) para o perfil de velocidades e fator de atrito tem validade limitada quando são usadas em situações variadas e conduzem a resultados diversos quando da sua aplicação prática. Fazem-se necessários mais experimentos em laboratório visando obter maiores conhecimentos neste campo, visto que, o estudo do comportamento de misturas sólido-líquido em tubulações está assumindo grande importância na medida em que os recursos naturais para o fornecimento de energia tornam-se a cada dia mais caros e raros. Particularmente, necessitam-se informações sobre o comportamento dos perfis de velocidade em escoamentos turbulentos de misturas sólido-líquido para identificar dentre as correlações existentes, as mais confiáveis para aplicação.

Desta maneira, utilizou-se a bentonita como material de ensaio, por ser uma rocha constituída essencialmente por um argilo-mineral montmorilonítico (esmectítico) formado pela desvitrificação e subsequente alteração química de um material vítreo, de origem ígnea, usualmente um tufo ou cinza vulcânica, ácida de preferência (Ross e

Shanon ,1926; segundo Santos, 1975 ) que a torna útil quando aplicada nos diversos campos da engenharia.

A bentonita é utilizada na indústria de minas como fluido de arraste das partículas graúdas, como impermeabilizante de tanques e canais além de ser muito útil na construção de barreiras horizontais e verticais para escoamento de águas. Ela está recebendo atualmente, maior atenção também devido a sua potencialidade como absorvedor de mercúrio em tratamento de esgotos e metais pesados (Viraraghavan e Kapoor, 1994) e para dragagens em canais abertos, devido a sua propriedade específica de expandir-se (inchar) várias vezes o seu volume inicial se umedecida com água e formar géis tixotrópicos em meio aquoso em concentrações tão baixas como 2% (Santos, S.P, 1975, Darby, R., 1986). Com base nestas verificações, utilizou-se mistura de água e argila como fluido de ensaio, para avaliar melhor seu aproveitamento tanto na área hidráulica como de saneamento.

Visto isso, este trabalho tem como principal objetivo :

- 2.1. Verificar o comportamento reológico da lama de bentonita.
- 2.2. Realizar medidas de pressão ao longo das tubulações para concentrações diversas.
- 2.3. Determinar a distribuição de velocidades num tubo com água limpa , bentonita em pó e bentonita e sólidos para algumas concentrações.
- 2.4. Determinar os coeficientes de atrito em tubos em função do número de Reynolds.

2.5. Comparar os perfis de velocidade e o fator de atrito obtidos experimentalmente com os calculados pelas formulações disponíveis na literatura.

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura sobre o tema de escoamento bifásico é desenvolvida em três partes. Apresentam-se as diversas formas de classificações que podem ser encontradas para o escoamento bifásico e como essas classificações se manifestam com a mudança da velocidade do escoamento. No item seguinte focalizam-se aspectos reológicos para elucidação do comportamento da mistura de bentonita e colocam-se alguns conceitos básicos sobre o assunto. Posteriormente, discorre-se sobre trabalhos que tratam de fator de atrito e perfis de velocidade dentro de uma linha essencialmente semi-empírica e apresentam-se neste item os resultados dessas investigações.

Segundo **DORON & BARNEA (1996)**, uma das mais comuns classificações (Vocaldo & Charles, 1972; Parzonka et al, 1981) diz respeito a quatro regimes de escoamentos, que são: “escoamento homogêneo”, “escoamento heterogêneo e com deslize no fundo” e “escoamento saltitante e com camada estacionária”. Continuando **DORON & BARNEA (1996)**, relataram que Bain & Bonnington (1970) e Turian & Yuan (1977) também usaram em seu trabalho o termo “saltitação para referir-se ao escoamento que move-se no fundo. É apresentado nas figuras 1 a 4 um esquema destes tipos de escoamento.

Ainda segundo a revisão da literatura de **DORON & BARNEA (1996)**, quanto aos regimes de escoamentos, relataram que alguns investigadores usaram diferenciações bem grosseiras como por exemplo: Durand (1953) e Condolios & Chapus (1963) referiram-se a um

“escoamento sem deposição” e “escoamento com deposição”. Continuando, os autores afirmaram que Brown (1991) diferenciou entre um “regime de escoamento completamente segregado”, onde definiu segundo Doron & Barnea (1996) como sendo o regime onde todas as partículas estão presentes no fundo, mais um “regime de escoamento heterogêneo”, no qual incluiu um escoamento heterogêneo em suspensão e um no fundo.



Figura 1: Escoamento Saltitante com camada estacionária no fundo.

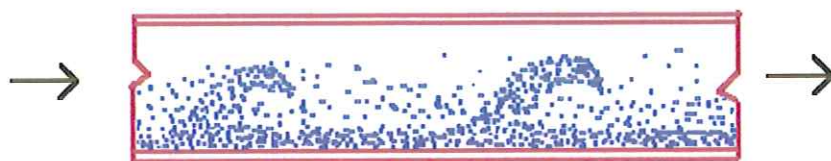


Figura 2: Escoamento Saltitante

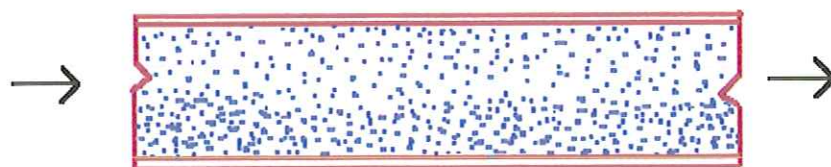


Figura 3: Escoamento Heterogêneo.

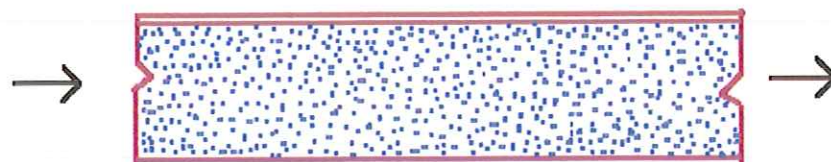


Figura 4: Escoamento Homogêneo



LAZARUS (1989), melhorou a classificação dos regimes de escoamento onde fez uma lista desses regimes mais refinadamente, que são: “camada estacionária”, “camada parcialmente estacionária”, “movimento da camada no fundo”, “escoamento heterogêneo”, “escoamento pseudo-homogêneo” e “escoamento homogêneo”, estes três últimos regimes são definidos como “escoamento completamente suspenso”. Esta classificação é mostrada nas figuras 5 e 6.

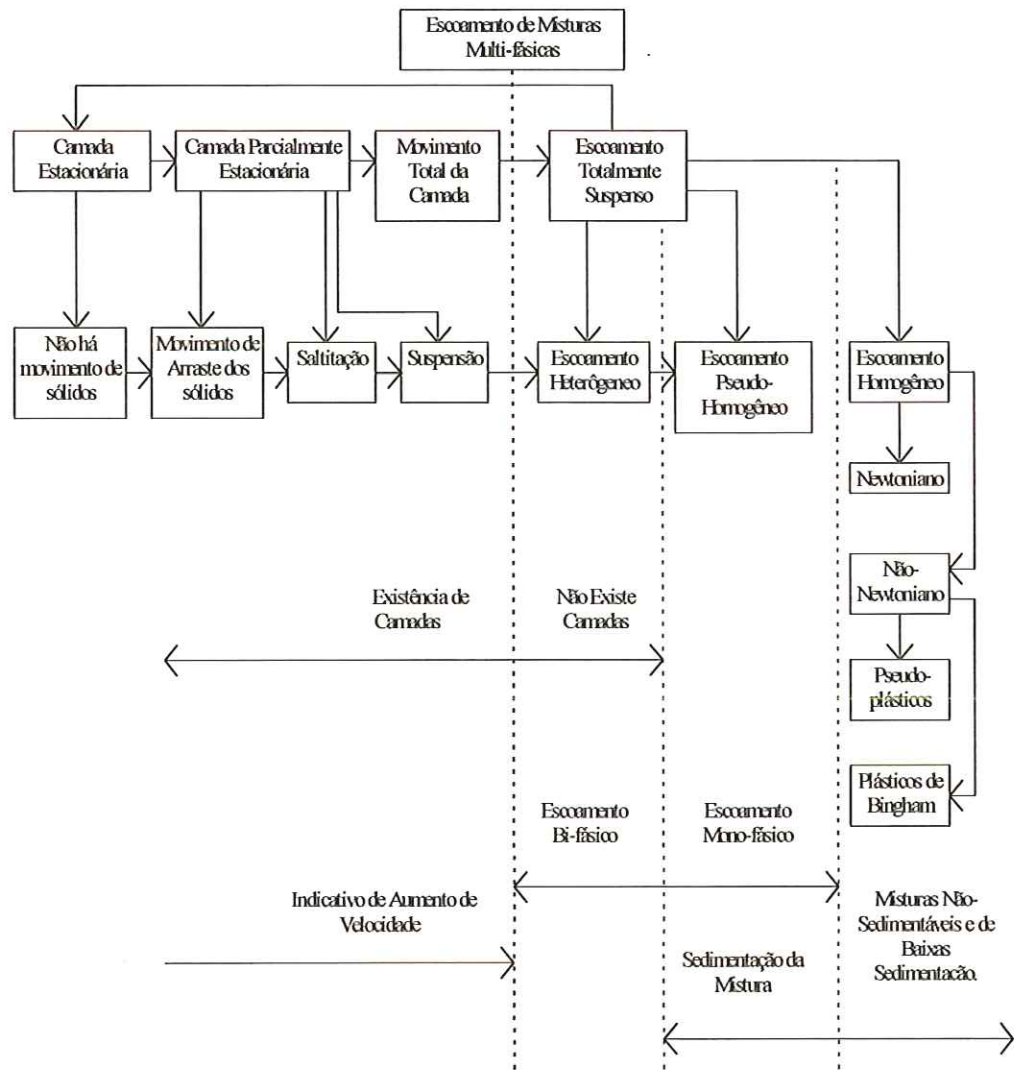


Figura 5: Classificação do escoamento de misturas sólido-líquido.

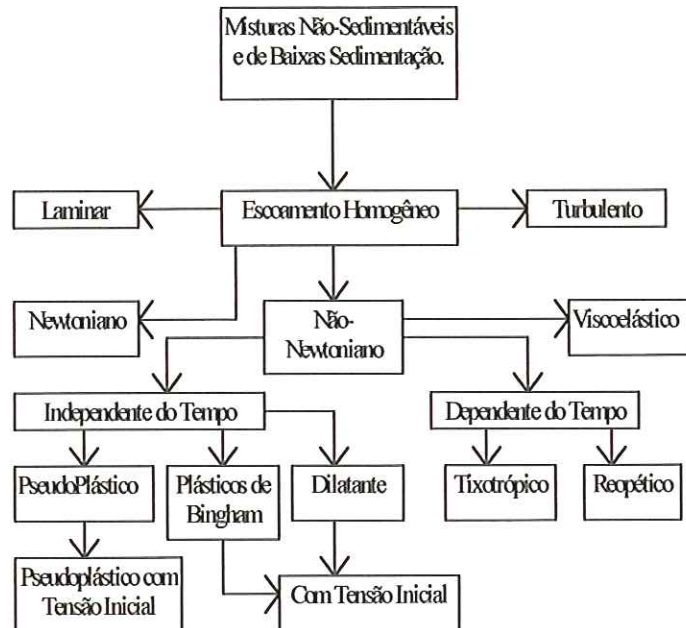


Figura 6: Classificação de misturas não-sedimentáveis e de baixas sedimentação.

### 3.1 - Aspectos Reológicos

Objetivando o detalhamento na literatura de metodologia a ser usada nesta pesquisa para a determinação do comportamento reológico da bentonita e de levantamento de dados. Este item apresenta uma abordagem teórica sobre os conceitos básicos de reologia.

O termo Reologia, foi proposto por **Bingham** em 1928; palavra esta de origem grega: *Rheo* = Fluir; *Logos* = Estudos. A reologia tem como finalidade prognosticar a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento num corpo, ou reciprocamente, prognosticar a deformação ou escoamento resultante da aplicação de um dado sistema de forças em um corpo (Manrich e Pessan, 1987).

Pela descrição geral dada por PERRY & CHILTON (1980), os fluidos não-Newtonianos são usualmente divididos em três classes gerais:

### 3.1.1 - Fluidos não-Newtonianos Independentes do Tempo

Aqueles cujas propriedades são independentes do tempo ou da duração do escoamento. Pertencem a esta classe os seguintes materiais:

#### *a) Plásticos de Bingham*

Estes fluidos diferem dos Newtonianos somente pelo fato da relação linear entre a tensão cisalhante e o gradiente de velocidades não passar pela origem, nestes fluidos uma tensão de cisalhamento inicial é necessária para que se tenha o início do escoamento. Como se observa na figura 7 no gráfico (b). Sua equação apresenta-se como:

$$\tau = \tau_o + \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad \text{Eq.(01)}$$

Onde;

$\tau$  = Tensão de cisalhamento.

$\tau_o$  = Tensão de cisalhamento inicial.

$\frac{dv}{dy}$  = Gradiente de velocidade.

$\mu$  = Viscosidade plástica de Bingham.

### ***b) Pseudoplásticos***

Estes materiais englobam a maior parte dos fluidos não-Newtonianos. Como soluções de polímeros, polímeros semi-fluidos, fluidos de perfuração e suspensões de polpa de papel ou de pigmentos. Nos gráficos (c-d) da figura 7 a tensão de cisalhamento contra o gradiente de velocidade dá uma curva de escoamento que pode ser uma reta quando representada em escalas logarítmicas e pode-se definir sua equação na forma de lei de potência :

$$\tau = K \left( -\frac{dv}{dy} \right)^n \quad n < 1 \quad \text{Eq.(02)}$$

Onde;

K= Índice de consistência.

n= Parâmetro reológico que determina o comportamento do escoamento.

### ***c) Dilatantes***

Estes materiais exibem comportamento inverso ao dos pseudoplásticos, neste a viscosidade aparente cresce com o gradiente de velocidade, como mostra os gráficos (c-d) da figura 7. Exemplos desse material são as suspensões de goma de amido ou de mica em água.

### 3.1.2 - Fluidos não-Newtonianos Dependentes do tempo

Nesta classe os materiais tem suas propriedades dependentes da duração do escoamento. Sua tensão de cisalhamento varia com a duração da aplicação do gradiente de velocidade. Dividem-se em:

#### *a) Fluidos Tixotrópicos*

Estes fluidos possuem uma estrutura cuja ruptura é função do tempo bem como do gradiente de velocidades ( $dv/dy$ ). Isto se deve ao fenômeno causado pela ocorrência simultânea da desestruturação e reestruturação de um sistema disperso como por exemplo a argila. Sua curva é mostrada no gráfico (e) da figura 7.

#### *b) Fluidos Reopéticos*

Estes materiais exibem comportamento inverso aos tixotrópicos, pois aumentam rapidamente de viscosidade com o aumento da tensão de cisalhamento. Estão representados no gráfico (f) da figura 7.

### 3.1.3 - Fluidos não-Newtonianos Viscoelásticos

Estes fluidos exibem uma recuperação elástica das deformações que ocorrem durante o escoamento. O maior grupo de fluidos desta classe é formado por líquidos poliméricos. No escoamento desses fluidos aparecem, além das tensões tangenciais usuais, tensões normais à direção do escoamento. Essas tensões normais dão origem a diversos fenômenos

não-usuais; por exemplo, o “efeito Weisemberg”, no qual o fluido tende a subir no eixo que gira no fluido. Seu diagrama é mostrado no gráfico (g) da figura 7.

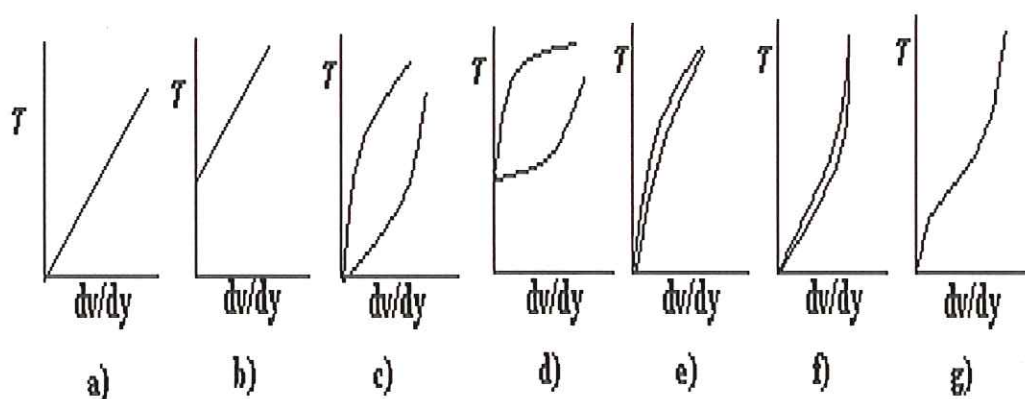


Figura 7: Diagramas reológicos dos fluidos conhecidos (Lazarus, 1989).

- a) Newtoniano
- b) Bingham
- c) Pseudoplástico / Dilatante
- d) Pseudoplástico com tensão inicial / Dilatante com tensão inicial.
- e) Tixotrópico
- f) Reopético
- g) Viscoelástico

### 3.2 - A Bentonita

Segundo SANTOS (1975), o nome bentonita foi utilizado pela 1ª vez em 1898 a uma argila plástica coloidal encontrada em camadas

cretáceas em Wyoming (EUA). No Brasil, mineradores, comerciantes e consumidores de argila costumam chamar “bentonita”, a qualquer argila montmorilonítica, o que segundo Santos (1975), provoca confusões.

**ZANDONADI (1967)**, estudou as argilas verdes de Sacramento (M.G), visando melhorar suas características para utilização como agente tixotrópico em fluidos de perfuração. Concluiu que os fatores mais importantes num fluido de perfuração de poços são a viscosidade e a tixotropia. E que as argilas típicas que podem ser usadas como agentes tixotrópicos de fluidos de perfuração de poços são as bentoníticas sódicas e atapulgitas. Sendo que as bentoníticas sódicas tem uso geral e as atapulgitas são usadas em perfurações de solos alcalinos e em perfurações através de água salgada.

**SILVA et al. (1988)**, verificaram a adequação do modelo de Bingham, Potência, Casson e Herschell-Bulkley ao escoamento dos fluidos à base de água e à base de óleo sob diferentes temperaturas e paralelamente, sob faixas de deformação preestabelecidas, confrontaram o comportamento detectado no simulador de superfície denominado de Sistema Hidráulico de Superfície (SHS) com o obtido no viscosímetro Fann VG 35A. A tabela 2 mostra as expressões propostas para os quatro modelos estudados por Silva et. al.(1988). Cada modelo é escrito em formas equivalentes para tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) ou viscosidade aparente ( $\eta$ ):  $\tau=f(dv/dy)$ ,  $\eta=f(dv/dy)$ .

Tabela 2 : Modelos reológicos mais comuns para fluidos viscosos. (Silva et.al. (1988)).

Modelo Reológico	Equação Reológica	Viscosidade Aparente ( $\eta$ )	Nomenclatura
Newton	$\tau = \mu_{\text{abs}} \cdot \frac{dv}{dy}$	$\eta = \mu_{\text{abs}}$	$\tau$ = Tensão Cisalhante $\mu_{\text{abs}}$ =Viscos.absoluta
Potência	$\tau = K \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^n$	$\eta = K \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^{n-1}$	K=Índice de Consistência n=Índice de Comportamento
Bingham	$\tau = \tau_o + \mu \cdot \frac{dv}{dy}$	$\eta = \mu + \tau_o \cdot \frac{1}{\frac{dv}{dy}}$	$\tau_o$ =Tensão Cisalhante Inicial $\mu$ =Viscos. plástica de Bingham
Casson	$\tau^{1/2} = \tau_c^{1/2} + \left( \mu_c \cdot \frac{dv}{dy} \right)^{1/2}$	$\eta = \left[ \left( \frac{\tau_c}{\frac{dv}{dy}} \right)^{1/2} + \mu_c^{1/2} \right]^2$	$\tau_c$ =Tensão Cisalhante inicial de Casson $\mu_c$ =Viscos.plástica de Casson
Herschell-Bulkley	$\tau = \tau_{\text{hb}} + \left( K_{\text{hb}} \cdot \frac{dv}{dy} \right)^{n_{\text{hb}}}$	$\eta = \frac{\tau_{\text{hb}}}{\frac{dv}{dy}} + \left( K_{\text{hb}} \cdot \frac{dv}{dy} \right)^{n_{\text{hb}}-1}$	$\tau_{\text{hb}}$ =Tensão Cisal. inicial de Herschell-Bulkley. $K_{\text{hb}}$ =Índice de Consist. de Herschell-Bulkley. $n_{\text{hb}}$ =Índice de comportamento de Herschell-Bulkley

Os autores concluíram que o modelo de Herschell-Bulkley mostrou-se mais adequado que os de Casson, Bingham e aquele na forma de potência, para todos os fluidos de perfuração ensaiados no viscosímetro



rotacional tipo Fann. Nos testes ensaiados no simulador SHS, a adequação dos modelos de Herschell-Bulkley, da Potência e de Casson, respectivamente.

Observaram que independentemente do tipo de lama (à base de óleo ou água) e do instrumento utilizado (Fann ou SHS), em 100% dos casos analisados, o modelo de Bingham foi o menos adequado para descrever o comportamento reológico dos fluidos de perfuração. A tensão cisalhante inicial do modelo de Bingham apresentou, segundo Silva et al.(1988), para todos os fluidos ensaiados, valores muito superiores aos obtidos pelas correlações de Casson e Herschell-Bulkley, confirmando a inadequação do modelo de Bingham em regiões de baixos gradientes de velocidade.

E finalizando, Silva et al.(1988) atentaram que os índices de comportamento dos fluidos ensaiados obtidos pelos modelos de potência e de Herschell-Bulkley, mostram que aqueles obtidos do primeiro modelo apresentaram em 70% dos casos, comportamento mais pseudoplástico, uma característica fortemente não-Newtoniana.

### **3.3 - Escoamento Turbulento de Suspensões não-Newtonianas:**

#### **Perfis de Velocidade e Fator de Atrito.**

Apresentam-se aqui diversos trabalhos constantes na literatura sobre formulações para o perfil de velocidades e fator de atrito. Dentro dessa linha de pesquisa essencialmente semi-empírica, mostram-se aqui os resultados dessas investigações.

**BRODKEY et al. (1961)**, obtiveram uma equação para o perfil de velocidades de fluidos não-Newtonianos em escoamentos turbulentos. Os autores enfatizaram que essa equação pode também ser desenvolvida das equações de Reynolds para escoamento turbulento. Aplicaram o método semi-empírico desenvolvido por Pai (1953) para fluidos não-Newtonianos que seguem a lei de potência e supuseram que o perfil de velocidades pode ser representado por uma série de potência de três termos. A equação do perfil de velocidades encontrada após ter-se estudado as condições de contorno desses termos, é:

$$\frac{U}{U_{max}} = 1 + \left[ \frac{s-m}{m-(n+1)/2n} \right] \left( \frac{y}{R} \right)^{(n+1)/n} + \left[ \frac{(n+1)/2n-s}{m-(n+1)/2n} \right] \left( \frac{y}{R} \right)^{2m} \quad \text{Eq.(03)}$$

onde;

$$s = (\rho \cdot u_*^2 / K)^{1/n} \cdot (R / 2 \cdot U_{max}) = (y_o^+)^{1/n} / 2 \cdot u^+ \quad \text{Eq.(04)}$$

$$u_* = \sqrt{\tau_w / \rho} = \text{Velocidade de atrito.}$$

m = Constante maior do que 2.

y = Distância da parede a um ponto qualquer.

R = Raio do tubo.

U = Velocidade média em um ponto.

$U_{m\acute{a}x}$  = Velocidade máxima do escoamento.

$\tau_w$  = Tensão de cisalhamento nas paredes.

$\rho$  = Massa específica do fluido.

K = Índice de consistência do fluido

$$y_o^+ = R^n \cdot u_*^{2-n} \cdot \frac{\rho}{K} \quad \text{Eq.(05)}$$

$$u^+ = U_{max} / u_* \quad \text{Eq.(06)}$$

Os autores compararam a equação (03) com dados experimentais da literatura e concluíram que a equação é válida para fluidos que obedecem a lei de potência e determina a distribuição de velocidades em toda a seção transversal do tubo, mas ressaltam que ao combinar valores diferentes de  $m$  e  $u_{m\acute{a}x}$ , à mesma velocidade média, diferentes perfis de velocidade podem ser encontrados.

**BOGUE & METZNER (1963)**, desenvolveram um trabalho semi-empírico que objetivou a determinação dos perfis de velocidade de soluções aquosas de carbopol e suspensões aquosas de argila. Revisaram dados da literatura sobre perfis de velocidade de fluidos Newtonianos e sugeriram uma correção empírica à tradicional correlação dos perfis de velocidade dada por Nikuradse. Os autores encontraram esta correção empírica como uma função do fator de atrito,  $f$ , e do raio,  $R$ . Assumiram que a equação para fluidos Newtonianos corrigida pode ser usada para fluidos não-Newtonianos puramente viscosos, a semi-empírica relação entre fator de atrito e número de Reynolds sugerida pelos autores é dada como:

$$u^+ - C(\xi, f) = 5,57 \cdot \log(y^+)^{1/n} + I(n, Re^*) \quad \text{Eq.(07)}$$

$$C(\xi, f) = 0,05 \cdot \sqrt{2/f} \cdot \exp \frac{-(\xi - 0,8)^2}{0,15} \quad \text{Eq.(08)}$$

onde;

$C(\xi, f)$  = Fator de correção empírico.

