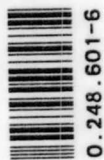


UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

ANÁLISE DO ESCOAMENTO JUNTO A RESSALTOS EM CANALIZAÇÕES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA.



0.248.601-6

UFSC-BU

IRLAN VON LINSINGEN

OUTUBRO DE 1980

"ANÁLISE DO ESCOAMENTO JUNTO A RESSALTOS EM CANALIZAÇÕES"

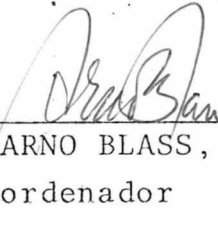
Irlan Von Linsingen

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA"

ESPECIALIDADE EM ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO.




PROF. ROGÉRIO TADEU DA SILVA FERREIRA, Ph.D.
Orientador

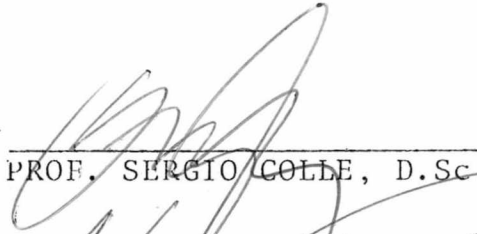


PROF. ARNO BLASS, Ph.D.
Coordenador

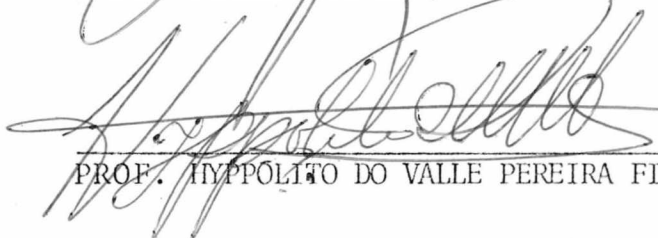
BANCA EXAMINADORA



PROF. ROGÉRIO TADEU DA SILVA FERREIRA, Ph.D.
Orientador



PROF. SÉRGIO COLLE, D.Sc.



PROF. HIPPOLITO DO VALLE PEREIRA FILHO, Ph.D.

A meus pais,
esposa e filhos.

A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço ao Prof. Rogério Ferreira por aceitar a orientação deste trabalho.

Quero ainda agradecer ao Prof. Arno Bollmann pelo apoio e pronto atendimento quando solicitado a esclarecer algumas dúvidas, ao Prof. Hyppólito Pereira pela pronta resolução dos problemas financeiros que envolveram a construção da bancada de testes, ao técnico João Martins pelo auxílio efetivo na construção e montagem da bancada de testes, ao Senhor Manoel de Souza pelo excelente trabalho de carpintaria e a todas as personalidades anônimas que, com seu esforço, contribuíram para a efetivação deste trabalho, e haverão sempre de contribuir para uma sociedade mais evoluída e justa.

S U M Á R I O

SIMBOLOGIA	i
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - BANCADA DE TESTES	4
2.1 - Considerações preliminares	4
2.2 - Condições iniciais	4
2.3 - Parâmetros medidos	6
2.4 - Elementos do sistema	7
2.4.1 - Descrição geral	7
2.4.2 - Secção de testes	7
2.4.3 - Controle do Número de Reynolds	11
2.4.4 - Reservatórios de emissão e recepção	12
2.4.5 - Bomba peristáltica	13
2.4.6 - Dispositivo de visualização do escoamento	14
2.4.7 - Dispositivo de medição de pressões	17
2.4.8 - Desnível máximo	20
CAPÍTULO III - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	21
3.1 - Considerações iniciais	21
3.2 - Avaliação do número de Reynolds	21
3.3 - Medição dos comprimentos de separação	26
3.4 - Medição dos perfis de velocidade	32
3.5 - Determinação das tensões de cisalhamento	46
CAPÍTULO IV - ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
4.1 - Análise dos perfis de velocidade à montante do obstáculo	49

4.2 - Análise dos comprimentos de separação do escoamento à jusante do obstáculo	53
4.3 - Análise das características do escoamento à entrada e saída da obstrução	55
4.4 - Análise das características do escoamento à jusante do obstáculo; considerações globais sobre o desenvolvimento das características analisadas ao longo do escoamento	59
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
APÊNDICES	68
1. Dimensionamento da Bomba	68
2. Calibração do desnível	72
3. Determinação da viscosidade da solução	74
3.1 - Processo de obtenção de Metilcelulose A-15 ...	74
3.2 - Concentração em peso	74
3.3 - Determinação da viscosidade	75
3.4 - Equipamentos utilizados	76
4. Calibração do transdutor de pressão diferencial	82
4.1 - Processo de calibração	82
4.2 - Equipamentos utilizados	86

SIMBOLOGIA

a	- constante dependente da secção considerada	adim
a	- valor da tangente de α	adim
A_x	- indicação de escala genérica	adim
A_{100}	- indicação de escala para o valor de calibração de 100μ	adim
b	- inclinação da reta	adim
c	- constante	adim
c%	- concentração percentual de metilcelulose	%
d	- diâmetro dos tubos de tomada de pressão	(mm)
d	- densidade da esfera	(g/cm ³)
d'	- diâmetro interno da mangueira	(mm)
D	- diâmetro do duto da secção de testes	(mm)
D*	- diâmetro da obstrução	(mm)
D_m	- diâmetro médio do elemento de volume	(mm)
e%	- erro percentual	%
$f'(x_0)$	- valor da derivada dU/dr na parede	(1/s)
$f'(x_i)$	- valor da derivada dU/dr em pontos fora da parede	(1/s)
g	- aceleração gravitacional local	(m/s ²)
g_n	- aceleração gravitacional normal	(m/s ²)
h	- altitude	(m)
h	- intervalo de medição de velocidade local	(mm)
I.E.	- indicação de escala	adim
K	- constante do viscosímetro	adim
lr	- comprimento do arco do elemento de volume	(mm)
l_x	- comprimento de separação do escoamento	(mm)
Le	- comprimento de entrada na secção de testes	(mm)
Li	- comprimento de injeção de corante	(mm)

L_T	- comprimento total da secção de testes	(mm)
L_c	- linha de centro do escoamento	(adim)
L_m	- braço de momento do rotor	(mm)
m_p	- massa do picnômetro	(g)
m_f	- massa do fluido	(g)
n	- comprimento da coluna de liquido do micromanômetro	(mm)
n	- índice de comportamento de fluxo	(adim)
n'	- rotação	(rpm)
N	- potência	(cv)
P_e	- pressão estática	(kgf/cm ²)
P_t	- pressão total	(kgf/cm ²)
P_M	- massa de metilcelulose	(g)
P_{H_2O}	- massa da água	(g)
P_x	- pressão diferencial	(kgf/cm ²)
P_N	- pressão nominal	(kgf/cm ²)
Q	- vazão	(l/min)
r	- raio local	(mm)
R	- raio da secção de testes	(mm)
R_m	- raio médio do elemento de volume	(mm)
Re_D	- número de Reynolds referido ao diâmetro da secção de testes	(adim)
Re_{D^*}	- número de Reynolds referido ao diâmetro da obstrução	(adim)
REC	- registro de emissão central	
S_N	- deformação da membrana	(μ)
t	- tempo	(s)
T_f	- temperatura do fluido	(°C)
u	- velocidade periférica do rotor	(cm/s)
U_{mD^*}	- velocidade média no interior da obstrução	(cm/s)

U	- velocidade local	(cm/s)
U_{mt}	- velocidade média teórica	(cm/s)
U_m	- velocidade média	(cm/s)
$U_{m\acute{a}x}$	- velocidade máxima	(cm/s)
Vol	- volume	(l)
V_{Desl}	- volume deslocado pela bomba	(cm ³)
V_t	- volume total de fluido	(cm ³)
V_o	- volume original do Picnômetro	(cm ³)
ω	- velocidade angular	(rad/s)
x	- comprimento medido a partir de origem especificada	(mm)
α	- ângulo de inclinação do micromanômetro	(grau)
α'	- ângulo de inclinação de reta logaritmica	(grau)
β	- coeficiente de dilatação do vidro	(°C ⁻¹)
β	- ângulo de atuação dos roletes	(grau)
β'	- ângulo formado pelos extremos do elemento de volume.	(grau)
ϕ	- latitude	(grau)
η_v	- rendimento volumétrica	(%)
η_m	- rendimento mecânico	(%)
μ	- viscosidade absoluta	(cP)
ν	- viscosidade cinemática	(cm ² /s)
ρ	- densidade da solução	(g/cm ³)
ρ_f	- densidade do líquido monométrico	(g/cm ³)
τ_i	- tensão de cisalhamento local	(dinas/cm ²)
$\tau_{m\acute{a}x}$	- tensão de cisalhamento máximo	(dinas/cm ²)
τ_w	- tensão de cisalhamento na parede	(dinas/cm ²)
τ^*	- tensão de cisalhamento adimensional	(adim)
ΔPr	- pressão diferencial radial	(kgf/cm ²)
ΔH	- desnível entre reservatórios	(cm)
ΔT	- diferença entre temperatura de medição e calibração	(°C)

R E S U M O

O presente trabalho tem por objetivo, estudar as características do escoamento interior em regime laminar, plenamente desenvolvido junto a um obstáculo anular de secção longitudinal quadrada.

Por meio de uma bancada de testes especialmente projetada e devidamente instalada em laboratório, são medidos os comprimentos de separação a jusante do obstáculo e as pressões diferenciais locais, para vários números de Reynolds em diferentes secções com a finalidade de determinar os perfis de velocidade e de tensão de cisalhamento.

São também analisados aspectos do comportamento dos comprimentos de separação, das velocidades e tensões máximas ao longo do escoamento e das tensões na parede e no interior da região de recirculação.

A B S T R A C T

The main objective of this work is to study the laminar fully developed flow close to a circumferencial hump placed at the wall of a smoth circular pipe.

An experimental set up was used to determine the reattachment length and the velocity and shear stress profiles of the flow for different Reynolds numbers.

Simple relations were obtained from the analysis of the data for the reattachment length, maximum velocity and maximum shear stress in different positions along the flow and different Reynolds numbers.

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

Durante a década passada, considerável atenção foi dispensada ao desenvolvimento de dispositivos cardiovasculares protéticos e coração artificial. Atualmente, devido às dificuldades encontradas na determinação analítica dos padrões e parâmetros do escoamento sanguíneo, o projeto de próteses cardiovasculares é ainda em grande parte, uma arte, pois os conhecimentos estão assentados em algumas medições experimentais esporádicas e conhecimentos empíricos. As superfícies artificiais dos dispositivos protéticos criam eventualmente problemas tais como a formação de trombos com consequentes danos aos elementos formadores do sangue, que estão intimamente relacionados com as características do escoamento.

Experimentações realizadas por Fry et al (1965), segundo citação de Cheng et al [1], em condutos com derivação, sugerem que a ocorrência crítica para a formação de trombos e possível desestruturação sanguínea está associada à região de separação do escoamento.

Foi também mostrado por Fry (1968), citado em Cheng et al [1], que a deterioração e erosão de células endoteliais está intimamente relacionada às tensões cizalhantes que agem sobre as células.

O objetivo do presente trabalho é efetuar o levantamento do escoamento interior junto a um obstáculo de secção transversal anular e longitudinal quadrada, fixada à parede de um duto circular liso, através da medição do comprimento de separação e perfis de velocidade nas regiões de recirculação para números de Reynolds variando entre 20 e 500, segundo Guyton [2]. Esta faixa de variação do número de Reynolds é a que ocorre nas porções regulares das grandes artérias, tanto na circulação sistêmica quanto pulmonar.

Ao escoamento em regime laminar plenamente desenvol-

vido do presente trabalho, poderá futuramente ser introduzida uma componente oscilatória que permitirá a visualização e análise em regime de fluxo pulsátil. Da mesma forma, poderá ser analisado o escoamento através de obstáculos de geometrias mais complexas, ou ainda a região de recirculação e separação em bifurcações.

O fluido é uma solução aquosa a 2% de METILCELULOSE (METHOCEL A-15 - DOW CHEMICAL Inc.), que apresenta uma viscosidade de 10 cP a 20°C, movimentado por uma bomba peristáltica que fecha o circuito entre dois reservatórios mantidos em desnível controlável.

O desenvolvimento das pesquisas neste campo do conhecimento está originalmente relacionado ao desenvolvimento de soluções numéricas para escoamentos de Poiseuille uniforme, oscilatório e pulsátil junto a obstáculos de secção quadrada [3]. O escoamento é analisado bidimensionalmente através das equações de NAVIER-STOKES apresentadas na forma de transporte de vorticidade para solução por método de diferenças finitas.

Para o escoamento oscilatório, devido à reversão periódica da direção do fluxo, a vorticidade e a região de separação aparecem em ambos os lados do obstáculo em diferentes tempos. Observa-se que o comprimento de separação aumenta com o gradiente de pressão e diminui com a frequência. Verifica-se o mesmo comportamento para o escoamento pulsátil, mas com o comprimento de separação em ambos os lados do obstáculo um pouco menores.

Desta maneira são analisadas as variações de pressão ao longo da linha de centro do escoamento, as tensões cizalhantes próximas ao obstáculo para ciclos determinados dos fluxos oscilatório e pulsátil, a variação temporal das componentes de velocidade para pontos próximos da obstrução, variação com o tempo dos tamanhos dos vórtices em condições específicas de frequência e número de Kármán e posições dos centros de vorticidade a vários tempos.

Mais recentemente, segundo Cheng et al [4] pesquisas igualmente numéricas, levando-se em conta os parâmetros do escoamento tem sido direcionadas mais estreitamente às condições de

fluxo sanguíneo reais, admitindo-se já, além dos obstáculos de secção quadrada (estenoses) fixas, distensões de parede (aneurismas) com variação temporal (paredes móveis).

Estão também sendo pesquisadas as influências das formações de estenoses e aneurismas em bifurcações simétricas e assimétricas sobre os parâmetros característicos do escoamento, segundo Liou [5].

A década de 80 se inicia com estudos de escoamentos secundários na porção superior da aorta e outras situações similares [18]. Neste caso, porém, devido às dificuldades de formulação matemática, algumas simplificações são impostas para que a análise numérica possa ser efetivada, quais sejam:

1. O sangue tem comportamento Newtoniano;
2. Os vasos são rígidos;
3. O escoamento é laminar e em regime permanente.

O escoamento é descrito pelas equações de Navier-Stokes e continuidade em termos de coordenadas cilíndricas para a entrada e saída e coordenadas toroidais para a curvatura do vaso.

Observa-se, no entanto, que até o presente momento não se tem notícia de comprovação experimental dos estudos teóricos e numéricos realizados e já em estado bastante avançado. Por esta razão é que se procura justificar a realização deste estudo experimental, com o objetivo de contribuir para um melhor entendimento do escoamento junto a obstáculos, bem como gerar dados para a verificação de soluções numéricas e melhoria dos esquemas numéricos empregados.

C A P I T U L O I I

BANCADA DE TESTES

2.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Algumas considerações preliminares são necessárias na utilização de modelos que visam permitir o estudo de fenômenos físicos mais complexos que extrapolam os limites práticos e também que tenham a flexibilidade necessária para permitir a realização de outros experimentos mais elaborados.

Os resultados obtidos através destes modelos simplificados, embora um pouco afastados da realidade, servem como ponto de partida para análises mais complexas e fornecem subsídios para prever o comportamento do fenômeno real.

2.2 - CONDIÇÕES INICIAIS

Além das hipóteses simplificativas apresentadas na introdução, são consideradas ainda as seguintes condições práticas para a montagem da bancada de testes e obtenção de dados:

- i) O escoamento é laminar plenamente desenvolvido na entrada da seção de teste;
- ii) A solução utilizada tem comportamento Newtoniano;
- iii) O experimento é realizado com números de Reynolds, baseados no diâmetro da canalização, variando entre 20 e 500. Entretanto, a instalação é dimensionada para operar até o valor máximo de $Re_D = 1000$, para permitir experimentações futuras em outra faixa de variação de Re_D .

A consideração de comportamento Newtoniano da solução de Methocel utilizada, pode ser justificada pelos estudos de Metzener[6]. Segundo o pesquisador, os perfis de velocidade para escoamento em regime laminar plenamente desenvolvido de fluídos não Newtonianos afasta-se da condição paraboloidal, característica de fluídos Newtonianos, segundo a expressão:

$$\frac{U}{U_m} = \frac{1 + 3n}{1 + n} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (2.1)$$

onde: U= Velocidade local

U_m = Velocidade média

n= índice de comportamento de fluxo (característica reológica)

R= Raio do duto

r= raio local

Para fluídos Newtonianos, o índice de comportamento de fluxo é igual à unidade, afastando-se de um para fluídos não-Newtonianos. Desta forma, os perfis de velocidade se afastam da condição parabólica de acordo com a Figura 1 abaixo:

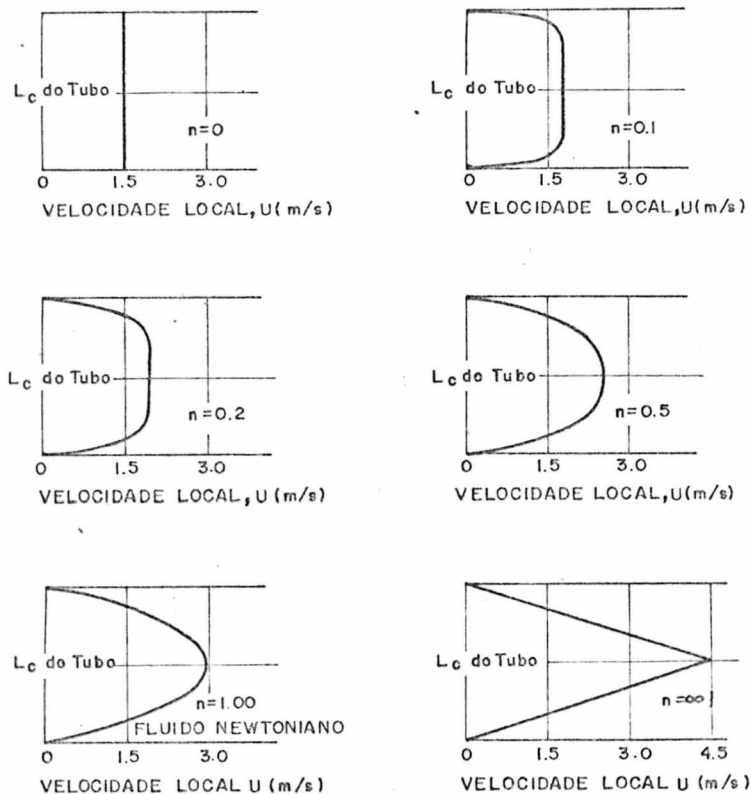


Fig. 1 = Dependência do perfil de velocidade em função do índice de comportamento do fluxo (n)
(Velocidade média = 1,5 m/s)

Por outro lado, também de acordo com Metzner[6], a tendência ao afastamento da condição paraboloidal aumenta com a concentração de materiais poliméricos de alto peso molecular.

Como será visto mais adiante no item 4.1, na região do escoamento plenamente desenvolvido, os perfis de velocidade obtidos experimentalmente estão suficientemente próximos da condição paraboloidal, justificando portanto, a hipótese de fluido com comportamento Newtoniano.

O fluido utilizado é uma solução à 2% de metilcelulose, uma substância cuja característica polimérica é determinada pela celulose[7]. Tal solução possui uma viscosidade média dez vezes maior que a da água pura a 20°C, permitindo a obtenção de baixos números de Reynolds, e caracterizando a 3ª condição. É interessante salientar que uma concentração maior de metilcelulose poderia eventualmente simplificar a obtenção de baixos números de Reynolds através de sistemas de controle mais grosseiros. No entanto, ao adotar tal medida, estar-se-ia correndo o risco de gerar um afastamento significativo da condição Newtoniana, dificultando a interpretação dos resultados.

Finalmente, a primeira condição é obtida pelo estudo do comprimento da canalização antes da entrada da seção de testes, como será caracterizado no item 2.4.2.

2.3 - PARÂMETROS MEDIDOS

Os parâmetros a serem medidos, necessários para o levantamento de curvas e posterior análise são os seguintes:

1. Números de Reynolds para várias situações de escoamento controlados por estrangulamento e gradiente de pressão.
2. Pressões dinâmicas na região plenamente desenvolvida do escoamento, com a finalidade de verificação das duas primeiras condições iniciais citadas.
3. Comprimento de separação do escoamento para vários números de Reynolds.
4. Pressões dinâmicas para vários números de Reynolds em várias seções da seção de teste com a finalidade de obterem-se os perfis de velocidade e as tensões de cisalhamento.

2.4 - ELEMENTOS DO SISTEMA

2.4.1 - Descrição Geral

A bancada de testes é constituída basicamente de uma secção de testes ligada a dois reservatórios de solução mantidos em desnível controlável.

O circuito é fechado por uma bomba peristáltica com fluxo positivo na direção do reservatório móvel, chamado de RESERVATÓRIO EMISSOR. O reservatório de captação do fluído em escoamento é chamado de RESERVATÓRIO RECEPTOR. Todo o sistema é ligado a um terceiro reservatório (de controle), cuja função principal é suprir as eventuais perdas do circuito, considerando-se como função secundária, o armazenamento de fluído fora de operação. O sistema é ilustrado esquematicamente na Fig. 2.

2.4.2 - Secção de testes

A secção de testes, sendo o elemento fundamental do sistema, é a que exige maiores cuidados na sua confecção.

Inicialmente, para que se tenha, na região de análise do escoamento, condições de escoamento desenvolvido, considera-se um comprimento de entrada $|8, 17|$ Le dado por:

$$Le = (0,03 \text{ a } 0,065) D \cdot Re_D \quad (2.2)$$

Por conveniência é adotado um comprimento de $0,05 \cdot D \cdot Re_D$, determinado para um Re_D máximo de 10^3 .

Com a finalidade de unir a secção de testes ao reservatório emissor e também uniformizar o fluxo na entrada da secção de testes é utilizado um uniformizador de fluxo.

Para a determinação dos comprimentos de separação do escoamento, o método adotado é o visual, sendo portanto necessário que a secção de teste seja transparente. Por esta razão, é utilizado um tubo de acrílico cristal. A transparência é igualmente importante sob o ponto de vista de detecção de possíveis bolhas de ar que podem afetar os parâmetros a serem medidos.

O diâmetro do tubo, limitado pelas condições de mercado, é de $1 \frac{3}{4}$ " . Como o tubo é comercialmente liso, não são considerados os efeitos de rugosidade sobre o escoamento.