$I(n, Re^*)$  = Variável quantitativa.

$\xi = y/R$  = Distância radial.

$f$  = Fator de atrito de Fanning.

$u = \frac{u_*}{\sqrt{f/2}}$  = Velocidade média do escoamento num tubo.

$Re^* = \frac{u^{2-n} \cdot (2R)^n \cdot \rho}{\frac{K}{8} \cdot \left(\frac{6n+2}{n}\right)^n}$  = Número de Reynolds de Metzner-Reed

(1955), ou número de Reynolds generalizado.

$(y^+)^{1/n} = \frac{y \cdot u_* \cdot \rho}{K}$

$u^+ = \frac{U}{V}$

Os autores concluíram a partir de seu trabalho que os perfis de velocidade em escoamentos turbulentos de fluidos não-Newtonianos puramente viscosos são essencialmente iguais aos dos fluidos Newtonianos quando estes fluidos estão a mesma velocidade média do escoamento e se forem restritos ao índice do escoamento ( $n$ ), na faixa de 1,0 (Newtoniano) à 0,45.

**EISSEMBERG & BOGUE (1964)**, obtiveram o perfil de velocidades e fator de atrito de fluidos não-Newtonianos em escoamentos turbulentos em tubos para suspensões aquosas diluídas e concentradas de tório, utilizando as formulações semi-empíricas dos fluidos Newtonianos e estimaram a viscosidade aparente dos fluidos considerando a tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação. Concluíram que para suspensões diluídas os perfis de velocidade seguem o modelo Newtoniano, enquanto que para suspensões concentradas os perfis acentuam-se tanto quanto os modelos não-Newtonianos.

ZANDI & RUST (1965), obtiveram o perfil de velocidades usando como material de experimento cinco suspensões que escoaram em tubulação horizontal. Estes autores desenvolveram uma formulação baseada no modelo de Oswald-deWaele, na lei de potência de fluidos plásticos Binghamianos e nas propriedades elásticos-viscosas de algumas dessas substâncias e compararam quantitativamente os resultados numéricos calculados com os dados experimentais de outros pesquisadores como (Shaver e Merrill, 1959, Dodge & Metzner, 1959, Bogue e Metzner, 1963, Wells, 1964 e Eissenberg & Bogue, 1964). O estudo mostrou que o modelo representava uma boa aproximação nos resultados para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.

A equação desenvolvida por Zandi & Rust (1965) para determinação do perfil de velocidades a partir dessas considerações é:

$$u \frac{u^*}{r} = \frac{\kappa (M \rho)^{1/2} \cdot u^2}{((\Delta P / 2L) \cdot r - M(-u)^n)^{1/2}} \quad \text{Eq.(09)}$$

onde;

$u^*$  ,  $u^{**}$  = 1ª e 2ª derivadas da velocidade em relação ao raio.

$\kappa$  = Constante de von-Kármán.

$(\Delta P / 2L) \cdot r$  = Componente do cisalhamento na direção transversal.

$M$  = Função das propriedades das paredes do tubo e da turbulência.

$r$  = Distância do centro da tubulação ao limite da superfície da subcamada viscosa ( $0,95 \cdot R$ ).

A equação (09) descreve os perfis de velocidade em escoamento turbulento de fluidos pseudoplásticos ou dilatantes, em tubos. Quando  $n$  for igual a 1, a equação descreve os perfis de velocidade em escoamento turbulento de fluidos Newtonianos. Entretanto, esta equação não faz distinção entre a subcamada viscosa e o escoamento principal, onde ocorre a turbulência. Por essa razão, a posição onde  $M$  torna-se uniforme (subcamada viscosa) não pode ser determinada com certeza, o que levou os autores a não considerá-la e supor  $r = 0,95 \cdot R$  como limite máximo ao uso dessa equação. Os autores concluíram que a solução dessa equação em forma analítica fechada é inviável, mas métodos numéricos podem ser usados para obter a solução.

**SZILAS et al. (1981)**, estudando perda de carga em escoamento turbulento de fluidos não-Newtonianos, descreveram uma equação para o fator de atrito a qual se baseou em considerações sobre distribuição de velocidades na subcamada viscosa e o núcleo turbulento. Consideraram o escoamento isotrópico e homogêneo, em um tubo cilíndrico de raio  $R$  e de comprimento infinito num fluido incompressível com comportamento reológico pseudoplástico. Sendo flutuações da turbulência desprezíveis e viscosidade muito pequena na subcamada laminar consideraram a distribuição de velocidades nessa região como linear. Sua equação para o perfil de velocidades é apresentada como:

$$\frac{u}{u_*} = \left( \frac{u_*^{2-n}}{\mu} \cdot \rho \right)^{1/n} \cdot (R-y) \quad \text{Eq.(10)}$$

Externamente à subcamada viscosa os efeitos da tensão de cisalhamento diminuem e a turbulência aumenta no escoamento principal. Com o objetivo de determinar a distribuição de velocidades no escoamento principal, os autores consideraram a constante de von-Kármán ( $\kappa$ ) determinada com base nos dados empíricos de Nikuradse (1932), ser temporariamente indeterminada. Integraram duas vezes a equação da quantidade de movimento e obtiveram o perfil de velocidades para o escoamento turbulento na forma:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_{max}}{u_*} + \frac{1}{\kappa} \cdot \left( \sqrt{\frac{y}{R}} + \ln\left(1 - \sqrt{\frac{y}{R}}\right) \right) \quad \text{Eq.(11)}$$

Sendo velocidades iguais na interface da subcamada viscosa e o núcleo turbulento, Szilas et. al.(1981), igualaram as equações (10) e (11), obtendo a velocidade máxima adimensionalizada, como mostra a equação (12):

$$\frac{u_{max}}{u_*} = \frac{1}{n \cdot \kappa} \cdot \ln\left( Re^* \cdot \left(\frac{u_*}{u}\right)^{2-n} \right) - \frac{1}{\kappa} \cdot \left( 1 + \frac{\ln \alpha}{n} \right) + \left(\frac{\alpha}{8}\right)^{1/n} \cdot \left(\frac{6n+2}{n}\right) \quad \text{Eq.(12)}$$

onde;

$$\alpha = \frac{u_*^{2-n} \delta^n \rho}{\frac{K}{8} \left( \frac{6n+2}{n} \right)^n} = \text{constante} \quad \text{Eq.(13)}$$

$\delta$  = Altura da subcamada viscosa.

**Szilas et al. (1981)**, verificaram que a velocidade média na seção transversal do tubo depende somente do número de Reynolds generalizado. Com base neste critério deduziram o fator de atrito similarmente ao dos fluidos Newtonianos ( $n = 1$ ) e estimaram as constantes  $\alpha$  e  $\kappa$  da equação generalizada de Prandtl-Nikuradse, obtendo dessa forma;

para tubos lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{2}{n} \cdot \log. (Re_f^{*1-(n/2)}) + \beta \quad \text{Eq.(14)}$$

onde;

$$\beta = 1,51^{1/n} \cdot \left( \frac{0,707}{n} + 2,12 \right) - \frac{4,015}{n} - 1,057 \quad \text{Eq.(15)}$$

e para tubos rugosos

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log. \left( 3,71 \cdot \frac{D}{\varepsilon} \right) \quad \text{Eq.(16)}$$



Na região de transição entre o escoamento laminar e turbulento, propuseram a seguinte equação para o fator de atrito análoga a equação de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{10^{-\beta/2}}{\text{Re}^* \cdot f^{(2-n)/2n}} + \frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} \right) \quad \text{Eq.(17)}$$

Esta generalização da equação de Colebrook, claramente demonstra a dependência do fator de atrito em relação ao Número de Reynolds para fluidos pseudoplásticos, os parâmetros reológicos do fluido e a natureza das paredes da tubulação. Esta equação foi a primeira relação analítica desenvolvida para fluidos não-newtonianos que incluiu os efeitos do número de Reynolds e a rugosidade das paredes da tubulação, mostrando bons resultados quando comparada a outras equações existentes para tais fluidos.

**SWAMEE (1993)**, estudando o problema do aumento da viscosidade de óleo escoando em tubos submarinos, relatou que esse fato é devido a perda de calor do escoamento de óleo para a água do mar que envolve o tubo e possui temperatura muito menor que a do escoamento. O autor analisou esse problema do resfriamento do óleo e desenvolveu uma equação explícita para o coeficiente de atrito, a partir de considerações das propriedades do escoamento do fluido, temperatura e geometria da tubulação. Essa equação é dada como:

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{\text{Re}^*} \right)^8 + 9,5 \left[ \text{Ln} \left( \frac{\varepsilon}{3,7.D} + \frac{5,74}{\text{Re}^{*0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{\text{Re}^*} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad \text{Eq.(18)}$$

O autor concluiu que esta equação por ser similar a equação de Colebrook reflete as mudanças de escoamento nas regiões de escoamento laminar, transição e turbulento com boa aproximação. Assevera que a equação (18) por ser explícita pode ser útil nos cálculos de otimização de projetos de tubulações.

SANTANA et al. (1984), ao estudarem o transporte de suspensões de hematita em tubos, com concentração em peso na faixa de 40 a 65%, afirmaram que o transporte de suspensões é, em sua grande maioria, no regime turbulento. E para tais suspensões concentradas de sólidos muito finos, o comportamento reológico é geralmente de fluido não-Newtoniano. Segundo esses autores, até o momento, não existe uma técnica universalmente aceita para o cálculo da queda de pressão no escoamento turbulento de fluidos não-Newtonianos. Na literatura há várias equações, obtidas pela técnica da análise dimensional, que tentam generalizar a relação entre o fator de atrito e o número de Reynolds, sendo incluídas a rugosidade relativa em algumas delas. (Dodge e Metzner, 1959; Tomita, 1959; Clapp, 1961 e Szilas et al. 1981). Sendo estas equações, conforme mostra a tabela (3), analisadas pelos autores na obtenção de seus resultados experimentais e com o objetivo de correlacionar o fator de atrito em escoamento de fluidos não-Newtonianos, visando o "scale-up" no projeto de minerodutos.

Tabela 3 : Equações para o coeficiente de atrito no escoamento turbulento de fluidos que obedecem a lei de potência.

AUTORES	ANO	EQUAÇÃO
Dodge e Metzner	1959	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{2}{n^{0,75}} \cdot \log \left[ \text{Re}^* \cdot \frac{f^{1-n/2}}{4} \right] - \frac{0,2}{n^{1,2}}$
Tomita	1959	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left[ \text{Re}^* \cdot \sqrt{f} / 2 \right] - 0,2$
Clapp	1961	$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1,35}{n} - 1,48 + \frac{2,27}{n} \log \left[ \text{Re}^* \cdot \frac{(f)^{1-n/2}}{4} \right] + 0,34 \frac{(5n-8)}{n}$
Szilas, Bobok e Navratil	1981	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[ \frac{10^{-\beta/2}}{\text{Re}^* \cdot f^{(2-n)/2n}} + \frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} \right]$ <p>onde;</p> $\beta = 1,51^{1/n} \cdot \left( \frac{0,707}{n} + 2,12 \right) - \frac{4,015}{n} - 1,057$

Desta análise SANTANA et al. (1984) concluíram que a equação de Szilas et al. (1981) apresentou melhor desempenho devido à inclusão da rugosidade relativa ( $\varepsilon/D$ ) como parâmetro fundamental, a qual é importante fora da faixa (2 a 10 Centipoise). As demais equações da tabela apresentaram fraco desempenho na previsão do coeficiente de atrito das suspensões de hematita, sendo mais indicadas para a análise do escoamento de polímeros que apresentam viscosidades mais elevadas e efeitos de redução de arraste.

**MASSARANI & TELLES (1992)**, mostraram que as várias equações encontradas para os fluidos Newtonianos, podem ser ampliadas para contemplar uma ampla classe de fluidos não-Newtonianos, sendo o elo de ligação entre essas duas classes a viscosidade efetiva do fluido. Esta viscosidade pode ser calculada conhecendo-se a função tensão cisalhante do fluido, que é uma propriedade do fluido, e a taxa de deformação característica, uma propriedade cinemática do escoamento. Os autores compararam as várias equações existentes para o fator de atrito em escoamentos turbulentos de fluidos não-Newtonianos em tubos (Maegava et al.1984, Santana et al.1983 e Szilas et al. 1981), e concluíram que o fator de atrito pode ser estimado de modo satisfatório, através das equações clássicas válidas para fluidos Newtonianos, bastando para tal associar ao número de Reynolds uma viscosidade efetiva dependente das propriedades reológicas do fluido e da propriedade cinemática do escoamento.

**SUMMER et al. (1989)**, relataram que um dos problemas do escoamento de lama refere-se a apropriada viscosidade usada em descrever o escoamento, se as partículas são muito finas e a velocidade de sedimentação é baixa, as misturas podem ser testadas viscosimetricamente e seus escoamentos no tubo são determinados com modelos contínuos. Entretanto, com lamas de partículas maiores, os modelos contínuos conhecidos tornam-se inadequados e faz-se importante determinar o ponto de transição do regime laminar para o turbulento que ainda não foi resolvido satisfatoriamente.

**GILLIES et al. (1991)**, desenvolveram um modelo para determinar a perda de carga para partículas graúdas. Dados experimentais de escoamentos isotérmicos de lamas de areia, cascalho e carvão em tubos em escala industrial foram usados para obter a equação do modelo. O modelo difere de outras equações, como a de Durand e Condolios (1952) que era até então, segundo os autores, considerada a melhor equação para o fator de atrito de lamas com partículas graúdas. **GILLIES et al. (1991)**, incorporaram em seu modelo uma análise simplificada dos mecanismos do atrito nas paredes e dentro desta análise adicionaram dois parâmetros do escoamento, quais sejam, o coeficiente de atrito cinemático entre as partículas e parede do tubo e a reologia da mistura do fluido e finos com baixa sedimentação. Segundo os autores esses parâmetros foram raramente relatados na literatura.

**WANG & LARSEN (1994)**, relataram que Wang et al. (1983) ao fazerem experimentos com uma hiperconcentração de argila e silte não-Newtonianas em canais, encontraram que a turbulência desenvolveu-se somente na parte rasa do canal, enquanto que o escoamento na parte superior permaneceu laminar. Em estudo anterior, Wang et al. (1992) mostraram que a transição de um escoamento de suspensões de argila de regime laminar para o turbulento ocorreu quando o número de Reynolds estava entre 2.000 e 10.000. A estrutura do escoamento foi observada complexa na região de transição, os autores asseveraram que o escoamento turbulento, laminar e intermitente podem coexistir no mesmo escoamento.

NAKAE (1994), realizou um estudo experimental num circuito fechado com o propósito de confirmar a influência dos finos na redução do arraste, afirmando que o fenômeno da redução do arraste tem origem essencialmente na subcamada elástica (localizada entre a subcamada viscosa e o núcleo turbulento). Fez um conjunto de medições com tubo de Pitot numa seção transversal de tubo em acrílico, tentando mostrar a existência desse fenômeno, além de testar o desempenho do tubo de Pitot nos escoamentos com sólidos e traçar o perfil adimensionalizado da distribuição de velocidades. O Pitot, baseado no mesmo princípio do Pitot Cole, tinha seção transversal sextavada e tomadas de pressão, a montante e a jusante em furos localizados nas faces opostas do sextavado. Este Pitot foi acoplado a um transdutor diferencial de pressão que possibilitou ao autor realizar medidas aceitáveis apesar da presença de sólidos. Tal desempenho se deveu ao impedimento do deslocamento do volume de água no interior do tubo que reduziu sobremaneira a penetração de sedimentos no transdutor.

### **3.4 - Medições de Velocidades Pontuais**

No que concerne a pesquisas experimentais para determinação dos perfis de velocidade de misturas concentradas revisam-se a seguir alguns trabalhos inovadores e recentes para o desenvolvimento de instrumentos de medidas.

BROWN et al. (1983), utilizaram uma pequena sonda para obter velocidades pontuais, e empregaram técnicas de correlação-cruzada para medir velocidades médias de misturas com sólidos a altas concentrações

de volume de 10, 20 e 30%. A sonda consistiu de um tubo em aço, em forma de tubo de pitot, introduzido com a face do corpo horizontal em sentido contrário ao escoamento. Neste corpo horizontal dois pares de eletrodos devidamente dispostos um ao lado do outro, permitem, após a aplicação de corrente elétrica no escoamento, obter mudanças sensíveis na condutividade. Os autores objetivaram examinar os efeitos da geometria da sonda e qual sua melhor precisão na determinação dos perfis de velocidade ao se configurar sondas com diferentes posições dos eletrodos. Em uma dessas configurações observaram um interessante efeito do número de Reynolds, quando usaram lama de areia com etileno glicol com alta viscosidade, nesta configuração o número de Reynolds do escoamento diminuiu com o aumento da viscosidade da lama e os correlogramas tornaram-se menos definidos.

De forma geral, concluíram que para uma dada geometria da sonda, que pode ter diferentes espaços entre os eletrodos, esta poderá cessar seus efeitos se as partículas forem muito finas, ou seja, para viscosidades elevadas o emprego da sonda é inadequado, devido a região afetada pela sonda ser maior com concentrações elevadas de partículas finas do que para partículas grossas. Entretanto apresentaram-se apropriadas ao estudo de uma variedade de misturas sólido-líquido.

Num trabalho interessante, MAO-QUAN (1985), desenvolveu um medidor de velocidades com o propósito de determinar o perfil de velocidades em escoamento turbulento, não somente de água limpa, mas também de fluidos com alta concentração de areia. O medidor consiste basicamente de um transdutor, um conversor e um processador de sinais.

O transdutor transforma energia cinética ( $1/2 \rho V^2$ ) do escoamento em energia potencial. Este transdutor é composto de um suporte rígido com um grau de liberdade que vibra devido ao escoamento, acoplado a um medidor de deformação (Strain-Gage) de alta sensibilidade. A aparência do medidor assemelha-se ao tubo de Pitot. MAO-QUAN (1985) determinou o perfil de velocidade em um canal destacando que o instrumento pode medir a turbulência longitudinalmente de ponto a ponto e a distribuição de velocidades ininterruptamente ao longo do eixo vertical em aproximadamente 30 segundos, com boa exatidão.



#### 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Foram ensaiadas concentrações de 2, 3, 4 e 5% em peso da lama de bentonita e areia em concentrações de 0,75 e 1,5% em peso adicionadas à uma mistura de bentonita em concentração de 3%, na instalação-piloto, após as adaptações de alguns equipamentos existentes no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA). Os elementos que compõem o sistema experimental seguem-se abaixo:

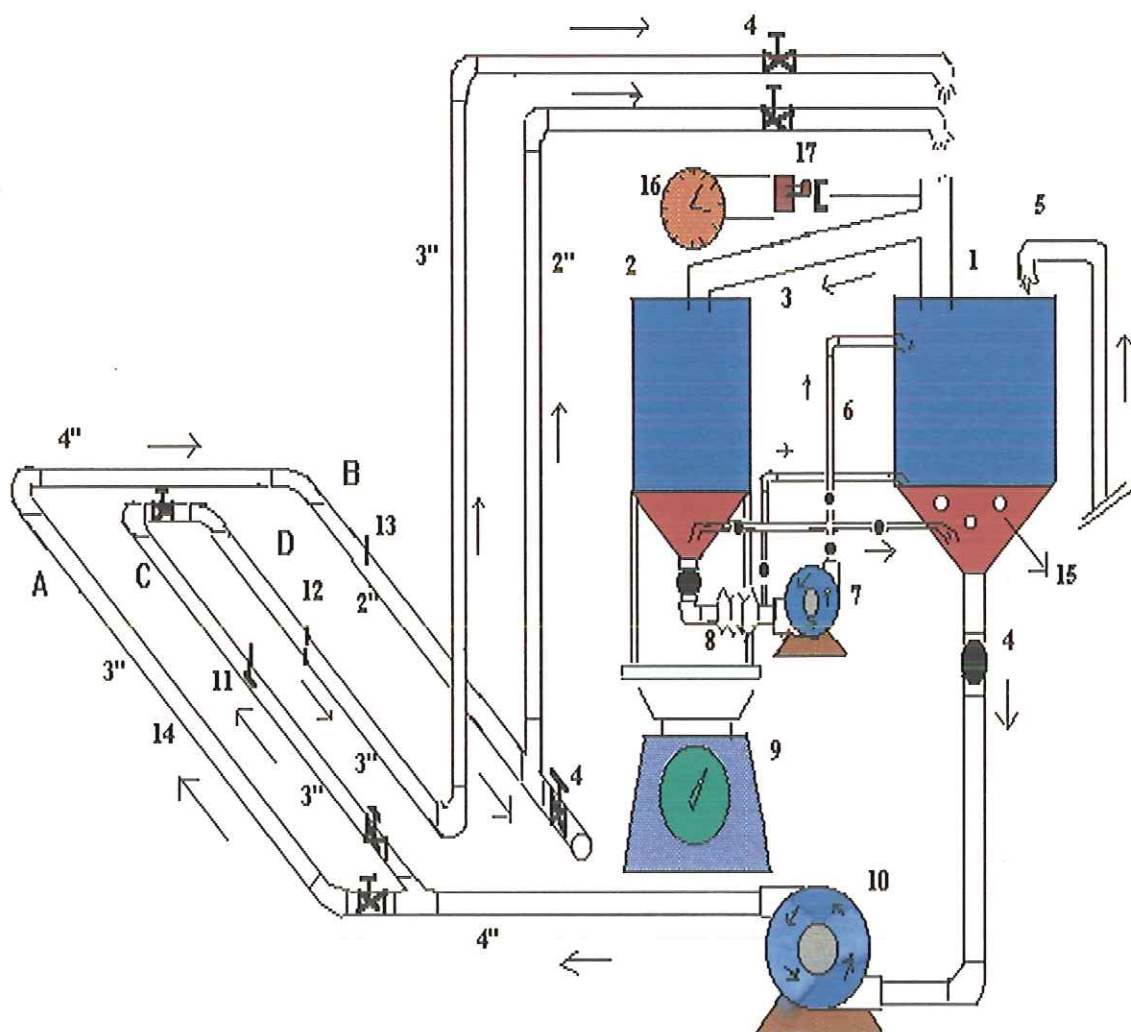


Figura 8 : Representação esquemática da instalação-piloto.

- 1 - Reservatório abastecedor
- 2 - Reservatório gravimétrico
- 3 - Desviador do escoamento
- 4 - Válvula
- 5 - Tubulação de alimentação de água
- 6 - Tubulação em inox p/retorno e agitação da mistura
- 7 - Bomba centrífuga de 4 cv
- 8 - Mangote de sucção flexível
- 9 - Balança eletrônica
- 10- Bomba centrífuga de 30 cv
- 11- Tubo de Pitot
- 12- Medidor de orifício
- 13- Tomada de temperatura
- 14- Sistema de circulação em tubulação de resina e lã de vidro
- 15- Resistência elétricas
- 16- Cronômetro digital
- 17- Interruptor elétrico

#### **4.1 - Reservatório Abastecedor**

Reservatório abastecedor tem capacidade para 3000 litros com formato cilíndrico na sua parte superior e fundo cônico, cujo diâmetro mede 1,60 m e alturas de 1,20 m, na parte cilíndrica e 0,90 m na parte cônica. O material utilizado na construção do reservatório é chapa de ferro com 3 mm de espessura, pintado internamente com pintura epoxi para protegê-lo do efeito corrosivo. Três resistências blindadas de aço inox, com potência de 6 kw cada, foram colocadas neste reservatório com

a finalidade de controlar a temperatura aquecendo a mistura testada . Um isolamento térmico minimizou perda de calor através das paredes do reservatório, com revestimento de manta de lã de rocha de 4 cm de espessura. Sua forma, dimensões e posição, foram definidas em função da descarga máxima de bombeamento, das características da mistura, e do volume de bombeamento (Satto, 1994)., foto 1.