Finalmente, com o intuito de eliminar possíveis bolhas de

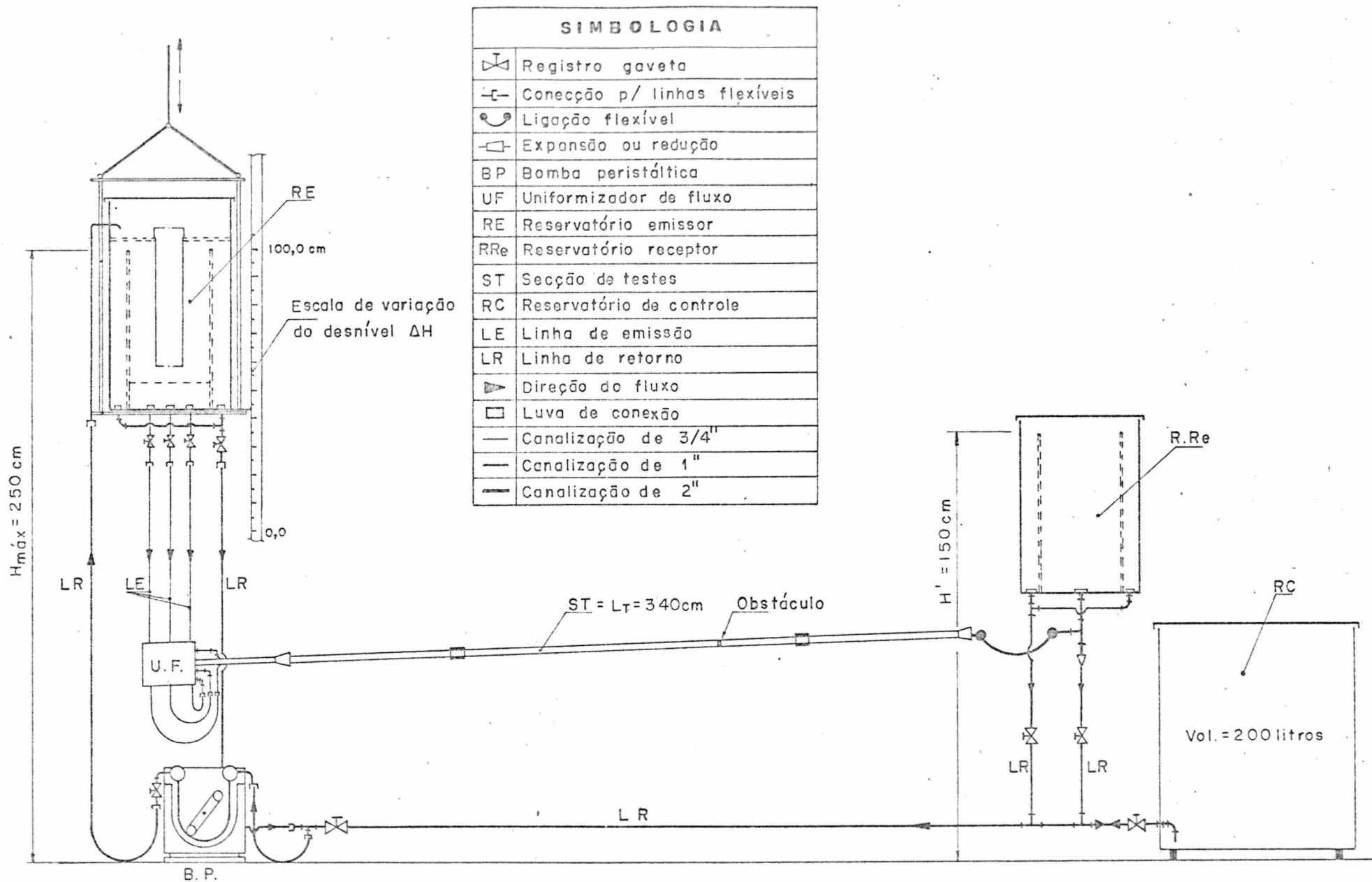


Fig. 2 = Esquema da Bancada de Téstes

ar na secção, a bancada permite a inclinação da secção de testes através de ligação flexível de sua porção terminal com o reservatório receptor.

A Figura 3 mostra esquematicamente a secção de testes onde estão indicados os comprimentos de entrada, total e da secção de injeção de corante para visualização do escoamento, relativa à posição do obstáculo.

O obstáculo, foco dos experimentos, cuja forma e dimensões são indicadas na figura 4, é também constituído em acrílico usinado e polido. A forma e dimensões adotadas são referidas a trabalhos já realizados em outras instituições, conforme citado no ítem 1. A perpendicularidade da secção transversal da obstrução, em relação às linhas de corrente do escoamento é particularmente importante nesta fase de estudo, pois evita que se formem correntes secundárias que, além de prejudicarem a visualização, certamente afetariam os parâmetros do escoamento, tornando sua análise particular para o modelo utilizado.

Em função disto, foi utilizado um dispositivo de posicionamento do obstáculo com ajuste cônico. A fixação do obstáculo à parede da secção é obtida por interferência. Para tal, a parede do tubo foi aquecida a 60°C e o obstáculo resfriado a 0°C.

A secção de testes deve ficar completamente isolada do restante da instalação e principalmente do reservatório emissor, a fim de serem evitadas transmissões de vibrações provenientes da bomba peristáltica. Para isto, a ligação do reservatório emissor à secção de testes é realizada por meio de tubos flexíveis e a estrutura de sustentação do reservatório isolada da secção, como pode ser visto na figura 2.

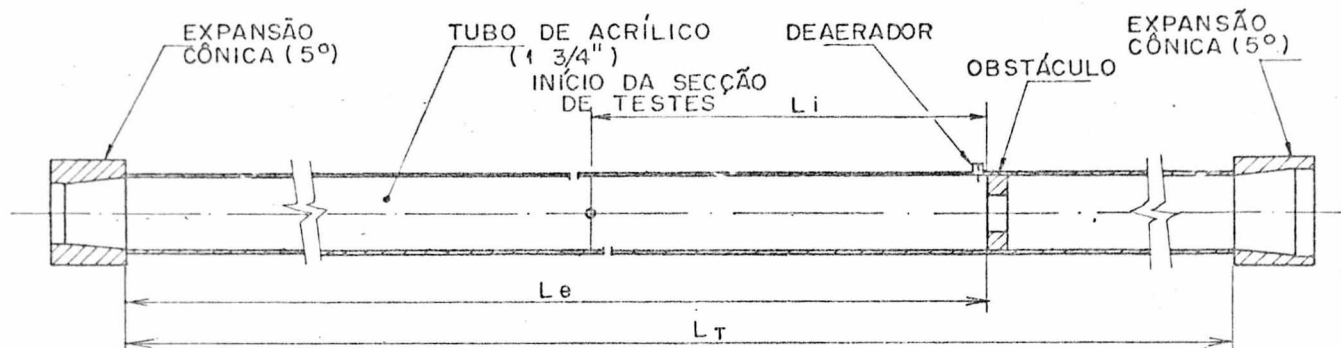


Fig. 3 = Esquema da Secção de Testes

L_e = comp. de entrada = 220 cm

L_i = comp. de injeção = 60 cm

L_T = comp. total = 340 cm

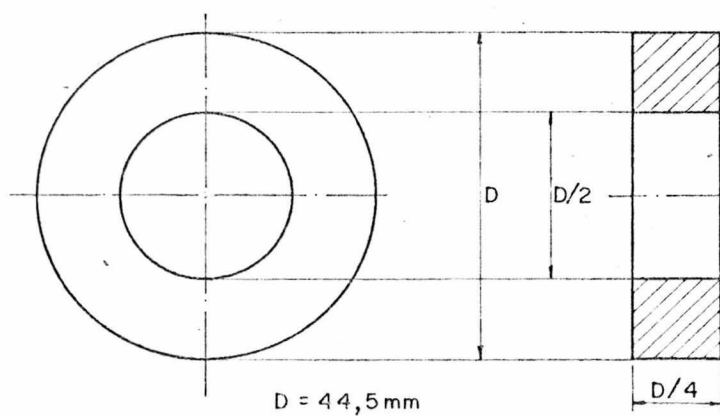


Fig. 4 = Geometria do Obstáculo

2.4.3 - Controle do número de Reynolds

O número de Reynolds pode ser controlado através da variação do desnível entre os reservatórios de emissão e recepção e da perda de carga localizada em registros colocados nas linhas de emissão à saída do reservatório emissor.

Para maior sensibilidade de controle, foram colocadas três linhas de emissão de diâmetro 3/4", unidas à entrada da seção de testes por um uniformizador de fluxo. O esquema do uniformizador é mostrado na figura 5.

Para que a vazão permaneça constante a cada medição, os reservatórios foram projetados de tal forma que a necessária estabilidade de desnível é garantida pela vazão de transbordamento de ambos os reservatórios, para reservatórios secundários incorporados ligados à bomba pelas linhas de retorno (Figura 6a e 6b).

A vazão medida é a vazão de transbordamento do reservatório receptor, controlada por um registro de gaveta colocado na linha de retorno à saída do reservatório de transbordamento. (Figura 2).

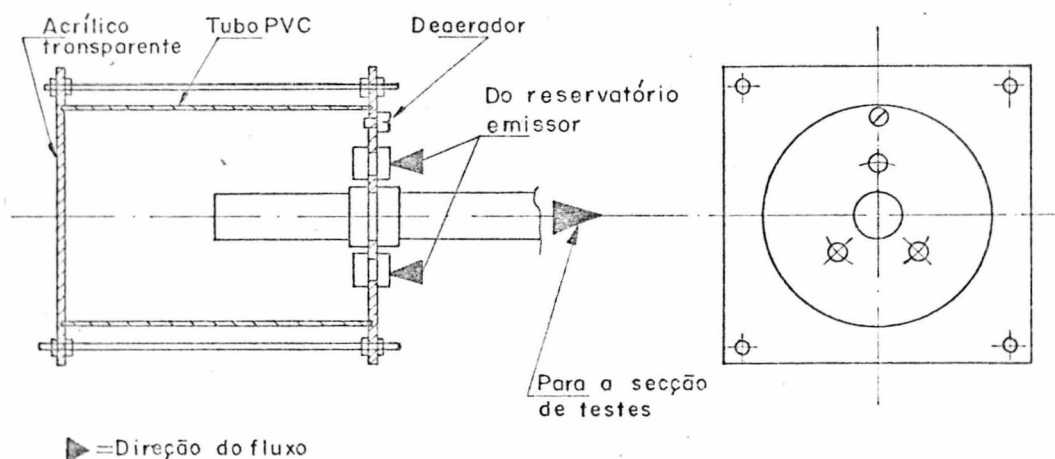


Fig. 5 = Uniformizador de Fluxo

2.4.4 - Reservatório emissor e receptor.

Ambos os reservatórios são construídos de forma a suprirem as necessidades apresentadas no ítem anterior.

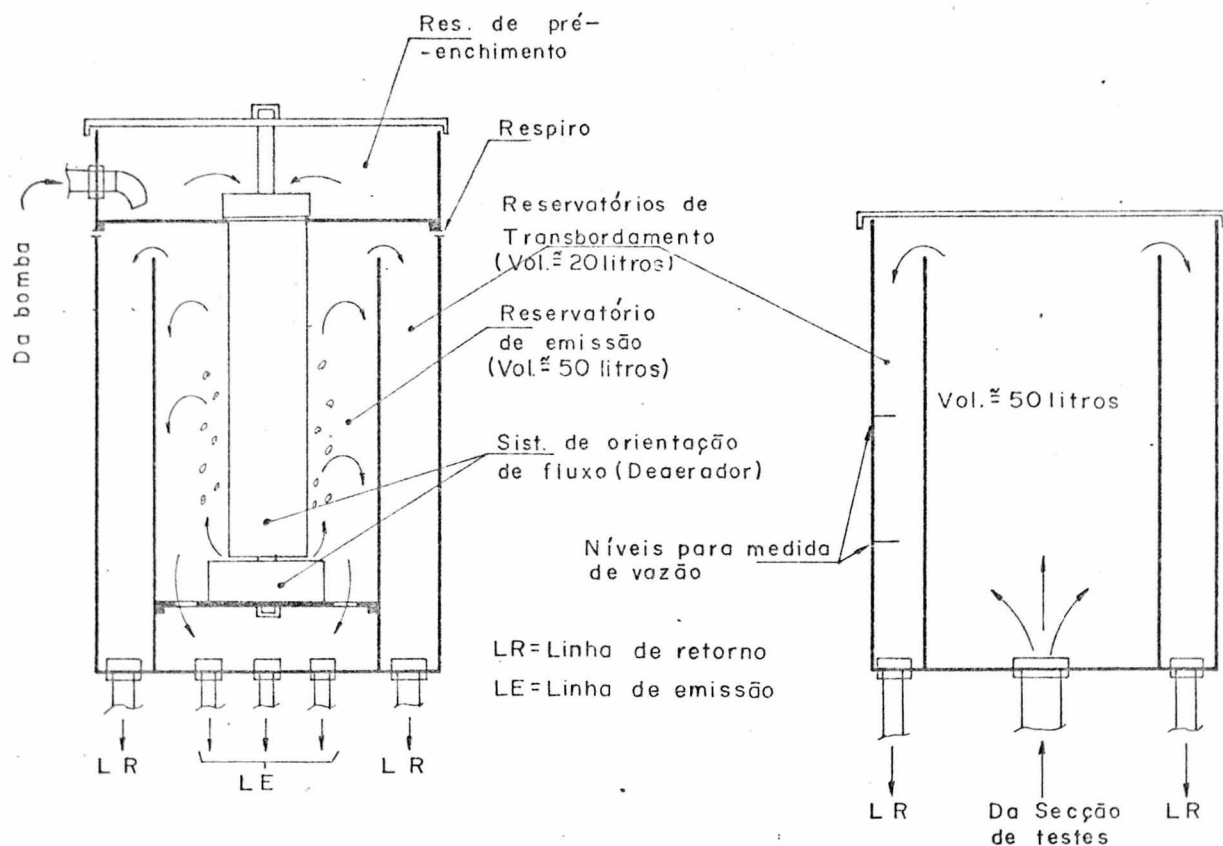
Como, no entanto, não existe um parâmetro básico de determinação do volume desses reservatórios, procurou-se estabelecer uma relação com a vazão máxima do sistema, considerando-se o dobro dessa vazão em volume, ou seja, na vazão máxima, este reservatório seria cheio em 100 segundos.

Deve-se destacar, aqui, uma das características principais do reservatório emissor. Devido à facilidade de formação de diminutas bolhas de ar e espuma na solução, mesmo quando sofre pequenas agitações e da sua dificuldade de eliminação, o reservatório foi projetado de tal forma a orientar o fluxo na direção da superfície livre da solução através de uma coluna de amortecimento montada sobre um desviador de fluxo. Desta forma, as prováveis bolhas de ar e espuma são orientadas no sentido contrário ao do escoamento para a secção de testes, como pode ser visto na figura 6a.

Registros colocados na saída dos reservatórios de transbordamento regulam o nível da solução, evitando a entrada de ar nas linhas de retorno da bomba.

O reservatório receptor é esquematizado na Figura 6b, onde são indicados os níveis de medição de vazão.

Por facilidade construtiva, os reservatórios possuem secção retangular.



a) Reservatório Emissor

b) Reservatório Receptor

Fig. 6 = Esquema dos Reservatórios Emissor e Receptor

2.4.5 - Bomba Peristáltica

A bomba foi projetada de tal forma a permitir um bombeamento eficiente da solução para as condições de vazão máxima estabelecida, de maneira a minimizar a possibilidade de formação de bolhas de ar e evitar a incorporação à solução, de partículas de material sólido decorrentes da oxidação de materiais ferrosos, comum em outros tipos de bomba.

Esta bomba é largamente difundida nos meios biomédicos e utilizada em cirurgias cardíacas.

Procurou-se, entretanto, otimizar o sistema, com a introdução de roletes guia com a finalidade de orientar as mangueiras impulsionadoras de solução, evitando seu deslocamento lateral e a necessidade consequente de parada do conjunto para reajustes durante a experimentação.

O elemento responsável pelo transporte da solução é constituído de dois roletes de transporte, que pressionam dois tubos de látex de diâmetro 1/2", sobre um suporte semi-circular e de dois roletes guia posicionado à 90° em relação aos roletes transportadores.

É interessante salientar que em testes preliminares, constatou-se a impossibilidade de utilização de tubos flexíveis de plástico como elementos de transporte, devido à baixa elasticidade do material.

Este conjunto é ligado por um sistema redutor ao motor elétrico de acionamento com controle de velocidade.

É utilizado um motor de corrente contínua, cuja variação de rotação é obtida por meio da variação de corrente elétrica. Este sistema foi projetado e construído no Departamento de Engenharia Elétrica desta Universidade.

O projeto parcial da bomba é apresentado no Apêndice 1.

2.4.6 - Dispositivo de visualização do escoamento:

A visualização do escoamento se torna possível, à medida que se utiliza um sistema de injeção de corante para a visualização de determinadas linhas de corrente e um sistema de iluminação adequado.

a. Sistema de injeção de corante:

Duas são as preocupações básicas que orientam a construção do sistema.

A primeira, que se refere à densidade da solução de visualização, por não ser primordial para o dimensionamento dos injetores, é discutida mais apropriadamente em procedimentos experimentais.

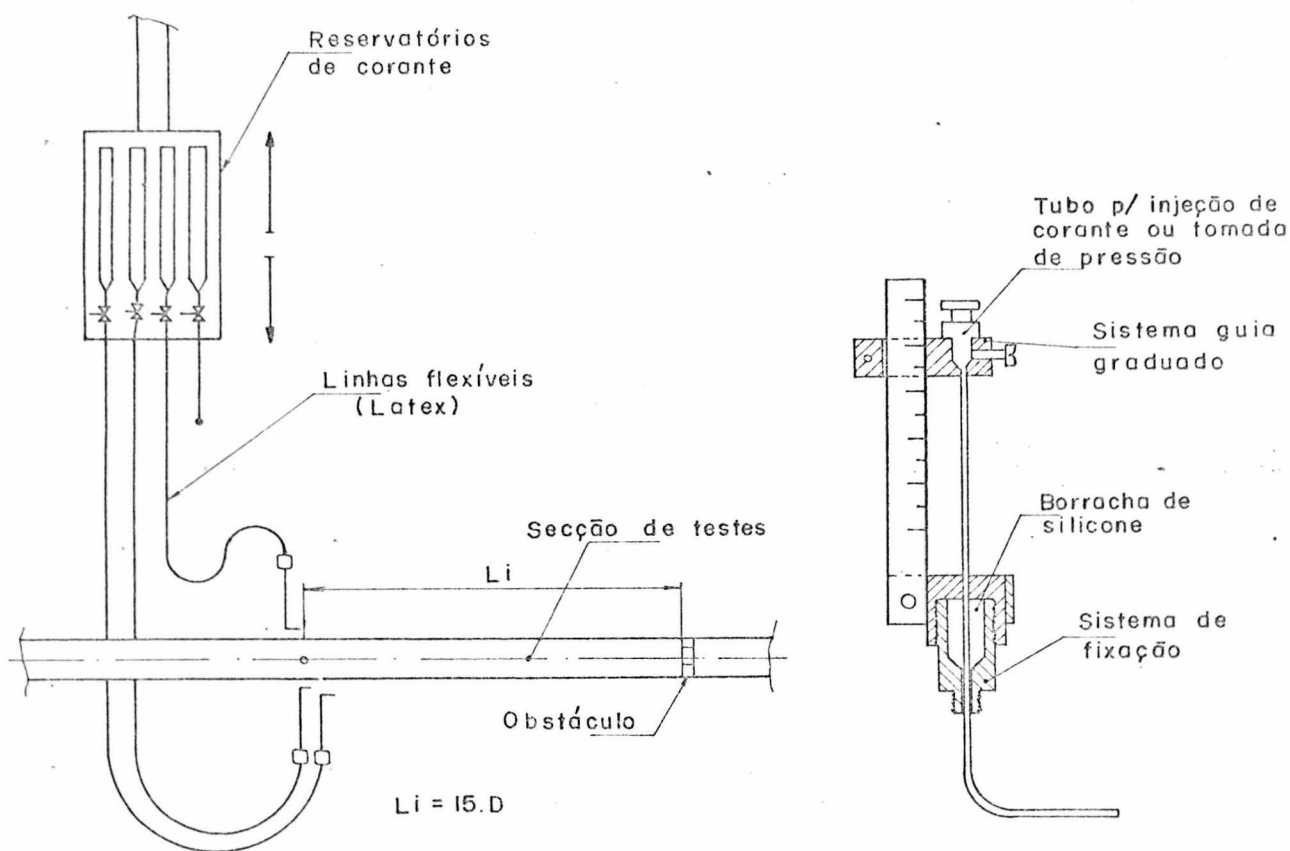
A segunda, que se refere à vazão de entrada de corante no escoamento é a que orienta efetivamente a construção do sistema.

A velocidade de entrada da solução de visualização deve ser a mesma do escoamento no ponto de injeção, para que nenhum parâmetro seja alterado, e se obtenha uma linha de corrente o mais

uniforme possível.

Por este motivo, os depósitos de solução corante foram colocados sobre uma haste ajustável verticalmente. A ligação dos depósitos aos injetores é obtida por meio de mangueiras de látex com registros de agulha. Assim, a cada relação de desnível dos reservatórios emissor e receptor, é possível regular a vazão de entrada de corante. O sistema é ilustrado na Figura 7a.

Os injetores foram construídos com agulhas hipodérmicas de 1,5 mm de diâmetro, obedecendo à norma [9] para construção de tubos de tomada de pressão.



a) Sistema de controle de injeção de corante

b) Sistema guia dos injetores de corante e tomada de pressão.

Fig. 7 = Sistema de Injeção de Corante

As agulhas podem ser movimentadas ao longo da secção transversal da secção de testes através de um dispositivo guia conforme esquematizado na Figura 7b.

Para a varredura completa da secção, são colocados três injetores defasados de 90° , posicionados a 15 diâmetros do obstáculo.

b- Sistema de Iluminação:

As características da fonte de iluminação são:

1. A luz captada no plano de visualização é a refratada e transmitida pelo fluido e parede de secção. A fonte é portanto colocada atrás da secção de testes, evitando assim a ocorrência desagradável e indesejável de luz refletida pela superfície altamente refletora do tubo de acrílico.

2. A luz incidente deve ser difusa e uniformemente distribuída sobre a região do escoamento em análise, para que se obtenha uma imagem de densidade de iluminação uniforme, para fins de registro fotográfico.

Com este objetivo foram utilizadas quatro lâmpadas fluorescentes posicionadas em semi-círculo, recobertas por uma lâmina de acrílico branco de mesma forma, dispostas ao redor da secção de testes.

Finalmente, para um melhor registro fotográfico, deve-se evitar a introdução de luzes de outras fontes além da transmitida pela secção, já que isto afetaria a fotometragem alterando as características de contraste entre as linhas de corrente visualizadas e o restante da área clara da secção.

O sistema de iluminação utilizado é ilustrado na Figura 8.

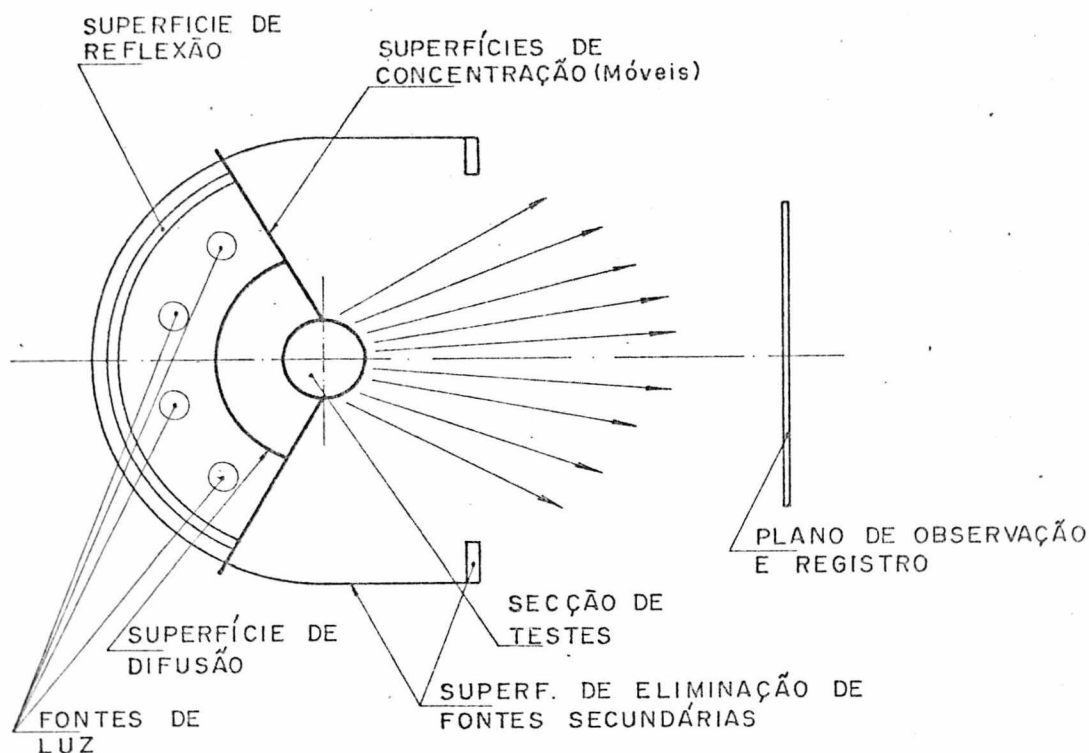


Fig. 8 - Sistema de iluminação da secção de testes

2.4.7 - Dispositivo de medição de pressão:

Para o levantamento dos perfis de velocidade na região de interesse do escoamento, o parâmetro a ser medido é a pressão dinâmica, obtendo-se daí as velocidades locais.