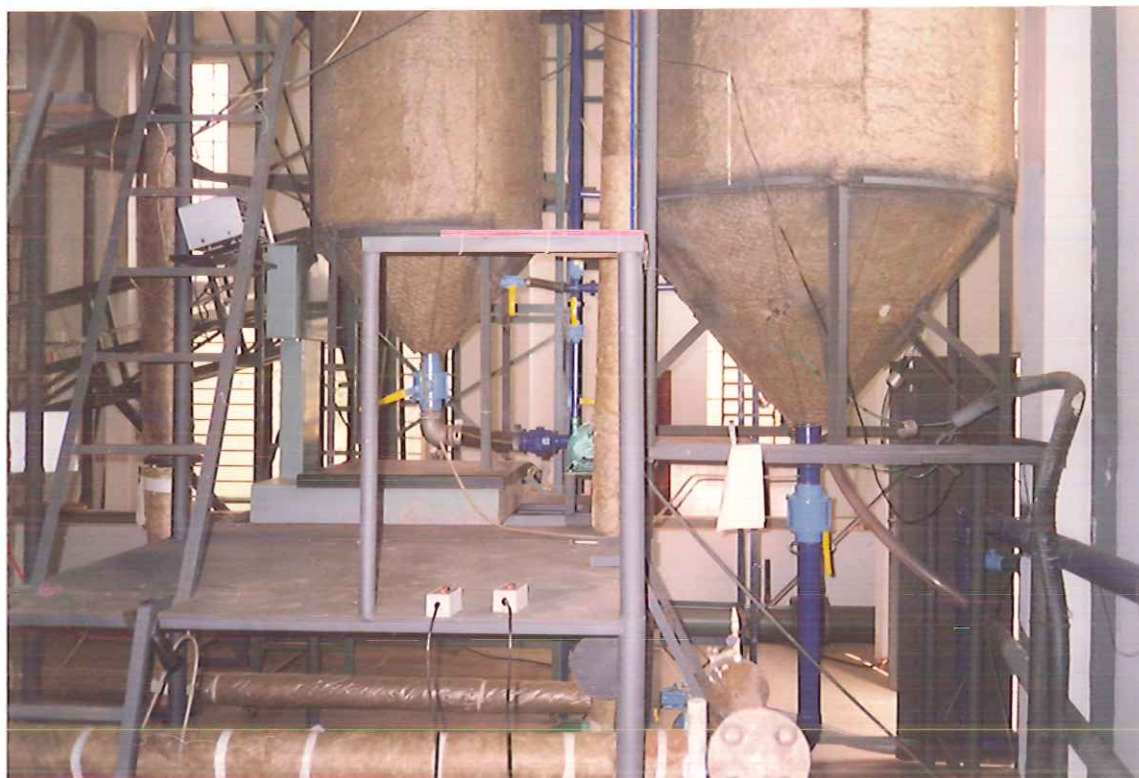


Foto 1: Reservatórios abastecedor e gravimétrico, com revestimento de lã de rocha e sistema de retorno e agitação da mistura.

## **4.2 - Reservatório Gravimétrico**

Reservatório gravimétrico, possui as mesmas características do anterior, excetuando-se as resistências e dimensões que são de 0,90 m de diâmetro e alturas de 1,20 m e 0,45 m nas partes cilíndricas e côncavas respectivamente. Apoiando-se sobre uma balança, com finalidade de se obter a vazão gravimétrica.

## **4.3 - Motor-Bomba**

Dois conjuntos motor-bomba, sendo que o primeiro com a finalidade de fazer a circulação da mistura através das tubulações até o reservatório gravimétrico e o segundo de fazer retornar a mistura do reservatório gravimétrico para o reservatório abastecedor e/ou agitando-o, possuem potências de 30 cv e 3 cv, respectivamente.

## **4.4 - Tubulações**

As tubulações constituem-se de aço inox e de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) e envolvidas externamente com lã de rocha para isolamento térmico com o meio ambiente. Os tubos de aço inox estão na sucção da bomba de 30cv e na ligação entre os reservatórios gravimétrico e abastecedor, fazendo o retorno e agitação da mistura de lama de bentonita. Os tubos de PRFV são lisos com rugosidade absoluta igual a 0,003046 mm e possuem diâmetros de 2,0 e 3,0 polegadas. Estes tubos formam a parte principal do circuito, onde foram feitos todos os testes.

#### 4.5 - Medidores

Desviador de escoamento, tem como finalidade desviar o escoamento do reservatório abastecedor para o gravimétrico. Seus requisitos de projeto são:

- Impedir vazamentos durante o desvio que possa trazer erros de medida;
- proteger o operador de respingos da mistura que possam atingi-lo causando queimaduras;
- evitar ocorrência de afogamento durante o desvio do escoamento;
- não criar transientes hidráulicos que venham a provocar o rompimentos das tubulações.

Todas essas condições foram satisfeitas com o desviador de escoamento mostrado na foto 2.



Foto 2 : Desviador de Escoamento.

Outros componentes do sistema de medição são:

- Balança eletrônica com capacidade para 750 Kg e precisão de 200 g.
- Manômetros diferenciais - são seis no total distribuídos ao longo das tubulações, onde foram observados as diferenças de pressão para estudar as perdas energéticas.
- Cata-bolhas-sedimentos construídos em recipientes de vidro com dois tubos de aço inox e soldados com durepoxi. Objetivaram a retirada de bolhas de ar e impedir a entrada da mistura bentonita e água nas mangueiras de silicone que ligam as tomadas de pressão aos manômetros.
- Tubo de Pitot, com orifício de 2 mm de diâmetro, instalado na tubulação de 3,0 polegadas. Este instrumento consiste em um tubo de material metálico, com uma extremidade recurvada em direção ao escoamento do fluido.

#### **4.6 - Outros Aparelhos e Equipamentos Úteis na Obtenção dos Dados**

- Termômetro, Cronômetro, Conjunto de Peneiras.
- Painel de controle elétrico

#### **4.7 - Preparação do Fluido não-Newtoniano.**

A lama de bentonita foi preparada a partir de material muito fino e seco e adquirida em sacas de 25 Kg. As misturas desejadas foram obtidas na proporção adequada diretamente no reservatório abastecedor. Os ensaios foram iniciados com mistura de baixa concentração que, após o término dos mesmos, era ajustada complementando a quantidade de

bentonita até atingir a próxima concentração planejada. Nos ensaios para transporte de sólidos grosseiros pela lama de bentonita, optou-se pela mistura de bentonita com concentração de 3% em peso, por ser média entre as concentrações inicialmente ensaiadas e escolheu-se areia como sólido a ser transportada pela lama de bentonita.

#### **4.8 - Ensaios**

A metodologia desenvolvida para consecução dos objetivos desta pesquisa, consistiu de três etapas. Primeiro, foram realizados com água limpa, obtendo-se número expressivo de dados, para adquirir experiência e ter dados consistentes no uso da instalação-piloto. Na segunda, fizeram-se ensaios com bentonita em pó. E na terceira etapa com mistura de areia e bentonita em uma concentração já definida anteriormente.

Os ensaios para caracterizar a bentonita foram realizados com o uso do reômetro RHEOTEST-2, para temperaturas crescentes e decrescentes de 20 à 60 °C. A densidade aparente da mistura de bentonita foi determinada pelo uso de picnômetro de 400 ml com agitação magnética para homogeneizar a mistura de bentonita e água. Os ensaios foram realizados com água e bentonita em pó em concentrações em peso de 2, 3, 4, 5 e 6%. A densidade absoluta da bentonita em pó foi obtida por picnometria a hélio. Os ensaios para a determinação da granulometria da bentonita em pó foram realizados por microscopia eletrônica.

## **4.8.1 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **4.8.1.1 - Medição Direta do Tamanho das Partículas**

Realizaram-se ensaios para determinação da granulometria através de métodos de sedimentação e sedigrafia que mostraram ser inadequados para a suspensão da bentonita devido a não-sedimentabilidade da bentonita no primeiro caso e devido a dificuldade de discernir-se os tamanhos absolutos da partícula no método da sedigrafia. Neste último, mudou-se as concentrações, os dispersantes e aplicou-se ultra-som para ajudar na dispersão das partículas sem sucesso. A solução encontrada foi obter sua granulometria por microscopia eletrônica.

Nesta técnica as imagens das partículas são medidas diretamente. Usualmente, toma-se medidas lineares das partículas por meio de uma escala colocada sobre a imagem da partícula. Para todas as formas, excetuando-se a esférica, sendo necessário definir precisamente o perfil da partícula a ser medida. Os dois maiores problemas encontrados nesse método são reunir uma quantidade de dados suficiente para assegurar a exatidão dos parâmetros envolvidos e eliminar variações devidos aos erros humanos.

Os diversos diâmetros foram obtidos por áreas aleatoriamente escolhidas na amostra contendo concentrações de partículas de todos os tamanhos e formas e estimando-se entre essas partículas o seu diâmetro médio. A tabela 4 apresenta o tamanho médio obtido para cinco áreas fotográficas mapeadas.



Tabela 4: Tamanho médio da bentonita em pó.

Tamanho ( $\mu\text{m}$ )	% Diâmetros
<10	23,30
10-20	20,00
20-30	21,60
30-40	15,00
40-50	7,00
50-60	1,60
60-70	0,00
70-80	3,30
80-90	5,00
90-100	1,60
>100	1,60
<b>Total</b>	<b>100</b>

A figura 9 mostra a distribuição da bentonita em pó para uma amostra ampliada 120 vezes e a figura 10 mostra uma área da mesma amostra ampliada 500 vezes. Toda diversidade de tamanhos obtida em cada área está reproduzida no apêndice A.

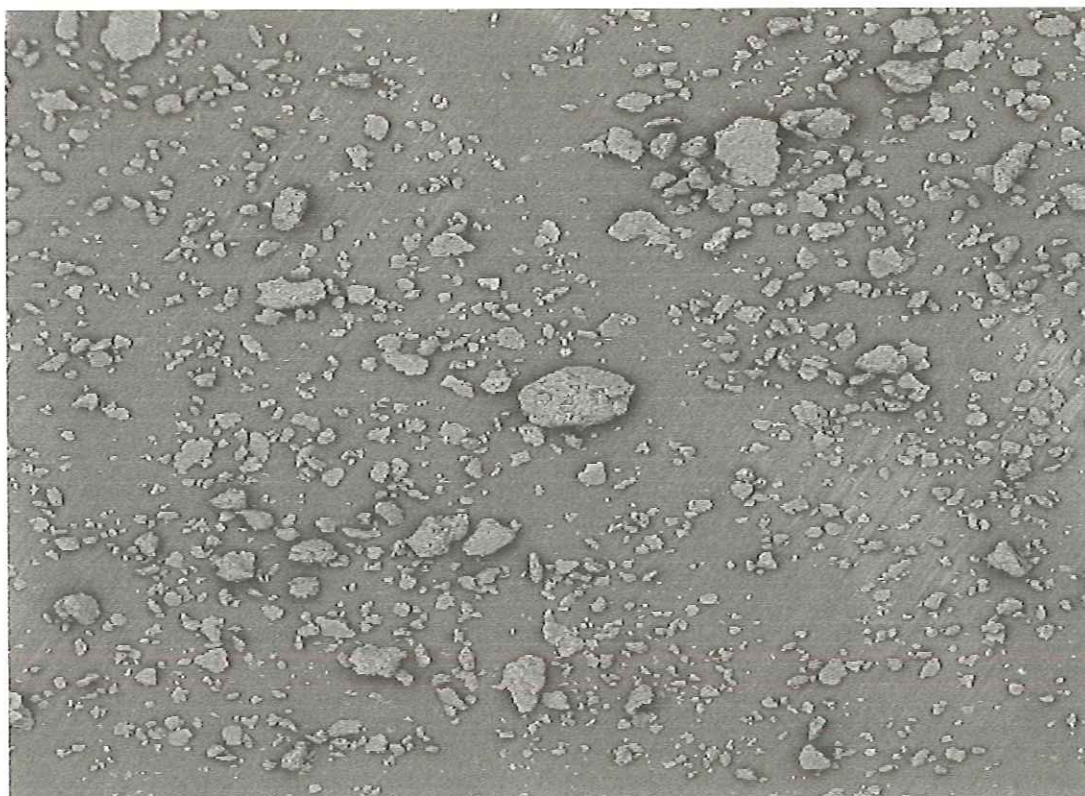


Figura 9: Vista microscópica de amostra da bentonita em pó (120X).

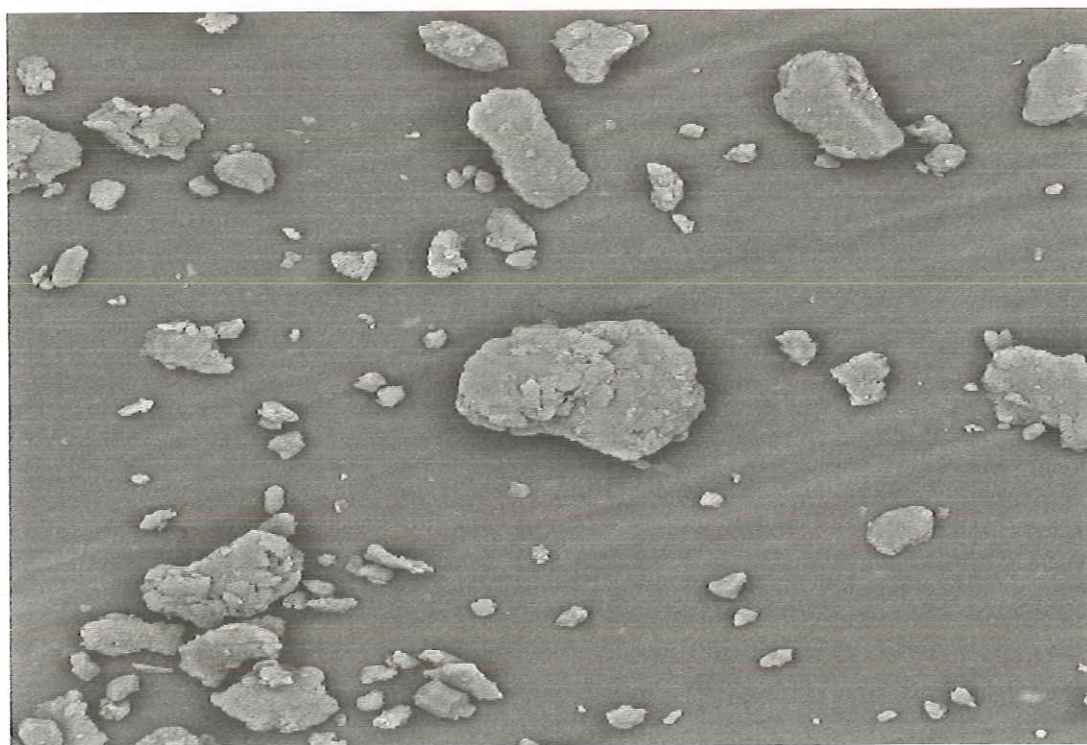


Figura 10: Vista microscópica de amostra de bentonita em pó (500X)

#### 4.8.1.2 - Picnometria a Hélio

Obteve-se por picnometria a hélio a densidade absoluta da bentonita em pó. Neste ensaio a bentonita em pó foi secada em estufa e depois levada ao picnômetro. Foram realizadas cinco medidas entre elas para se ter resultados mais consistentes. O picnômetro a hélio injeta esse gás na bentonita dentro de uma câmara do instrumento, o hélio preenche todos os vazios existentes na amostra. Pela razão da diferença do volume da amostra e o volume de hélio injetado na bentonita pela massa inicial da amostra obtém-se a sua massa específica absoluta que foi de  $2,598 \text{ g/cm}^3$

#### 4.8.1.3 - Vazão

As medições de vazão foram executadas pelo método gravimétrico, usando-se o desviador de escoamento, reservatório gravimétrico, balança eletrônica e cronômetro digital. O escoamento é desviado do reservatório abastecedor para o gravimétrico pelo desviador de escoamento que é puxado manualmente ao mesmo tempo em que é acionado o cronômetro digital, de precisão de milésimos de segundos, por meio de um interruptor. Após decorridos um tempo médio de 20 segundos de escoamento solta-se o desviador, lê-se o tempo decorrido no cronômetro digital e o peso líquido da mistura na balança eletrônica.

A vazão é determinada pela razão entre a massa lida na balança eletrônica e o tempo lido no cronômetro digital. A massa era corrigida para eliminar o efeito da interferência de mangotes ligando a saída do

reservatório gravimétrico colocado sobre a balança com bomba de 4 cv que faz o retorno e agitação da mistura. A equação fica:

$$Q_{mistura} = \frac{M_{corrigida}}{t} \quad \text{Eq.(19)}$$

onde;

$$Q_{mistura} = \text{Vazão em massa da mistura (Kg/s)}$$

$$M_{corrigida} = 1,0035 \cdot M_{lida} + 1,0821 \quad \text{Eq.(20)}$$

$$M_{lida} = \text{Massa Lida (Kg)}$$

$$t = \text{Tempo decorrido no cronômetro (seg.)}$$

#### 4.8.1.4 - Perda de Carga

As medidas de perda de carga distribuída foram feitas em dois trechos distintos da instalação-piloto. Trechos A e B, sendo respectivamente de diâmetros de 3 e 2 polegadas, conforme mostra a figura 8. O trecho A é reto e horizontal, sendo constituído de PRFV, contém duas tomadas de pressão, que distam 5,23 metros e ligadas a um manômetro diferencial de mercurio e água. O segundo trecho de 2 polegadas também reto e horizontal, das mesmas características do trecho A, tem duas tomadas de pressão, afastadas uma da outra por 4,35 metros e ligadas a um manômetro diferencial. Esses tubos possuem uma emenda entre as tomadas de pressão que introduzem certo erro na perda de carga.

Este inconveniente é devido as suas dimensões serem comercializadas em comprimentos de 6,0 metros e a posição das tomadas de pressão terem que obedecer as normas técnicas vigentes.

#### **4.8.1.5 - Perfis de Velocidade**

As determinações dos perfis de velocidade foram feitas em uma seção transversal do tubo de 3 polegadas, considerando seu eixo vertical, as medidas foram feitas por meio de um tubo de pitot com tomadas de pressão ligadas a um manômetro.

#### **4.8.1.6 - Reologia**

As relações entre tensões cisalhantes e gradientes de velocidade definidas como viscosidade foram obtidas no reômetro de cilindros concêntricos, para estabelecer o comportamento reológicos desta classe de fluido, se é Newtoniano ou não-Newtoniano.

Durante os ensaios, pretendeu-se submeter o reômetro a concentrações elevadas de lama de bentonita, mas estas medidas foram inconsistentes, por terem ultrapassado a escala de leitura do reômetro. As concentrações ensaiadas foram de 2, 3, 4, 5 e 6 % em peso. A bentonita em pó foi proveniente de usina de mineração (União Brasileira de Mineração) da região de Campina Grande (PB).

As amostras foram submetidas a temperaturas crescentes e decrescentes variando de 20 à 60 °C, em intervalos de 10 °C. Fazendo o mesmo procedimento para a rotação em cada temperatura ensaiada, com gradientes de velocidade de 57,81 a 1.560,88 (s<sup>-1</sup>). Este procedimento, teve por objetivo verificar a histerese, que ocorreu em quase todas as concentrações ensaiadas, tendo características levemente tixotrópicas (Ver pág. 18), decorrentes do processo de hidratação da bentonita. Mas como o tratamento matemático dos fluidos dependentes do tempo é relativamente complexo, este fator vem sendo desconsiderado na classificação reológica dos fluidos de perfuração (Darby, R., 1986; Silva et al., 1988).

#### 4.8.1.7 - Massa Específica

As massas específicas da bentonita foram determinadas com o auxílio de um picnômetro de 400 ml, um aquecedor magnético com aquecedor termostático, uma balança analítica e um termômetro.

A metodologia empregada foi a mesma realizada por Satto (1994), onde teve vários problemas na calibração do picnômetro, quando realizou ensaios com vinhaça. O principal problema foi a formação de gotículas nas paredes do frasco o qual só foi solucionado retirando a haste do picnômetro e agitando-o no fundo com uma barra magnética. Além de bolsas que se formavam na parte superior do picnômetro e que interferiam na calibração, resolveu este problema desfazendo as bolsa com um bastão de vidro antes de pesá-lo, fazendo desta maneira este excesso de líquido ser drenado para fora do frasco.

Durante os ensaios da massa específica para bentonita também foram observados esses problemas e empregou-se a metodologia usada por Satto (1994) para resolvê-los, desta forma obteve-se a medida indireta do volume do picnômetro  $V_{picnometro}$  ( $cm^3$ ), em função da temperatura  $T$  ( $^{\circ}C$ ), pelo uso da massa da água  $m_a$  (g) e de sua massa específica  $\rho_{agua}$  ( $g/cm^3$ ). Conforme observa-se no gráfico da figura 11.

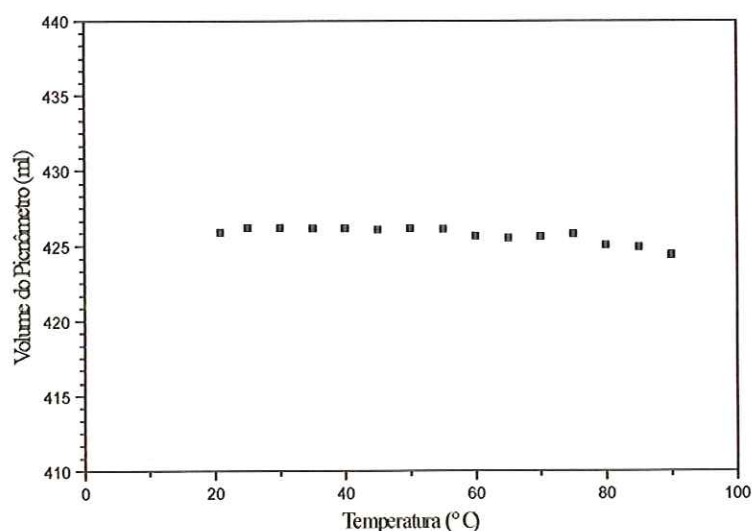


Figura 11: Curva de calibração do Picnômetro de 400 ml em função da temperatura.

A figura 11, mostra o volume do picnômetro em função da temperatura. Na avaliação da massa específica da mistura de bentonita e água foram utilizadas estes volumes do frasco.

## 5 - RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 - Reologia

Os dados observados das tensões de cisalhamento ( $\tau$ ) em função do gradiente de velocidade ( $dv/dy$ ), nas temperaturas especificadas permitiram obter os parâmetros reológicos por regressão linear e não-linear para o modelo de Bingham e de Herschell-Bulkley, respectivamente. Este último modelo propõe a expressão matemática do modelo de Potência deslocada em relação ao eixo das tensões cisalhantes, ajustando-se três parâmetros que são a tensão cisalhante inicial ( $\tau_0$ ), o índice de consistência (K) e o índice de comportamento de Herschell-Bulkley ( $n_{hb}$ ).

Dos dois modelos estudados o de Bingham apresentou coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mais insatisfatório. O modelo de Herschell-Bulkley mostrou-se mais adequado a determinação dos parâmetros reológicos para este fluido de perfuração quando comparados os coeficientes de correlação linear deste com os de Bingham. Os resultados obtidos destes modelos são mostrados nas tabela 5 e 5a, apresentando-se na última coluna, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ).



Tabela 5 : Parâmetros reológicos do modelo de Herschell-Bulkley.

Conc. em Peso (%)	Temp. (°C)	$\tau_0$ (dina/cm <sup>2</sup> )	K (p)	n	$10^{-2} \cdot \eta$ (cp)	R <sup>2</sup>
2,0	20	2,4	1,65	0,46	0,03265933	0,95172
	30	3,44	3,24	0,35	0,02942176	0,9895
	40	4,56	2,40	0,35	0,02308281	0,99086
	60	4,13	2,13	0,36	0,02225329	0,98455
3,0	20	4,48	5,09	0,32	0,03716478	0,99972
	30	5,82	6,85	0,26	0,03341772	0,99922
	40	6,28	7,55	0,24	0,03227121	0,9973
	60	4,54	4,85	0,30	0,03111727	0,9986
4,0	20	5,47	6,13	0,31	0,04187823	0,99866
	30	5,76	7,35	0,28	0,04059313	0,99887
	40	5,02	6,13	0,30	0,03886955	0,99924
	60	4,97	6,08	0,30	0,0385467	0,93061
5,0	20	8,88	17,73	0,25	0,07708624	0,99840
	30	8,33	16,04	0,25	0,06992839	0,99960
	40	8,21	15,92	0,25	0,06936829	0,9988
	60	8,46	15,56	0,24	0,06363677	0,99872
6,0	20	17,45	51,26	0,16	0,11768776	0,99872
	30	14,80	42,28	0,18	0,1112286	0,99955
	40	15,83	45,40	0,16	0,11166774	0,99926
	60	18,71	53,09	0,14	0,10720373	0,99943

Tabela 5a : Parâmetros reológicos do modelo de Bingham.

Conc. em Peso (%)	Temp. (°C)	$\tau_0$ (dina/cm <sup>2</sup> )	$\mu$ (p)	$10^{-2} \cdot \eta$ (cp)	R <sup>2</sup>
2,0	20	11,18	0,0139	0,021064	0,9395
	30	8,81	0,0183	0,0239473	0,9228
	40	15,39	0,0139	0,0237598	0,6167
	60	14,21	0,0136	0,0227038	0,5890
3,0	20	23,39	0,0277	0,0426877	0,8455
	30	24,36	0,0206	0,0362040	0,7429
	40	21,10	0,0196	0,0331129	0,6735
	60	18,86	0,0188	0,0308829	0,8045
4,0	20	18,75	0,0267	0,0387093	0,9382
	30	19,73	0,0218	0,0344429	0,8752
	40	19,52	0,0206	0,0331034	0,8586
	60	20,57	0,0174	0,0305791	0,8187
5,0	20	41,09	0,0321	0,0584242	0,7067
	30	41,06	0,0303	0,0566063	0,6843
	40	34,27	0,0344	0,0563556	0,8746
	60	41,43	0,0277	0,0542401	0,9148
6,0	20	32,94	0,0252	0,0463047	0,9877
	30	33,08	0,023	0,0441945	0,9677
	40	31,14	0,0246	0,0445509	0,9908
	60	48,70	0,0414	0,0725978	0,9073

Nos gráficos das figuras 12 a 16, são apresentados os dados observados sobre tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade. A tensão cisalhante aumenta com o gradiente de velocidade em todas as concentrações, mas esse acréscimo diminui com o aumento da temperatura. Observa-se neste gráficos que a bentonita, apresenta-se com comportamento pseudoplástico ( $n < 1$ ), tendo em vista que a viscosidade diminui com o aumento da tensão de cisalhamento. O comportamento Newtoniano ( $n = 1$ ) restringi-se a uma faixa de tensão cisalhante e gradiente de velocidade, onde são inicialmente de comportamento Newtoniano para faixas de  $\tau$  e  $dv/dy$  baixas até chegarem ao comportamento pseudoplásticos  $n < 1$ ). As misturas voltam a ser Newtonianas para faixas de  $\tau$  e  $dv/dy$  altas (Manrich & Pessan, 1987). Sua classificação é de fluido não-Newtoniano independente do tempo ( $dv/dy$  é somente função de  $\tau$ ).

A viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade, parametrizados em termos da temperatura são apresentadas nos gráficos das figuras 17 a 21. Para diversas concentrações ensaiadas a figura 22 mostra a viscosidade aparente em função da concentração. A figura 23 apresenta estas informações de formas diversas.

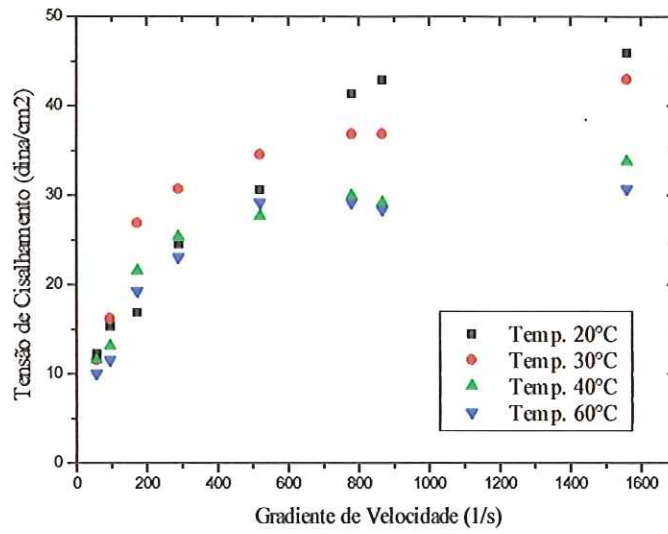


Figura 12: Reograma da mistura de bentonita e água para concentração de 2% em peso.

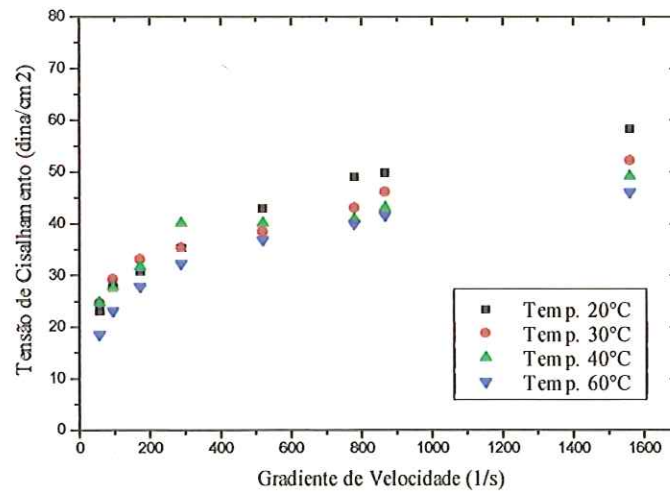


Figura 13: Reograma da mistura de bentonita e água para concentração de 3% em peso.



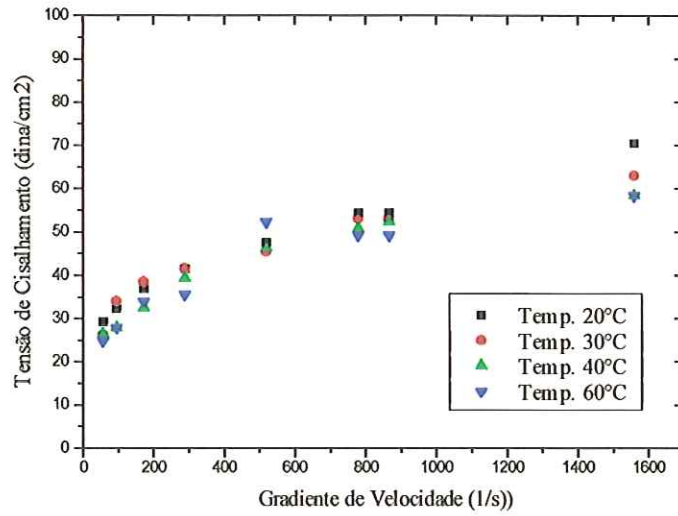


Figura 14: Reograma da mistura de bentonita e água para concentração de 4 % em peso.

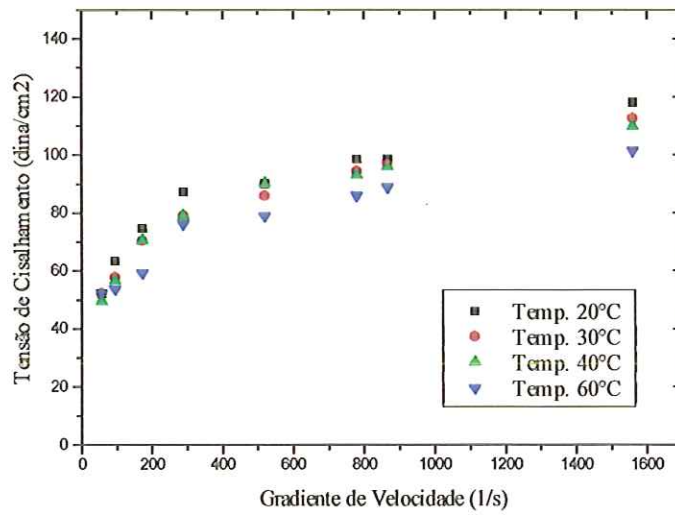


Figura 15: Reograma da mistura de bentonita e água para concentração de 5 % em peso.

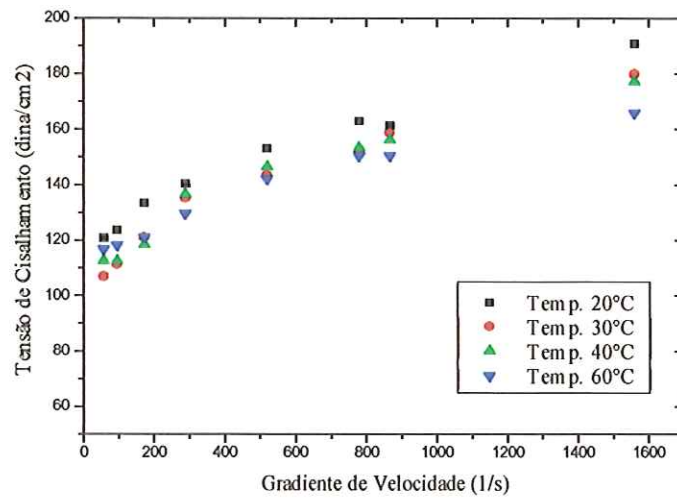


Figura 16: Reograma da mistura de bentonita e água para concentração de 6 % em peso.

As misturas de bentonita e água em várias concentrações apresentam comportamento tipicamente não-Newtoniano com características pseudoplásticas ( $n < 1$ ). A tixotropia encontrada na lama de bentonita é esperada para esse fluido de perfuração, em que pela definição dos fluidos tixotrópicos o fluido assumirá o estado gel quando deixado em repouso e regeneraria o estado soluto quando submetido a ação puramente mecânica.

Esta característica, apesar de ser desprezada nos cálculos por serem muito complexos os tratamentos matemáticos dos fluidos dependentes do tempo, é extremamente importante quando se deseja parar o processo de perfuração para troca ou manutenção dos equipamentos, pois mantém os sólidos carregados em suspensão até a continuidade dos trabalhos.

Observa-se nos gráficos das figuras 17 a 21 que a viscosidade aparente diminui com o aumento do gradiente de velocidade para todas as concentrações ensaiadas nas temperaturas de 20 a 60 °C confirmando o seu comportamento pseudoplástico. Observa-se também que para altos valores do gradiente de velocidade, a variação da viscosidade aparente com o gradiente de velocidade é similar em todas as temperaturas ensaiadas. Tal observação nos conduz a conclusão de que a viscosidade aparente da mistura de bentonita e água independe da temperatura nessas regiões de gradientes de velocidade elevados.

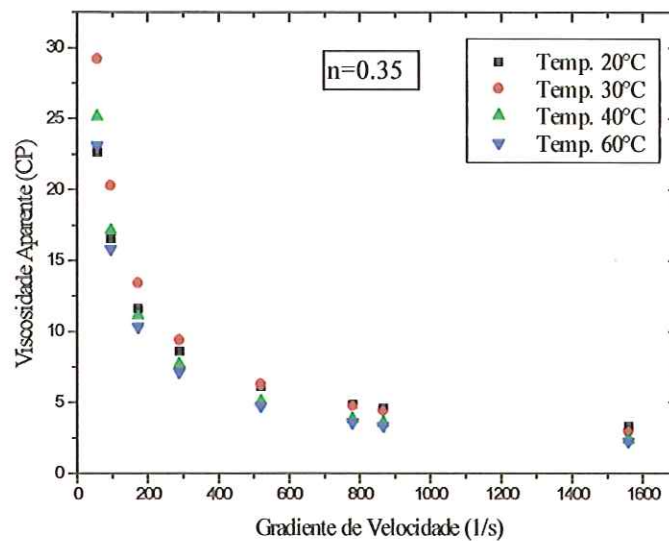


Figura 17: Curva da viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade da mistura de bentonita para concentração de 2% em peso.

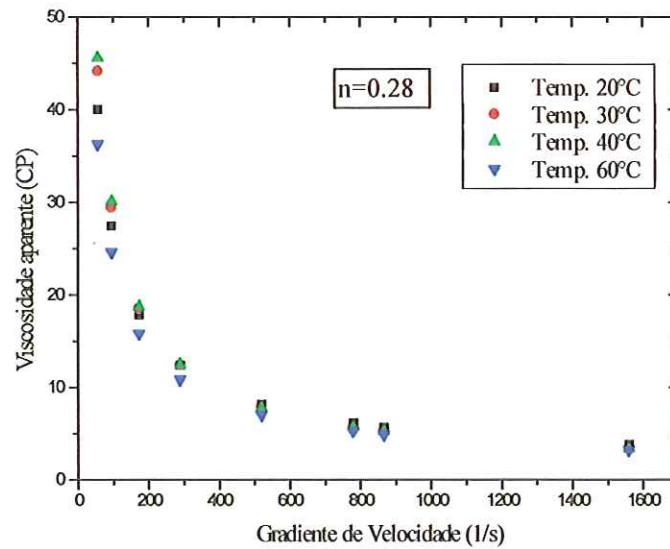


Figura 18: Curva da viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade da mistura de bentonita para concentração de 3% em peso.

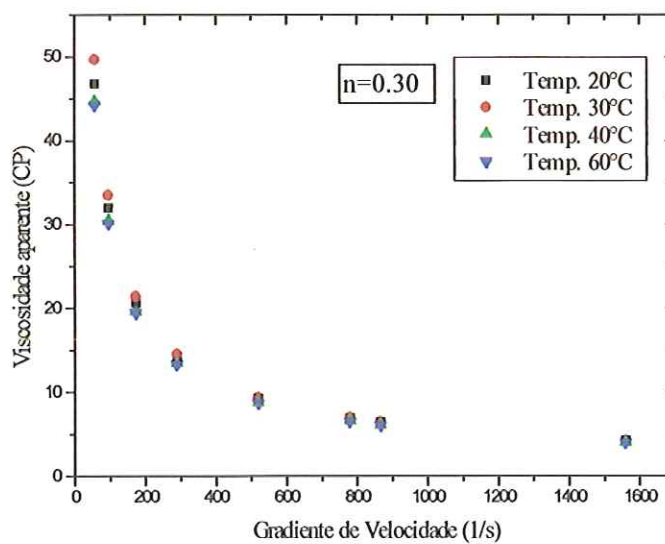


Figura 19: Curva da viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade da mistura de bentonita para concentração de 4% em peso.



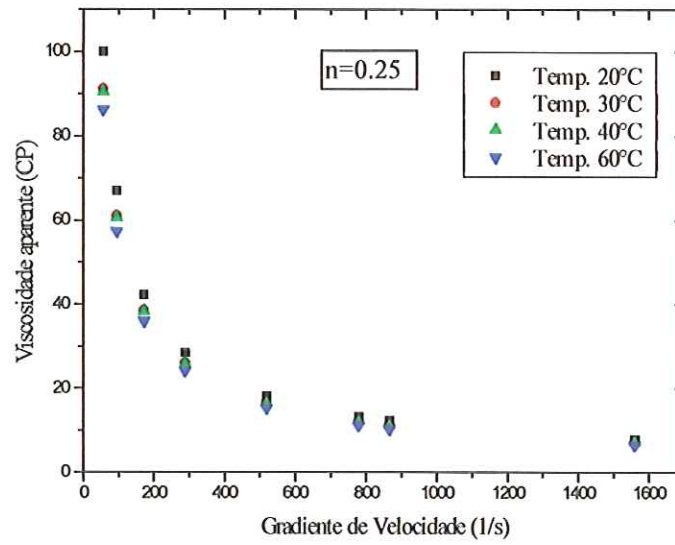


Figura 20: Curva da viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade da mistura de bentonita para concentração de 5% em peso.

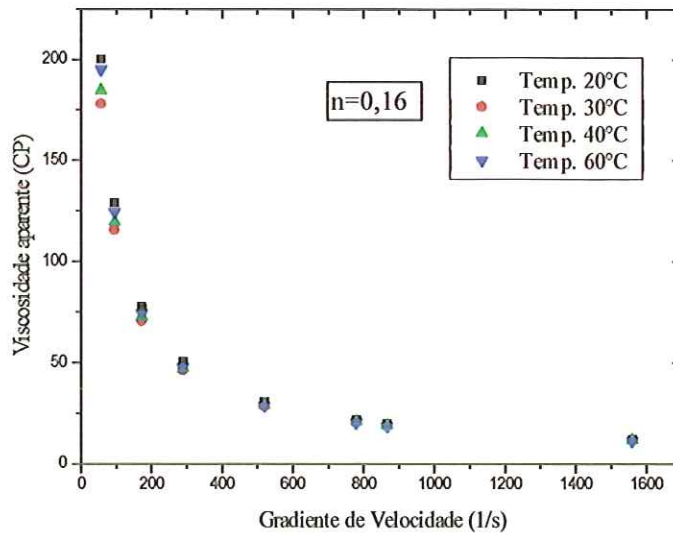


Figura 21: Curva da viscosidade aparente em função do gradiente de velocidade da mistura de bentonita para concentração de 6% em peso.

Com os dados assim obtidos para a viscosidade aparente em função da temperatura para concentrações constantes, de acordo com o gráfico da figura 23, determinaram-se, por regressão, as equações reológicas da viscosidade aparente, conforme mostra a tabela 6.

Não foram feitos ensaios no reômetro com concentração 0% (somente água), devido a precisão do aparelho ser acima de 1,0 centipoise, os dados da viscosidade da água para efeito de comparação foram obtidos no Handbook of Chemistry and Physics (1987).

Tabela 6: Equações reológicas da viscosidade aparente ( $\eta$ ) em função da temperatura T (°C) para concentrações (%) constantes.

Concentração em Peso (%)	Temperatura T (°C)	Viscosidade Aparente ( $\eta$ ) $\theta = \frac{T - 20}{60 - 20}$	Coef. de Determinação ( $R^2$ )
2,0	20 à 60°C	$\eta = 0,1069.\theta^{-0,3944}$	0,9127
3,0	”	$\eta = 0,0587.\theta^{-0,1591}$	0,9271

Tabela 6:Continuação.

Concentração em Peso (%)	Temperatura T (°C)	Viscosidade Aparente ( $\eta$ ) $\theta = \frac{T - 20}{60 - 20}$	Coef. de Determinação (R <sup>2</sup> )
4,0	”	$\eta = 0,0531.\theta^{-0,0803}$	0,9223
5,0	”	$\eta = 0,1254.\theta^{-0,1651}$	0,9532
6,0	”	$\eta = 0,1478.\theta^{-0,0786}$	0,9010

\* Relações válidas para  $\theta > 0$ .

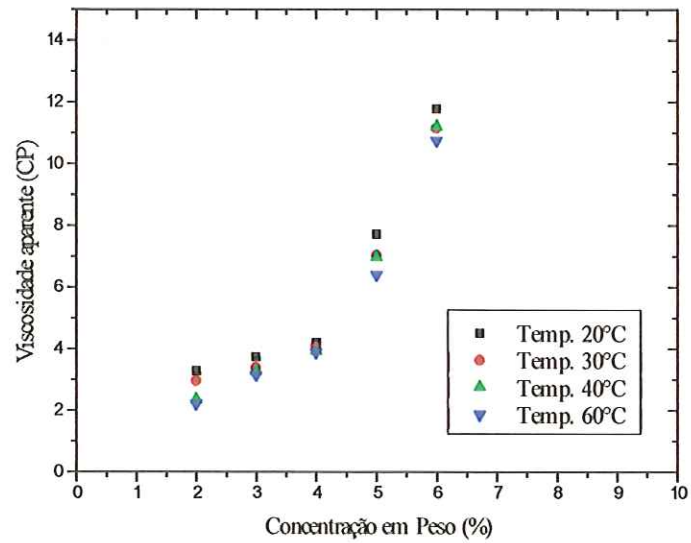


Figura 22: Viscosidade aparente da mistura de bentonita e água em função da concentração em variadas temperaturas.

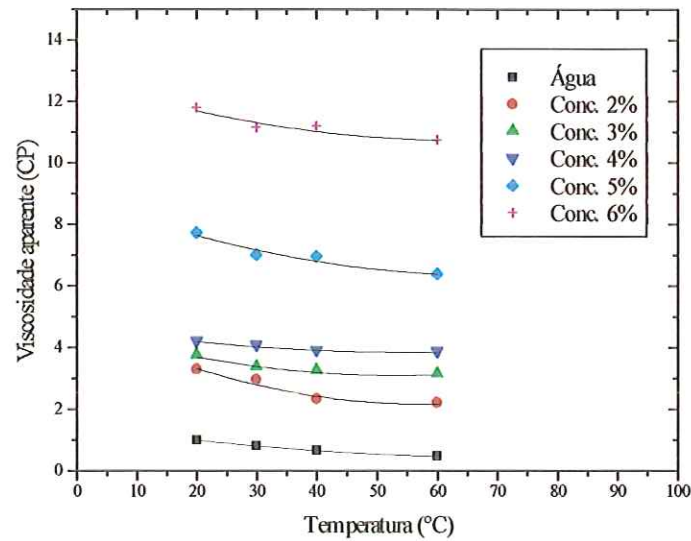


Figura 23: Viscosidade aparente da mistura de bentonita e água em função da temperatura, para diversas concentrações.

## 5.2 - Massa Específica

Uma vez calibrado o picnômetro determinaram-se as massas específicas da mistura de bentonita e água  $\rho_{\text{mistura}}$  ( $\text{g/cm}^3$ ) em função da temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), pela relação  $\rho_{\text{mistura}} = m_{\text{mistura}}/V_{\text{mistura}}$  e obteve-se a figura 24. A partir dos dados da massa específica em função da temperatura chegou-se às equações de regressão. Essas equações estão apresentadas na tabela 7.

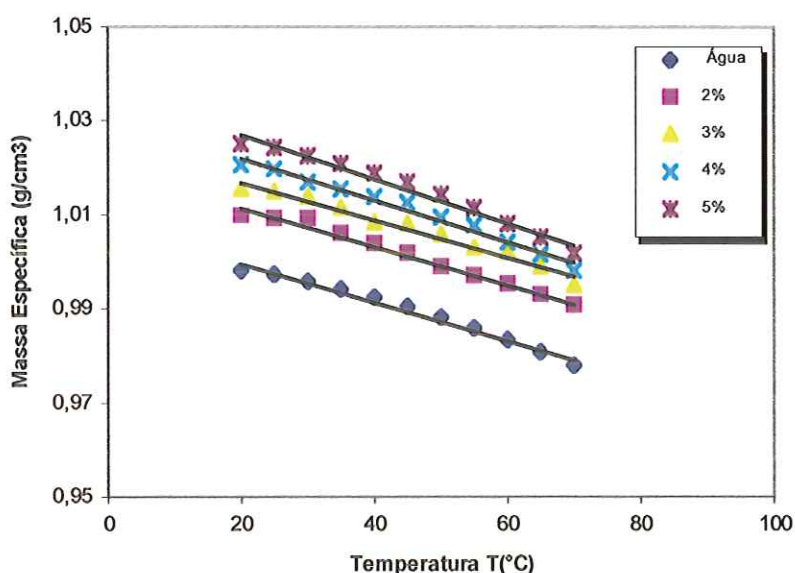


Figura 24: Massa específica da mistura de bentonita e água em função da temperatura para concentrações constantes.

A figura 24 mostra o comportamento da bentonita semelhante com o da água. Os acréscimos observados nos perfis em temperatura ambiente é decorrente do aumento da viscosidade com a concentração. Os dados para a

massa específica nestas temperaturas acima de 70 °C foram desprezados devido a bentonita gerar barreiras físicas de temperatura no picnômetro mesmo sob agitação magnética, o que invalidou os dados.

Tabela 7 : Equações para a massa específica,  $\rho_{\text{mistura}}$  em função da temperatura, T (°C).

Concentração em Peso (%)	Temp. T (° C)	Equação $\theta = \frac{T - 20^\circ}{70^\circ - 20^\circ}$	Coef. de Determinação (R <sup>2</sup> )
2%	20-70°	$\rho = 1,0196 - 0,0004 \cdot \theta$	0,9839
3%	”	$\rho = 1,0249 - 0,0004 \cdot \theta$	0,9780
4%	”	$\rho = 1,0307 - 0,0004 \cdot \theta$	0,9811
5%	”	$\rho = 1,0365 - 0,0005 \cdot \theta$	0,9785

\* Relações válidas para  $\theta > 0$

### 5.3 - Viscosidade Cinemática

A partir dos dados de viscosidade aparente e massa específica em função da temperatura e concentração para a bentonita, obteve-se o gráfico da figura 25, que mostra o comportamento da viscosidade cinemática em função da temperatura. Com esses dados, utilizando análise de regressão determinou-se as equações presentes na tabela 8, as quais são úteis nos cálculos de perdas energéticas, especificamente o número de Reynolds generalizado de Metzner e Reed (1955), que é o mais indicado nestes cálculos quando se trata de fluidos não-Newtonianos.

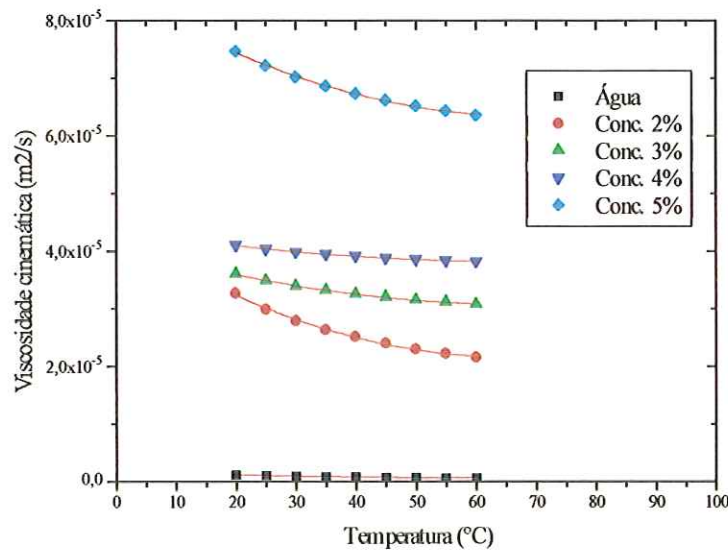


Figura 25: Viscosidade cinemática ( $\nu$ ) da mistura de bentonita e água em função da temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para concentrações constantes.

As equações obtidas por regressão para a viscosidade e massa específica são úteis nos cálculos de perda de carga da bentonita.

Tabela 8: Equações obtidas para a viscosidade cinemática ( $\nu$ ) em função da temperatura (T) °C para concentrações constantes da mistura de bentonita e água.

Concentração em Peso (%)	Temperatura T (° C)	Equação $\theta = \frac{T - 20^\circ}{60^\circ - 20^\circ}$	Coef. de Determinação (R <sup>2</sup> )
2,0	20 a 60	$\nu = 1.10^{-4} \cdot \theta^{-0,3799}$	1,0
3,0	”	$\nu = 6.10^{-5} \cdot \theta^{-0,1446}$	0,9980
4,0	”	$\nu = 5.10^{-5} \cdot \theta^{-0,0659}$	0,9988
5,0	”	$\nu = 1.10^{-4} \theta^{-0,1472}$	0,9996

\* Relações válidas para  $\theta > 0$ .



#### 5.4 - Perda de Carga

Os cálculos dos coeficientes de atrito para a determinação da perda de carga da mistura de bentonita e água foram obtidos pela equação de Darcy-Weisbach e algumas das equações indicadas na literatura.

Estas equações do coeficiente de atrito encontram-se de forma implícita, conforme a tabela 3 e equação (18) do capítulo 3, seu coeficiente foi determinado por método de resolução numérica (Apêndice B). Os ensaios foram realizados com água e com misturas de bentonita e água nas concentrações de 2, 3, 4, e 5% em peso em tubos de diâmetros interno de 50 mm e 75 mm. Logo após esta sequência de ensaios com água e mistura de bentonita e água, realizaram-se os testes com misturas de bentonita e areia em concentrações de 0,75 e 1,5 %.