Em situações normais um tubo de Pitot segundo Prandtl poderia ser utilizado sem maiores problemas. No entanto, para a região considerada, devido à expansão da veia fluída à jusante do obstáculo, (região de recirculação) e também no interior da obstrução, a pressão estática sofre variações ao longo do escoamento que é relevante para a precisão das medições.

Assim, um tubo de Pitot não pode ser usado, devido à posição em que são tomadas as pressões total e estática.

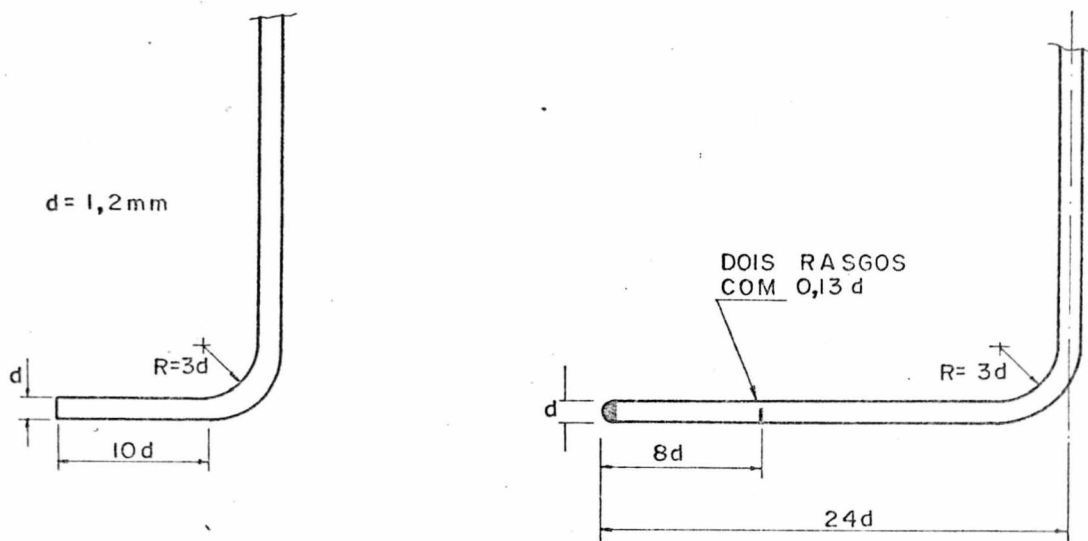
Em função do exposto, foram utilizados dois tubos independentes, construídos especialmente com a finalidade de medir as pressões total e estática numa mesma secção. Verificou-se que a pressão estática não varia ao longo da secção transversal do esco

amento.

Ambos os tubos foram construídos segundo a norma, a partir de agulhas hipodérmicas especiais de 1,2 milímetros de diâmetro, conforme é mostrado na figura 9.

O tubo de tomada de pressão estática foi construído obstruindo-se a ponta da agulha e realizando-se uma pequena fenda lateral de 0,12 mm a 8 diâmetros conforme a norma construtiva dos tubos de Pitot segundo Prandtl [9].

Os tubos assim construídos são montados sobre guias deslizantes, de tal forma a permitir a varredura de toda a secção, como pode ser observado no esquema da Figura 7b.



a) Tipo p/ tomada de pressão Total ou Injeção de Corante

b) Tubo para tomada de pressão estática adaptado da norma ASHRAE-51-75

Fig. 9 = Tubos de Medição de Pressões Total e Estática

Outro aspecto, não menos importante a ser considerado, está relacionado à faixa de pressões dinâmicas existentes.

Uma breve avaliação, baseada num número de Reynolds da ordem de 200, por exemplo, no interior da obstrução, mostra que para:

$$\Delta P_r = \frac{1}{2} \rho U_{m_{D^*}}^2, \quad \text{onde } U_{m_{D^*}} = \frac{2 \operatorname{Re}_D \cdot \nu}{D} \quad (2.3)$$

sendo: $D = 44,5 \text{ mm}$ - $D^* = D/2$

$\nu = 0,108 \text{ cm}^2/\text{s}$ à 20°C

$\rho = 1,0019 \text{ g/cm}^3$ (densidade da solução a 20°C)

a pressão dinâmica média é:

$$\Delta P_r = 18,85 \text{ N/m}^2 = 1,92 \text{ mm H}_2\text{O}$$

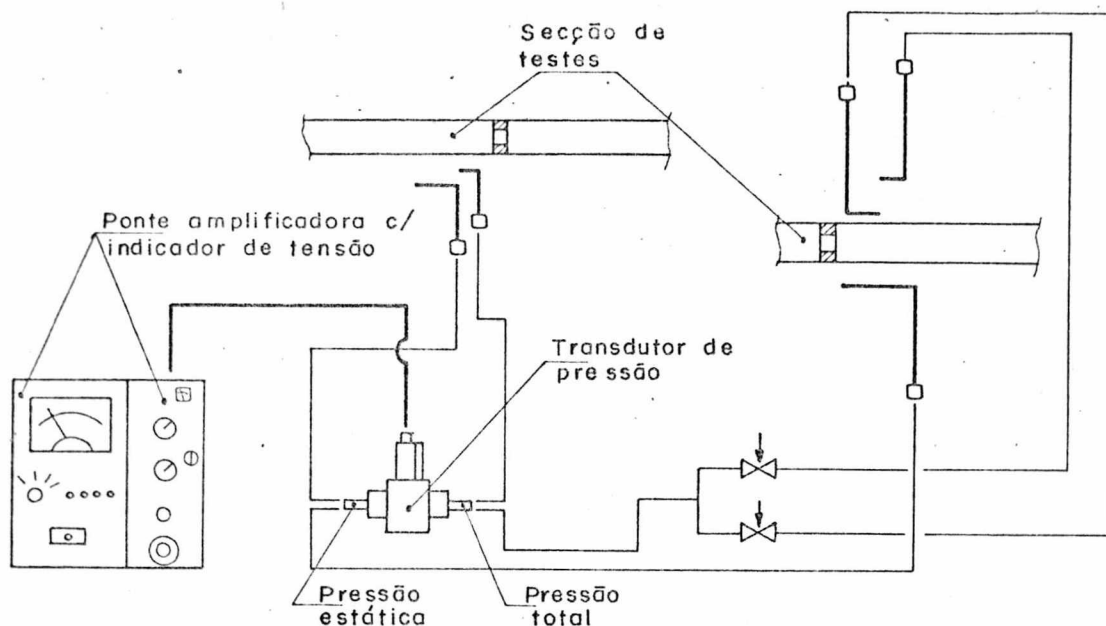
As pressões dinâmicas no interior da região de recirculação são ainda menores que este valor.

Para tal faixa de medição de pressões, seria impossível a utilização de um manômetro tipo tubo U, tendo em vista que o erro provável de medição seria bastante elevado, considerando-se, por exemplo, uma resolução de leitura de 1,0 mm.

Tornou-se necessário, portanto, o uso de um equipamento mais sensível. Na impossibilidade de utilização de um micro-manômetro de tubo inclinado para medições em meio aquoso, recorreu-se a um transdutor de pressões diferenciais indutivo [10] de alta sensibilidade, acoplado a uma ponte amplificadora.

A especificação do equipamento, bem como sua calibração são apresentados no Apêndice 4. A Figura 10a mostra o esquema do conjunto.

Com relação às medições de pressão dinâmica e estática na região de recirculação, foi seguida a mesma rotina dos outros pontos da secção. Porém, devido à inversão de velocidade nesta região, tornou-se necessária a utilização de dois tubos de tomada de pressão total, posicionados e conectados ao transdutor de acordo com o esquema da Figura 10b.



- a) A montante e no interior do obstáculo b) A jusante do obstáculo

Fig. 10 = Conjuntos de medição de pressão diferencial.

2.4.8 - Desnível máximo:

O desnível máximo entre reservatórios emissor e receptor é calculado em função da perda de carga para o número de Reynolds máximo de 1000, referido ao diâmetro da secção de testes.

Em consequência, a vazão máxima para este fim, dada pela expressão:

$$Q = \frac{\pi}{4} DvRe_D \quad (2.4)$$

para uma viscosidade cinemática de $0,15 \text{ cm}^2/\text{s}$ e diâmetro nominal de $44,5 \text{ mm}$, é da ordem de $500 \text{ cm}^3/\text{s}$.

Tendo em conta todas as perdas de pressão ao longo dos condutores retos e as perdas localizadas nos acessórios, o desnível máximo entre reservatórios é da ordem de 100 cm .

C A P Í T U L O I I I

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Após a construção e montagem dos dispositivos de medição, foram realizados alguns levantamentos preliminares, apresentados no Apêndice 2, com a finalidade de adaptação do operador aos sistemas de medição, para verificação prévia das condições de funcionamento da instalação e do desempenho do sistema de medição.

Os procedimentos experimentais apresentados a seguir englobam os resultados obtidos, sendo que em alguns casos a análise de situações específicas é apresentada concomitantemente com o intuito de facilitar a leitura e entendimento do texto.

3.2 - Avaliação do número de Reynolds:

A faixa dos números de Reynolds a ser utilizada nos experimentos é de 20 a 500.

O número de Reynolds é referido ao diâmetro da secção de testes, mesmo que se esteja considerando medições no interior da obstrução, onde neste caso o número de Reynolds é o dobro do especificado. A obstrução cria uma redução de secção transversal de 25%.

A finalidade principal desta medição é facilitar a reprodutibilidade dos números de Reynolds para os experimentos correlatos. Para isto foram efetuados levantamentos de curvas de variação da vazão da solução de Metilcelulose em função das perdas de carga representadas pela variação de desnível e perdas localizadas nos registros de controle.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1, e as curvas resultantes, na Figura 11.

Considerando que a temperatura da solução exerce influência considerável sobre a viscosidade, como pode ser visto na carta de variação da viscosidade com temperatura (Figura 38, Apêndice 3) a cada bloco de medições foram efetuadas leituras de temperatura e determinadas as viscosidades da solução de metilcelulose. Desta forma, o diagrama $Re_D \times \Delta H$ da Figura 12 é também função da temperatura da solução.

Por este motivo, tais curvas possuem caráter aproximativo com relação à reprodutibilidade dos números de Reynolds, a não ser, é claro, para as mesmas temperaturas nas quais foram geradas.

Conhecidas a vazão (item 2.4.3) e a temperatura, o número de Reynolds é determinado através da expressão usual, adaptada às condições experimentais, isto é:

$$Re_D = Um. D/v = 4. Q/\pi D.v = 4,769 Q/v \quad (3.1)$$

sendo: Q = vazão medida (l/min)

v = viscosidade cinemática, função da temperatura (cm²/s)

Segundo este procedimento prévio, todos os experimentos que são baseados num mesmo número de Reynolds puderam ser realizados com relativa facilidade. Procurou-se, sempre que possível, efetuar as medições numa mesma secção transversal no sentido crescente do número de Reynolds.

Os tempos em segundos constantes da Tabela 1 são resultados da média de três valores de tempo obtidos originalmente.

A diferença nas temperaturas da Tabela 1 é decorrente de medições efetuadas em dias diferentes.

TABELA 1 - VALORES DE Re_D EM FUNÇÃO DO DESNÍVEL E PERDAS LOCALIZADAS.

$T_f = 17,5^\circ C$		$v = 0,117 \text{ cm}^2/s$		$T_f = 18^\circ C$		$v = 0,115 \text{ cm}^2/s$	
Vol. 3,75 lts		REC. = 1/2 volta		Vol. 11,25 lts		REC. = 1 volta	
Desnível $\Delta H(\text{cm})$	Tempo $t(\text{seg})$	Vazão $Q(\text{l/min})$	Re_D	Desnível $\Delta H(\text{cm})$	Tempo $t(\text{seg})$	Vazão $Q(\text{l/min})$	Re_D
10	760,8	0,284	11,8	10	329,2	1,97	81,6
20	476,4	0,453	18,8	20	209,4	3,09	128,3
30	360,0	0,600	24,9	30	164,0	3,95	163,8
40	300,0	0,720	29,9	40	140,2	4,62	191,6
50	261,4	0,826	34,3	50	122,8	5,28	218,8
60	273,5	0,909	37,7	60	110,5	5,86	243,2
70	218,5	0,988	41,0	70	101,5	6,38	264,7
80	201,0	1,075	44,6	80	94,6	6,85	284,0

$T_f = 13,5^\circ C$		$v = 0,136 \text{ cm}^2/\text{seg}$		$T_f = 13,5^\circ C$		$v = 0,136 \text{ cm}^2/s$	
Vol. 11,25 lts		REC. 1 1/2 volta		Vol. 11,25 lts		REC. = 2 voltas	
Desnível $\Delta H(\text{cm})$	Tempo $t(\text{seg})$	Vazão $Q(\text{l/min})$	Re_D	Desnível $\Delta H(\text{cm})$	Tempo $t(\text{seg})$	Vazão $Q(\text{l/min})$	Re_D
10	226,0	2,87	100,5	10	197,4	3,28	115,1
20	137,2	4,72	165,6	20	119,4	5,43	190,3
30	105,0	6,17	216,4	30	89,4	7,25	254,1
40	87,5	7,40	259,6	40	73,0	8,88	311,2
50	76,0	8,53	299,0	50	63,0	10,28	360,6
60	66,8	9,70	340,1	60	55,8	11,61	407,2
70	61,0	10,62	372,5	70	50,4	12,86	450,8
80	56,0	11,57	405,7	80	46,0	14,09	493,9

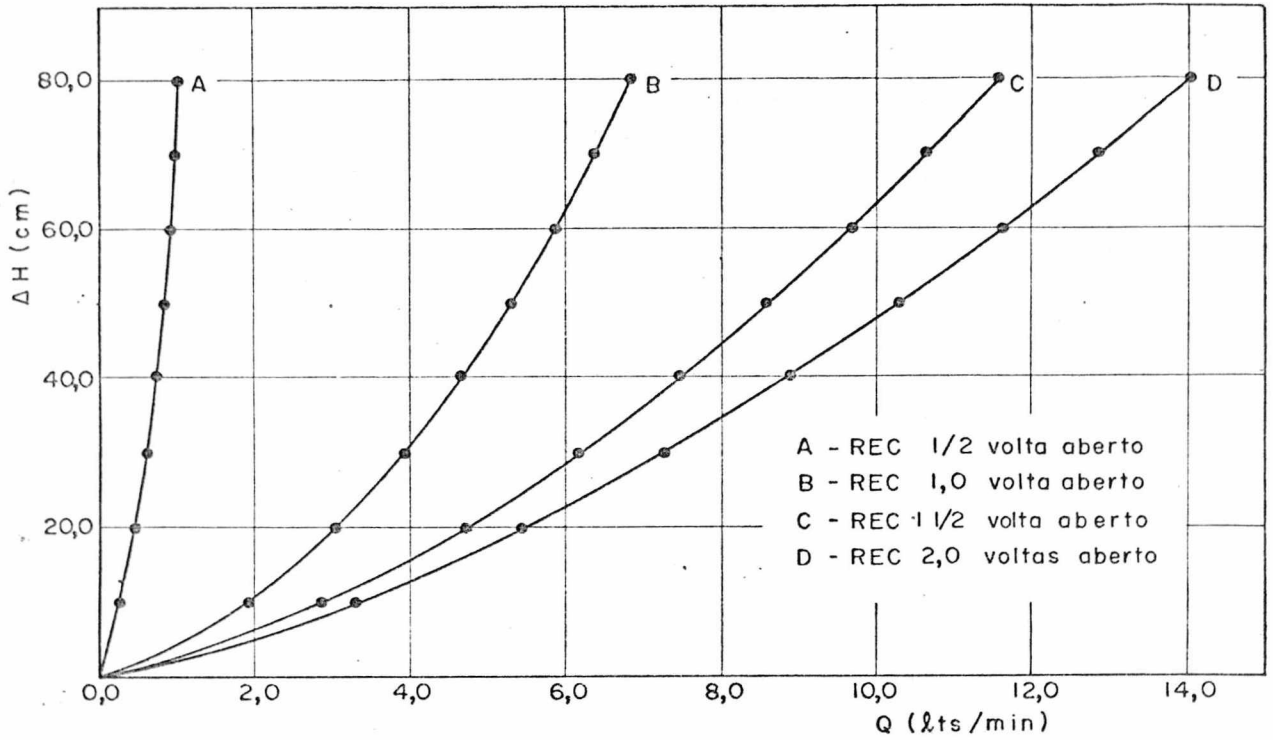


Fig. 11 = Curvas de Variação da vazão em função da perda de carga localizada e desnível.

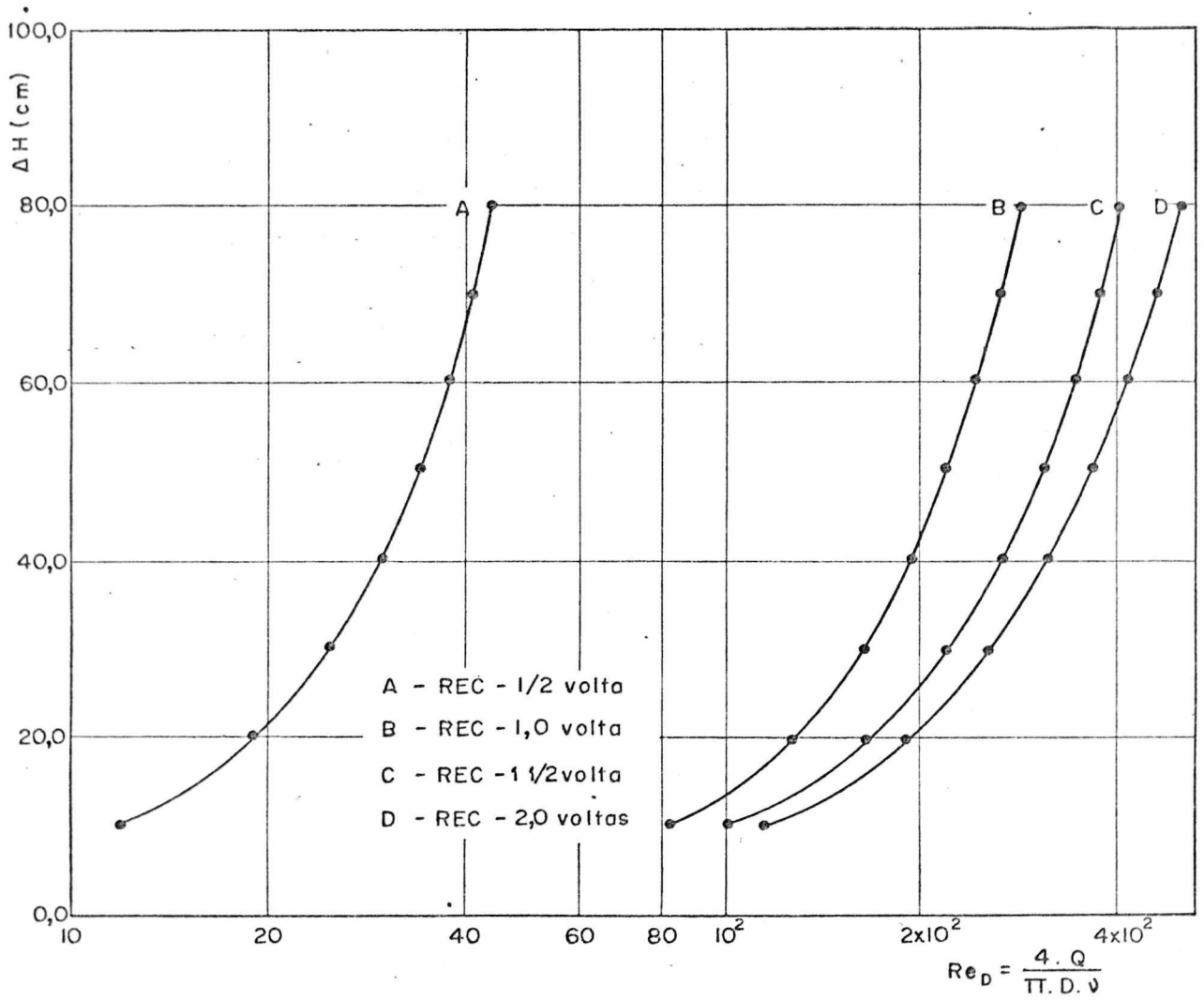


Fig.12 = Curvas de variação de Re_D em função da perda de carga localizada e desnível.

3.3 - Medição dos comprimentos de separação:

A. Comentários Preliminares:

No ítem 2.4.6, estão apresentados os cuidados envolvidos na construção do sistema de injeção de corante. Como a análise da influência da densidade da solução corante se encaixa melhor nos procedimentos experimentais, do que propriamente na construção do dispositivo de visualização, achou-se por bem discutí-lo nesta secção.

A medição dos comprimentos de separação do escoamento após o obstáculo, está fundamentada na distância em que a linha de corrente tangente à superfície da obstrução volta a reencontrar a parede da secção de testes. A medição deste comprimento é feita através da visualização desta linha de corrente. Desta maneira, a uniformidade da linha de corrente tornada visível tem uma importância muito grande sobre a precisão das medidas a serem efetuadas. Existe basicamente três fatores que podem alterar a uniformidade das linhas de corrente, a saber:

1. Vibrações e outras perturbações exteriores sobre o conjunto.
2. Diferença entre a velocidade local do escoamento e a da solução corante na secção de injeção.
3. Diferença acentuada da densidade da solução corante relativa à densidade da solução principal.

Os detalhes construtivos adotados permitem a eliminação dos dois primeiros fatores.

Ainda, com relação ao segundo fator, apesar de a velocidade tender a se uniformizar ao longo do escoamento, o único efeito perturbador é aquele causado pela rápida difusão do corante na solução principal produzindo uma faixa de comprimento relativamente extensa, sem a ocorrência desejada de uma concentração nítida em torno de um ponto na região de reencontro da linha de corrente.

Com relação ao terceiro fator, o efeito principal e certamente o mais prejudicial, seria a alteração do comprimento de separação, pela utilização de um corante com densidade diferente'

da da solução. A solução de metilcelulose com anilina verde e vermelha com concentração 1:50 em peso foi empregada como solução corante.

A forma encontrada para verificar se a linha de corrente visualizada estava compatível com o escoamento, foi colocar os injetores a uma distância relativamente elevada do obstáculo (600 milímetros). Desta forma, pode-se garantir, por simples inspeção visual a inexistência de qualquer dos fatores apresentados.

B. Procedimentos:

Para a realização da medição dos comprimentos de separação, uma escala graduada foi colocada junto à parede da secção de testes, no mesmo plano por onde passa a linha de corrente visualizada, posicionando-se o zero na secção de saída do obstáculo.

Para cada número de Reynolds, a solução corante é injetada segundo as condições estabelecidas no ítem anterior e 2.4.6, sendo a linha de corrente formada, fotografada em intervalos de aproximadamente 1 minuto.

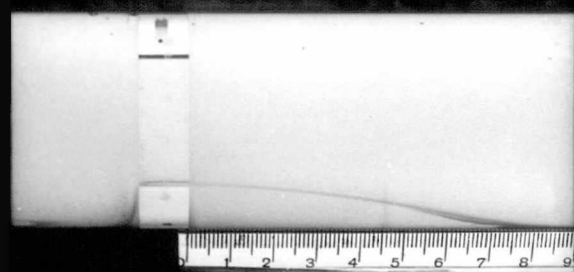
A figura 13 mostra os resultados obtidos para $Re_D = 55$.

A figura 14 apresenta as linhas de corrente de reencontro para Re_D iguais a 36, 78, 116 e 189.

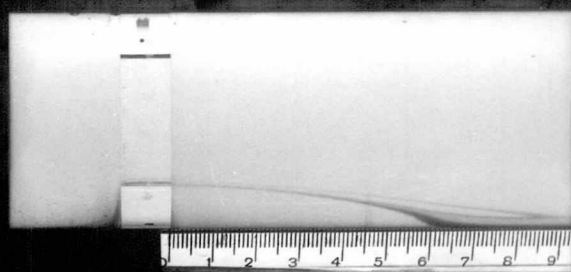
Observa-se que à medida que aumenta o número de Reynolds, aumenta o grau de dificuldade para a medição precisa do valor do comprimento de reencontro, chegando-se a um limite prático de $Re_D = 190$ para o método empregado. A partir deste valor, as medições tornam-se bastante difíceis devido ao acúmulo de corante na região de reencontro causado pelo reduzido ângulo de aproximação da linha de corrente com a parede, como pode ser observado na figura 14 d para um $Re_D = 189$.

Em função dos comprimentos de separação medidos da forma descrita acima, foram obtidos os parâmetros adimensionais (l_x/D) especificados na Tabela 2. A dependência destes valores em relação aos números de Reynolds foi então plotada na Figura 15, gerando a curva de variação dos comprimentos de separação em função de Re_D .

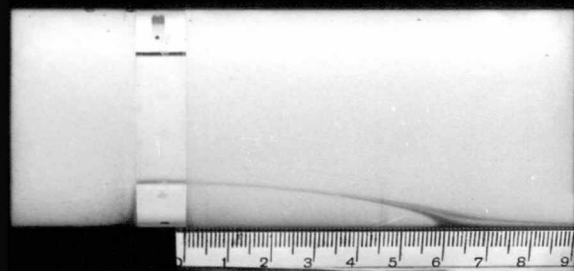
Deve-se mencionar que o efeito de curvatura da secção de testes modifica a visualização somente no sentido radial e não ao longo do escoamento. Por isto a forma geométrica da linha de sepa



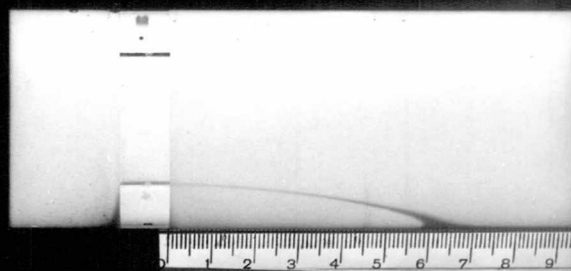
a



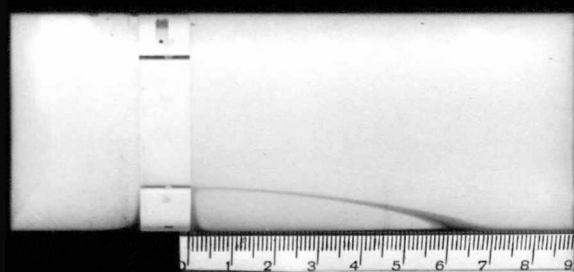
b



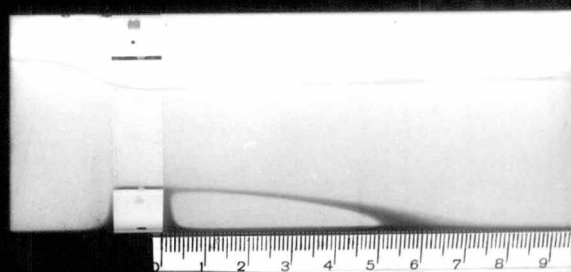
c



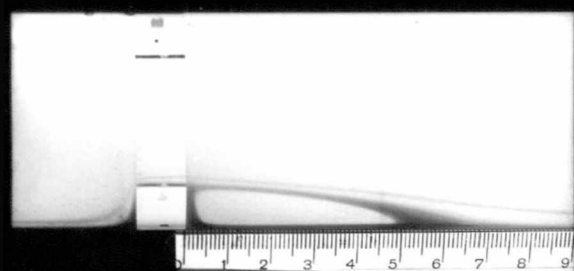
d



e



f



g

$Re_D : 55$	$\nu : 0,132 \text{ cm}^2/\text{s}$
objetiva	exposição
50 mm - f/1:1.8	1/125seg-f/9.5

FIG. 13 : VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO
(medição do comprimento de separação)

ração não foi obtida.

TABELA 2 - COMPRIMENTOS DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO PARA VÁRIOS NÚMEROS DE REYNOLDS.

Re_D	ℓx (mm)	$\ell x/D$	Re_D	ℓx (mm)	$\ell x/D$
22,0	27	0,60	116,0	123	2,76
36,0	45	1,00	135,0	148	3,32
44,0	52	1,17	139,0	150	3,37
50,0	59	1,32	164,0	180	4,00
55,0	62	1,40	189,0	188	4,22
67,0	75	1,68	190,0	190	4,27
78,0	88	2,00	-	-	-

NOTA= Os filmes fotográficos utilizados foram os seguintes:

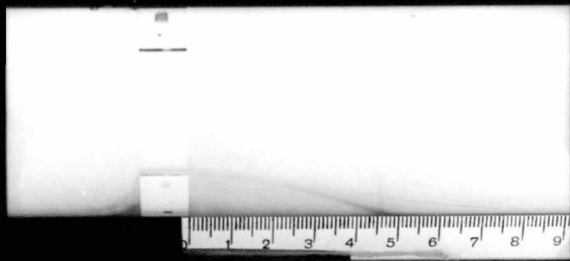
Fig. 13, 14b e 14d - PLUS - X PAN (ASA 125 - KODAK)

Fig. 14a e 14c - PANATOMIC - X (ASA 32 - KODAK)

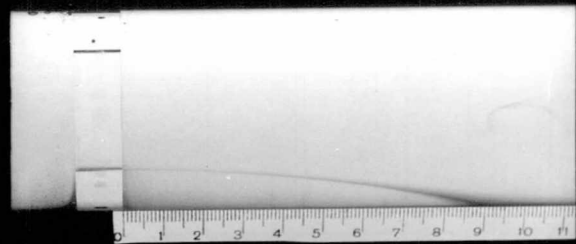
revelados em revelador ILFORD ID-11, nos tempos recomendados pelo fabricante.

As ampliações correspondentes foram realizadas em papel de gradação 3 - (N-3), revelados em revelador especial para a obtenção de grandes contrastes, cuja fórmula [11] é apresentada a seguir.

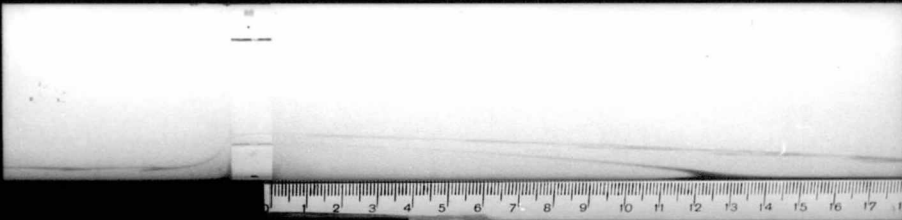
Metol -----	0,55 g
Sulfito de Sódio -----	19,00 g
Hidroquinona -----	4,25 g
Carbonato de Sódio -----	16,00 g
Brometo de Potássio -----	1,00 g
Água para completar -----	1,00 l



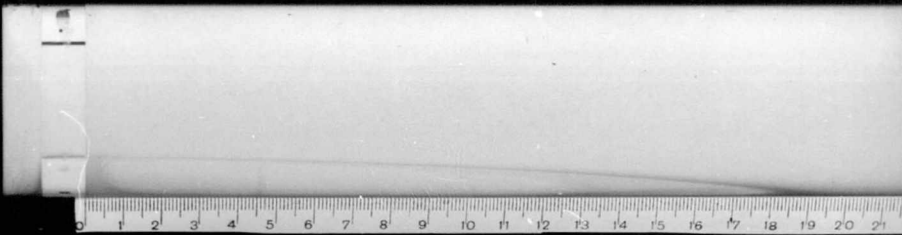
a	$Re_D: 36$	$\nu = 0,119 \text{ cm}^2/\text{s}$
Exp. = 1/60 s - f/4.0		Filtro verde



b	$Re_D: 78$	$\nu = 0,115 \text{ cm}^2/\text{s}$
Exp. = 1/125 s - f/4.5		Filtro verde



c	$Re_D: 116$	$\nu = 0,132 \text{ cm}^2/\text{s}$
Exp. = 1/125 s - f/4,5		



d	$Re_D: 189$	$\nu = 0,115 \text{ cm}^2/\text{s}$
Exp. = 1/125 s - f/4,5		Filtro verde

FIG. 14 : VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO
(medição do comprimento de separação)

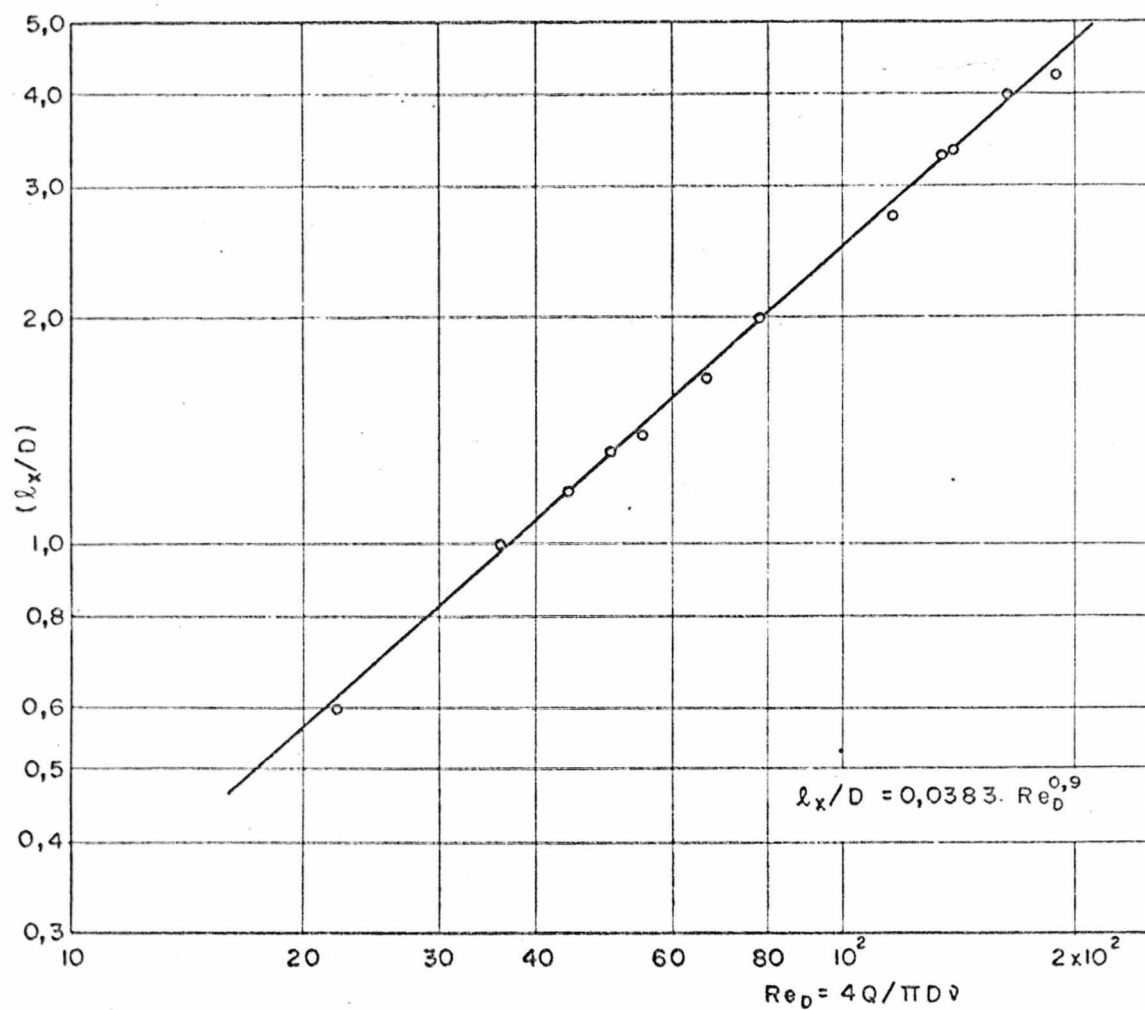


Fig. 15 = Curva de variação dos comprimentos de separação em função do número de Reynolds.

3.4 - Medição dos perfis de velocidade:

A. Comentários Preliminares:

A medição dos perfis de velocidade está baseada nos valores de pressão dinâmica obtidos na região de análise do escoamento.

Com este fim, foram selecionadas seis secções de tomada de pressão, cujas localizações foram determinadas pelas seguintes condições:

1. SECÇÃO 1 - Situada 26mm à montante do obstáculo, na região de escoamento plenamente desenvolvido, com a finalidade de verificação das duas primeiras condições iniciais apresentadas no ítem 2.2, isto é; escoamento laminar plenamente desenvolvido na entrada da secção de testes, e fluído com comportamento Newtoniano.

2. SECÇÕES 2 e 3 - Respectivamente na entrada e saída do obstáculo, relevantes com relação ao desenvolvimento dos perfis de velocidade e distribuição de tensões cizalhantes.

3. SECÇÕES 4, 5 e 6 - 30, 60, e 90 milímetros a jusante do obstáculo, respectivamente, com o objetivo de observar o desenvolvimento dos perfis de velocidade e de determinar a linha de inversão de velocidade no interior da região de recirculação. Igualmente importante para a determinação do desenvolvimento da distribuição de tensões de cisalhamento ao longo do escoamento.

B - Procedimentos:

Para a determinação dos pontos de tomada de pressão total em cada secção, procurou-se, na medida do possível seguir a norma AMCA-ASHRAE [9]. No entanto, devido às peculiaridades do escoamento após o obstáculo, os pontos referentes às secções 4,5 e 6 foram escolhidos de forma a se obter a maior quantidade de informação possível na região de inversão de velocidade, no interior da zona de recirculação.

Por outro lado, considerando a simetria do escoamento, observada na fase de medição dos comprimentos de separação, a varredura de cada secção foi realizada sobre um único plano.

Os pontos de medição em cada secção estão distanciados da parede do tubo e da parede do obstáculo, quando no interior do mes

mo (secções 2 e 3), de acordo com os esquemas da Figura 16.

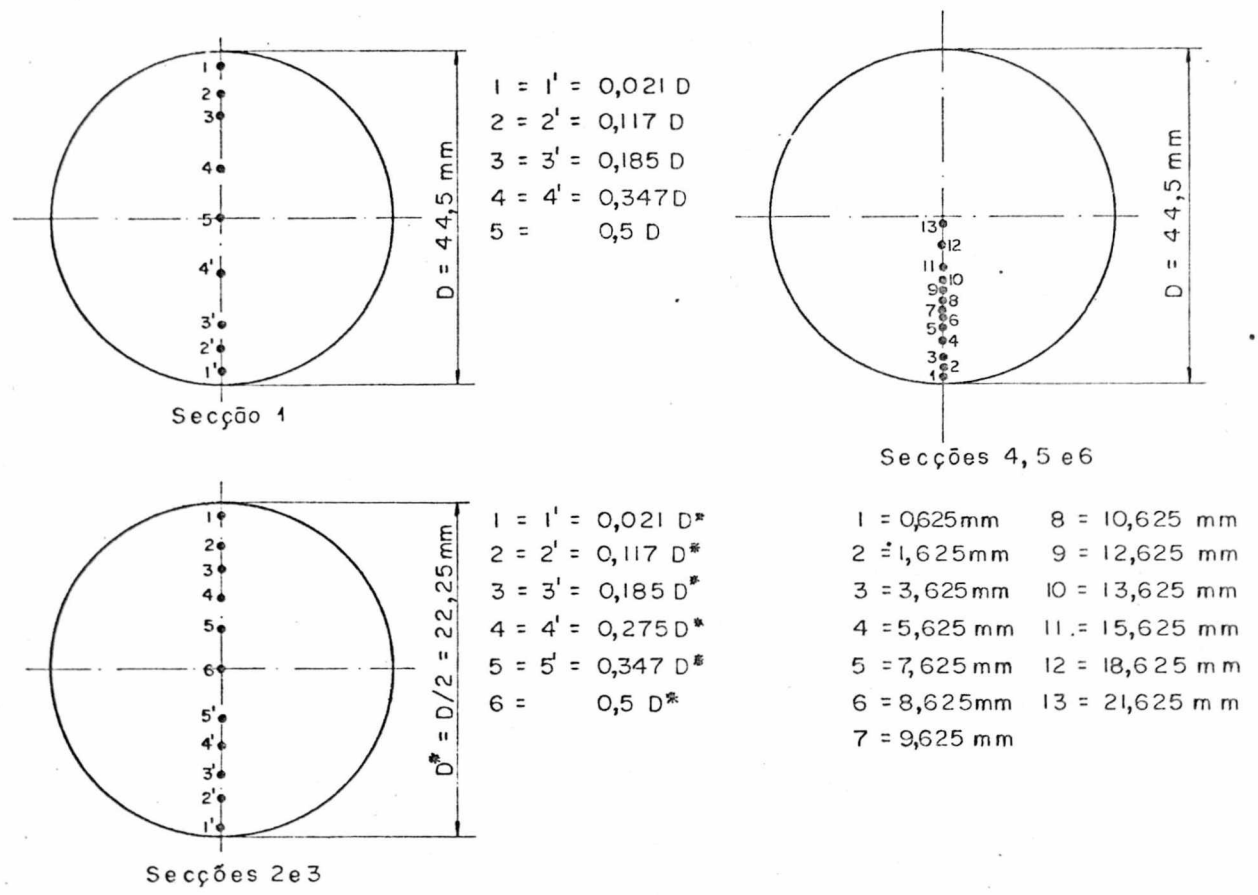


Fig. 16 = Localização dos pontos de medição de pressão para as diversas secções.

As pressões estáticas em cada secção foram obtidas, posicionando-se o tubo fora da região de influência da tomada de pressões totais, ou seja, próximo da parede da secção de testes e a 90° em relação aos dispositivos de tomada de pressões totais.

C - Sequência de levantamento de dados:

Devido às dificuldades de obtenção de agulhas hipodérmicas especiais para a confecção dos tubos de tomada de pressão, não foi possível, como era desejado, realizar um levantamento simultâ

neo de dados para cada número de Reynolds, ao longo do escoamento, para as secções 1, 2 e 3.

Por outro lado, não foi possível realizar, após o obstáculo, o levantamento contínuo de dados ao longo do escoamento, devido às dificuldades de construção de um sistema guia longitudinal e radial simultâneo. Por esta razão, foram considerados para esta região do escoamento, secções discretamente dispostas.

Conforme especificado no ítem 2.4.7, para as secções 4, 5 e 6 foram utilizados dois tubos de tomada de pressão total e um para a pressão estática. (Fig. 10b), sendo um tubo de pressão total para a região de recirculação, abaixo da linha de inversão de velocidades e outro para a região de circulação acima desta linha e até o centro da secção, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 17. Este procedimento garante a tomada de pressões integral em uma mesma secção.

Uma vez estabilizada e zerada a ponte indutiva acoplada ao transdutor de pressões (ítem 2.4.7), é realizada a varredura de cada secção para cada número de Reynolds, aguardando-se para cada ponto de medida, o tempo necessário de estabilização do ponteiro de leitura da ponte (por volta de 3 minutos).

As pressões correspondentes são obtidas através do diagrama de variação da deflexão do indicador em função das pressões diferenciais (diagrama I.E x ΔP) da Figura 40 do Apêndice 4.

Este processo foi realizado independentemente para cada secção a partir da secção 1. Com o equipamento disponível, após a medição de cada secção era necessário parar o sistema durante a troca dos tubos de medição para outra secção. Por outro lado, a cada secção, era necessário recalibrar a posição dos pontos de tomada de pressão, para evitar erros futuros no levantamento das curvas. Também a reprodutibilidade dos números de Reynolds nestas condições era difícil tornando este procedimento bastante moroso.

Após o obstáculo, nas secções 4, 5 e 6, constatou-se não ser possível obter dados para a mesma faixa de números de Reynolds utilizada para as secções 1, 2 e 3, devido as pequenas variações de pressão diferencial no interior da região de recirculação.

Desta forma, para Re_D abaixo de 200, as variações de

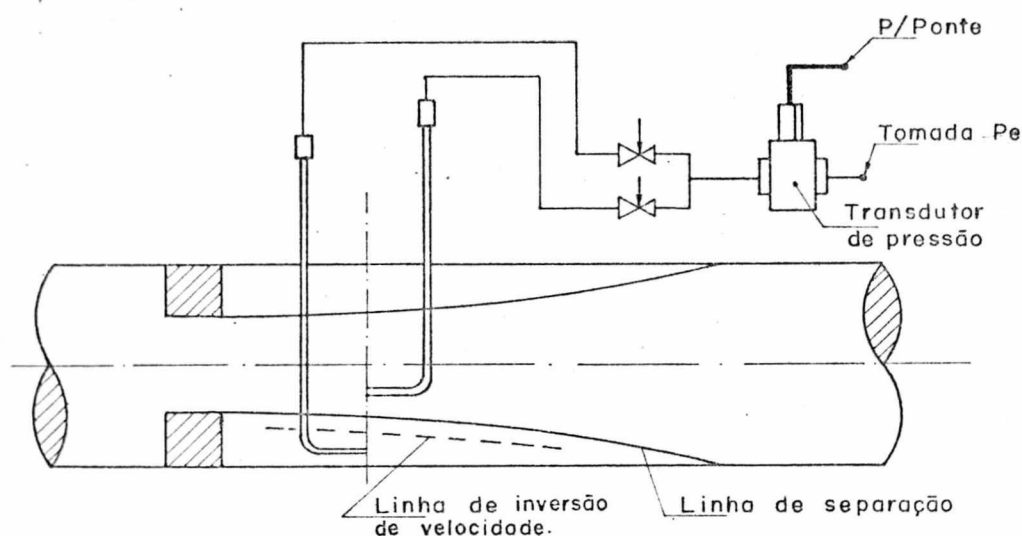


Fig. 17 - Processo de medição após o obstáculo

pressão ponto a ponto tornavam-se extremamente reduzidas, impedindo leituras precisas e induzindo erros relativamente elevados.

Por outro lado, para Re_D acima de 400, as instabilidades no equipamento de medição de pressão a cada ponto tornavam-se grandes em relação às baixas pressões medidas afetando consideravelmente a precisão de leitura.

Do exposto, ficou estabelecida, para esta região, uma faixa limite de medições para Re_D variando entre 200 e 400.

As medições de pressão a jusante do obstáculo foram efetuadas a partir da região de recirculação, deslocando-se o tubo de medição de pressão desde o ponto 1, próximo à parede da seção até o início do ponto de inversão de velocidade, isto é, até o ponto onde a pressão diferencial se anula. Em sequência, o outro tubo era posicionado nesse ponto, desligando-se o circuito anterior e prosseguindo daí até o centro da seção.

Com os valores de pressão assim obtidos, foram determinadas as velocidades através da expressão:

$$\Delta P_r = \rho U^2 / 2g \quad \text{onde;} \quad (3.2)$$

$$\rho = f(T) \quad (\text{Tabela 13 Apêndice 3})$$

Os resultados obtidos são apresentados a seguir nas tabelas 3,4,5,6,7 e 8.

Os perfis de velocidade decorrentes são apresentados nas figuras 18,19,20 e 21. Devido à simetria do escoamento, para as secções 4,5 e 6 foram plotadas as velocidades somente para meia secção, para Re_D significativos de 200 e 368.