Com todos os dados assim obtidos, diagramatizaram-se os coeficientes de atrito em função do número de Reynolds para a água comparando-os com a curva de Blasius para tubos lisos constante do diagrama de Moody e em função do número de Reynolds generalizado para as misturas de bentonita e água para as tubulações de 50 e 75 mm. Estes gráficos são apresentados nas figuras 26 a 33, sendo indicados em cada diagrama os autores das equações empregadas neste trabalho.

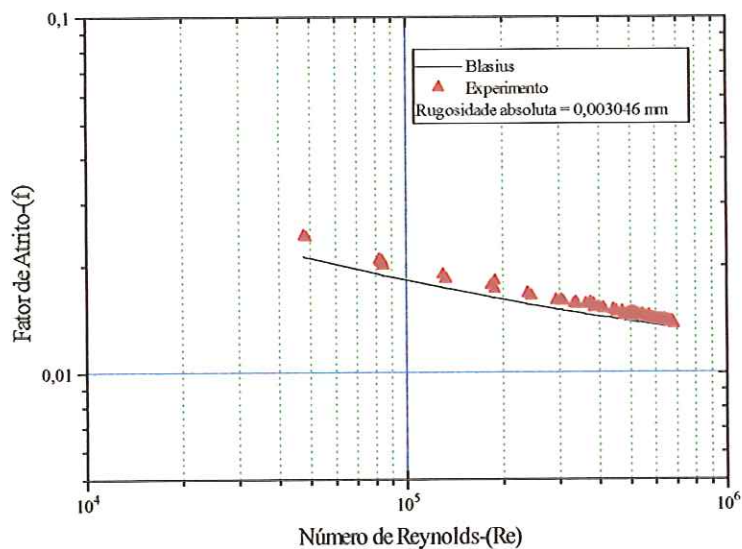


Figura 26: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds (Re)  
Fluido: água - Tubo de PRFV de 50 mm de diâmetro.

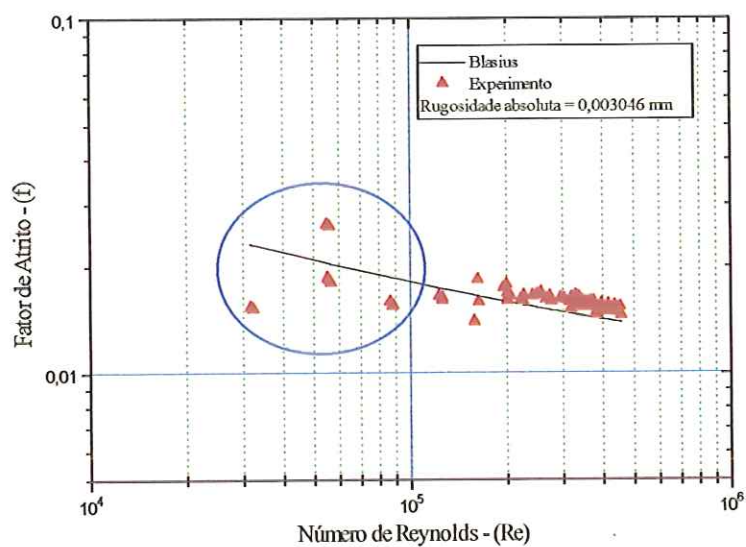


Figura 27: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds (Re)  
Fluido: água - Tubo de PRFV de 75 mm de diâmetro.

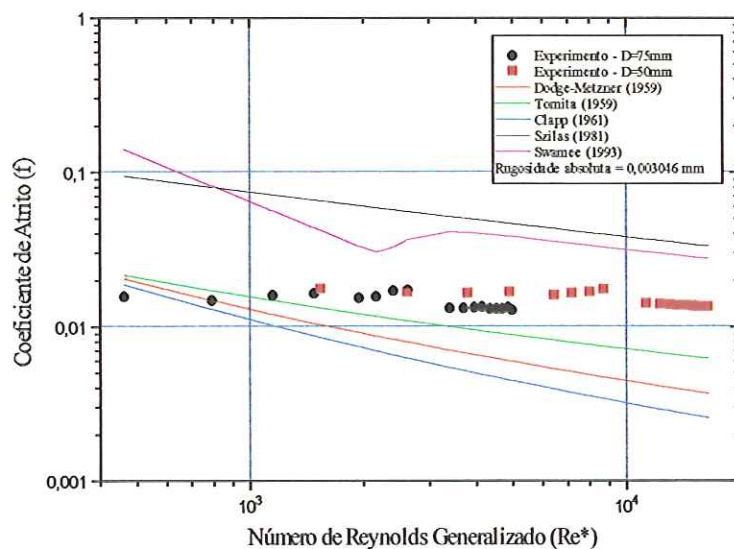


Figura 28: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizado ( $Re^*$ ) - Concentração de 2% em peso - Mistura de bentonita e água.

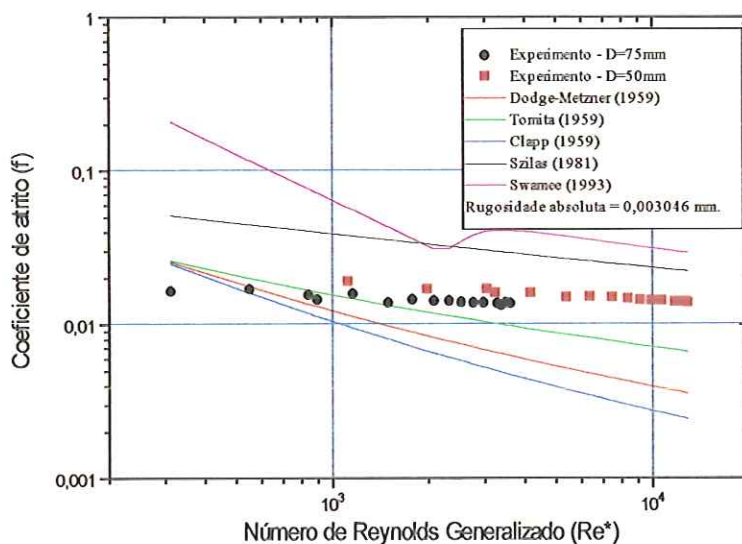


Figura 29: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizado ( $Re^*$ ) - Concentração de 3% em peso - Mistura de bentonita e água.

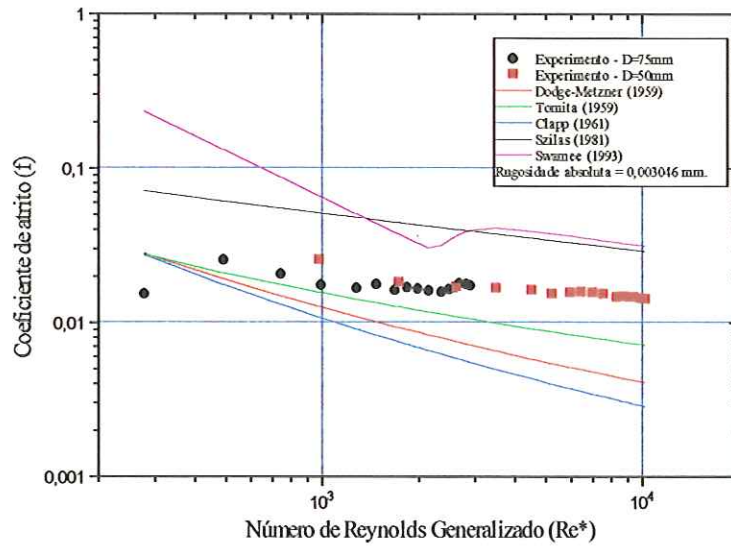


Figura 30: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizado ( $Re^*$ ) - Concentração de 4% em peso - Mistura de bentonita e água.

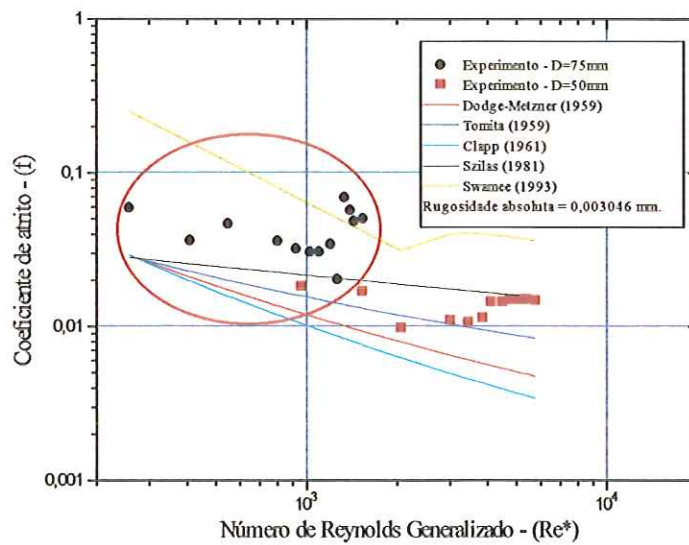


Figura 31: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizado ( $Re^*$ ) - Concentração de 5 % em peso - Mistura de bentonita e água.

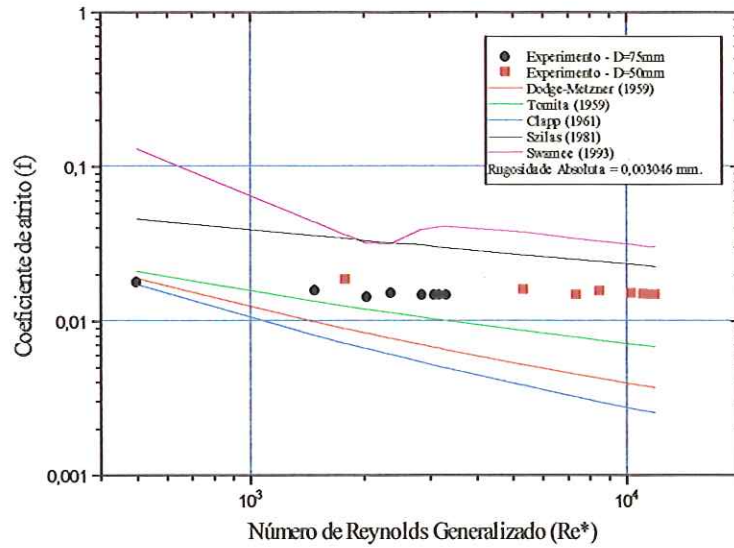


Figura 32: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizado ( $Re^*$ ) - Ensaio com mistura de bentonita e água (3%) e areia (0,75%) .

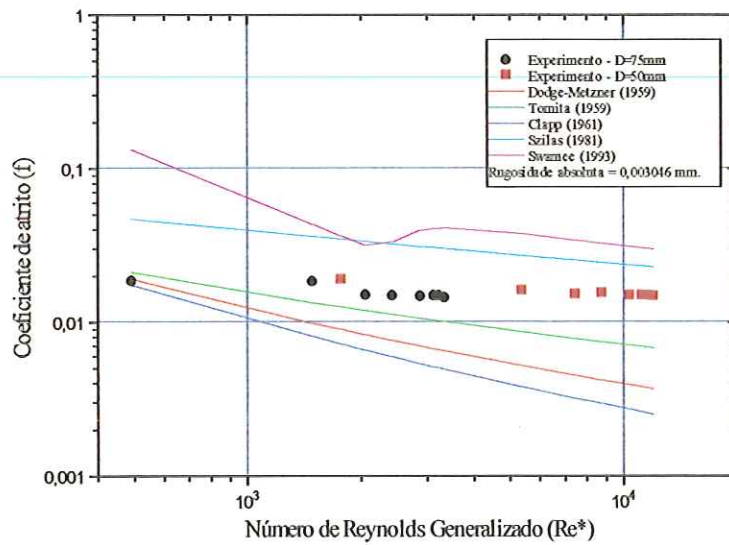


Figura 33: Coeficiente de atrito (f) em função do número de Reynolds generalizado ( $Re^*$ ) - Ensaio com mistura de bentonita (3%) e água e areia (1,5 %).

Os dados para a viscosidade e massa específica da água para o cálculo do número de Reynolds foram obtidos no Handbook of Chemistry and Physics (1987). Observam-se nos gráficos das figuras 26 e 27 que os dados observados do coeficiente de atrito colocam-se próximos da curva de Blasius para tubos lisos nas duas tubulações ensaiadas. Esse acréscimo no valor do coeficiente de atrito deve-se a emenda localizada entre as tomadas de pressão nos tubos de 50 e 75 mms. Os valores encontrados para a água do coeficiente de atrito utilizando-se a equação de Darcy-Weisbach mostram que há dispersão nos dados entre os números de Reynolds de  $2.10^4$  a  $2.10^5$  para o tubo de 75 mm polegadas, sendo as baixas vazões responsáveis pelas leituras menos precisas nas colunas de mercúrio dos manômetros.

As figuras 28 a 31 apresentam o coeficiente de atrito ( $f$ ) em função de Reynolds generalizado para as diversas concentrações da mistura de bentonita e água, visto que, nesses fluidos, deve-se empregar essa modificação do número de Reynolds proposta por Metzner-Reed (1955), devido ao seu comportamento não-Newtoniano. Observa-se que para todos os ensaios da mistura de bentonita e água os dados experimentais obtidos para o tubo de 50 e 75 mm apresentam-se em torno da região de transição em termos de número de Reynolds modificado e localizam-se entre a curva de Tomita (1959) e de Szilas (1981), e de acordo com o aumento da concentração os dados tendem a aproximar-se cada vez mais do primeiro. Lembra-se que a análise de Santana (1984), indicou a equação de Szilas (1981) mais satisfatória quando se pretende transportar partículas não-poliméricas, que não é o caso da mistura bentonita e água. Em geral a

equação de **Tomita (1959)**, apresenta uma boa concordância com os valores observados do coeficiente de atrito em função do número de Reynolds generalizado mostrando-se mais indicada para a determinação da perda de carga desses fluidos. Nota-se que a curva de **Swamee (1993)** tem um comportamento muito similar aquele apresentado pelo diagrama de Moody para tubos lisos nas regiões de escoamento em regimes, laminar, transição e turbulento.

Os dados experimentais para os ensaios que foram realizados com areia e bentonita, nas figuras 32 a 33, mostram que a areia transportada não influencia significativamente nos resultados do coeficiente de atrito quando comparados com a mistura de bentonita sem areia. Isto se deve a granulometria fina da areia com diâmetro médio de 0,40 mm, a qual parece não estar afetando as propriedades reológicas da mistura de bentonita por se comportar como um fino. Além disso, frisa-se o fato de ter-se empregado baixa concentração de areia. Isto leva a concluir que a mistura foi em sua totalidade homogênea.

A dispersão dos dados experimentais observados na elipse que se destaca no gráfico da figura 27, deveu-se a uma bifurcação e emenda localizada entre as tomadas de pressão no tubo de 75 mm de diâmetro. A bifurcação fazia parte do circuito que existia anteriormente na instalação-piloto e foi mantida no mesmo, após as adaptações realizadas, para que possa ser aproveitada em outras experiências no futuro. Durante os ensaios preliminares com água no tubo de 75 mm, observou-se a formação de

câmaras de ar na bifurcação e como solução para a retirada do ar colocou-se válvulas de pressão no mesmo, mas esse procedimento não foi suficiente para sanar o problema da dispersão a baixos números de Reynolds, como nota-se no gráfico da figura 27. O aparecimento da emenda no tubo de 75 mm é devido ao tubo de PRFV (Plástico Reforçado de Fibra de Vidro) ser comercializado em comprimento de seis metros.

A outra dispersão observada no gráfico da figura 31, foi devido a camada tampão que se formou nas mangueiras de silicone das tomadas de pressão durante os ensaios com a mistura de bentonita-água, que criou entupimentos e prejudicou as leituras de pressão nos manômetros de mercúrio.

### **5.5 - Perfis de Velocidade**

As medidas da velocidade em vários pontos da tubulação foram realizadas com o auxílio de um tubo de Pitot, localizado na seção transversal no tubo de 3 polegadas. As medidas em cada ponto eram distanciadas de 5 mm uma da outra para obter-se o perfil de velocidades para número de Reynolds variando de  $5 \cdot 10^4$  a  $4 \cdot 10^5$  para a água e de  $5 \cdot 10^2$  a  $5 \cdot 10^3$  para a lama de bentonita. Foram realizados ensaios com concentrações de misturas de bentonita e água em 2, 3 e 4 % em peso, em seguida foram feitos ensaios com bentonita na concentração média de 3% e areia em 0,75% e 1,5%. A concentração de 5% em peso não foi alvo deste ensaio devido as dificuldades encontradas, como entupimento no orifício do Pitot, mangueiras



e no cata-bolhas-sedimentos, que impossibilitavam as leituras nos manômetros. A partir das medidas obtidas com o Pitot, calcularam-se as velocidades ( $u$ ), através da equação 21.

$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad \text{Eq.(21)}$$

Onde;

$u$  = Velocidade em um ponto da seção transversal do tubo.

$\Delta P$  = Diferença de pressão.

$\rho$  = Massa específica.

Nota-se dos gráficos das figuras 34 à 45 que há semelhanças nos perfis de velocidade de cada concentração ensaiada. Observa-se que a medida que a concentração aumenta, o número de Reynolds generalizado diminui para mesma velocidade média, isto se deve ao aumento da viscosidade da mistura.

Nos gráficos da figura 40 a 45 a mistura de bentonita-água e bentonita-areia-água apresentaram perfis de velocidade bem distribuídos,

principalmente para altos valores do números de Reynolds generalizado, que demonstra que a mistura tanto da bentonita-água quanto da bentonita-areia-água são homogêneas para essas concentrações ensaiadas. Observam-se nestes perfis que a distância radial superior e inferior do tubo influencia ligeiramente nas medidas da velocidade. Tal efeito se deveu ao alinhamento do Pitot em relação à parede da tubulação.

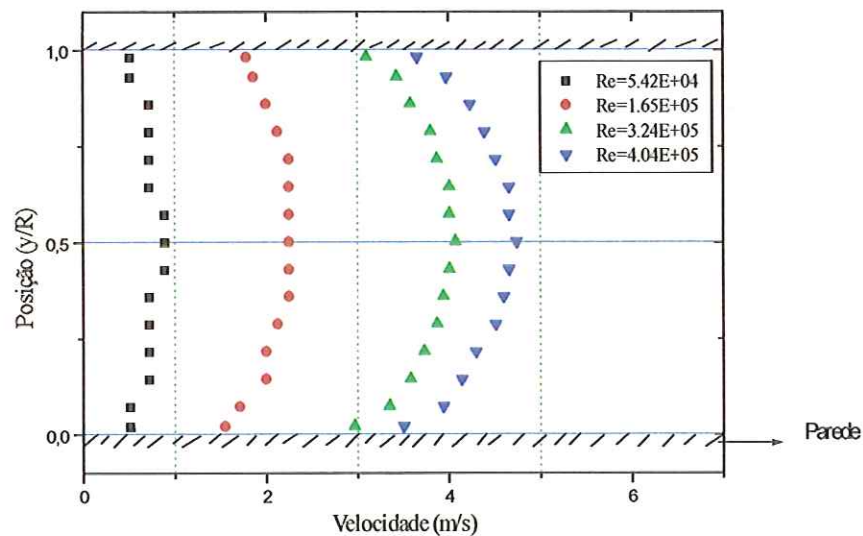


Figura 34: Perfis de velocidade experimentais para a água - Tubo de 75 mm de diâmetro.

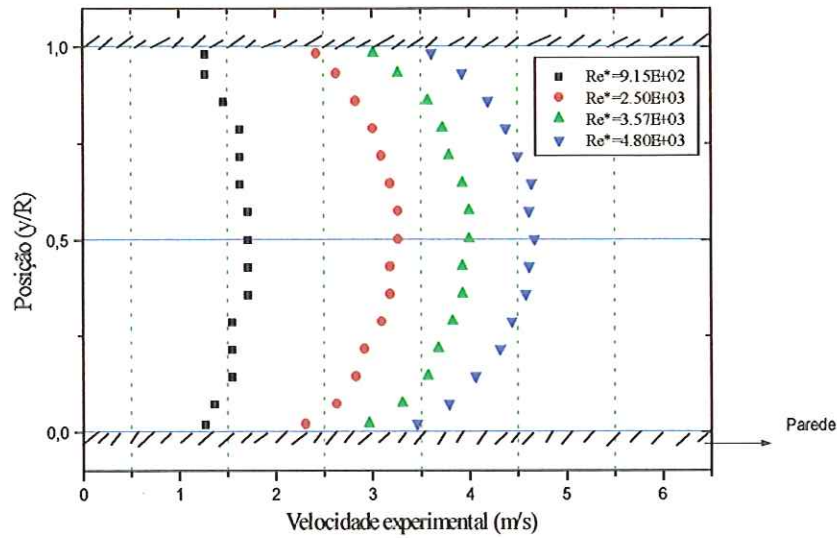


Figura 35: Perfis de velocidade experimentais para a mistura de bentonita e água a concentração de 2% em peso. Tubo de 75 mm de diâmetro

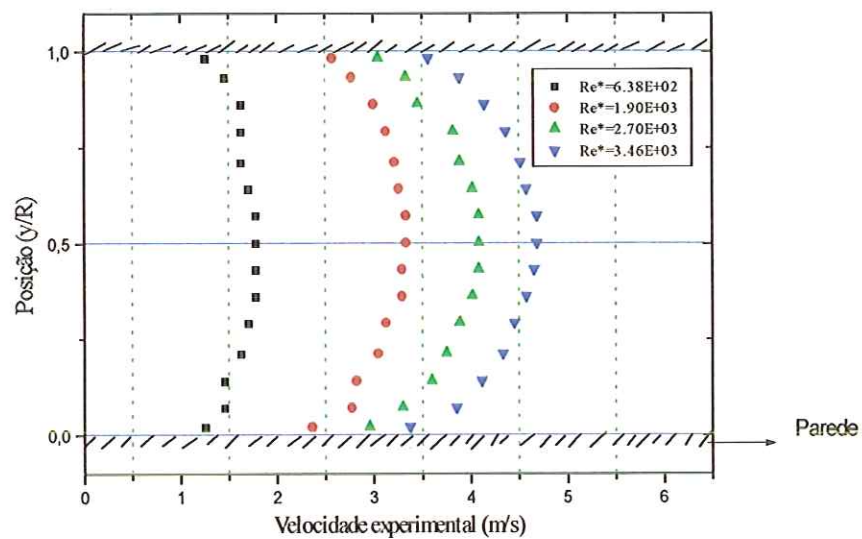


Figura 36: Perfis de velocidade experimentais para a mistura de bentonita e água a concentração de 3% em peso. Tubo de 75 mm de diâmetro.

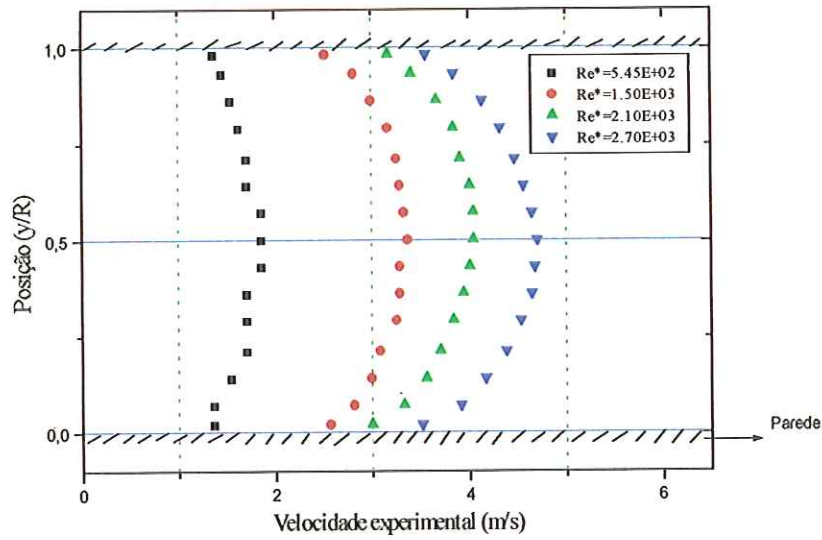


Figura 37: Perfis de velocidade experimentais para a mistura de bentonita e água a concentração de 4% em peso. Tubo de 75 mm de diâmetro

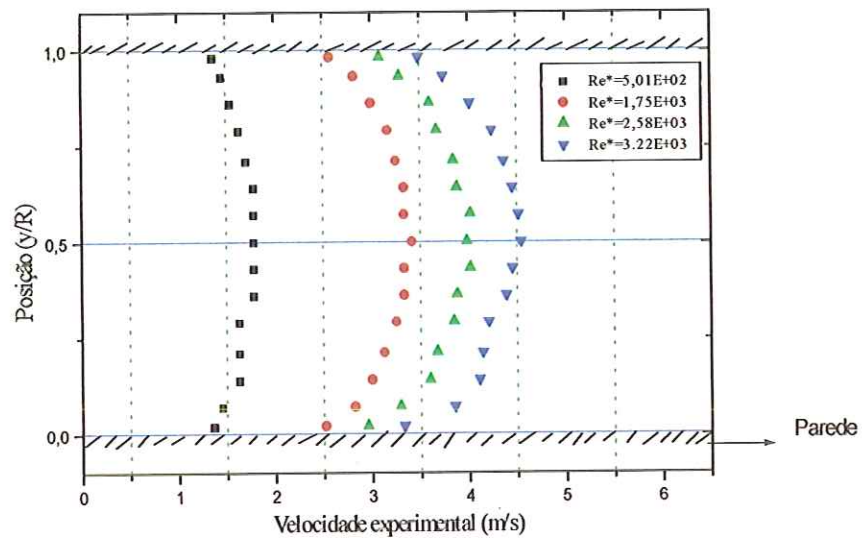


Figura 38: Perfis de velocidade experimentais para a mistura de bentonita e água (3%) e areia (0,75%) - Tubo de 75 mm de diâmetro.