TABELA 3 - Valores de pressão diferencial e velocidade local para a SECÇÃO 1, em função de Re_D

$T_f=18^\circ\text{C}$ $\rho=1,00234\text{g/cm}^3$ $Re_D=105$				$T_f=18^\circ\text{C}$ $\rho=1,00234\text{g/cm}^3$ $Re_D=163$			
Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)
1	0,00	-	-	1	-	-	-
2	0,20	0,05	3,14	2	0,36	0,095	4,33
3	0,30	0,08	3,97	3	0,60	0,160	5,62
4	0,48	0,10	4,44	4	1,12	0,300	7,69
5	0,56	0,15	5,38	5	1,32	0,356	8,38
4'	0,48	0,10	4,44	4'	1,12	0,300	7,69
3'	0,24	0,07	3,72	3'	0,64	0,175	5,87
2'	0,16	0,04	2,80	2'	0,40	0,105	4,55
1'	0,10	0,02	2,20	1'	0,20	0,055	3,29
$T_f=18^\circ\text{C}$ $\rho=1,00234\text{g/cm}^3$ $Re_D=210$				$T_f=18^\circ\text{C}$ $\rho=1,00234\text{g/cm}^3$ $Re_D=300$			
1	0,10	0,026	2,26	1	0,10	0,026	2,26
2	0,40	0,105	4,55	2	1,00	0,270	7,30
3	1,00	0,270	7,30	3	1,76	0,470	9,63
4	1,96	0,530	10,22	4	3,28	0,880	13,17
5	2,20	0,590	10,79	5	3,80	1,200	15,38
4'	1,96	0,530	10,22	4'	3,10	0,830	12,80
3'	1,00	0,270	7,30	3'	1,60	0,430	9,21
2'	0,40	0,105	4,55	2'	0,84	0,235	6,81
1'	0,28	0,075	3,85	1'	0,10	0,155	5,53
$T_f=17^\circ\text{C}$ $\rho=1,00256\text{g/cm}^3$ $Re_D=481$							
1	0,50	0,132	5,10				
2	3,00	0,810	12,60				
3	5,50	1,475	17,00				
4	10,50	2,785	23,40				
5	12,00	3,240	25,40				
4'	10,30	2,781	23,40				
3'	5,40	1,458	16,90				
2'	3,00	0,810	12,60				
1'	2,70	0,730	12,00				

TABELA 4 - Valores de pressão diferencial e velocidade local para a SECÇÃO 2, em função de Re_D .

$T_f=17^\circ\text{C}$ $\rho=1,00256\text{g/cm}^3$ $Re_D=31$				$T_f=17^\circ\text{C}$ $\rho=1,00256\text{g/cm}^3$ $Re_D=68$			
Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)
1	0,4	0,105	4,55	1	1,0	0,270	7,29
2	0,5	0,135	5,16	2	1,6	0,432	9,22
3	0,6	0,162	5,65	3	1,8	0,486	9,78
4	0,6	0,162	5,65	4	1,9	0,513	10,05
5,6,5'	0,6	0,162	5,65	5,6,5'	2,0	0,540	10,31
4'	0,6	0,162	5,65	4'	1,9	0,513	10,05
3'	0,6	0,162	5,65	3'	1,9	0,513	10,05
2'	0,5	0,135	5,16	2'	1,7	0,459	9,51
1'	0,3	0,081	4,00	1'	1,0	0,270	7,29
$T_f=17^\circ\text{C}$ $\rho=1,00256\text{g/cm}^3$ $Re_D=131$				$T_f=17^\circ\text{C}$ $\rho=1,00256\text{g/cm}^3$ $Re_D=178$			
1	3,1	0,837	12,84	1	5,5	1,485	17,10
2	5,0	1,350	16,31	2	8,7	2,349	21,51
3	5,6	1,512	17,26	3	9,4	2,538	22,36
4	5,8	1,566	17,56	4	9,9	2,673	22,95
5,6,5'	5,9	1,593	17,71	5,6,5'	10,0	2,700	23,06
4'	5,8	1,566	17,56	4'	9,7	2,619	22,71
3'	5,6	1,512	17,26	3'	9,1	2,457	22,00
2'	5,0	1,350	16,31	2'	8,4	2,268	21,14
1'	3,1	0,837	12,84	1'	4,8	1,296	15,98
$T_f=17^\circ\text{C}$ $\rho=1,00256\text{g/cm}^3$ $Re_D=234$							
1	8,80	2,376	21,63				
2	13,80	3,726	27,09				
3	15,00	4,050	28,25				
4	15,80	4,266	29,00				
5,6,5'	16,20	4,374	29,35				
4'	15,80	4,266	29,00				
3'	15,00	4,050	28,25				
2'	13,80	3,726	27,09				
1'	7,75	2,093	20,30				

TABELA 5 - Valores de pressão diferencial e velocidade local para a SECÇÃO 3, em função de Re_D .

$T_f=18,5^\circ\text{C}$ $\rho=1,00223\text{g/cm}^3$ $Re_D=30$				$T_f=18,5^\circ\text{C}$ $\rho=1,00223\text{g/cm}^3$ $Re_D=54$			
Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)
1	0,16	0,04	2,80	1	0,10	0,025	2,22
2	0,46	0,12	4,87	2	0,50	0,135	5,16
3	0,65	0,18	5,90	3	1,10	0,300	7,69
4	0,95	0,26	7,10	4	1,60	0,430	9,21
5,6,5'	1,00	0,27	7,30	5,6,5'	1,60	0,430	9,21
4'	0,95	0,26	7,10	4'	1,60	0,430	9,21
3'	0,70	0,19	6,12	3'	1,10	0,300	7,69
2'	0,55	0,15	5,44	2'	0,60	0,135	5,16
1'	0,30	0,08	3,97	1'	0,10	0,025	2,22
$T_f=18,5^\circ\text{C}$ $\rho=1,00223\text{g/cm}^3$ $Re_D=81$				$T_f=18,5^\circ\text{C}$ $\rho=1,00223\text{g/cm}^3$ $Re_D=140$			
1	0,30	0,08	3,97	1	0,60	0,16	5,60
2	1,60	0,43	9,20	2	4,50	1,21	15,40
3	2,50	0,675	11,50	3	6,50	1,74	18,50
4	3,00	0,810	12,60	4	7,25	1,94	19,50
5,6,5'	3,10	0,830	12,80	5,6,5'	7,40	1,97	19,70
4'	3,00	0,810	12,60	4'	7,20	1,93	19,50
3'	2,50	0,675	11,50	3'	6,50	1,74	18,50
2'	1,60	0,43	9,20	2'	4,50	1,21	15,40
1'	0,25	0,07	3,97	1'	0,60	0,16	5,60
$T_f=18,5^\circ\text{C}$ $\rho=1,00223\text{g/cm}^3$ $Re_D=161$				$T_f=18,5^\circ\text{C}$ $\rho=1,00223\text{g/cm}^3$ $Re_D=227$			
1	1,00	0,27	7,30	1	2,20	0,592	10,80
2	6,00	1,61	17,80	2	12,50	3,375	25,80
3	8,40	2,24	21,00	3	16,00	4,320	29,20
4	9,25	2,46	22,00	4	17,00	4,590	30,10
5,6,5'	9,40	2,50	22,20	5,6,5'	17,50	4,725	30,50
4'	9,25	2,46	22,00	4'	17,10	4,590	30,10
3'	8,40	2,24	21,00	3'	16,00	4,320	29,20
2'	6,30	1,61	17,80	2'	12,60	3,375	25,80
1'	1,00	0,27	7,30	1'	2,20	0,592	10,80

TABELA 5 - continuação

$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$\text{Re}_D=200$		$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$\text{Re}_D=368$	
Pos. Tubo	I.E.	ΔP_{r^2} (kgf/m ²)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_{r^2} (kgf/m ²)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_{r^2} (kgf/m ²)	U (cm/s)
1	1,50	0,405	8,90	1	4,30	1,161	15,10	1	4,30	1,161	15,10
2	9,50	2,565	22,48	2	33,25	8,977	42,00	2	33,25	8,977	42,00
3	13,50	3,645	26,80	3	39,70	10,719	45,90	3	39,70	10,719	45,90
4	14,75	3,982	28,00	4	42,00	11,340	47,30	4	42,00	11,340	47,30
5,6,5'	15,10	4,077	28,30	5,6,5'	43,30	11,691	48,00	5,6,5'	43,30	11,691	48,00
4'	14,75	3,982	28,00	4'	42,30	11,421	47,40	4'	42,30	11,421	47,40
3'	13,50	3,645	26,80	3'	39,50	10,665	45,80	3'	39,50	10,665	45,80
2'	9,25	2,497	22,20	2'	33,00	8,910	41,90	2'	33,00	8,910	41,90
1'	1,60	0,432	9,20	1'	4,50	1,215	15,50	1'	4,50	1,215	15,50

TABELA 6 - Valores de pressão diferencial e velocidade local para a SECÇÃO 4, em função de Re_D .

$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$\text{Re}_D=200$		$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$\text{Re}_D=368$	
Pos. Tubo	I.E.	ΔP_{r^2} (kgf/m ²)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_{r^2} (kgf/m ²)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_{r^2} (kgf/m ²)	U (cm/s)
1	0,04	-0,011	-1,50	1	0,08	-0,022	-2,10	1	0,08	-0,022	-2,10
2	0,06	-0,016	-1,80	2	0,20	-0,054	-3,30	2	0,20	-0,054	-3,30
3	0,125	-0,032	-2,50	3	0,36	-0,097	-4,40	3	0,36	-0,097	-4,40
4	0,06	-0,016	-1,80	4	0,25	-0,067	-3,60	4	0,25	-0,067	-3,60
5	-	-	-	5	-	-	-	5	-	-	-
6	0,20	0,054	3,30	6	0,20	0,054	3,30	6	0,20	0,054	3,30
7	0,60	0,162	5,60	7	0,80	0,216	6,50	7	0,80	0,216	6,50
8	1,25	0,338	8,10	8	2,75	0,742	12,10	8	2,75	0,742	12,10
9	4,20	1,134	14,90	9	12,40	3,350	25,70	9	12,40	3,350	25,70
10	6,40	1,728	18,45	10	19,50	5,260	32,20	10	19,50	5,260	32,20
11	10,40	2,810	23,50	11	36,10	9,75	43,80	11	36,10	9,75	43,80
12	13,00	3,510	26,30	12	40,80	11,02	46,60	12	40,80	11,02	46,60
13	13,60	3,672	26,90	13	42,10	11,367	47,30	13	42,10	11,367	47,30

TABELA 7 - Valores de pressão diferencial e velocidade local para a SECÇÃO 5, em função de Re_D .

$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$Re_D=202$		$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$Re_D=368$	
Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)
1	0,06	-0,016	-1,80	1	0,20	-0,054	-3,30	1	0,20	-0,054	-3,30
2	0,08	-0,022	-2,10	2	0,25	-0,067	-3,60	2	0,25	-0,067	-3,60
3	0,20	-0,054	-3,30	3	0,50	-0,135	-5,10	3	0,50	-0,135	-5,10
4	0,08	-0,022	-2,10	4	0,20	-0,054	-3,30	4	0,20	-0,054	-3,30
5	0,20	0,054	3,30	5	-	-	-	5	-	-	-
6	0,40	0,108	4,60	6	0,30	0,081	4,00	6	0,30	0,081	4,00
7	0,90	0,243	7,00	7	1,00	0,270	7,30	7	1,00	0,270	7,30
8	1,60	0,432	9,20	8	3,50	0,945	13,60	8	3,50	0,945	13,60
9	3,90	1,053	14,40	9	10,40	2,808	23,50	9	10,40	2,808	23,50
10	5,50	1,485	17,10	10	16,00	4,320	29,20	10	16,00	4,320	29,20
11	8,90	2,403	21,70	11	29,50	7,965	39,60	11	29,50	7,965	39,60
12	12,50	3,375	25,80	12	38,00	10,260	44,90	12	38,00	10,260	44,90
13	13,40	3,620	26,70	13	39,50	10,665	45,80	13	39,50	10,665	45,80

TABELA 8 - Valores de pressão diferencial e velocidade local para a SECÇÃO 6, em função de Re_D .

$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$Re_D=200$		$T_f=17^\circ\text{C}$		$\rho=1,00256\text{g/cm}^3$		$Re_D=367$	
Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)	Pos. Tubo	I.E.	ΔP_r (kgf/m^2)	U (cm/s)
1	0,12	-0,032	-2,50	1	0,30	-0,081	-4,00	1	0,30	-0,081	-4,00
2	0,20	-0,054	-3,30	2	0,50	-0,135	-5,10	2	0,50	-0,135	-5,10
3	0,25	-0,067	-3,60	3	0,70	-0,189	-6,10	3	0,70	-0,189	-6,10
4	0,20	-0,054	-3,30	4	0,30	-0,081	-4,00	4	0,30	-0,081	-4,00
5	0,25	0,067	3,60	5	0,06	0,016	1,80	5	0,06	0,016	1,80
6	0,50	0,135	5,10	6	0,50	0,135	5,10	6	0,50	0,135	5,10
7	1,00	0,270	7,30	7	1,60	0,432	9,20	7	1,60	0,432	9,20
8	2,00	0,540	10,30	8	3,90	1,053	14,40	8	3,90	1,053	14,40
9	3,40	0,918	13,40	9	11,00	2,970	24,20	9	11,00	2,970	24,20
10	4,60	1,242	15,60	10	16,90	4,563	30,00	10	16,90	4,563	30,00
11	7,40	1,998	19,80	11	28,20	7,614	38,70	11	28,20	7,614	38,70
12	10,60	2,862	23,70	12	37,70	10,179	44,80	12	37,70	10,179	44,80
13	11,50	3,105	24,70	13	38,90	10,503	45,50	13	38,90	10,503	45,50

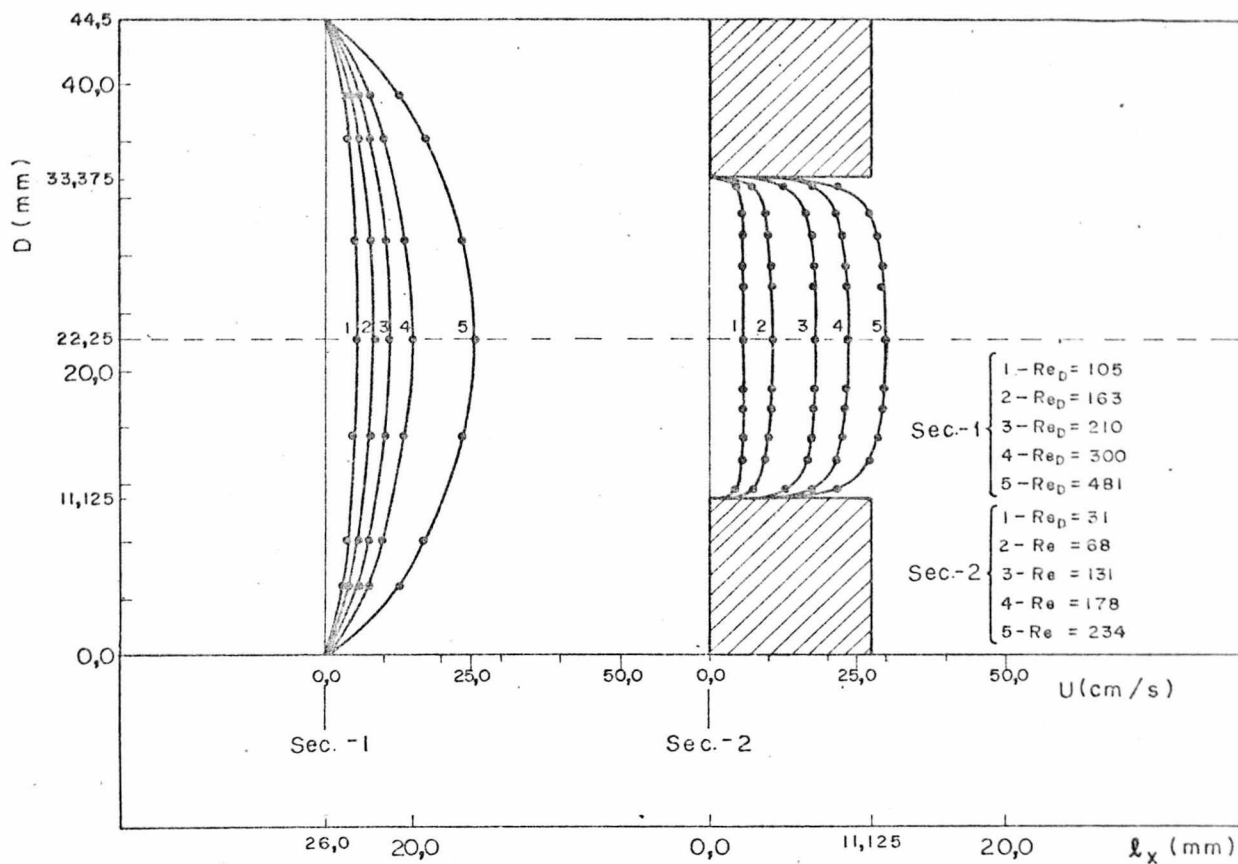


Fig. 18 = Perfis de velocidade para as secções 1 e 2 para vários Re_D

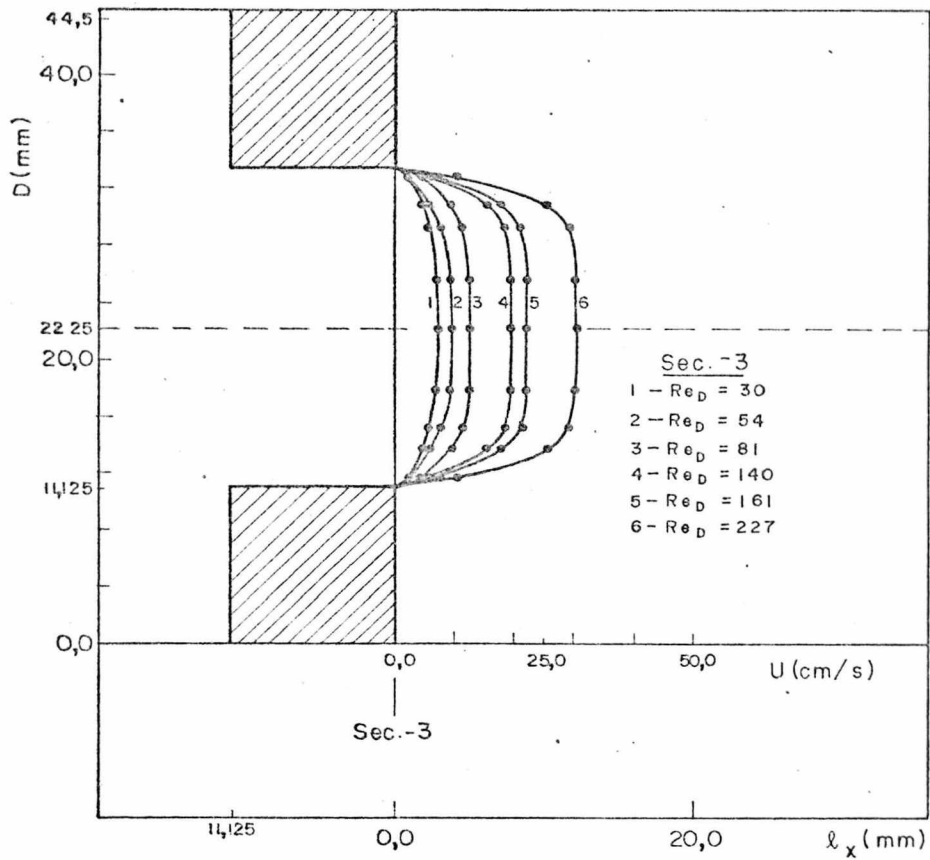


Fig. 19 = Perfis de Velocidade para a secção 3 para vários Re_D

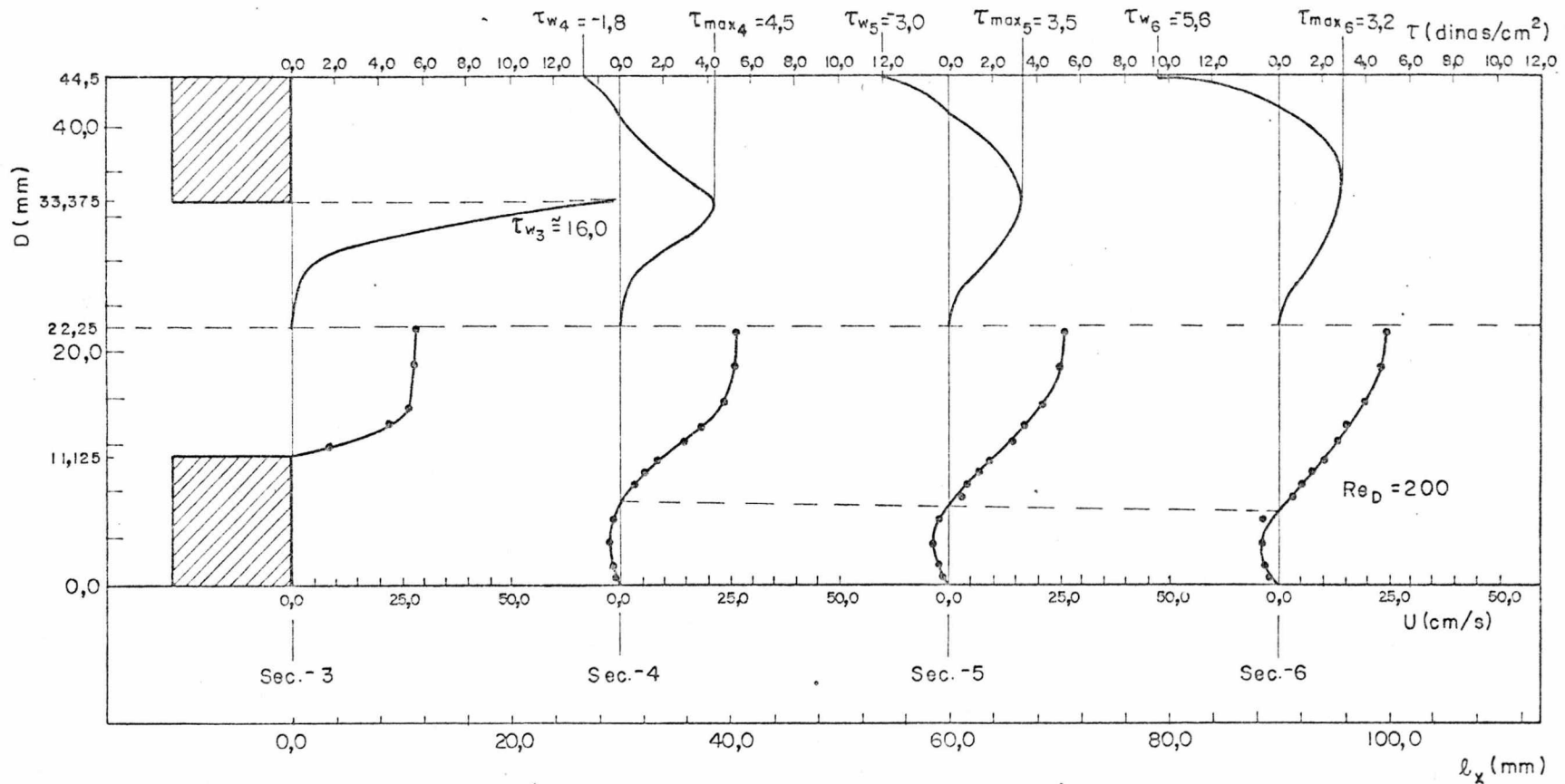


Fig. = 20 = Desenvolvimento dos perfis de velocidade e tensão de cisalhamento a jusante do obstáculo para $Re_D = 200$, com delimitação da linha de inversão de velocidade

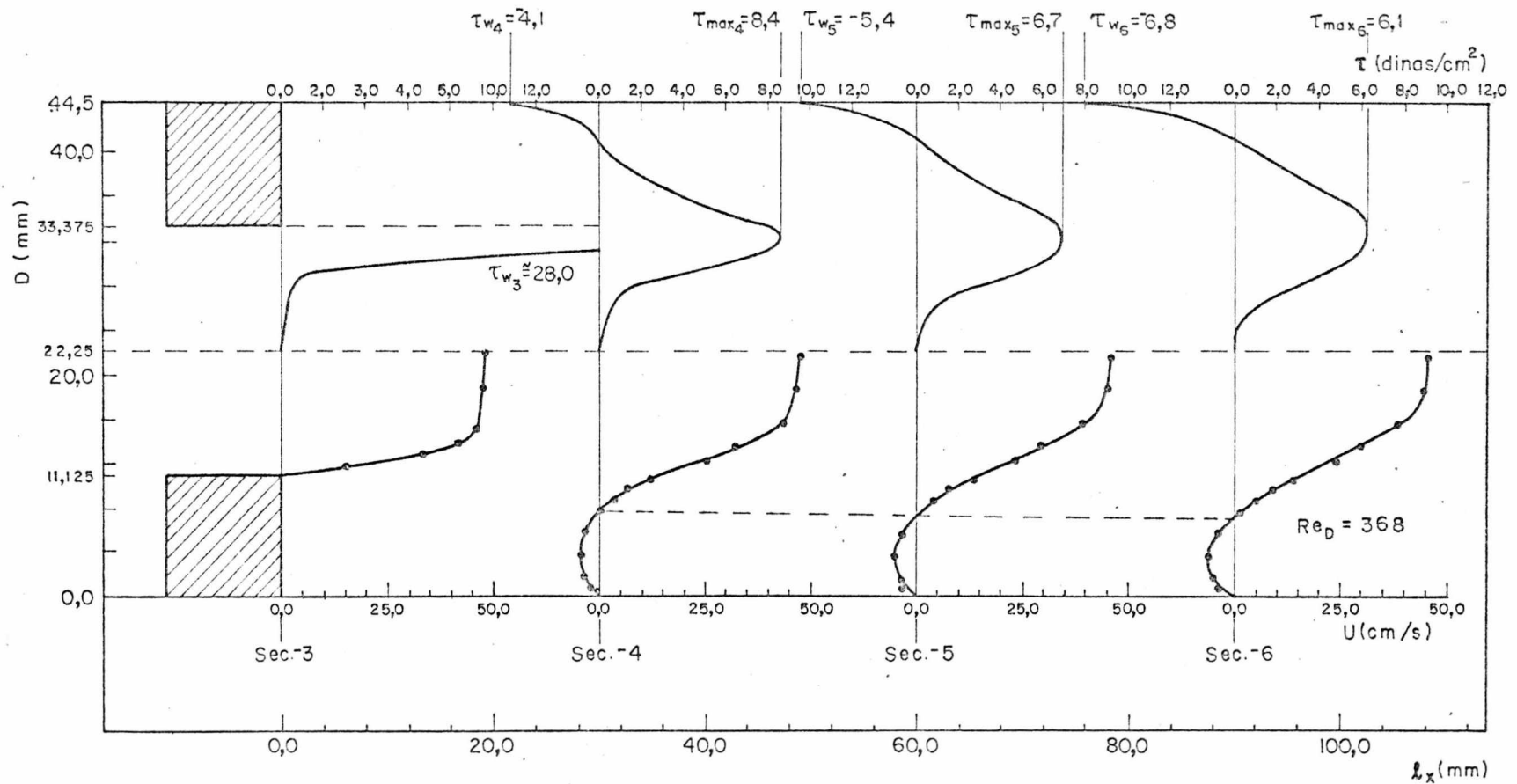


Fig. = 21 = Desenvolvimento dos perfis de velocidade e tensão de cisalhamento a jusante do obstáculo para $Re_D = 368$, com delimitação da linha de inversão de velocidade.