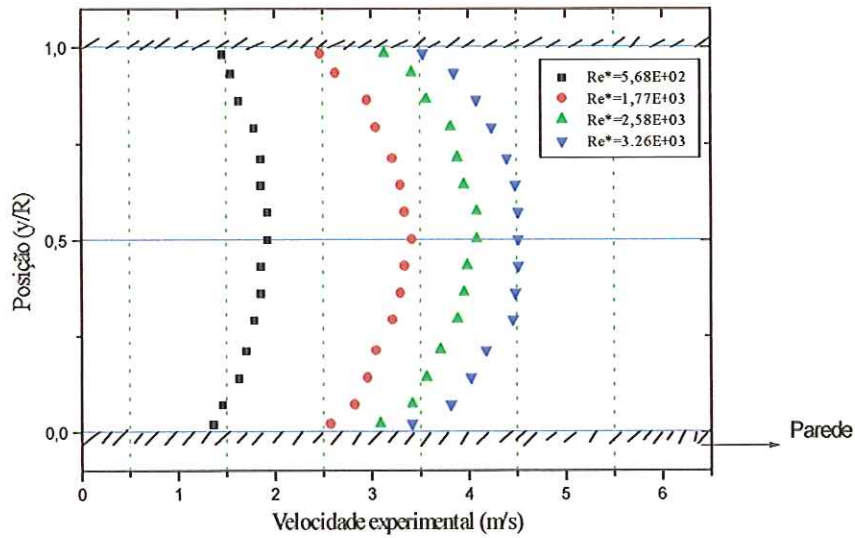


Figura 39: Perfis de velocidade experimentais para a mistura de bentonita e água (3%) e areia (1,5%) - Tubo de 75 mm de diâmetro

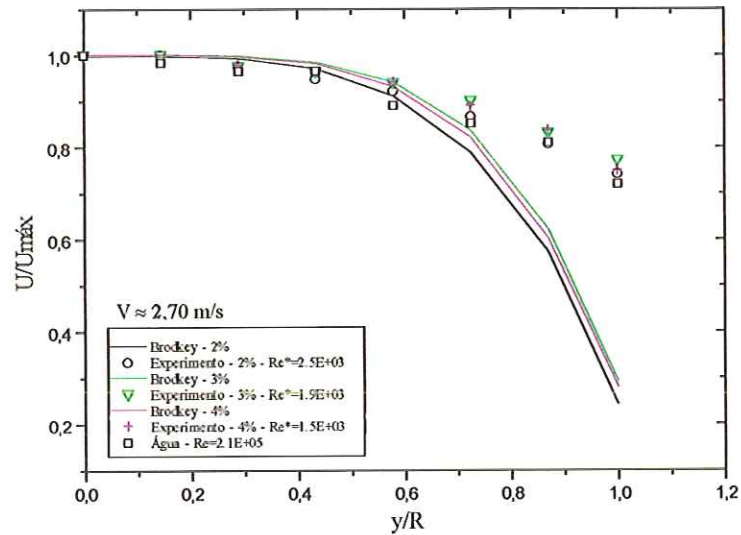


Figura 40: Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Brodkey et al.(1961).

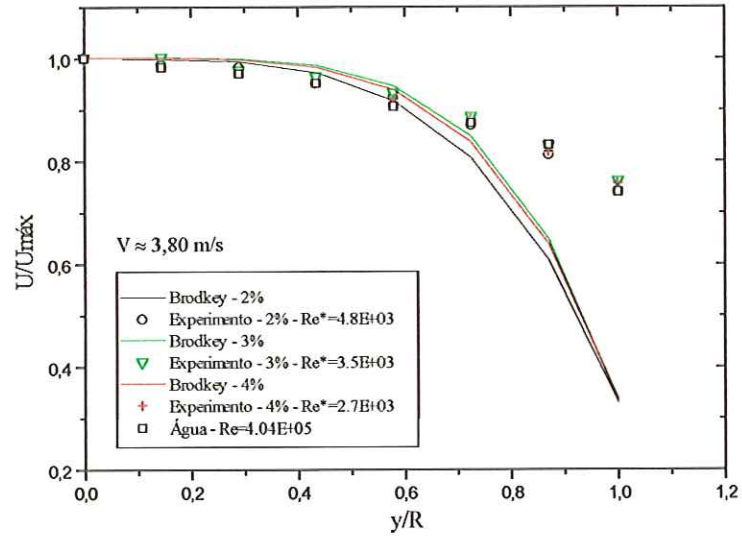


Figura 41: Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Brodkey et al. (1961).

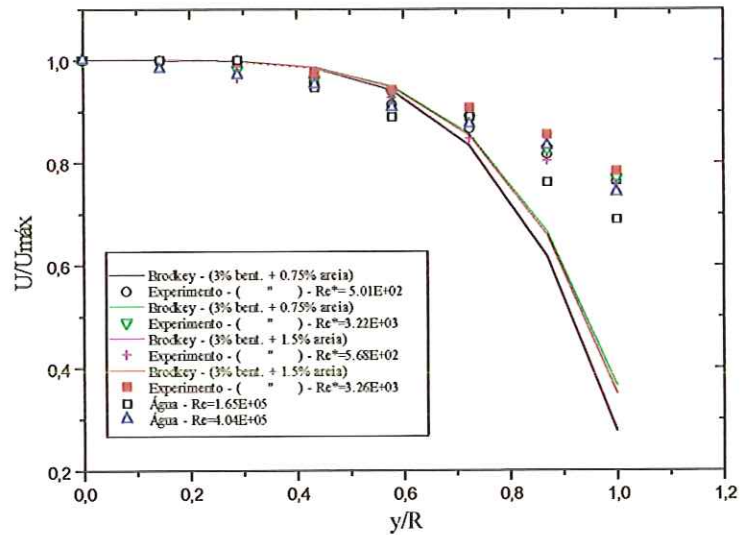


Figura 42: Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Brodkey et al. (1961).

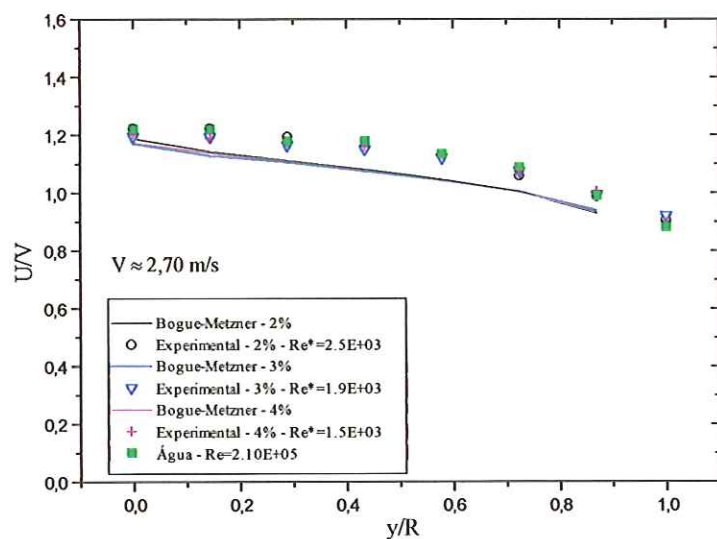


Figura 43: Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Bogue e Metzner (1963).

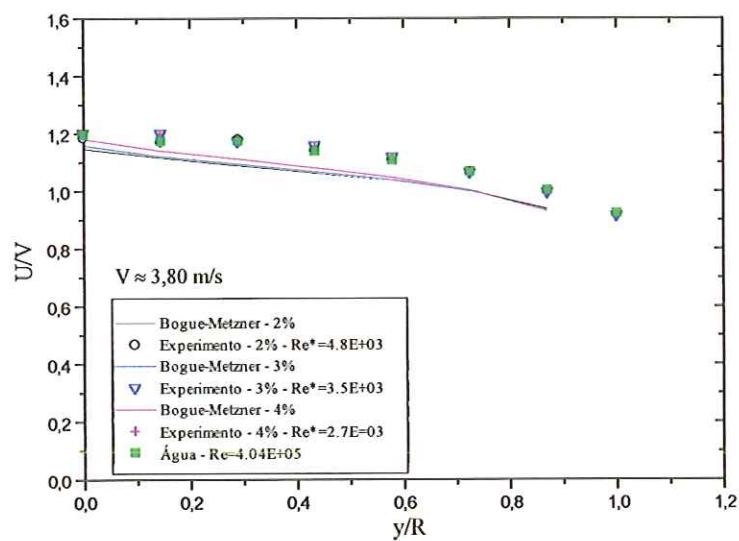


Figura 44: Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Bogue e Metzner (1963).

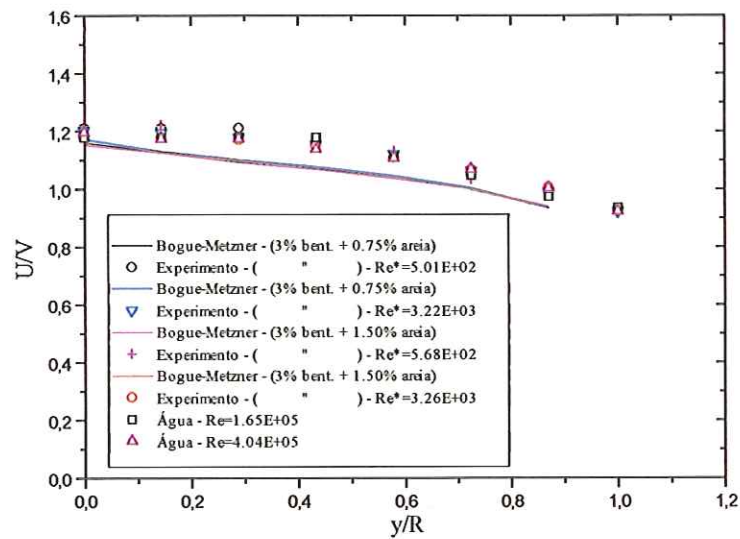


Figura 45: Comparação entre os perfis de velocidade adimensionais observados e calculados pela equação de Bogue e Metzner (1963).

Os perfis de velocidade adimensionalizados das figuras 40 a 45 obtidos experimentalmente e calculados pelas equações (03) e (07) de **Brodkey et al. (1961)** e **Bogue e Metzner (1963)**, respectivamente, apresentaram comportamento diferenciado. As velocidades observadas junto às paredes são bem superiores aquelas indicadas pelas equações (03) e (07). Os gráficos das figuras 40 e 42 que foram calculados com a equação de **Brodkey et al. (1963)** apresentam desvios significativos nas curvas a partir



da posição  $y/R = 0,72$ . Este afastamento deve-se ao valor de  $m$  tomado nestes cálculos que foi o mesmo assumido pelo autor ( $m=18$ ).

As vazões obtidas por integração e as obtidas experimentalmente não apresentaram muitas diferenças entre si. Da comparação entre essas vazões, foram estimados erros entre 0,001 e 5 % para todos os ensaios. Conseguiu-se esta precisão nas vazões através de três medidas de vazão realizadas gravimetricamente para cada condição de escoamento. Este procedimento minimizou o erro experimental e trouxe mais confiabilidade aos dados. Nos cálculos, considerou-se este erro desprezível e manteve-se nos mesmos, as vazões obtidas experimentalmente. No apêndice C apresentam-se todos os cálculos da integração dos perfis de velocidade utilizados neste trabalho.

## 6 - CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um estudo experimental sobre o escoamento de mistura bentonia-água num duto circular. Foram realizados ensaios reológicos para determinação da viscosidade, massa específica, densidade e granulometria. A perda de carga foi observada em tubos de 50 e 75 mm de diâmetro em escoamentos de mistura bentonita-água e desta mistura transportando areia como material graúdo. Os perfis de velocidade das misturas na seção transversal do tubo de maior diâmetro foram determinados com tubo de pitot.

A análise dos resultados dos ensaios reológicos mostrou que a mistura bentonita-água tem características não-Newtonianas com comportamento pseudoplástico. O modelo de Herschell-Bulkley apresentou-se mais adequado para descrever tal comportamento e para obtenção da viscosidade aparente. Uma comparação entre o fator de atrito observado em escoamentos de misturas como função do número de Reynolds generalizado e aqueles calculados por diferentes métodos mostra que os dados experimentais se colocam entre as previsões dos modelos de Tomita (1959) e Szilas (1981).

Assim com base nos dados observados, pode-se concluir que estes modelos oferecem melhor aproximação do coeficiente de atrito para misturas de bentonita e água. Os perfis de velocidade adimensionalizados através de velocidade máxima e média com os perfis obtidos das formulações de **Brodkey et al. (1961)** e **Bogue e Metzner (1963)**, mostraram que o primeiro modelo subestima a velocidade da mistura nas proximidades da parede do duto circular. O modelo de **Bogue e Metzner (1963)** aproxima melhor a variação da velocidade longitudinal na seção circular.

## 7 - SUGESTÃO

Em vista da importância do transporte de misturas sólido-líquido para as áreas da engenharia, recomenda-se pesquisas que venham a desenvolver instrumentos de medição de velocidades pontuais na seção transversal de um tubo para obtenção dos perfis de velocidade de misturas sólido-líquido a concentrações mais elevadas.

## 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- **BOGUE, D. C. and METZNER, A. B.**, “*Velocity Profiles in Turbulent pipe Flow*”; I&EC Fundamentals, Vol.2, N. 2, May, 1963, pp. 143-149.
- 2- **BRODKEY, R. S, LEE, J. and CHASE, R. C.**; “*A Generalized Velocity Distribution for Non-Newtonian Fluids*”, AIChE Journal, Vol. 7, N.3 , September, 1961.pp. 392 - 393.
- 3- **BROWN, N. P., SHOOK, C. A, and PETERS, J.**; “*A Probe For Point Velocities in Slurry Flows*”; The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 61, August, 1983. pp.597-602.
- 4- **CHENG, D. C.-H., RAY, D. J. and VALENTIN, F. H. H. ;** “*The Flow Thixotropic Bentonite Suspensions Through Pipes and pipe Fittings*”; Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol. 43, 1965.
- 5- **DARBY, R.**; “*Hydrodynamics of Slurries and Suspensions*”, Encyclopedia of Fluid Mechanics, V.5 - Slurry Flow Technology, Cheremisinoff, Ed., 1986.
- 6- **DORON, P. and BARNEA, D.** “*Flow Pattern Maps For Solid-Liquid Flow*”, International Journal of Multiphase Flow”, Vol. 22, N. 2, pp.273-283.

- 7- EISSEBERG, D. M. and BOGUE, D. C. ; "Velocity Profiles of Thoria Suspensions in Turbulent Pipe Flow"; AICHe Journal, Vol. 10, N.5 , September, 1964, pp. 723-727.
- 8- GILLIES, R. G., SHOOK, C. A. and WILSON, K. C. ; "An Improved Two Layer model For Horizontal Slurry Pipeline Flow"; "The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 69, February, 1991, pp. 173-178.
- 9- GOVIER, G. W and AZIZ, K., "The Flow of Complex Mixtures in Pipes", Litton Educational Publishing, Inc.,1972.
- 10- LAZARUS, J. H., "Mixed - Regime Slurries in Pipelines, I: Mechanistic Model", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 115, N.11, 1989.
- 11- MANRICH, S. e PESSAN, L. A. ; "Reologia-Conceitos Básicos",1987.
- 12- MASSARANI, G. e TELLES, S.A; "Escoamento de Soluções e Suspensões não-Newtonianas em dutos"; Anais da XX ENEMP, São Carlos, II , 397., 1992.
- 13- MAO-QUAN, T. ; "A New Instrument for Turbulent Velocity Measurement ", (Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan Hubei, P. R. of China), Proceedings

International Symposium On Refined Flow Modelling And Turbulence Measurements, ASME, September, 1985.

- 14- METZNER, A. B. and REED, J. G. ; “*Flow of Non-Newtonian Fluids-Correlations of the Laminar, Transition and Turbulent Flow Regions*”, AIChE Journal ; 430, 1955.
- 15- NAKAE, T. ; “*Influência dos Sedimentos Finos na Redução de Arraste em Escoamento de Areia em Conduto Forçado*”; Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor, Vol. 1, 1994, São Paulo.
- 16- PERRY, R. H. and CHILTON, C. H. ; “*Manual de Engenharia Química*” 5ª ed., Guanabara Dois Ed., 1980.
- 17- SANTANA, C. C. , ISMAIL, K. A. R. AND MASSARANI, G., “*Horizontal Hydraulic Transportation of Solid Particles*”, Rev. Bras. Tec., V.10, 1979.
- 18- SANTANA, C. P., COELHO, G.L.V. e CLEMENTE, S. F. ; “*Escoamento Turbulento de Suspensões de Minério de Ferro*” , Rev. Bras. de Engenharia Química, Vol. 7, nº 3-4, pág. 49-51, - Unicamp 1984.
- 19- SANTOS, P. S.; “*Tecnologia das Argilas*”, Vol. 1, Editora Edgar Blucher Ltda, 1975.

- 20- **SATTO, J.;** *“Caracterização Hidráulica do Transporte de Vinhaça em Tubulações”*, Tese de Doutorado - USP-EESC, 1994.
- 21- **SILVA, M. G. P., MARTINS, A. L. M. e OLIVEIRA, A. A. J. ,** *“Avaliação do Comportamento Reológico de Fluidos de Perfuração no escoamento Anular”*, 2ª. Mesa-Redonda Sobre Revestimento e Cimentação de Poços de Petróleo, Petrobrás, 1988.
- 22- **SUMMER, R. J. ; SHOOK, C. A. ; and ROCO, M. C.;** *“Concentration Fluctuation Spectra in Turbulent Shurry Pipeline Flow”*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 111, Spetember, 1989, pp. 317-323.
- 23- **SWAMEE, P. K.,** *“Design of a Submarine Oil Pipeline”*, Journal of Transportation Engineering, Vol. 119, N.1, Jan/feb., 1993.
- 24- **SZILAS, A. D., BOBOK, E., and NAVRATIL, L.;** *“Determination of Turbulent Pressure Loss of Non-Newtonian Oil Flow in Rough Pipes”*; Reol.Acta, Vol. 20, 1981, pp. 487-496.
- 25- **VIRARAGHAVAN, T. and KAPOOR, A. ;** *“Adsorption of Mercury from Wastewater by Bentonite”*, Applied Clay Science, 9 , 31- 49, (1994).
- 26- **WANG, Z. and LARSEN, P.;** *“Turbulent Structure of Water and Clay Suspensions With Bed Load”*; Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 120. N. 5, May, 1994 -pp. 577 - 601.



- 27- WASP, E. J.; SEITER, R. H. and THOMPSON, T. L.; "*Hetero-Homogeneous Solid/Liquid Flow in the Turbulent Regime*", Paper 13, 199-210, Pergamon Press, 1971.
- 28- ZANDI, I.; "*Advances in Solid - Liquid Flow in Pipes and Its Application*", Pergamon Press, Inc. 1971.
- 29- ZANDONADI, A. R.; "*Estudos Preliminares Sobre as Argilas Verdes de Sacramento Como Agentes Tixotrópicos Para Fluidos de Perfuração de Poços*", IPT-Pub. 954, e. 2, 1967.
- 30- ZANDI, I. AND RUST, R. H.; "*Turbulent non-Newtonian Velocity Profiles in Pipes*", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 91, N. HY6, Nov. 1965.

## 9 - APÊNDICE A

Tabela : Diâmetros obtidos para a bentonita em pó ( $\mu\text{m}$ ).

1ª Área	2ª Área	3ª Área	4ª área	5ª Área
9.8	8.03	6.4	9.5	15.4
4.0	5.1	2.8	3.2	17.2
1.62	2.3	1.2	1.7	12.8
14.9	15.6	29.3	1.06	28.5
16.9	17.2	24.5	2.5	26.2
17.6	23.5	25	18.5	36.2
29.8	28.5	30.9	17.6	38.2
29.1	31.4	30.5	12.5	45.1
32.86	35.2	71	14.3	
39.3	36	77.9	23.5	
39.9	46.3	84	23.9	
	55.5	84	35.2	
		88	40.6	
		98	45.3	

## 10 - APÊNDICE B

Este programa calcula pelo método da bisseção o coeficiente de atrito das equações da tabela 3 do capítulo 3.

```

10 CLEAR
20 CLS
30 PRINT "MÉTODO DA BISSEÇÃO"
40 PRINT "EQUAÇÃO DO FATOR DE ATRITO"
50 PRINT "ENTRE COM OS DADOS"
60 PRINT
70 INPUT "QUAL O VALOR DE N=";N
80 INPUT "QUAL O NÚMERO DE REYNOLDS=";re
90 INPUT "APRXPXIMAÇÃO INICIAL X0="; a: A1 = a
100 INPUT "                X1="; B: B1=B
110 INPUT "QUAL O ERRO                E="; E
120 INPUT "NÚMERO MÁXIMO DE ITERAÇÕES="; N
130 PRINT
140 REM *****
150 REM EQUAÇÃO DO FATOR DE ATRITO
160 DEF Fnequação (x) =
170 REM *****
180 GOSUB 520
190 IF (b-a)<E THEN 400
200 K=1

```

```

210 X=a
220 Fa=Fnequação (x)
230 PRINT a; Fa
240 DIM Z(N+2), fZ (N+2)
250 FOR I = 1 TO N+2
260 Z (I) = (a + b)/2
270 X = Z (I)
280 fZ (I) = Fnequação (X) : IF W=1 THEN 310
290 PRINT "  RESULTADOS DAS ITERAÇÕES  "
300 W = 1
310 PRINT ; I ; Z (I); fZ (I)
320 IF Fa * fZ (I) > 0 THEN a = Z (I) : GOTO 340
330 b = Z (I)
340 IF ABS ( b - a ) < E THEN 400
350 IF ABS (((b - a) / b) * 100) < E THEN 400
360 IF ABS ( fZ (I)) < E THEN 400
370 K = K + 1
380 NEXT I
390 PRINT " ----- SOLUÇÃO -----"
400 PRINT " Número de Iterações      : "; K
410 PRINT " Raiz                      : "; Z(I)
420 PRINT " PRECISÃO                      : "; E
430 GOSUB 810
490 PRINT "ALERTA ! NÃO CONVERGIU , ITERAÇÕES
INSUFICIENTES"
500 PRINT "FORNEÇA OUTRO NÚMERO"
510 PRINT Z= 2: GOTO 730

```

```
520 PRINT "VERIFICAÇÃO PARA SABER SE EXISTE RAIZ NO
INTERVALO FORNECIDO"
530 X = a
540 Fa = Fnequação (x)
550 X = b
560 Fb = Fnequação (x)
570 PRINT "Fa = "; Fa; "Fb="; Fb
580 IF Fa * Fb < 0 THEN 600 ELSE 620
600 PRINT " OK ! "
610 RETURN
620 PRINT "NÃO EXISTE RAIZ NO INTERVALO CONHECIDO"
630 PRINT " Fa * FB > 0 "
640 PRINT " -----FIM-----"
650 END
660 FOR I = 1 TO K
670 FOR I = 1 TO K
680 PRINT TAB (10); I; TAB (25); Z(I); TAB (40); fZ (I)
690 NEXT I
700 GOTO 640
```

## 11 - APÊNDICE C

### Cálculo do Perfil de Velocidades

#### 11.1 - Fluido: Água

Perfil de velocidades

Volta no R.G	Vazão Kg/s	Vel Média (m/s)	Posição	$\Delta H$ (mmHg)	$\Delta H$ (N/m <sup>2</sup> )	$U=\sqrt{2 \cdot \Delta H} / \rho$ (m/s)	$\tau_o$	$u^*$ (vel. de atrito)-m/s
0V+6	3,04	0,67	1,00	1	133,333	0,517	26,568	0.16328
			0,93	1	133,333	0,517		
			0,86	2	266,667	0,732		
			0,79	2	266,667	0,732		
			0,71	2	266,667	0,732		
			0,64	2	266,667	0,732		
			0,57	3	400,000	0,896		
			0,50	3	400,000	0,896		
			0,43	3	400,000	0,896		
			0,36	2	266,667	0,732		
			0,29	2	266,667	0,732		
			0,21	2	266,667	0,732		
			0,14	2	266,667	0,732		
			0,07	1	133,333	0,517		
			0,00	1	133,333	0,517		