3.5. - Determinação das tensões de cisalhamento:

Para a determinação de tensões cisalhantes nas várias secções foi utilizado um método de diferenciação numérica [12], baseado nos valores de velocidade local obtidos através dos perfis de velocidade das figuras 18, 19, 20 e 21, para intervalos discretos.

As expressões utilizadas para a determinação das derivadas da velocidade local em função de sua variação radial, a partir da parede da secção considerada são as seguintes:

1. Cálculo da derivada na parede:

$$f'(x_0) = \frac{1}{12h} \left[-25f(x_0) + 48f(x_1) - 36f(x_2) + 16f(x_3) - 3f(x_4) \right] \quad (3.3)$$

2. Cálculo das derivadas em pontos fora da parede:

$$f'(x_i) = \frac{1}{12h} \left[-3f(x_{i-1}) - 10f(x_i) + 18f(x_{i+1}) - 6f(x_{i+2}) + f(x_{i+3}) \right] ; i = 1, \dots \quad (3.4)$$

O intervalo entre velocidades locais subsequentes, representado nas expressões por 'h', foi escolhido arbitrariamente, sendo fixado em 1,0 mm para as secções 1,4,5,6 e 0,5 mm para as secções 2 e 3.

Os valores de velocidade local obtidos foram processados em calculadora programável, sendo os resultados utilizados para o cálculo das tensões de cisalhamento correspondentes, segundo a expressão de Newton da viscosidade:

$$\tau_i = \mu \cdot f'(x_i) \quad (3.5)$$

onde: μ = viscosidade para a temperatura correspondente de cada perfil de velocidade.

Os valores de tensão assim obtidos foram plotados para alguns perfis de velocidade, conforme especificado nas figuras 20, 21, 22 e 23.

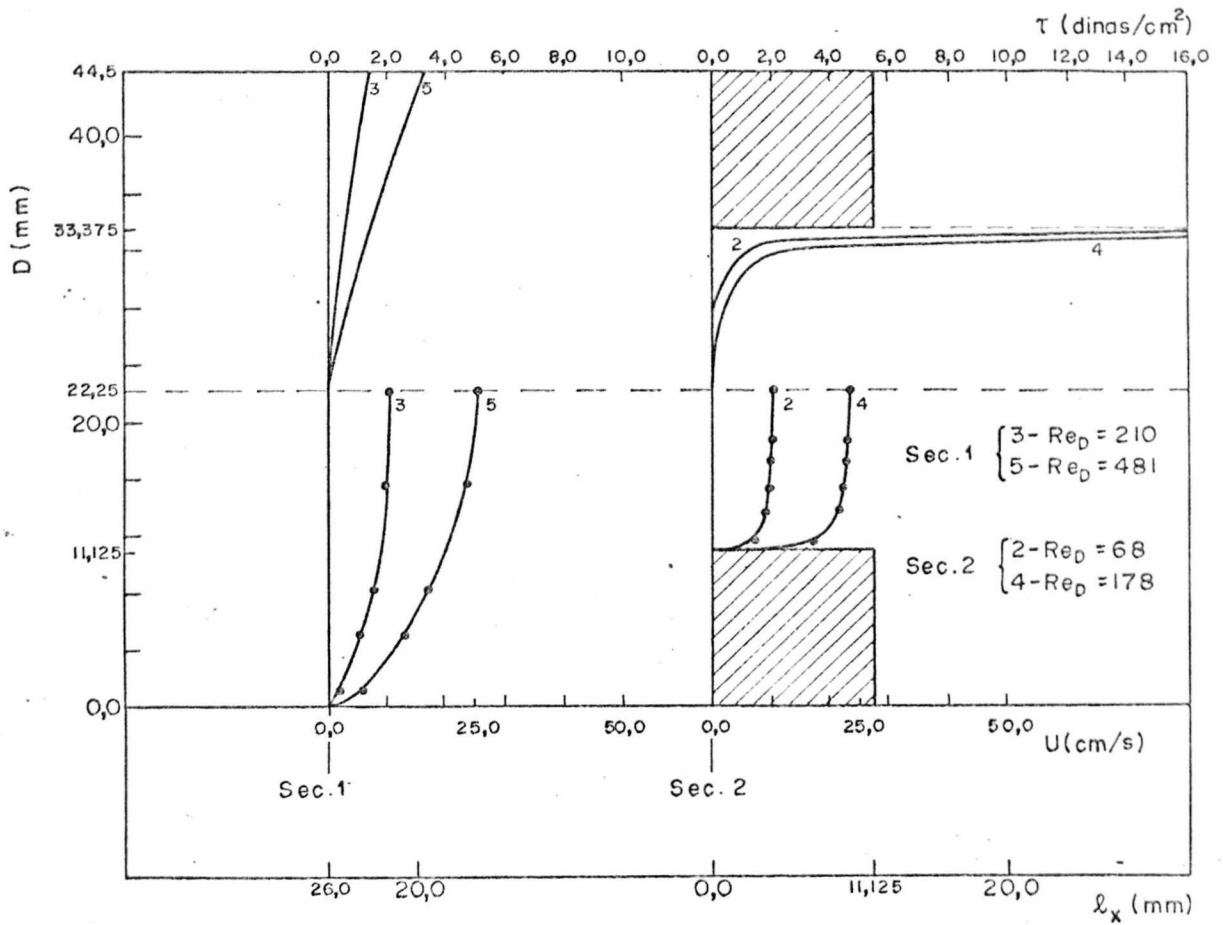


Fig. 22 = Tensões cizalhantes para as secções 1 e 2, correspondentes aos perfis de velocidade especificados.

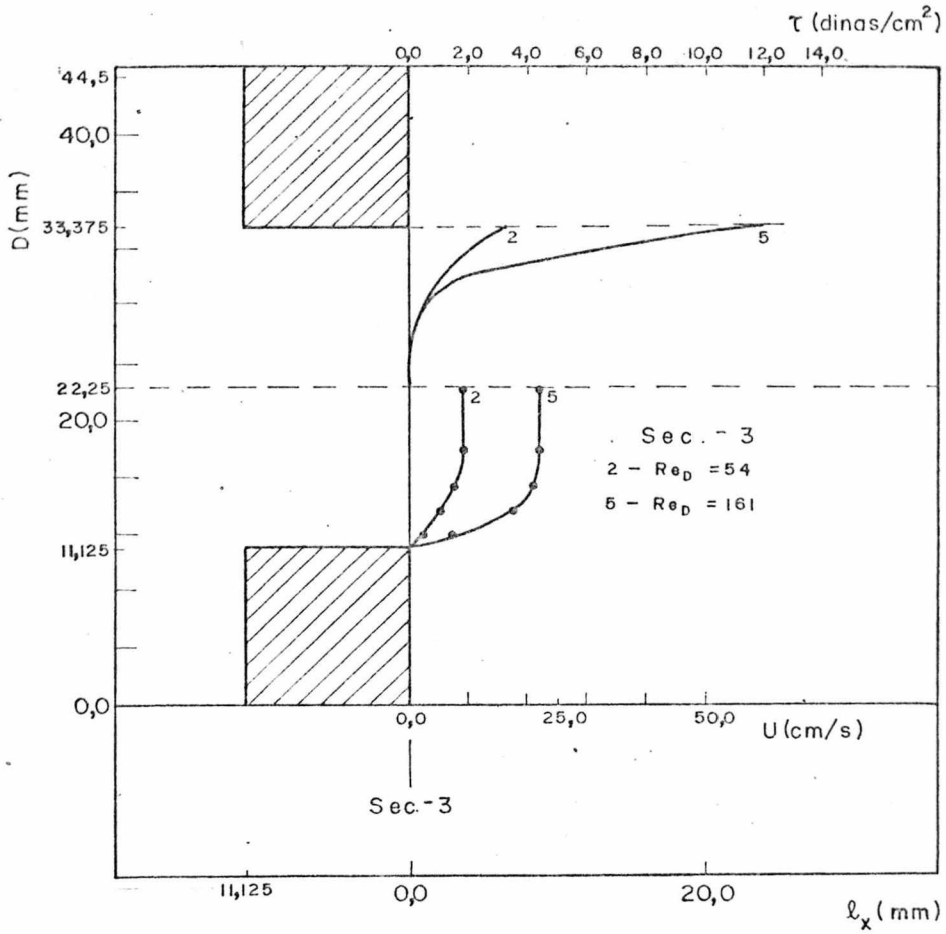


Fig. 23 - Tensões cizalhantes para secção 3, correspondentes aos perfis de velocidade para $Re_D = 54$ e 161:

C A P Í T U L O IV

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a apresentação da análise dos resultados obtidos neste trabalho, procurou-se agrupar os assuntos principais em quatro itens, de acordo com a realização dos experimentos. Embora existam outros aspectos que poderiam ser considerados restringiu-se a análise a alguns aspectos de cada situação.

- 4.1 - Análise dos perfis de velocidade a montante do obstáculo.
- 4.2 - Análise dos comprimentos de separação do escoamento a jusante do obstáculo.
- 4.3 - Análise das características do escoamento na entrada e saída da obstrução.
- 4.4 - Análise das características do escoamento a jusante do obstáculo; considerações globais sobre o desenvolvimento das características analisadas ao longo do escoamento.

4.1 - ANÁLISE DOS PERFIS DE VELOCIDADE A MONTANTE DO OBSTÁCULO.

A finalidade principal do levantamento desses perfis deve-se à verificação da condição de que o escoamento é laminar plenamente desenvolvido na região de estudo e que a solução utilizada possui comportamento Newtoniano.

Aqui, ambas são analisadas sob um único ponto de vista, em função da expressão genérica para perfis de velocidade (equação 2.1) proposta por Metzner [6] e já comentada no item 2.2.

Para tanto foram selecionados alguns perfis da secção 1 e que são plotados de forma mais conveniente na Figura 24, para meia secção.

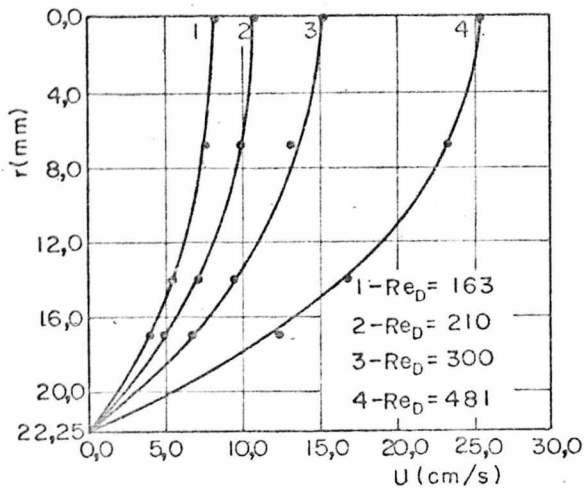


Fig. 24 = Perfis de Velocidade para a secção 1.

A velocidade média para a secção 1 é determinada pela equação da continuidade, a partir das vazões obtidas experimentalmente, de acordo com a seguinte expressão:

$$U_m = Q / \pi \cdot R^2 \quad (4.2)$$

Para o levantamento dos perfis adimensionais das figuras 25, 26 e 27, foram selecionadas onze relações de raio (r/R) e obtidas as correspondentes relações de velocidade (U/U_m), da Figura 24.

Sendo esta, uma análise comparativa, para a verificação do comportamento Newtoniano é considerado, além do índice de comportamento de fluxo (n) unitário, que reduz a expressão 2.1 à forma paraboloidal;

$$\frac{U}{U_m} = 2 \left[1 - (r/R)^2 \right] \quad (4.1)$$

mais um perfil adimensional para $n=0,6$, característico de fluido não Newtoniano.

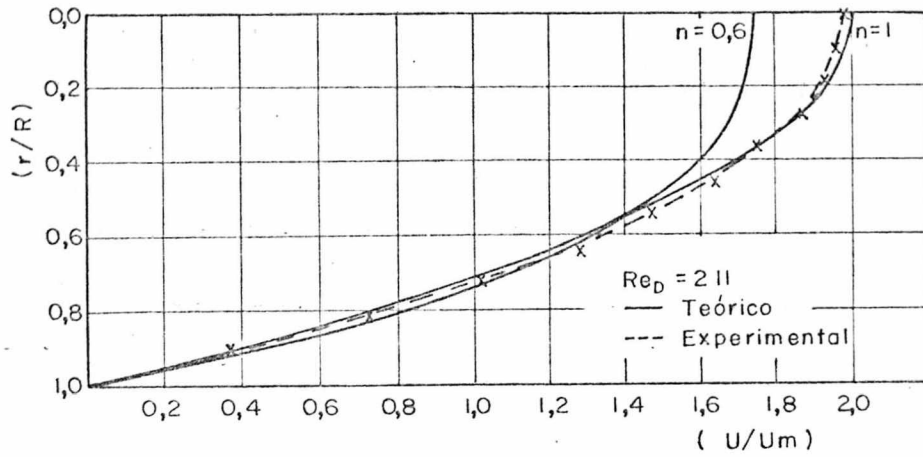


Fig. 25 = Perfis de velocidade adimensionais para $Re_D = 211$

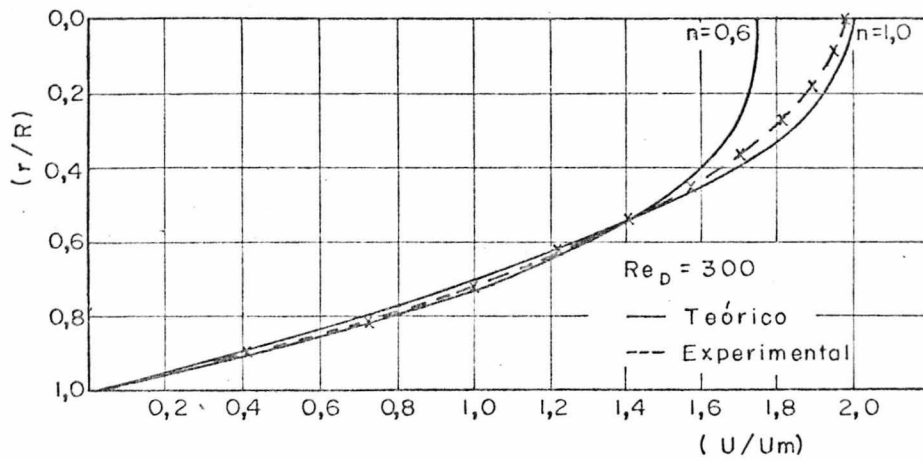


Fig. 26 = Perfis de velocidade adimensionais para $Re_D = 300$

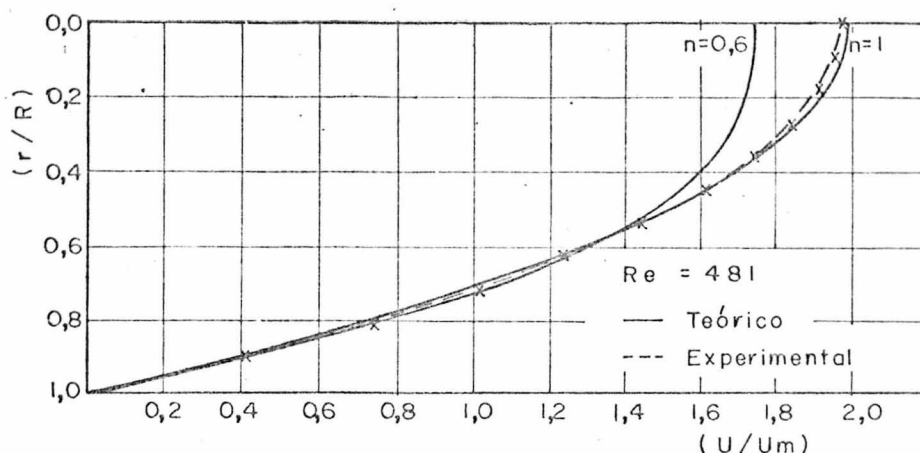


Fig. 27 = Perfis de velocidade adimensionais para $Re_D = 481$

Observa-se nessas figuras, que os perfis experimentais apresentam um pequeno afastamento em relação ao perfil teórico para $n = 1,0$, isto é, da condição paraboloidal.

Este fato pode ser consequência de três fenômenos distintos a saber:

1. Afastamento da condição Newtoniana da solução de metilcelulose.
2. Escoamento não plenamente desenvolvido na seção considerada.
3. Erros experimentais de medição de vazão e tomada de pressão.

Se, por um lado, considera-se que o afastamento é causado por erros de medição de vazão, chega-se à conclusão de que o afastamento causado por esta condição é de 1,25% para $Re_D = 481$ e por volta de 1,0% para $Re_D = 210$ e 300.

Estes erros percentuais são obtidos, considerando-se a variação da velocidade média medida em relação à velocidade média correspondente do perfil teórico, da seguinte maneira:

$U_m = f(Q) = 12,86 \text{ cm/s}$ - para $Re_D = 481$

$U_{m_t} = \frac{1}{2} U_{m\acute{a}x} = 12,7 \text{ cm/s}$ - para $Re_D = 481$ do perfil te3rico

Assim, $e\% = 100 \cdot \left[1 - (U_{m_t}/U_m) \right] = 1,25\%$ (4.3)

Isto significa uma varia33o do volume medido de 30 cm^3 em 3750 cm^3 (volume padr3o de medi33o de vaz3o), isto 3, para a 3rea de 375 cm^2 , uma varia33o de $0,8 \text{ mm}$ na altura medida.

Em outras palavras, isto importaria num erro de medi33o do tempo de preenchimento do volume considerado da ordem de $2/10$ de segundo, o que 3 bastante aceit3vel.

Por outro lado, considerando somente a influ3ncia do 3ndice de comportamento de fluxo, ter-se-ia para $Re_D = 481$, um valor de "n" baseado em $U_{m\acute{a}x}/U_m$ da ordem de $0,96$, determinado a trav3s da equa33o 2.1. Isto significaria um afastamento da condi33o Newtoniana da ordem de 4% para a linha de centro. O mesmo 3 verificado para os outros perfis, com varia333es m3nimas.

A possibilidade de ocorr3ncia de perfil n3o plenamente desenvolvido 3 praticamente inexistente, se se considerar que o comprimento de entrada 3 calculado em fun33o de $Re_D = 1000$. Como se est3 analisando o escoamento para Re_D menor que a metade deste valor, o comprimento de entrada correspondente 3 muito menor e em consequ3ncia o escoamento desenvolvido se estabelece bem antes da sec33o 1.

Em fun33o do esposto, pode-se concluir que provavelmente o afastamento verificado 3 consequ3ncia de ambas as situa333es 1 e 3, com varia333es percentuais reais menores do que aquelas determinadas para cada situa33o individualmente. Consequen-temente, as condi333es iniciais especificadas s3o plenamente aceit3veis.

4.2 - AN3LISE DOS COMPRIMENTOS DE SEPARA33O DO ESCOAMENTO A JUSANTE DO OBST3CULO

Conforme descrito no 3tem 3.3, uma s3rie de considera333es foram j3 elaboradas visando uma melhor obten33o dos comprimentos de separa33o.

N3o obstante todo cuidado tenha sido tomado para a

visualização e uniformidade das linhas de corrente, o limite prático de medições para o processo utilizado mostrou-se relativamente baixo. Pode-se observar que a faixa mínima de Re_D (Tabela 02) está bastante próxima daquela originalmente proposta, não tendo sido observados problemas que tivessem dificultado sua obtenção.

O limite máximo de $Re_D = 190$, deve-se ao fato de que acima deste valor, ou faixa de valores próximos, as linhas de separação começam a apresentar uma certa instabilidade com relação à uniformidade, dificultando em parte a medição. Aliado a este fato, ocorre como já mencionado, uma aproximação em ângulo muito reduzido com a parede. Em consequência, a medição dos comprimentos de separação deixa de ser precisa, apresentando variações relativamente consideráveis.

Ao plotar os comprimentos de separação medidos em função de números de Reynolds em gráfico bilogarítmico, observa-se que a evolução de " λx " ocorre segundo a seguinte lei de potência obtida da informação indicada pela inclinação da reta logarítmica da figura 15:

$$\log (\lambda x/D) = a \log (Re_D) + \log C \quad (4.4)$$

$$\text{onde, } a = \text{tg } \alpha' = \text{tg } 42^\circ = 0,9$$

$$\text{donde } C = 0,0383$$

$$\text{Assim: } \lambda x/D = 0,0383 Re_D^{0,9} \quad \text{para } 20 < Re_D < 200 \quad (4.5)$$

Embora a utilidade desta relação seja indiscutível no que se refere ao conhecimento dos comprimentos de separação para todos os números de Reynolds situados dentro da faixa considerada, não se pode, a priori, garantir sua validade para Re_D muito afastados dessa faixa, pois muito pouco se conhece a respeito do desenvolvimento desses comprimentos.

A comprovação da relação empírica ora desenvolvida para outra faixa de Re_D fica dependente de outras experimentações, que devem seguir outro método, como por exemplo, a introdução de corante diretamente no interior da região de recirculação. próximo

mo à parede da secção, de forma contínua, procurando-se o ponto de início da recirculação.

4.3 - ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO NA ENTRADA E SAÍDA DA OBSTRUÇÃO.

A observação dos perfis de velocidade na entrada e saída da obstrução (secções 2 e 3), sugere o estabelecimento de uma função de variação da velocidade máxima com o número de Reynolds para cada secção.

É interessante analisar esta situação na forma adimensional bastando para tanto adimensionalizar o parâmetro velocidade. Para isto, utiliza-se a velocidade média obtida experimentalmente através da vazão para o diâmetro característico da obstrução, isto é:

$$U_m = 4 \cdot Q / \pi \cdot D^{*2} = 16 \cdot Q / \pi D^2 = Re_{D^*} \cdot v / D^* \quad (4.6)$$

onde: $D^* = D/2$

Desta maneira obtêm-se o diagrama de variação ($U_{m\max.}/U_m$) x Re_D , que plotado em gráfico logarítmico fornece para as secções consideradas, as retas logarítmicas da figura 28, para os valores considerados na Tabela 9, a seguir.

TABELA 9 - VALORES DE VELOCIDADE ADIMENSIONAL EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS, PARA AS SECÇÕES 2 e 3.

SECÇÃO 2				
Re_D	$U_{m\acute{a}x.}$ (cm/s)	U_m (cm/s)	$\frac{U_{m\acute{a}x.}}{U_m}$	$\frac{Re_D}{\left(\frac{x}{D^*}\right) + 1}$
31	5,65	3,34	1,69	31,0
68	10,30	7,29	1,41	68,0
131	17,70	14,02	1,62	131,0
178	23,10	19,00	1,22	178,0
234	29,40	25,07	1,17	234,0
SECÇÃO 3				
54	9,21	5,49	1,68	36,0
81	12,80	8,27	1,55	54,0
140	19,70	14,23	1,38	93,3
161	22,20	16,29	1,36	107,3
200	28,30	21,47	1,32	133,3
368	48,00	39,22	1,22	245,3

Observa-se na figura 28 que as retas logarítmicas possuem em a mesma inclinação, o que leva a crer que, a menos de uma constante, a função de variação da velocidade máxima com o número de Reynolds possui a mesma forma para ambas as secções.

A linearidade logarítmica verificada sugere a utilização de uma função da forma

$$Y = a \cdot X^{-b} \quad (4.7)$$

onde: $-b$ = inclinação das retas

a = constante dependente da secção considerada

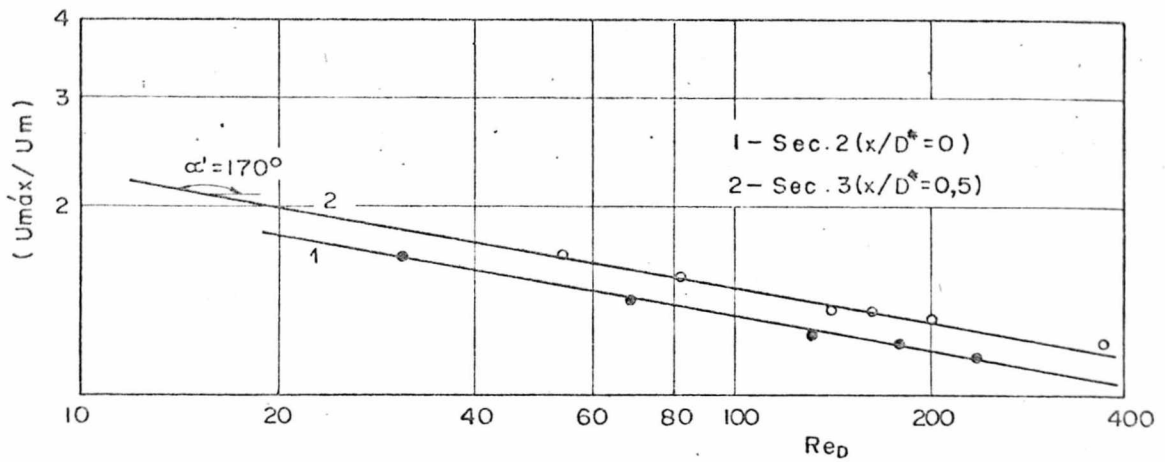


Fig. 28 = Variação da Velocidade em função de Re_D para secções distintas.

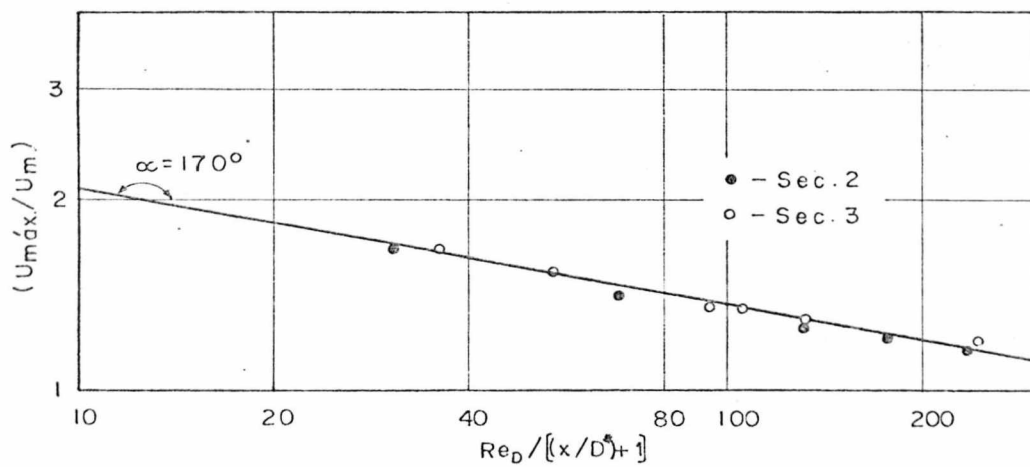


Fig. 29 = Variação da Velocidade em função de Re_D e do Parâmetro de aproximação $(x/D^*) + 1$

Por outro lado, considerando que a velocidade sofre variação contínua desde a secção 2 até a secção 3, pressupõe-se a existência de um fator de aproximação baseado na própria característica da secção. O fator considerado é a distância entre as secções, sendo aqui introduzido na sua forma dimensional, gerando uma função de dependência da seguinte forma:

$$\frac{U_{m\acute{a}x}}{U_m} = \left[f \operatorname{Re}_D, (x/D^*) + 1 \right] \quad (4.8)$$

onde: x = distância entre as secções, com origem na secção 2 e valor $D/4$ (cm) na secção 3.

D^* = diâmetro característico da obstrução = $D/2$

Desta forma, obtém-se a curva de variação de $U_{m\acute{a}x}/U_m$ em função de $\operatorname{Re}_D / \left[(x/D^*) + 1 \right]$ da figura 29.

Em virtude da superposição assim obtida, consegue-se estabelecer uma única função válida para as duas secções, da seguinte forma:

$$\frac{U_{m\acute{a}x}}{U_m} = 3,08 \left[\frac{\operatorname{Re}_D}{(x/D^*) + 1} \right]^{-0,176} \quad (4.9)$$

A equação empírica acima pode ser reagrupada para fornecer a seguinte relação:

$$\frac{U_{m\acute{a}x}}{U_m} = 3,08 \left[((x/D^*) + 1)^{0,176} \right] \operatorname{Re}_D^{-0,176} \quad (4.10)$$

onde o valor entre colchetes representa a constante para cada secção considerada em função da distância entre elas, obtendo-se as duas relações que reproduzem as curvas da figura 28.

Observando a forma dos perfis de velocidade para essas secções pode-se perceber que, na secção 2, devido à redução de 50% no diâmetro as linhas de corrente próximas à parede do tubo tendem a retardar muito seu movimento em relação as linhas de corrente mais próximas da linha de centro do escoamento, gerando esforços cortantes muito elevados na região próxima à parede da sec

ção considerada e diminuindo bruscamente à medida que se aproximam do centro, o que pode ser visto nos perfis de tensão da figura 22.

A interação entre as forças de inércia e viscosas tende a se reestabelecer ao longo do escoamento, o que é caracterizado pela forma dos perfis de velocidade da secção 3. Em consequência, as tensões cizalhantes diminuem de intensidade em relação aos máximos da secção 2 e apresentam variações menos bruscas à medida que se aproximam da linha de centro. Este fato é caracterizado pelos perfis de tensão apresentados na figura 23.

A partir da secção 3, as tensões máximas positivas diminuem gradativamente até o seu valor mínimo que ocorre na parede do tubo, quando o escoamento tornar-se novamente plenamente desenvolvido.

4.4 - ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO A JUSANTE DO OBSTÁCULO; CONSIDERAÇÕES GLOBAIS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DAS CARACTERÍSTICAS ANALISADAS AO LONGO DO ESCOAMENTO.

À medida que o escoamento se afasta do obstáculo, os perfis de velocidade tendem a reestabelecer a forma do perfil plenamente desenvolvido, o que pode ser visto nas figuras 20 e 21.

Observa-se que a forma achatada da porção central do perfil na secção 3 se desfaz ao longo do escoamento, com redução da velocidade máxima na linha de centro. Esta diminuição de $U_{máx}$ ocorre até o seu valor mínimo na condição desenvolvida.

Por outro lado, na região de recirculação, a linha de inversão de velocidade (velocidade nula), compreendida entre a linha de separação (linha de corrente visualizada, tangente à parede interior do obstáculo) e a parede do tubo, tende a se aproximar desta à medida que a separação se aproxima de " lx " (comprimento de separação).

Entretanto, nada se pode afirmar sobre a forma de aproximação da linha de inversão para o espaço compreendido entre a secção 6 e a secção que contém " lx ".

Pode-se perceber que à medida que a separação diminui, o perfil reverso de velocidade que ocorre abaixo da linha de inversão tende a crescer.

Logicamente, esse crescimento negativo não acontece in definidamente, mas está restrito à região de recirculação somente. Isto equivale a dizer que em " l_x ", não existe mais o perfil reverso.

Com relação ao escoamento principal ao longo do escoamento, entre as secções 1 e 6, observa-se que as velocidades máximas na linha de centro passam, em cada Re_D considerado, por um máximo na secção de saída do obstáculo (secção 3), como pode ser visto na ilustração da figura 30, para $Re_D = 200$ e 368.

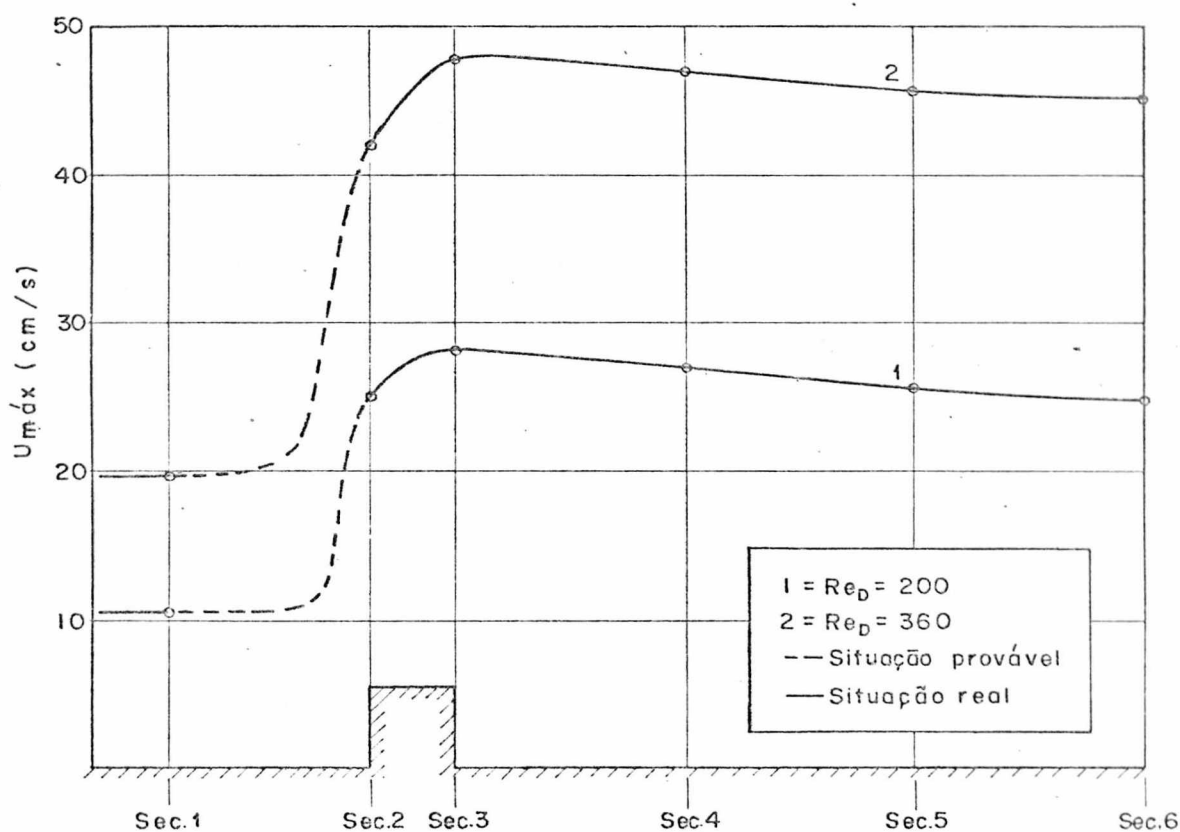


Fig. 30 = Evolução da velocidade máxima ao longo do escoamento

Nesta figura, a variação de velocidade que ocorre entre as secções 1 e 2 não pode ser obtida pelo método utilizado devido à impossibilidade de posicionamento dos tubos de Pitot, razão pela qual sua evolução é indicada por linha tracejada, seguindo a tendência natural de crescimento da curva no interior da obstrução.

Com relação às tensões de cisalhamento levantadas para as secções 4,5 e 6, observa-se que à medida que o escoamento se desenvolve, os valores de tensão máxima tornam-se menos acentuados, verificando-se um decréscimo nas tensões máximas positivas que ocorrem na região próxima à linha de separação.

Se essas tensões forem consideradas independentemente da posição radial em que ocorrem, então pode-se dizer que a tensão mínima para cada Re_D será aquela do escoamento desenvolvido.

Juntando-se as informações de tensão máxima determinadas para todas as secções consideradas, é possível prever o seu comportamento ao longo do escoamento.

A figura 31 a seguir, mostra um esboço ilustrativo da forma de variação da tensão máxima ao longo do escoamento para Re_D igual a 200.

Verifica-se aí, claramente, o pico de tensão atuante na secção de entrada da obstrução. A partir dessa secção a tensão diminui de forma mais suave até o reestabelecimento do escoamento desenvolvido.

A suposição de que a tensão cresce mais acentuadamente na região imediatamente anterior à secção 2, indicada por linha tracejada na figura, está baseada no fato de que ocorre aí uma variação brusca na forma do escoamento.

Com relação ao desenvolvimento das tensões na parede da secção à jusante do obstáculo, verifica-se (figuras 20 e 21) que estas tendem a crescer negativamente em concordância com a forma e volutiva dos perfis de velocidade reversos à medida que se afasta da secção de saída do obstáculo.

Conforme o exposto anteriormente sobre os perfis de velocidade na região de recirculação, o crescimento negativo das tensões nessa região deve ocorrer até um máximo, e em seguida chegar até zero.

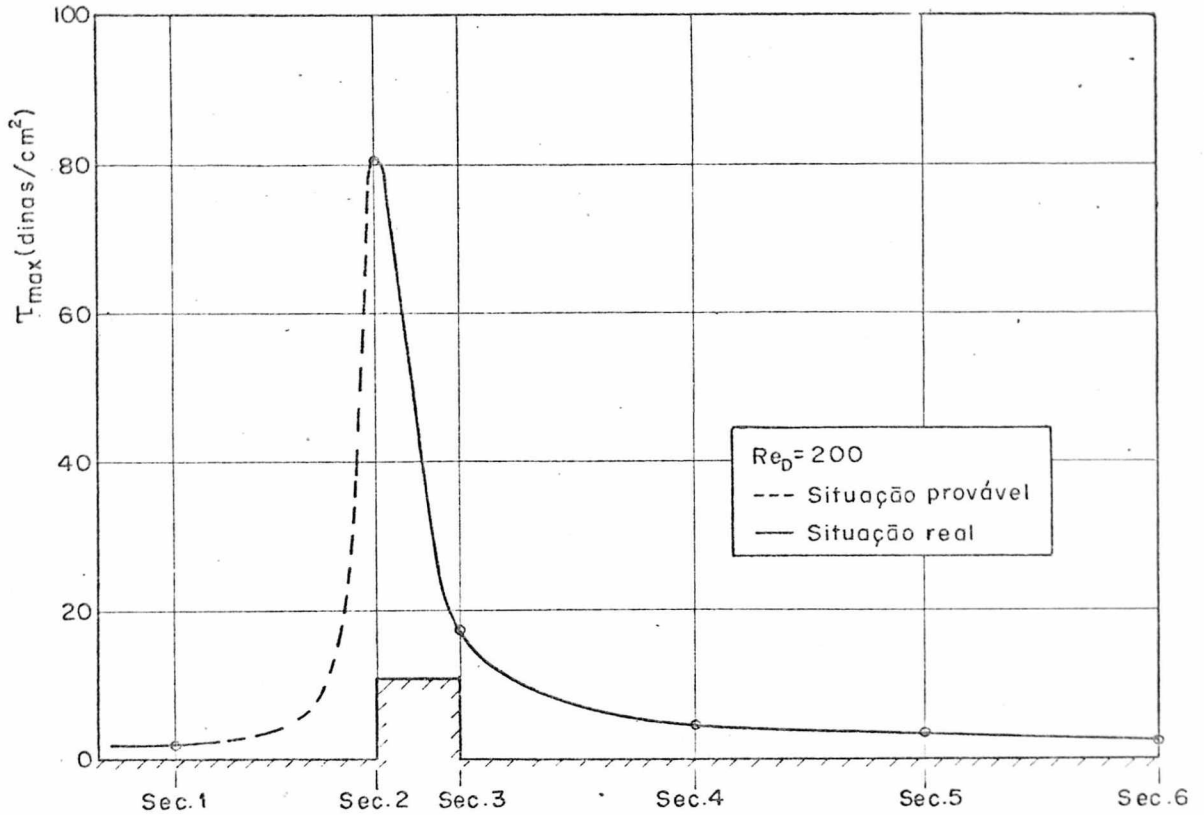


Fig. 31 = Evolução da tensão máxima ao longo do escoamento para $Re_D = 200$

Daí até o reestabelecimento do escoamento desenvolvido, a tensão cresce até tornar-se um máximo positivo e constante.

A forma de variação das tensões na parede para as secções 4,5 e 6 é mostrada na figura 32, em termos das tensões adimensionais para $Re_D = 200$ e 368, onde:

$$\tau_{\omega}^* = \frac{\tau_{\omega}}{\rho v^2 / D^2}$$

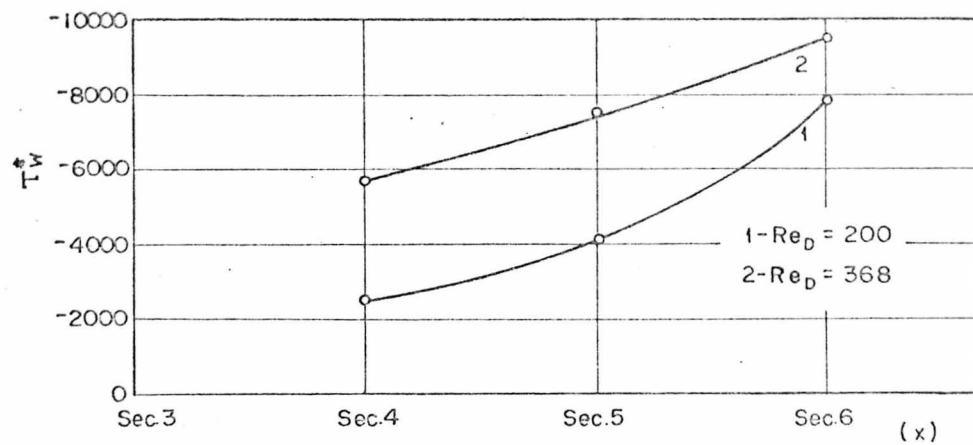


Fig. 32 = Evolução das tensões na parede à jusante do obstáculo

C A P Í T U L O V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O procedimento experimental adotado mostrou-se bastante satisfatório com relação ao levantamento de dados para uma determinada faixa de Reynolds (de 20 a 500).

No entanto, para uma faixa mais ampla, será necessário a adoção de outros métodos, alguns dos quais já comentados no decorrer do trabalho.

O conhecimento das tensões máximas na entrada do obstáculo tem uma importância muito grande para o conhecimento das características de desprendimento de partículas sólidas de estenoses em determinadas regiões do escoamento sanguíneo, considerados os devidos afastamentos geométricos em relação aos sistemas reais.

O conhecimento das características da região de recirculação pode levar à determinação dos mecanismos de formação dessas estenoses em locais específicos do sistema circulatório, como por exemplo, em bifurcações, onde o desvio de fluxo promove a formação de região de separação e recirculação nas zonas de baixa pressão.

A formulação das equações determinantes do comportamento da velocidade máxima na entrada e saída do obstáculo pode e deve ser estendida a outras regiões do escoamento, da mesma maneira que a formulação experimental dos perfis de velocidade integrais se possível.

Por ser este um primeiro trabalho nesse campo do conhecimento, as experimentações ficaram restritas à uma única geometria de obstrução. Contudo é interessante analisarem-se outras formas de ressaltos, como por exemplo, o escoamento sobre meia secção anular de secção longitudinal quadrada, secção anular de secção longitudinal semi-circular ou semi-senoidal e outras.

Seguindo as pesquisas numéricas, o escoamento pode ainda ser analisado com componente pulsátil, promovida por bomba de êmbolo colocada na entrada da secção de testes.

Finalmente, seria interessante desenvolver um método nu

mérico de análise dos resultados obtidos experimentalmente, e a partir daí desenvolver outros estudos teóricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - CHENG, L.C. - CLARK, M.E. - ROBERTSON, J.M. - Numerical calculation of oscillating flow in the vicinity of square wall obstacles in plane conduits - J. Biomechanics - 1972, Vol. 5 pp. 467-484, Pergamon Press.
- [2] - GUYTON, A.C. - Tratado de Fisiologia Médica, Ed. Guanabara. Koogan - S/A, 3º ed. Americana - 1º Ed. Brasileira, 1969.
- [3] - CHENG, L.C. - CLARK, M.E. - ROBERTSON, J.M. - Calculation of plane pulsatile flow pass wall obstacles - Depto. of Theoretical and Applied Mechanics - U. of Illinois - 1973.
- [4] - CHENG, L.C. - CLARK, M.E. - ROBERTSON, J.M. - Interactive and non-uniform unsteady phisiological flows by finite diference transforms - Proceedings of Symposium Computer Method in Eng. U. Southern Cal. - 1977 - Vol I - pp. 497-506. Efects of moving wall channel flows - paper for 1980. ASME WAM.
- [5] - LIOU, R.J. - CLARK, M.E. - ROBERTSON, L.M. - CHENG, L.C. - The dynamics of unsteady bifurcation flows - Biofluid Mechanics - Vol 2 - Ed. Daniel J. Scheneck Blacksbur - Virginia U.S.A.
- [6] - METZNER, A.B. - Non-Newtonian Technology - Fluid Mechanics, Mixing and Heat transfer (pp. 79-108). In: T.B. Brew and L.W. Hoopes, Tr. (eds) "Advances in chemical Eng". Vol. 1 Academic Press, New York - 1956.
- [7] - METHOCEL PRODUCTS - Dow Chemical Inc. U.S.A.
- [8] - SHAMES, I.H. - Mecânica dos Fluídos - Vol. 2. Análise de escoamentos - Ed. Edgard Blucher, 1973.