$\tau_o$	$u^*$	y	Posição Micrômetro	$U_i$	$r_i$	Delta <i>i</i>	$2 \cdot \pi \cdot U_i \cdot r_i \cdot \Delta i$	Veloc. Média integrada
26,57	0,16328	3,6	34,5	0,517	0,0345	0,005	5,61E-04	
		8,1	30	0,517	0,03	0,005	4,88E-04	
		13,1	25	0,732	0,025	0,005	5,75E-04	
		18,1	20	0,732	0,02	0,005	4,60E-04	
		23,1	15	0,732	0,015	0,005	3,45E-04	
		28,1	10	0,732	0,01	0,005	2,30E-04	
		33,1	5	0,896	0,005	0,005	1,41E-04	
		38,1	0	0,896	0	0,005	0,00E+00	
		33,1	5	0,896	0,005	0,005	1,41E-04	
		28,1	10	0,732	0,01	0,005	2,30E-04	
		23,1	15	0,732	0,015	0,005	3,45E-04	
		18,1	20	0,732	0,02	0,005	4,60E-04	
		13,1	25	0,732	0,025	0,005	5,75E-04	
		8,1	30	0,517	0,03	0,005	4,88E-04	
		3,1	35	0,517	0,035	0,005	5,69E-04	

$$Rey=5,42E+02$$

0,002798	0,614
----------	-------

## Perfil de velocidades

Tubo de 75 mm de diâmetro

fluido: água

Volta no R.G	Vazão Kg/s	Vel Média (m/s)	Rey	Posição (mm)	Posição	$\Delta H$ (mmHg)	$\Delta H$ (N/m <sup>2</sup> )	$U=\sqrt{2.\Delta H/\rho}$ (m/s)
1v+1	8,49	1,86	1,65E+5	34,5	1,00	12	1600,0	1,8
				30	0,93	13	1733,3	1,9
				25	0,86	15	2000,0	2,0
				20	0,79	17	2266,7	2,1
				15	0,71	19	2533,3	2,3
				10	0,64	19	2533,3	2,3
				5	0,57	19	2533,3	2,3
				0	0,50	19	2533,3	2,3
				-5	0,43	19	2533,3	2,3
				-10	0,36	19	2533,3	2,3
				-15	0,29	17	2266,7	2,1
				-20	0,21	15	2000,0	2,0
				-25	0,14	15	2000,0	2,0
				-30	0,07	11	1466,7	1,7
				-35	0,00	9	1200,0	1,6

U/um ax	Posição	Ui	ri	delta i	Vazão	Vel. Med. Integr.	u/V
0,79	34,5	1,79	0,0345	0,005	0,0019		0,94
0,83	30	1,87	0,03	0,005	0,0018		0,97
0,89	25	2,00	0,025	0,005	0,0016		1,05
0,95	20	2,13	0,02	0,005	0,0013		1,11
1,00	15	2,25	0,015	0,005	0,0011		1,18
1,00	10	2,25	0,01	0,005	0,0007		1,18
1,00	5	2,25	0,005	0,005	0,0004		1,18
1,00	0	2,25	0	0,005	0,0000		1,18
1,00	5	2,25	0,005	0,005	0,0004		1,18
1,00	10	2,25	0,01	0,005	0,0007		1,18
0,95	15	2,13	0,015	0,005	0,0010		1,11
0,89	20	2,00	0,02	0,005	0,0013		1,05
0,89	25	2,00	0,025	0,005	0,0016		1,05
0,76	30	1,72	0,03	0,005	0,0016		0,90
0,69	35	1,55	0,035	0,005	0,0017		0,81
					0,0087	1,92	

## Perfil de velocidades

Tubo de 75 mm de diâmetro

fluido: água

Densidade: 995,22 Kg/m<sup>3</sup>

Volta no R.G	Vazão Kg/s	Vel Média (m/s)	Rey	Posição (mm)	Posição	$\Delta H$ (mmHg)	$\Delta H$ (N/m <sup>2</sup> )	$U=\sqrt{2 \cdot \Delta H / \rho}$ (m/s)
1v+5	15,15	3,33	3,24E+5	34,5	1,00	36	4800,0	3,1
				30	0,93	44	5866,7	3,4
				25	0,86	48	6400,0	3,6
				20	0,79	54	7200,0	3,8
				15	0,71	56	7466,7	3,9
				10	0,64	60	8000,0	4,0
				5	0,57	60	8000,0	4,0
				0	0,50	62	8266,7	4,1
				-5	0,43	60	8000,0	4,0
				-10	0,36	58	7733,3	3,9
				-15	0,29	56	7466,7	3,9
				-20	0,21	52	6933,3	3,7
				-25	0,14	48	6400,0	3,6
				-30	0,07	42	5600,0	3,4
				-35	0,00	33	4400,0	3,0

Posição Micrômetro	U <sub>i</sub>	r <sub>i</sub>	Delta <sub>i</sub>	$2 \cdot \pi \cdot U_i \cdot r_i \cdot \Delta r_i$	Veloc. Média integrada
34,5	3,11	0,0345	0,005	0,003	
30	3,43	0,03	0,005	0,003	
25	3,59	0,025	0,005	0,003	
20	3,80	0,02	0,005	0,002	
15	3,87	0,015	0,005	0,002	
10	4,01	0,01	0,005	0,001	
5	4,01	0,005	0,005	0,001	
0	4,08	0	0,005	0,000	
5	4,01	0,005	0,005	0,001	
10	3,94	0,01	0,005	0,001	
15	3,87	0,015	0,005	0,002	
20	3,73	0,02	0,005	0,002	
25	3,59	0,025	0,005	0,003	
30	3,35	0,03	0,005	0,003	
35	2,97	0,035	0,005	0,003	
				<b>0,016</b>	<b>3,4</b>



Perfil de velocidades

Tubo de 75 mm de diâmetro

fluido: água

Densidade: 994,10 Kg/m<sup>3</sup>

Volta no R.G	Vazão Kg/s	Vel Média (m/s)	Rey	Posição (mm)	Posição	$\Delta H$ (mmHg)	$\Delta H$ (N/m <sup>2</sup> )	$U = \sqrt{2 \cdot \Delta H / \rho}$ (m/s)
1v+ 7	17,59	3,86	4,04E+5	34,5	1,00	50	6666,7	3,66
				30	0,93	59	7866,7	3,98
				25	0,86	67	8933,3	4,24
				20	0,79	72	9600,0	4,39
				15	0,71	76	10133,3	4,52
				10	0,64	81	10800,0	4,66
				5	0,57	81	10800,0	4,66
				0	0,50	84	11200,0	4,75
				-5	0,43	81	10800,0	4,66
				-10	0,36	79	10533,3	4,60
				-15	0,29	76	10133,3	4,52
				-20	0,21	69	9200,0	4,30
				-25	0,14	64	8533,3	4,14
				-30	0,07	58	7733,3	3,94
				-35	0,00	46	6133,3	3,51

Posição micro metro	ri	delta i	Vazão	Velocidade média
34,5	0,0345	0,005	0,004	
30	0,03	0,005	0,004	
25	0,025	0,005	0,003	
20	0,02	0,005	0,003	
15	0,015	0,005	0,002	
10	0,01	0,005	0,001	
5	0,005	0,005	0,001	
0	0	0,005	0,000	
5	0,005	0,005	0,001	
10	0,01	0,005	0,001	
15	0,015	0,005	0,002	
20	0,02	0,005	0,003	
25	0,025	0,005	0,003	
30	0,03	0,005	0,004	
35	0,035	0,005	0,004	

<b>0,018</b>	<b>3,98</b>
--------------	-------------

## 11.2 - Fluido: Bentonita-Água a 2% de Concentração em Peso.

Cálc.perfil de vel..D= 0,0762 m

Vel. Média (m/s)	Temp. do fluido °C	K	n	densid.	viscosid.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89
1,44	41,5	2,75	0,35	1003	0,025	9,15E+02	9	1199,89

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tens.Cis alh. (N/m2)	Veloc. atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrig. N/m2
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,906	4,371	0,066	6	799,932
5,23	30	0,03	0,0381	0,787	4,371	0,066	6	799,932
5,23	25	0,025	0,0381	0,656	4,371	0,066	8	1066,57
5,23	20	0,02	0,0381	0,525	4,371	0,066	10	1333,22
5,23	15	0,015	0,0381	0,394	4,371	0,066	10	1333,22
5,23	10	0,01	0,0381	0,262	4,371	0,066	10	1333,22
5,23	5	0,005	0,0381	0,131	4,371	0,066	11	1466,54
5,23	0	0	0,0381	0,000	4,371	0,066	11	1466,54
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,131	4,371	0,066	11	1466,54
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,262	4,371	0,066	11	1466,54
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,394	4,371	0,066	9	1199,89
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,525	4,371	0,066	9	1199,89
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,656	4,371	0,066	9	1199,89
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,787	4,371	0,066	7	933,254
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,919	4,371	0,066	6	799,932

Veloc. Exp.m/s	Posição Micrômetro	Ui	ri	Delta i	2.pi.Ui.ri .Deltai	Veloc. Média Integrada
1,2630	34,5	1,2630	0,0345	0,005	0,0014	
1,2630	30	1,2630	0,03	0,005	0,0012	
1,4583	25	1,4583	0,025	0,005	0,0011	
1,6305	20	1,6305	0,02	0,005	0,0010	
1,6305	15	1,6305	0,015	0,005	0,0008	
1,6305	10	1,6305	0,01	0,005	0,0005	
1,7101	5	1,7101	0,005	0,005	0,0003	
1,7101	0	1,7101	0	0,005	0,0000	
1,7101	5	1,7101	0,005	0,005	0,0003	
1,7101	10	1,7101	0,01	0,005	0,0005	
1,5468	15	1,5468	0,015	0,005	0,0007	
1,5468	20	1,5468	0,02	0,005	0,0010	
1,5468	25	1,5468	0,025	0,005	0,0012	
1,3642	30	1,3642	0,03	0,005	0,0013	
1,2630	35	1,2630	0,035	0,005	0,0014	
					<b>0,0063</b>	<b>1,38</b>

Cálculo do perfil de velocidades

D=0,0762 m

Vel.Méd (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	densidade	viscosid	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9
2,6	42,5	2,70	0,35	1002,6	0,024	2,5E+3	31	4132,9

Posição do microm.	y	R = raio	y/R	Tens.Cisalhante (N/m2)	(U*) - m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m2	Veloc. Exper. - U - m/s
34,5	0,0345	0,0381	0,906	15,054	0,123	22	2933,084	2,419
30	0,03	0,0381	0,787	15,054	0,123	26	3466,372	2,630
25	0,025	0,0381	0,656	15,054	0,123	30	3999,66	2,825
20	0,02	0,0381	0,525	15,054	0,123	34	4532,948	3,007
15	0,015	0,0381	0,394	15,054	0,123	36	4799,592	3,094
10	0,01	0,0381	0,262	15,054	0,123	38	5066,236	3,179
5	0,005	0,0381	0,131	15,054	0,123	40	5332,88	3,262
0	0	0,0381	0,000	15,054	0,123	40	5332,88	3,262
5	0,005	0,0381	0,131	15,054	0,123	38	5066,236	3,179
10	0,01	0,0381	0,262	15,054	0,123	38	5066,236	3,179
15	0,015	0,0381	0,394	15,054	0,123	36	4799,592	3,094
20	0,02	0,0381	0,525	15,054	0,123	32	4266,304	2,917
25	0,025	0,0381	0,656	15,054	0,123	30	3999,66	2,825
30	0,03	0,0381	0,787	15,054	0,123	26	3466,372	2,630
35	0,035	0,0381	0,919	15,054	0,123	20	2666,44	2,306

Posição	Ui	ri	Deltai	2.pi.Ui.ri.Di	Veloc. média Integrada
34,5	2,419	0,0345	0,005	0,003	
30	2,630	0,03	0,005	0,002	
25	2,825	0,025	0,005	0,002	
20	3,007	0,02	0,005	0,002	
15	3,094	0,015	0,005	0,001	
10	3,179	0,01	0,005	0,001	
5	3,262	0,005	0,005	0,001	
0	3,262	0	0,005	0,000	
5	3,179	0,005	0,005	0,000	
10	3,179	0,01	0,005	0,001	
15	3,094	0,015	0,005	0,001	
20	2,917	0,02	0,005	0,002	
25	2,825	0,025	0,005	0,002	
30	2,630	0,03	0,005	0,002	
35	2,306	0,035	0,005	0,003	

0,012 **2,670**

## Cálculo do perfil de velocidades

D=0,0762 m

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens.	Viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O	L (m)
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,85	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23
3,19	44,55	2,61151	0,35	1001,78	0,02391	3,57E+03	43	5732,846	5,23

microm.	r	R = raio	r/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	(U*) - m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>	Vel. Exp. - U - m/s	Vel. Máx. - Umax - m/s
0	0	0,0381	0	20,8815	0,14437	34	4532,94	3,008286	3,9962
5	0,005	0,0381	0,13123	20,8815	0,14437	40	5332,88	3,262944	3,9962
10	0,01	0,0381	0,26246	20,8815	0,14437	48	6399,45	3,574376	3,9962
15	0,015	0,0381	0,39370	20,8815	0,14437	52	6932,74	3,720329	3,9962
20	0,02	0,0381	0,52493	20,8815	0,14437	54	7199,38	3,791199	3,9962
25	0,025	0,0381	0,65616	20,8815	0,14437	58	7732,67	3,929105	3,9962
30	0,03	0,0381	0,78740	20,8815	0,14437	60	7999,32	3,996274	3,9962
34,5	0,0345	0,0381	0,90551	20,8815	0,14437	60	7999,32	3,996274	3,9962
30	0,03	0,0381	0,78740	20,8815	0,14437	58	7732,67	3,929105	3,9962
25	0,025	0,0381	0,65616	20,8815	0,14437	58	7732,67	3,929105	3,9962
20	0,02	0,0381	0,52493	20,8815	0,14437	55	7332,71	3,826141	3,9962
15	0,015	0,0381	0,39370	20,8815	0,14437	51	6799,42	3,684383	3,9962
10	0,01	0,0381	0,26246	20,8815	0,14437	48	6399,45	3,574376	3,9962
5	0,005	0,0381	0,13123	20,8815	0,14432	41	5466,20	3,303479	3,9962
0	0	0,0381	0	20,8815	0,14437	33	4399,62	2,963716	3,9962

Posição Micrômetro	Ui	ri	Delta i	2*pi*Ui*ri*Delta i	Vel. média Integrada
34,5	3,00828	0,0345	0,005	0,00326	
30	3,26294	0,03	0,005	0,00307	
25	3,57437	0,025	0,005	0,00280	
20	3,72032	0,02	0,005	0,00233	
15	3,79119	0,015	0,005	0,00178	
10	3,92910	0,01	0,005	0,00123	
5	3,99627	0,005	0,005	0,00027	
0	3,99627	0	0,005	0	
5	3,92910	0,005	0,005	0,00061	
10	3,92910	0,01	0,005	0,00123	
15	3,82614	0,015	0,005	0,00180	
20	3,68438	0,02	0,005	0,00231	
25	3,57437	0,025	0,005	0,00280	
30	3,30347	0,03	0,005	0,00311	
35	2,96371	0,035	0,005	0,00325	

0,01513	3,3176
---------	--------

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03
3,74	46	2,55	0,35	1001,2	0,0236	4,8E+3	56	7466,03

L (m)	Pos. Micrômetro	y	R = raio	y/R	Tens. Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Vel. de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,9055	27,19	0,1648	49	6532,77
5,23	30	0,03	0,0381	0,7874	27,19	0,1648	58	7732,67
5,23	25	0,025	0,0381	0,6562	27,19	0,1648	66	8799,25
5,23	20	0,02	0,0381	0,5249	27,19	0,1648	72	9599,18
5,23	15	0,015	0,0381	0,3937	27,19	0,1648	76	10132,4
5,23	10	0,01	0,0381	0,2625	27,19	0,1648	81	10799,0
5,23	5	0,005	0,0381	0,1312	27,19	0,1648	80	10665,7
5,23	0	0	0,0381	0,0000	27,19	0,1648	82	10932,4
5,23	5	0,005	0,0381	0,1312	27,19	0,1648	80	10665,7
5,23	10	0,01	0,0381	0,2625	27,19	0,1648	79	10532,4
5,23	15	0,015	0,0381	0,3937	27,19	0,1648	74	9865,82
5,23	20	0,02	0,0381	0,5249	27,19	0,1648	70	9332,54
5,23	25	0,025	0,0381	0,6562	27,19	0,1648	62	8265,96
5,23	30	0,03	0,0381	0,7874	27,19	0,1648	54	7199,38
5,23	35	0,035	0,0381	0,9186	27,19	0,1648	45	5999,49

Posição micrometro	Ui	ri	Delta	Vazão	Velocidade média Integrada
34,5	3,6125	0,0345	0,005	0,0039	
30	3,9302	0,03	0,005	0,0037	
25	4,1925	0,025	0,005	0,0033	
20	4,3790	0,02	0,005	0,0028	
15	4,4990	0,015	0,005	0,0021	
10	4,6446	0,01	0,005	0,0015	
5	4,6158	0,005	0,005	0,0007	
0	4,6732	0	0,005	0,0000	
5	4,6158	0,005	0,005	0,0007	
10	4,5869	0,01	0,005	0,0014	
15	4,4394	0,015	0,005	0,0021	
20	4,3177	0,02	0,005	0,0027	
25	4,0635	0,025	0,005	0,0032	
30	3,7923	0,03	0,005	0,0036	
35	3,4619	0,035	0,005	0,0038	

0,01796	3,94003
---------	---------

### 11.3 - Fluido: Bentonita-Água a 3% de Concentração em Peso.

Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	densid.	Viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53
1,45	44	5,66	0,28	1007,3	0,032	6,38E+2	11,36	1514,53

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	r/R	Tensão Cisalhante (N/m2)	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m2
5,23	0	0	0,0381	0,000	5,517	0,074	6	799,932
5,23	5	0,005	0,0381	0,131	5,517	0,074	8	1066,57
5,23	10	0,01	0,0381	0,262	5,517	0,074	10	1333,22
5,23	15	0,015	0,0381	0,394	5,517	0,074	10	1333,22
5,23	20	0,02	0,0381	0,525	5,517	0,074	10	1333,22
5,23	25	0,025	0,0381	0,656	5,517	0,074	11	1466,54
5,23	30	0,03	0,0381	0,787	5,517	0,074	12	1599,86
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,906	5,517	0,074	12	1599,86
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,131	5,517	0,074	12	1599,86
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,262	5,517	0,074	12	1599,86
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,394	5,517	0,074	11	1466,54
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,525	5,517	0,074	10	1333,22
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,656	5,517	0,074	8	1066,57
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,787	5,517	0,074	8	1066,57
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,919	5,517	0,074	6	799,932

Micrôm.	Ui	ri	Deltai	$2 \cdot \pi \cdot U_i \cdot r_i \cdot \Delta i$	Veloc. Média Integrada
34,5	1,26	0,0345	0,005	0,0014	
30	1,46	0,03	0,005	0,0014	
25	1,63	0,025	0,005	0,0013	
20	1,63	0,02	0,005	0,0010	
15	1,63	0,015	0,005	0,0008	
10	1,71	0,01	0,005	0,0005	
5	1,78	0,005	0,005	0,0003	
0	1,78	0	0,005	0,0000	
5	1,78	0,005	0,005	0,0003	
10	1,78	0,01	0,005	0,0006	
15	1,71	0,015	0,005	0,0008	
20	1,63	0,02	0,005	0,0010	
25	1,46	0,025	0,005	0,0011	
30	1,46	0,03	0,005	0,0014	
35	1,26	0,035	0,005	0,0014	

0,0066 1,45170

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62
2,75	44	5,66	0,28	1007,3	0,0321	1,9E+3	33	4399,62

L (m)	Posição do micrometro	r = dist. da parede ao centro do tubo	R = raio	r/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	34,5	0,0345	0,0381	1,0000	16,0254	0,1261	25	3333,05
5,23	30	0,03	0,0381	0,7874	16,0254	0,1261	29	3866,33
5,23	25	0,025	0,0381	0,6562	16,0254	0,1261	34	4532,94
5,23	20	0,02	0,0381	0,5249	16,0254	0,1261	37	4932,91
5,23	15	0,015	0,0381	0,3937	16,0254	0,1261	39	5199,55
5,23	10	0,01	0,0381	0,2625	16,0254	0,1261	40	5332,88
5,23	5	0,005	0,0381	0,1312	16,0254	0,1261	42	5599,52
5,23	0	0	0,0381	0,0000	16,0254	0,1261	42	5599,52
5,23	5	0,005	0,0381	0,1312	16,0254	0,1261	41	5466,20
5,23	10	0,01	0,0381	0,2625	16,0254	0,1261	41	5466,20
5,23	15	0,015	0,0381	0,3937	16,0254	0,1261	37	4932,91
5,23	20	0,02	0,0381	0,5249	16,0254	0,1261	35	4666,27
5,23	25	0,025	0,0381	0,6562	16,0254	0,1261	30	3999,66
5,23	30	0,03	0,0381	0,7874	16,0254	0,1261	29	3866,33
5,23	35	0,035	0,0381	0,9186	16,0254	0,1261	21	2799,76

Ui	ri	Delta	Vazão	Velocidade Média
2,57	0,0345	0,005	0,0028	
2,77	0,03	0,005	0,0026	
3,00	0,025	0,005	0,0024	
3,13	0,02	0,005	0,0020	
3,21	0,015	0,005	0,0015	
3,25	0,01	0,005	0,0010	
3,33	0,005	0,005	0,0005	
3,33	0	0,005	0,0000	
3,29	0,005	0,005	0,0005	
3,29	0,01	0,005	0,0010	
3,13	0,015	0,005	0,0015	
3,04	0,02	0,005	0,0019	
2,82	0,025	0,005	0,0022	
2,77	0,03	0,005	0,0026	
2,36	0,035	0,005	0,0026	
			0,0128	2,80

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54
3,34	45	5,62	0,28	1006,9	0,0320	2,70E+3	11,36	1514,54

L (m)	Posição do micrometro	y = dist. da par. ao centro do tubo	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	0	0	0,0381	0,00	5,52	0,07	35	4666,27
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	5,52	0,07	42	5599,52
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	5,52	0,07	45	5999,49
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	5,52	0,07	55	7332,71
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	5,52	0,07	57	7599,35
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	5,52	0,07	61	8132,64
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	5,52	0,07	63	8399,28
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,91	5,52	0,07	63	8399,28
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,13	5,52	0,07	63	8399,28
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,26	5,52	0,07	61	8132,64
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,39	5,52	0,07	57	7599,35
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,52	5,52	0,07	53	7066,06
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,66	5,52	0,07	49	6532,77
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,79	5,52	0,07	41	5466,20
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,92	5,52	0,07	33	4399,62

Posição Micrometro	Ui	ri	Deltai	$2 \cdot \pi \cdot U_i \cdot r_i \cdot \Delta t_i$	Velocidade média integrada
34,5	3,04	0,0345	0,005	0,0033	
30	3,34	0,03	0,005	0,0031	
25	3,45	0,025	0,005	0,0027	
20	3,82	0,02	0,005	0,0024	
15	3,89	0,015	0,005	0,0018	
10	4,02	0,01	0,005	0,0013	
5	4,08	0,005	0,005	0,0006	
0	4,08	0	0,005	0,0000	
5	4,08	0,005	0,005	0,0006	
10	4,02	0,01	0,005	0,0013	
15	3,89	0,015	0,005	0,0018	
20	3,75	0,02	0,005	0,0024	
25	3,60	0,025	0,005	0,0028	
30	3,30	0,03	0,005	0,0031	
35	2,96	0,035	0,005	0,0033	

<b>0,0153</b>	<b>3,35</b>
---------------	-------------



## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	densid.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32
3,85	45,8	5,59	0,28	1006,58	0,032	3,46E+3	60	7999,32

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	34,5	0,0345	0,0381	1,00	29,14	0,17	48	6399,46
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	29,14	0,17	57	7599,35
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	29,14	0,17	65	8665,93
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	29,14	0,17	72	9599,18
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	29,14	0,17	77	10265,7
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	29,14	0,17	79	10532,4
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	29,14	0,17	83	11065,7
5,23	0	0	0,0381	0,00	29,14	0,17	83	11065,7
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	29,14	0,17	82	10932,4
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	29,14	0,17	79	10532,4
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	29,14	0,17	75	9999,15
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	29,14	0,17	71	9465,86
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	29,14	0,17	64	8532,61
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	29,14	0,17	56	7466,03
5,23	35	0,035	0,0381	0,92	29,14	0,17	43	5732,85

Posição Micrômetro	Ui	ri	Delta	Vazão	Velocidade média
34,5	3,57	0,0345	0,005	0,004	
30	3,89	0,03	0,005	0,004	
25	4,15	0,025	0,005	0,003	
20	4,37	0,02	0,005	0,003	
15	4,52	0,015	0,005	0,002	
10	4,57	0,01	0,005	0,001	
5	4,69	0,005	0,005	0,001	
0	4,69	0	0,005	0,000	
5	4,66	0,005	0,005	0,001	
10	4,57	0,01	0,005	0,001	
15	4,46	0,015	0,005	0,002	
20	4,34	0,02	0,005	0,003	
25	4,12	0,025	0,005	0,003	
30	3,85	0,03	0,005	0,004	
35	3,38	0,035	0,005	0,004	

<b>0,018</b>	<b>3,910</b>
--------------	--------------

### 11.4 - Fluido: Bentonita-Água a 4% de Concentração em Peso.

Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47
1,5	48	6,38	0,3	1011,5	0,0389	5,45E+2	17	2266,47

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m2)	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m2
5,23	0	0	0,0381	0,00	8,26	0,0903	7	933,25
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	8,26	0,0903	8	1066,58
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	8,26	0,0903	9	1199,90
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	8,26	0,0903	10	1333,22
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	8,26	0,0903	11	1466,54
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	8,26	0,0903	11	1466,54
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	8,26	0,0903	13	1733,19
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,91	8,26	0,0903	13	1733,19
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,13	8,26	0,0903	13	1733,19
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,26	8,26	0,0903	11	1466,54
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,39	8,26	0,0903	11	1466,54
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,52	8,26	0,0903	11	1466,54
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,66	8,26	0,0903	9	1199,90
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,79	8,26	0,0903	7	933,25
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,92	8,26	0,0903	7	933,25

Microm.	Ui	ri	Deltai	2*pi*Ui*ri *deltai	Veloc. Média Integrada
34,5	1,36	0,0345	0,005	0,0015	
30	1,45	0,03	0,005	0,0014	
25	1,54	0,025	0,005	0,0012	
20	1,62	0,02	0,005	0,0010	
15	1,70	0,015	0,005	0,0008	
10	1,70	0,01	0,005	0,0005	
5	1,85	0,005	0,005	0,0003	
0	1,85	0	0,005	0,0000	
5	1,85	0,005	0,005	0,0003	
10	1,70	0,01	0,005	0,0005	
15	1,70	0,015	0,005	0,0008	
20	1,70	0,02	0,005	0,0011	
25	1,54	0,025	0,005	0,0012	
30	1,36	0,03	0,005	0,0013	
35	1,36	0,035	0,005	0,0015	

0,0067 1,47

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	densid.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88
2,72	47	6,4192	0,3	1011,9	0,03897	1,5E+3	40	5332,88

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	34,5	0,0345	0,0381	1	19,4247	0,13855	24	3199,72
5,23	30	0,03	0,0381	0,78740	19,4247	0,13855	30	3999,66
5,23	25	0,025	0,0381	0,65616	19,4247	0,13855	34	4532,94
5,23	20	0,02	0,0381	0,52493	19,4247	0,13855	38	5066,23
5,23	15	0,015	0,0381	0,39370	19,4247	0,13855	40	5332,88
5,23	10	0,01	0,0381	0,26246	19,4247	0,13855	41	5466,20
5,23	5	0,005	0,0381	0,13126	19,4247	0,13855	42	5599,52
5,23	0	0	0,0381	0	19,4247	0,13855	43	5732,84
5,23	5	0,005	0,0381	0,13123	19,4247	0,13855	41	5466,20
5,23	10	0,01	0,0381	0,26246	19,4247	0,13855	41	5466,20
5,23	15	0,015	0,0381	0,39370	19,4247	0,13855	40	5332,88
5,23	20	0,02	0,0381	0,52493	19,4247	0,13855	36	4799,59
5,23	25	0,025	0,0381	0,65616	19,427	0,13855	34	4532,94
5,23	30	0,03	0,0381	0,78740	19,4247	0,13855	30	3999,66
5,23	35	0,035	0,0381	0,91863	19,4247	0,13855	25	3333,05

Posição	Ui	ri	Delta i	Vazão	Velocidade média Integrada
34,5	2,51479	0,0345	0,005	0,00272	
30	2,81162	0,03	0,005	0,00264	
25	2,99320	0,025	0,005	0,00235	
20	3,16438	0,02	0,005	0,00198	
15	3,24658	0,015	0,005	0,00152	
10	3,28691	0,01	0,005	0,00103	
5	3,32618	0,005	0,005	0,00052	
0	3,36613	0	0,005	0	
5	3,28691	0,005	0,005	0,00051	
10	3,28691	0,01	0,005	0,00103	
15	3,24658	0,015	0,005	0,00152	
20	3,07832	0,02	0,005	0,00193	
25	2,99320	0,025	0,005	0,00235	
30	2,81162	0,03	0,005	0,00264	
35	2,56665	0,035	0,005	0,00282	

0,01279	2,80673
---------	---------

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	densid	viscos	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03
3,32	47,5	6,3979	0,3	1011,7	0,03894	2,10E+3	56	7466,03

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	0	0	0,0381	0	27,1946	0,16395	38	5066,23
5,23	5	0,005	0,0381	0,13123	27,1946	0,16395	44	5866,16
5,23	10	0,01	0,0381	0,26246	27,1946	0,16395	51	6799,42
5,23	15	0,015	0,0381	0,39370	27,1946	0,16395	56	7466,03
5,23	20	0,02	0,0381	0,52493	27,1946	0,16395	58	7732,67
5,23	25	0,025	0,0381	0,65616	27,1946	0,16395	61	8132,64
5,23	30	0,03	0,0381	0,78740	27,1949	0,16395	62	8265,96
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,90551	27,1946	0,16395	62	8265,96
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,13123	27,1946	0,16395	61	8132,64
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,26246	27,1946	0,16395	59	7865,99
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,39370	27,1946	0,16395	56	7466,03
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,52493	27,1946	0,16395	52	6932,74
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,65616	27,1946	0,16395	48	6399,45
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,78740	27,1946	0,16395	42	5599,52
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,91863	27,1946	0,16395	34	4532,94

Posição Micrômetro	Ui	ri	Deltai	2*pi*Ui*ri/Deltai	Veloc. Média Integrada
34,5	3,16469	0,0345	0,005	0,00343	
30	3,40538	0,03	0,005	0,00320	
25	3,66627	0,025	0,005	0,00287	
20	3,84179	0,02	0,005	0,00241	
15	3,90979	0,015	0,005	0,00184	
10	4,00963	0,01	0,005	0,00125	
5	4,04236	0,005	0,005	0,00063	
0	4,04236	0	0,005	0	
5	4,00963	0,005	0,005	0,00062	
10	3,94335	0,01	0,005	0,00123	
15	3,84179	0,015	0,005	0,00181	
20	3,70204	0,02	0,005	0,00232	
25	3,55680	0,025	0,005	0,00279	
30	3,32709	0,03	0,005	0,00313	
35	2,99350	0,035	0,005	0,00329	

0,02

3,44

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. do fluido °C	K	n	densidade	viscosidade	Reynolds Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03829	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7
3,86	48,5	6,3553	0,3	1011,3	0,03888	2,7E+3	82,34	10977,7

L (m)	microm.	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m2)	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m2
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,90551	39,9858	0,19884	48	6399,45
5,23	30	0,03	0,0381	0,78740	39,9858	0,19884	56	7466,03
5,23	25	0,025	0,0381	0,65616	39,9858	0,19884	65	8665,93
5,23	20	0,02	0,0381	0,52493	39,9858	0,19884	71	9465,86
5,23	15	0,015	0,0381	0,39370	39,9858	0,19884	76	10132,4
5,23	10	0,01	0,0381	0,26246	39,9858	0,19884	79	10532,4
5,23	5	0,005	0,0381	0,13123	39,9858	0,19884	82	10932
5,23	0	0	0,0381	0	39,9858	0,19884	84	11199,0
5,23	5	0,005	0,0381		39,9858	0,19884	83	11065,7
5,23	10	0,01	0,0381	0,26246	39,9858	0,19884	82	10932,4
5,23	15	0,015	0,0381	0,39370	39,9858	0,19884	78	10399,1
5,23	20	0,02	0,0381	0,52493	39,9858	0,19884	73	9732,50
5,23	25	0,025	0,0381	0,65616	39,9858	0,19823	66	8799,25
5,23	30	0,03	0,0381	0,78740	39,9858	0,19884	58	7732,67
5,23	35	0,035	0,0381	0,91863	39,9858	0,19884	47	6266,13

Micrôm/	Ui	ri	Delta i	Vazão	Velocidade Média
34,5	3,55751	0,0345	0,005	0,00385	
30	3,84255	0,03	0,005	0,00362	
25	4,13983	0,025	0,005	0,00325	
20	4,32668	0,02	0,005	0,00271	
15	4,47643	0,015	0,005	0,00210	
10	4,56393	0,01	0,005	0,00143	
5	4,64978	0,005	0,005	0,00073	
0	4,70614	0	0,005	0	
5	4,67805	0,005	0,005		
10	4,64978	0,01	0,005		
15	4,53433	0,015	0,005		
20	4,38719	0,02	0,005		
25	4,17155	0,025	0,005		
30	3,91056	0,03	0,005		
35	3,52026	0,035	0,005		

0,02

3,89

**11.5 - Fluido: Bentonita - Areia - Água (Concentração de 3% de Bentonita e 0,75% de Areia em Peso)**

Velocid. (m/s)	Temp. °C	K	n	dens.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22
1,28	39,5	5,83	0,28	1009,1	0,03271	5,01E+2	10	1333,22

L (m)	microm.	y	R = raio	y/R	T.Cis. (N/m2)	Vel.atrito (U*) -m/s	ΔP Pitot mmHg	ΔP N/m2
5,23	34,5	0,0345	0,0381	1.00	4.88	0.07	7	933,25
5,23	30	0,03	0,0381	0.79	4.86	0.07	8	1066,58
5,23	25	0,025	0,0381	0.66	4.86	0.07	9	1199,90
5,23	20	0,02	0,0381	0.52	4.86	0.07	10	1333,22
5,23	15	0,015	0,0381	0.39	4.86	0.07	11	1466,54
5,23	10	0,01	0,0381	0.26	4.86	0.07	12	1599,86
5,23	5	0,005	0,0381	0.13	4.86	0.07	12	1599,86
5,23	0	0	0,0381	0	4.86	0.07	12	1599,86
5,23	5	0,005	0,0381	0.13	4.86	0.07	12	1599,86
5,23	10	0,01	0,0381	0.26	4.86	0.07	12	1599,86
5,23	15	0,015	0,0381	0.39	4.86	0.07	10	1333,22
5,23	20	0,02	0,0381	0.52	4.86	0.07	10	1333,22
5,23	25	0,025	0,0381	0.66	4.86	0.07	10	1333,22
5,23	30	0,03	0,0381	0.79	4.86	0.07	8	1066,58
5,23	35	0,035	0,0381	0.92	4.86	0.07	7	933,25

Posição	Ui	ri	Delta i	Vazão	Velocidade média Intergrada
34,5	1.36	0,0345	0,005	.0015	
30	1.45	0,03	0,005	.0014	
25	1.54	0,025	0,005	.0012	
20	1.63	0,02	0,005	.0010	
15	1.70	0,015	0,005	.0008	
10	1.78	0,01	0,005	.0006	
5	1.78	0,005	0,005	.0003	
0	1.78	0	0,005	0	
5	1.78	0,005	0,005	.0003	
10	1.78	0,01	0,005	.0006	
15	1.63	0,015	0,005	.0008	
20	1.63	0,02	0,005	.0010	
25	1.63	0,025	0,005	.0013	
30	1.45	0,03	0,005	.0014	
35	1.36	0,035	0,005	.0015	

0.001	1.47
-------	------

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens.	viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91
2,63	41,5	5,75	0,28	1008,3	0,03245	1,75E+3	37	4932,91

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	0	0	0,0381	0,000	17,968	0,133	25	3333,1
5,23	5	0,005	0,0381	0,131	17,968	0,133	30	3999,7
5,23	10	0,01	0,0381	0,262	17,968	0,133	34	4532,9
5,23	15	0,015	0,0381	0,394	17,968	0,133	38	5066,2
5,23	20	0,02	0,0381	0,525	17,968	0,133	40	5332,9
5,23	25	0,025	0,0381	0,656	17,968	0,133	42	5599,5
5,23	30	0,03	0,0381	0,787	17,968	0,133	42	5599,5
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,906	17,968	0,133	44	5866,2
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,131	17,968	0,133	42	5599,5
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,262	17,968	0,133	42	5599,5
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,394	17,968	0,133	40	5332,9
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,525	17,968	0,133	37	4932,9
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,656	17,968	0,133	34	4532,9
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,787	17,968	0,133	30	3999,7
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,919	17,968	0,133	24	3199,7

Pos. Micrôm.	Ui	ri	deltai	2*pi*Ui*ri* *Deltai	Veloc. Média Integrada
34,5	2,571	0,0345	0,005	0,0028	
30	2,817	0,03	0,005	0,0027	
25	2,999	0,025	0,005	0,0024	
20	3,170	0,02	0,005	0,0020	
15	3,252	0,015	0,005	0,0015	
10	3,333	0,01	0,005	0,0010	
5	3,333	0,005	0,005	0,0005	
0	3,411	0	0,005	0,0000	
5	3,333	0,005	0,005	0,0005	
10	3,333	0,01	0,005	0,0010	
15	3,252	0,015	0,005	0,0015	
20	3,128	0,02	0,005	0,0020	
25	2,999	0,025	0,005	0,0024	
30	2,817	0,03	0,005	0,0027	
35	2,519	0,035	0,005	0,0028	

0,0129	2,83
--------	------

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens.	Viscos.	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38
3,29	42	5,73	0,28	1008,1	0,032	2,58E+3	54	7199,38

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	0	0	0,0381	0,000	26,22	0,1613	36	4799,6
5,23	5	0,005	0,0381	0,131	26,22	0,1613	41	5466,2
5,23	10	0,01	0,0381	0,262	26,22	0,1613	49	6532,8
5,23	15	0,015	0,0381	0,394	26,22	0,1613	51	6799,4
5,23	20	0,02	0,0381	0,525	26,22	0,1613	56	7466,0
5,23	25	0,025	0,0381	0,656	26,22	0,1613	57	7599,4
5,23	30	0,03	0,0381	0,787	26,22	0,1613	61	8132,6
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,906	26,22	0,1613	60	7999,3
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,131	26,22	0,1613	61	8132,6
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,262	26,22	0,1613	57	7599,4
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,394	26,22	0,1613	56	7466,0
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,525	26,22	0,1613	51	6799,4
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,656	26,22	0,1613	49	6532,8
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,787	26,22	0,1613	41	5466,2
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,919	26,22	0,1613	33	4399,6

Posição micrômetro	Ui	ri	Deltai	2*pi*Ui*ri *Deltai	Veloc. Média Integrada
34,5	3,086	0,0345	0,005	0,0033	
30	3,293	0,03	0,005	0,0031	
25	3,600	0,025	0,005	0,0028	
20	3,673	0,02	0,005	0,0023	
15	3,849	0,015	0,005	0,0018	
10	3,883	0,01	0,005	0,0012	
5	4,017	0,005	0,005	0,0006	
0	3,984	0	0,005	0,0000	
5	4,017	0,005	0,005	0,0006	
10	3,883	0,01	0,005	0,0012	
15	3,849	0,015	0,005	0,0018	
20	3,673	0,02	0,005	0,0023	
25	3,600	0,025	0,005	0,0028	
30	3,293	0,03	0,005	0,0031	
35	2,954	0,035	0,005	0,0032	

0,0152	3,34
--------	------



## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. do fluido °C	K	n	densidade	viscosidade	Reynolds Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90
3,73	43	5,69	0,28	1007,7	0,032	3,22E+3	68	9065,90

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	35,5	0,0355	0,0381	1.00	33.02	0.18	46	6132,81
5,23	30	0,03	0,0381	0.79	33.02	0.18	53	7066,06
5,23	25	0,025	0,0381	0.66	33.02	0.18	61	8132,64
5,23	20	0,02	0,0381	0.52	33.02	0.18	68	9065,89
5,23	15	0,015	0,0381	0.39	33.02	0.18	72	9599,18
5,23	10	0,01	0,0381	0.26	33.02	0.18	75	9999,15
5,23	5	0,005	0,0381	0.13	33.02	0.18	77	10265,7
5,23	0	0	0,0381	0	33.02	0.18	78	10399,1
5,23	5	0,005	0,0381	0.13	33.02	0.18	75	9999,15
5,23	10	0,01	0,0381	0.26	33.02	0.18	73	9732,5
5,23	15	0,015	0,0381	0.39	33.02	0.18	67	8932,57
5,23	20	0,02	0,0381	0.52	33.02	0.18	65	8665,93
5,23	25	0,025	0,0381	0.66	33.02	0.18	64	8532,60
5,23	30	0,03	0,0381	0.79	33.02	0.18	56	7466,03
5,23	35	0,035	0,0381	0.92	33.02	0.18	42	5599,52

Posição micrômetro	Ui	ri	Delta i	Vazão	Veloc. Média Integrada
34,5	3,489	0,0345	0,005	0,0038	
30	3,745	0,03	0,005	0,0035	
25	4,018	0,025	0,005	0,0032	
20	4,242	0,02	0,005	0,0027	
15	4,365	0,015	0,005	0,0021	
10	4,455	0,01	0,005	0,0014	
5	4,514	0,005	0,005	0,0007	
0	4,543	0	0,005	0,0000	
5	4,455	0,005	0,005	0,0007	
10	4,395	0,01	0,005	0,0014	
15	4,211	0,015	0,005	0,0020	
20	4,147	0,02	0,005	0,0026	
25	4,115	0,025	0,005	0,0032	
30	3,849	0,03	0,005	0,0036	
35	3,334	0,035	0,005	0,0037	

0,017	3,79
-------	------

### 11.6 - Fluido: Bentonita - Areia - Água (Concentração de 3% de Bentonita e 1,5% de Areia em Peso)

Vel. -m/s	Temp. fluido °C	K	n	dens	viscos	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89
1,35	45	5,62	0,28	1006,9	0,03203	5,68E+2	9	1199,89

L(m)	Posição	y	R = raio	y/R	Tensão (N/m <sup>2</sup> )	(U*) -m/s	ΔPmmHg	ΔP N/m <sup>2</sup>
5,23	34,5	0,0345	0,0381	1.00	4,371	0,066	8	1066,57
5,23	30	0,03	0,0381	0.79	4,371	0,066	9	1199,89
5,23	25	0,025	0,0381	0.66	4,371	0,066	10	1333,22
5,23	20	0,02	0,0381	0.52	4,371	0,066	12	1599,86
5,23	15	0,015	0,0381	0.39	4,371	0,066	13	1733,18
5,23	10	0,01	0,0381	0.26	4,371	0,066	13	1733,18
5,23	5	0,005	0,0381	0.13	4,371	0,066	14	1866,50
5,23	0	0	0,0381	0	4,371	0,066	14	1866,50
5,23	5	0,005	0,0381	0.13	4,371	0,066	13	1733,18
5,23	10	0,01	0,0381	0.26	4,371	0,066	13	1733,18
5,23	15	0,015	0,0381	0.39	4,371	0,066	12	1599,86
5,23	20	0,02	0,0381	0.52	4,371	0,066	11	1466,54
5,23	25	0,025	0,0381	0.66	4,371	0,066	10	1333,22
5,23	30	0,03	0,0381	0.79	4,371	0,066	8	1066,57
5,23	35	0,035	0,0381	0.92	4,371	0,066	7	933,254

Posição	Ui	ri	Delta	Vazão	Vel. média Integrada
34,5	1,456	0,0345	0,005	0,0016	
30	1,544	0,03	0,005	0,0015	
25	1,627	0,025	0,005	0,0013	
20	1,783	0,02	0,005	0,0011	
15	1,855	0,015	0,005	0,0009	
10	1,855	0,01	0,005	0,0006	
5	1,925	0,005	0,005	0,0003	
0	1,925	0	0,005	0,0000	
5	1,855	0,005	0,005	0,0003	
10	1,855	0,01	0,005	0,0006	
15	1,783	0,015	0,005	0,0008	
20	1,707	0,02	0,005	0,0011	
25	1,627	0,025	0,005	0,0013	
30	1,456	0,03	0,005	0,0014	
35	1,362	0,035	0,005	0,0015	

0,0072	1,58
--------	------

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens	viscos	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27
2,6	46	5,58	0,28	1006,5	0,03192	1,77E+3	35	4666,27

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m2)	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m2
5,23	0	0	0,0381	0,00	16,997	0,1299	23	3066,41
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	16,997	0,1299	26	3466,37
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	16,997	0,1299	33	4399,63
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	16,997	0,1299	35	4666,27
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	16,997	0,1299	39	5199,56
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	16,997	0,1299	41	5466,20
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	16,997	0,1299	42	5599,52
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,91	16,997	0,1299	44	5866,17
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,13	16,997	0,1299	42	5599,52
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,26	16,997	0,1299	41	5466,20
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,39	16,997	0,1299	39	5199,56
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,52	16,997	0,1299	35	4666,27
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,66	16,997	0,1299	33	4399,63
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,79	16,997	0,1299	30	3999,66
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,919	16,997	0,1299	25	3333,05

Posição Micrômetro	Ui	ri	Deltai	$2 \cdot \pi \cdot U_i \cdot r_i \cdot \Delta t_i$	Veloc. Média Integrada
34,5	2,47	0,0345	0,005	0,0027	
30	2,62	0,03	0,005	0,0025	
25	2,96	0,025	0,005	0,0023	
20	3,05	0,02	0,005	0,0019	
15	3,21	0,015	0,005	0,0015	
10	3,30	0,01	0,005	0,0010	
5	3,34	0,005	0,005	0,0005	
0	3,41	0	0,005	0,0000	
5	3,34	0,005	0,005	0,0005	
10	3,30	0,01	0,005	0,0010	
15	3,21	0,015	0,005	0,0015	
20	3,05	0,02	0,005	0,0019	
25	2,96	0,025	0,005	0,0023	
30	2,82	0,03	0,005	0,0027	
35	2,57	0,035	0,005	0,0028	

0,0125	2,73
--------	------

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens	viscos	Reys Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13
3,25	45,5	5,60	0,28	1006,7	0,032	2,58E+3	47	6266,13

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m2)	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m2
5,23	0	0	0,0381	0,00	22,82	0,1506	37	4932,91
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	22,82	0,1506	44	5866,17
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	22,82	0,1506	48	6399,46
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	22,82	0,1506	55	7332,71
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	22,82	0,1506	57	7599,35
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	22,82	0,1506	59	7866,00
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	22,82	0,1506	63	8399,29
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,91	22,82	0,1506	63	8399,29
5,23	-5	-0,005	0,0381	-0,13	22,82	0,1506	60	7999,32
5,23	-10	-0,01	0,0381	-0,26	22,82	0,1506	59	7866,00
5,23	-15	-0,015	0,0381	-0,39	22,82	0,1506	57	7599,35
5,23	-20	-0,02	0,0381	-0,52	22,82	0,1506	52	6932,74
5,23	-25	-0,025	0,0381	-0,66	22,82	0,1506	48	6399,46
5,23	-30	-0,03	0,0381	-0,79	22,82	0,1506	44	5866,17
5,23	-35	-0,035	0,0381	-0,92	22,82	0,1506	36	4799,59

Posição Micrôm.	Ui	ri	Deltai	2*pi*Ui*ri *Deltai	Veloc. Média Integrada
34,5	3,1	0,0345	0,005	0,0034	
30	3,4	0,03	0,005	0,0032	
25	3,6	0,025	0,005	0,0028	
20	3,8	0,02	0,005	0,0024	
15	3,9	0,015	0,005	0,0018	
10	4,0	0,01	0,005	0,0012	
5	4,1	0,005	0,005	0,0006	
0	4,1	0	0,005	0,0000	
5	4,0	0,005	0,005	0,0006	
10	4,0	0,01	0,005	0,0012	
15	3,9	0,015	0,005	0,0018	
20	3,7	0,02	0,005	0,0023	
25	3,6	0,025	0,005	0,0028	
30	3,4	0,03	0,005	0,0032	
35	3,1	0,035	0,005	0,0034	

0,0155	3,4
--------	-----

## Cálculo do perfil de velocidades

Vel. Média (m/s)	Temp. fluido °C	K	n	dens	viscos	Rey Gener.	Pressão (mmHg)	Pressão mH2O
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29
3,7	47	5,54	0,28	1006,1	0,032	3,26E+3	63	8399,29

L (m)	Posição do micrometro	y	R = raio	y/R	Tensão Cisalhante (N/m <sup>2</sup> )	Velocidade de atrito - (U*) -m/s	Pressão Pitot (mmHg)	Pressão Corrigida N/m <sup>2</sup>
5,23	34,5	0,0345	0,0381	0,91	30,6	0,174	47	6266,1
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	30,6	0,174	56	7466,0
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	30,6	0,174	63	8399,3
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	30,6	0,174	68	9065,9
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	30,6	0,174	73	9732,5
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	30,6	0,174	76	10132,5
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	30,6	0,174	77	10265,8
5,23	0	0	0,0381	0,00	30,6	0,174	77	10265,8
5,23	5	0,005	0,0381	0,13	30,6	0,174	77	10265,8
5,23	10	0,01	0,0381	0,26	30,6	0,174	76	10132,5
5,23	15	0,015	0,0381	0,39	30,6	0,174	75	9999,2
5,23	20	0,02	0,0381	0,52	30,6	0,174	66	8799,3
5,23	25	0,025	0,0381	0,66	30,6	0,174	61	8132,6
5,23	30	0,03	0,0381	0,79	30,6	0,174	55	7332,7
5,23	35	0,035	0,0381	0,92	30,6	0,174	44	5866,2

Posição micrometro	Ui	ri	Delta i	Vazão	Velocidade média integrada
34,5	3,53	0,0345	0,005	0,004	
30	3,85	0,03	0,005	0,004	
25	4,09	0,025	0,005	0,003	
20	4,25	0,02	0,005	0,003	
15	4,40	0,015	0,005	0,002	
10	4,49	0,01	0,005	0,001	
5	4,52	0,005	0,005	0,001	
0	4,52	0	0,005	0,000	
5	4,52	0,005	0,005	0,001	
10	4,49	0,01	0,005	0,001	
15	4,46	0,015	0,005	0,002	
20	4,18	0,02	0,005	0,003	
25	4,02	0,025	0,005	0,003	
30	3,82	0,03	0,005	0,004	
35	3,41	0,035	0,005	0,004	

0,018	3,84
-------	------