- [9] - AMCA - ASHRAE, AMCA Standard 21-74, Air moving and Conditioning Association - ASHRAE Standard 51-75, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers New York, 1st edition, 1975.
- [10] - HBM - OPERATING MANUAL - Nº 130.10 - 1001 BaE - 1969.
- [11] - VIEBIG, REINHARD - Formulário Fotográfico - Ed. Iris. 6^º ed. 1978, São Paulo.
- [12] - CARNAHAN, B. - LUTHER, H.A - WILKES, J.O. - "Applied Numerical Methods", John Wiley and Sons, Inc., 1969.
- [13] - MATAIX, C. - Mecânica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas - Harper and Row Publ., 1970, Ed. del Castillo.
- [14] - NORMA ASTM. D 1347/72 - Vol. 15 Standard Methods of testing Methylcellulose.
- [15] - NORMA DIN. 53015 - 1959 - VISCOMETRY - Measurement of viscosity with the Höppler Falling-sphere viscometer.
- [16] - LAMBRECHT, Wilh. "Catálogo de Equipamentos - Lambrecht KG, Prontuário nº 654 e 655 - Göttingen - 1971.
- [17] - AERONAUTICAL R. COMMITTEE - Modern developments in fluid dynamics - Ed. by S. Goldstein - Vol 1, Dover Publ., 1965..
- [18] - LIOU, R.J - CLARK, M.E. - ROBERTSON, J.M. - CHENG, L.C. - Precursor numerical studies of aortic arch flow - Depto of Theoretical and Applied Mechanics - U. of Illinois - 33rd ACEM B - Washington - 1980.

A P Ê N D I C E S

1. DIMENSIONAMENTO DA BOMBA

Para o dimensionamento da bomba é considerado aqui somente o elemento responsável pelo transporte da solução, isto é, o rotor.

O motor elétrico de acionamento não foi dimensionado, aproveitando-se um já existente em laboratório. Tomou-se apenas o cuidado de verificar se sua potência era suficiente.

Como a rotação do motor era excessiva para as condições de funcionamento determinadas para o sistema, foi necessário introduzir um sistema de redução, que por facilidade construtiva, foi feito através de polias, na proporção de 10:1.

O variador de velocidade foi dimensionado e construído no Departamento de Engenharia Elétrica desta Universidade, em função das necessidades de rotação e corrente exigidas pelo rotor e motor de acionamento, respectivamente.

Considera-se como elemento de transporte, dois roletes montados sobre um rotor, defasados de 180° , que ao pressionarem ciclicamente uma mangueira de látex sobre uma guia semi-circular, impulsionam a solução existente em seu interior num determinado sentido. A sub-pressão gerada imediatamente atrás do rolete ao longo de seu curso é responsável pela sucção da solução, que é então impulsionada pelo rolete seguinte, e assim sucessivamente.

Desta forma, o volume deslocado por rotação completado do eixo é o dobro do volume deslocado por um rolete em seu meio ciclo útil.

A figura 33 mostra um esquema simplificado do sistema, indicando o ângulo útil de transporte e a forma de atuação dos roletes.

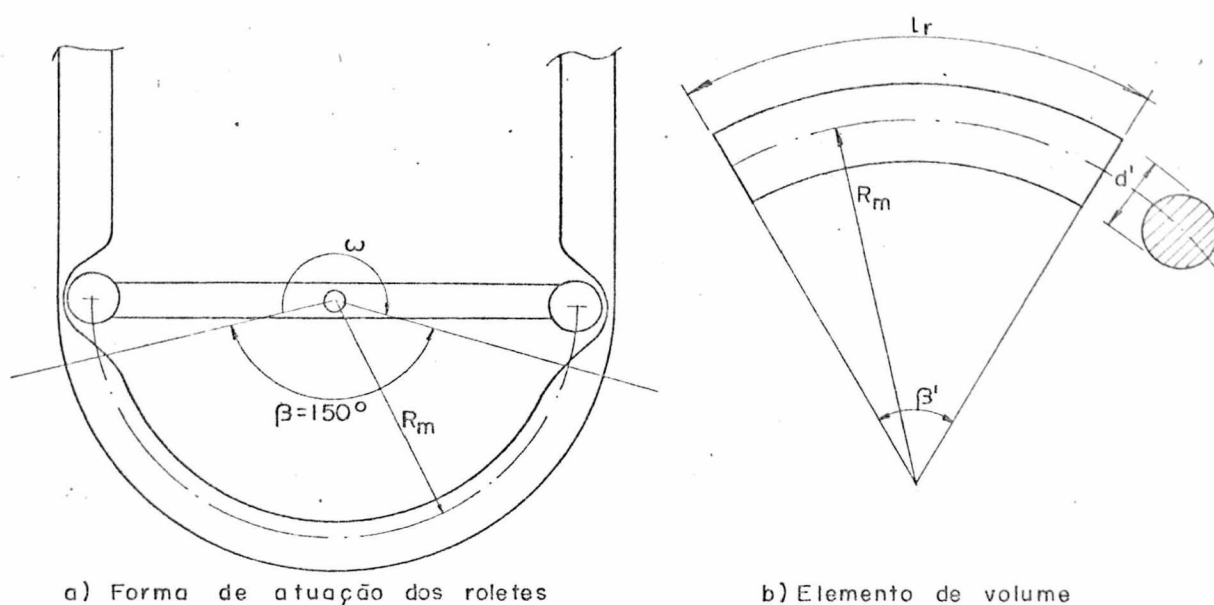


Fig. 33 = Elementos para o dimensionamento da bomba

Considerando o elemento de volume a ser transportado da figura 33 b, tem-se que:

$$V_{Desl} = \pi d'^2 l_r / 4 \quad (A1-1)$$

$$\text{onde: } l_r = \pi D_m \beta' / 360 \quad (A1-2)$$

sendo, d' = diâmetro do elemento de volume

D_m = diâmetro médio do elemento de volume referido ao eixo de rotação do rotor. (200mm)

β' = ângulo formado pelos extremos do elemento.

Considerando a geometria da figura 33a, pode-se observar que o ângulo efetivo de atuação do rolete é de $\approx 150^\circ$.

Optou-se originalmente pela utilização de uma mangueira de látex com diâmetro nominal de 1". Na realidade o diâmetro interno dessas mangueiras difere bastante do nominal, podendo-se considerar por volta de 18mm.

Assim, o volume deslocado por um rolete em meio giro

do rotor é:

$$V_{Desl} = \pi^2 d'^2 D_m \beta' / 1440 = 1,03 D_m d'^2 \quad (A1-3)$$

O volume deslocado por rotação é então:

$$V_{Desl./rot.} = 2,06 D_m d'^2 = 133,5 \text{ cm}^3/\text{rot} \quad (A1-4)$$

Para o volume total necessário, correspondente à vazão máxima de projeto de $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ para $Re_D = 10^3$, a rotação exigida é então:

$$n' = Q/V_{Desl./rot.} = 3,75 \text{ rps} = 225,0 \text{ rpm} \quad (A1-5)$$

A potência é determinada pela expressão |13|.

$$N = M w = \rho w Q L_m u / \eta_v \eta_m \quad (A1-6)$$

onde: u = velocidade periférica do rotor em R_m

$$(\pi D_m n' / 60)$$

L_m = braço de momento do rotor (R_m)

w = velocidade angular = $2\pi n' / 60$

ρ = densidade da solução

Os rendimentos volumétricos (η_v) e mecânico (η_m) foram arbitrados por falta de dados, ambos em 70%.

A figura a seguir mostra a montagem do rotor da bomba sobre seu suporte, que por sua vez é o elemento suporte da mangueira de transporte.

Podem ser vistos aí, os roletes guia da mangueira, cuja finalidade já foi comentada no item 2.4.5.

Os quatro roletes são montados sobre a base do rotor de forma a permitir um pequeno deslocamento radial, cuja finalidade é ajustar a pressão da mangueira sobre seu suporte e também permitir a utilização do sistema com mangueiras de espessuras e diâmetros diferentes.

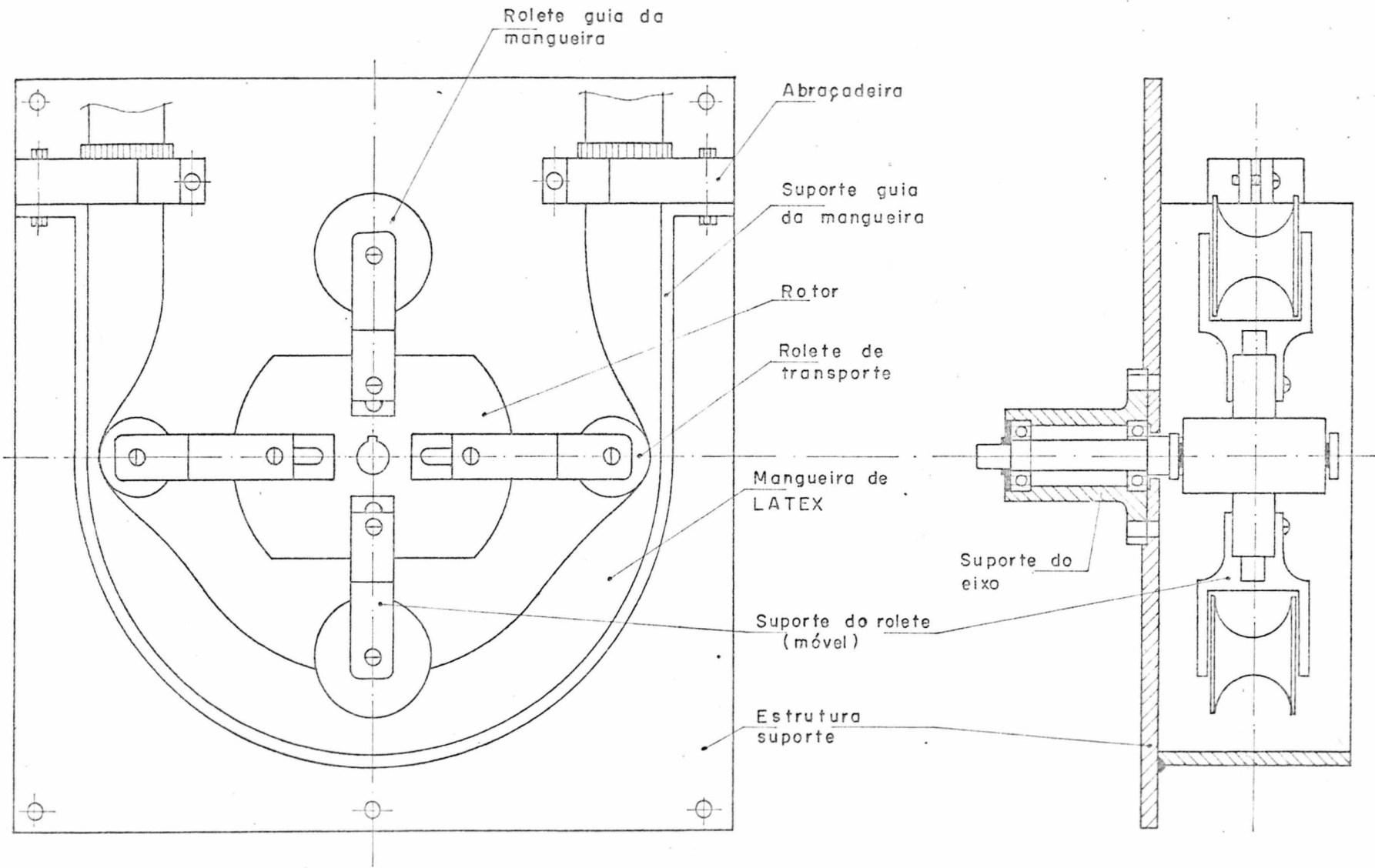


Fig. 34 = Montagem do rotor da bomba sobre seu suporte

2. CALIBRAÇÃO DO DESNÍVEL

A finalidade principal de se conhecer o desnível entre reservatórios emissor e receptor (gradiente de pressão) é facilitar a obtenção e reprodução dos números de Reynolds na secção de testes.

O desnível é facilmente obtido, considerando-se como desnível zero, a posição relativa dos reservatórios para a qual a vazão é nula. Nesta condição é posicionada uma escala graduada fixa à estrutura suporte do reservatório emissor, com o zero concordante com um indicador de escala fixado na base da estrutura móvel do reservatório.

O sistema indicador assim constituído foi testado para água medindo-se a vazão para diferentes desníveis. Como no entanto era necessário um controle mais sensível dos números de Reynolds, foram utilizados registros colocados à saída do reservatório emissor, de maneira que as vazões medidas são igualmente função das perdas de carga localizadas.

As variações de vazão em função do desnível e abertura dos registros de emissão foram plotadas em gráfico apresentado na figura 35, a título ilustrativo.

Observa-se aí que, para a água, a vazão máxima obtível é da ordem de 22,3 litros/min para um desnível máximo de 80 cm e com abertura de 3 voltas do registro de emissão. Isto significa um gradiente de pressão na secção de testes de aproximadamente 800 Kgf/m^2 .

O desnível máximo verificado para esta condição é função basicamente da bomba, cuja eficiência é garantida para uma rotação máxima de 200 rpm.

Igualmente, para esta condição, o número de Reynolds máximo referido ao diâmetro da secção de testes é da ordem de 10^4 .

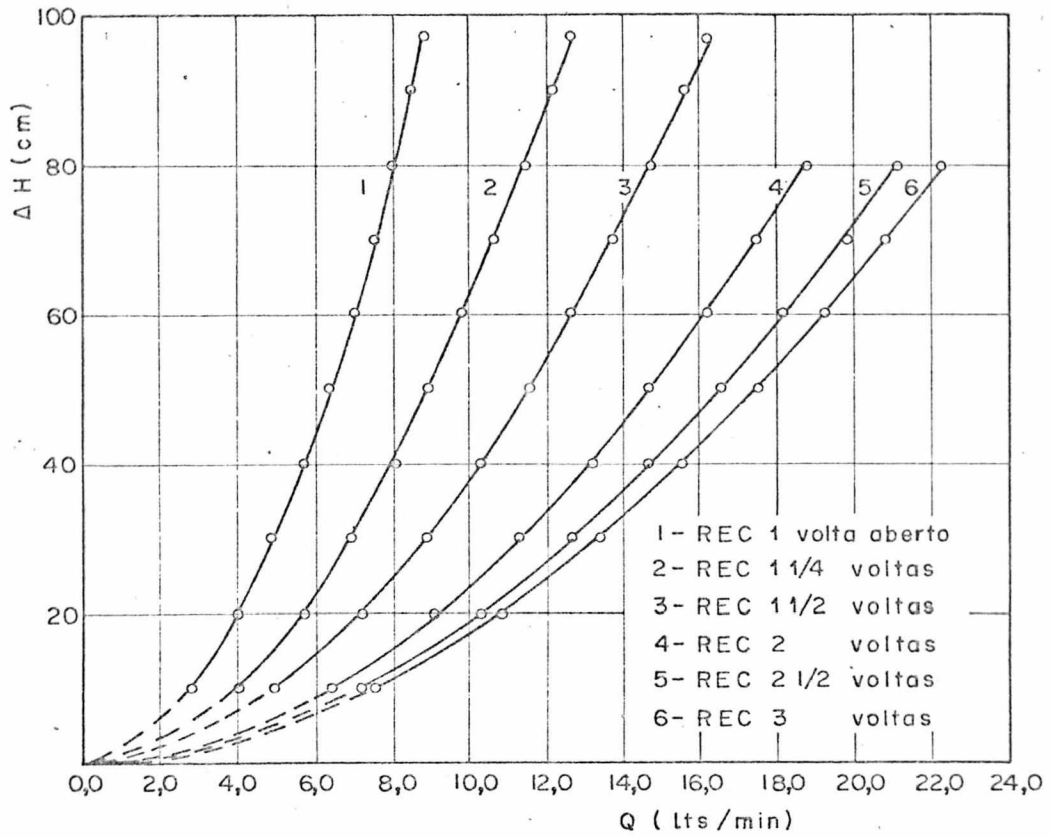


Fig. 35 = Curvas de variação da vazão em função do desnível e abertura dos registros de emissão para a água.

3. DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO

3.1 - Processo de obtenção da solução de Metilcelulose: A -15|7|

O metilcelulose é uma substância que possui as seguintes propriedades físicas:

Cor ----- Branco

Forma de apresentação ----- Pó

Densidade ----- Faixa: 0,42 a 0,52 (gr/cm³)

Em função de características próprias, o produto Metilcelulose deve ser inicialmente diluído com agitação contínua em 1/5 a 1/3 volume total de água destilada requerido à temperaturas variando entre 80 e 90°C. A agitação deve prosseguir até que todas as partículas estejam completamente umedecidas, eliminando a possibilidade de formação de uma camada gelatinosa superficial que impede a diluição das camadas interiores.

O volume restante de água deve então ser adicionado a temperaturas variando entre zero e 5°C. Prossegue-se a agitação até a completa homogeneização da mistura.

Para máxima transparência e reprodutividade de viscosidade deve-se manter a solução entre zero e 5°C por 20 a 40 minutos em banho refrigerante.

3.2 - Concentração em peso:

Para a obtenção da faixa de viscosidade desejada, determina-se a massa de Metilcelulose em função do volume de água requerido segundo a expressão:

$$P_M = \left(\frac{C\%}{1 - C\%} \right) \cdot P_{H_2O} \quad (A3-1)$$

onde: P_M = Peso de Metilcelulose

P_{H_2O} = Peso de água

$C\%$ = Concentração percentual desejada

Para a solução de Metilcelulose à 2%:

$$P_M = 0,02 \cdot P_{H_2O}$$

Para os 200 litros de água destilada utilizados, foram necessários quatro quilos de Metilcelulose.

3.3 - Determinação da viscosidade:

O fabricante de metilcelulose recomenda, para medições acuradas de viscosidade, a utilização de um viscosímetro do tipo UBBELOHDE [14].

O processo de calibração do viscosímetro construído no Departamento de Química desta Universidade é descrito a seguir:

1. Foram selecionados dois óleos e medidas suas viscosidades para uma faixa de variação de temperatura entre 5 a 40°C, a intervalos de 5°C, por meio de um viscosímetro de bola caída [15] termostatizado e calibrado, sendo que a densidade para a mesma faixa de temperaturas foi medida por um PICNÔMETRO (balão volumétrico), igualmente calibrado.

A viscosidade absoluta é determinada através da fórmula de HÖPPLER:

$$\mu = kt \cdot (d - \rho) \quad (\text{cP}) \quad (\text{A3-2})$$

onde: d = densidade da esfera (g/cm^3)

ρ = densidade do fluido (g/cm^3)

t = tempo de queda da esfera (s)

Para a avaliação da densidade, a massa de fluido (m_f) é função da diferença entre a massa do Picnômetro (m_p) e a massa total ($m_p + m_f$) medida à cada temperatura, após estabilizada a expansão volumétrica decorrente do acréscimo de temperatura. Considera-se que as medições são efetuadas sempre a partir das baixas temperaturas.

O volume de fluido deve ser corrigido à cada temperatura, em função do coeficiente de dilatação do material do Picnômetro, no caso vidro, de acordo com a expressão:

$$V_t = V_o (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (\text{A3-3})$$

onde: $\beta = 2,43 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - coeficiente de dilatação do vidro
 V_0 = Volume original do Picnômetro à temperatura de calibração (49,461 cc à 21,6°C)
 $\Delta T = T - 21,6^\circ\text{C}$ - diferença entre a temperatura de medição e a de calibração.

Finalmente a viscosidade cinemática é obtida pela expressão:

$$v = \mu/\rho = \mu \times 10^{-2} (\text{cP}) / \rho (\text{gr/cm}^3) = (\text{cm}^2/\text{s}) \quad (\text{A3-4})$$

2. Os dois óleos de viscosidade agora conhecidas foram utilizados como veículo de calibração do viscosímetro de UBEL LOHDE para a mesma faixa de temperatura, obtendo-se daí a constante de calibração "K" segundo a expressão:

$$\mu = k\rho t \text{ (cP)} \quad (\text{A3-5})$$

onde: ρ = densidade do fluido (g/cm^3)
 t = Tempo de escoamento do fluido entre duas marcações acima do capilar do viscosímetro (seg)

A constante de calibração é a média de seus valores a cada temperatura, de ambos os óleos utilizados.

3. De posse do valor de constante do viscosímetro, obteve-se da forma descrita no ítem anterior, os valores de viscosidade em função da temperatura para a solução de Metilcelulose.

Os resultados apresentados nas tabelas 10,11,12 e 13 a seguir, são consequência da média de três medições efetuadas originalmente. A partir destes dados, foram levantadas as curvas de variação da viscosidade com a temperatura apresentadas nas figuras 36, 37 e 38.

3.4 - Equipamentos utilizados:

VISCOSIMETROS

- a) de bola caída - MARCA-HAAKE Instruments Inc. (DIN 53015)
 (Germany)
 Esfera usada - nº 3

densidade - $d = 8,157 \text{ g/cm}^3$
 massa - $m = 16,298 \text{ g}$
 diâmetro - $\phi = 15,63 \text{ mm}$
 constante - $K = 0,00702 \text{ (cPcm}^3/\text{gs)}$

b- de UBELLOHDE -

Marca - Fabricação local (ASTM-DI347/72)
 Volume do fluido usado = 55 cm^3
 Constante $K = 0,0937 \text{ (cPcm}^3/\text{gs)}$
 Erro médio do valor de $K = 0,54\%$

- PIGNÔMETRO

Volume - $V_0 = 49,461 \text{ cm}^3$ à $21,6 \text{ }^\circ\text{C}$
 Massa - $m_p = 31,0322 \text{ g}$

- TERMOSTATO

Marca - HAAKE Instruments Inc. (Germany)
 Faixa de temperaturas - $0,0$ a 80°C
 Resolução - $0,1^\circ\text{C}$

- BALANÇA

MARCA - METTLER H - 10
 Faixa - $0,0$ a 160 g
 Precisão - $1/10000$

- CRONÔMETRO

MARCA - HEUER LEONIDAS
 Resolução - $2/10$ de segundos

TABELA Nº 10 - Valores de viscosidade em função da temperatura para óleos A e B, obtidas em viscosímetro de Bola Caída.

ÓLEO A				ÓLEO B		
T(°C)	t(seg)	μ (cP)	ν (cm ² /s)	t(seg)	μ (cP)	ν (cm ² /s)
5	452,8	230,70	2,566	102,5	52,477	0,607
10	328,0	167,14	1,860	84,3	43,177	0,502
15	242,0	123,40	1,380	63,2	32,384	0,378
20	184,3	94,05	1,060	49,8	25,529	0,299
25	122,0	62,30	0,705	39,0	20,003	0,235
30	112,0	57,21	0,650	31,8	16,317	0,193
35	88,4	45,17	0,515	26,0	13,347	0,158
40	72,0	36,81	0,421	21,0	10,785	0,128

TABELA Nº 11 - Variação da densidade com a temperatura para os óleos A e B em função da variação da massa

PICNÔMETRO		ÓLEO A		ÓLEO B	
T(°C)	Vol. (cm ³)	m(g)	ρ (g/cm ³)	m(g)	ρ (g/cm ³)
5	49,441	44,460	0,8992	42,713	0,8639
10	49,447	44,420	0,8983	42,566	0,8609
15	49,453	44,200	0,8938	42,417	0,8577
20	49,459	43,890	0,8874	42,265	0,8545
25	49,465	43,720	0,8838	42,091	0,8509
30	49,471	43,560	0,8805	41,933	0,8476
35	49,477	43,420	0,8776	41,744	0,8443
40	49,483	43,250	0,8740	41,610	0,8409

TABELA Nº 12 - Valores de "K" do viscosímetro de UBELLOHDE para temperaturas e viscosidades conhecidas, em função do tempo de escoamento em capilar.

ÓLEO A				ÓLEO B		
T(°C)	μ (cP)	t(seg)	K	μ (cP)	t(seg)	k
15	-	-	-	32,38	388,0	0,0973
20	94,05	1161,0	0,0913	25,53	307,5	0,0972
25	62,30	885,5	0,0796	20,00	245,0	0,0960
30	57,21	713,0	0,0911	16,32	200,2	0,0962
35	45,17	572,0	0,0900	-	-	-
40	36,81	463,0	0,0909	-	-	-
Valor médio de K = 0,0908 Erro médio ----- = 0,48%				Valor médio de K = 0,0967 Erro médio ----- = 0,61%		

TABELA Nº 13 - Valores de viscosidade e densidade em função da temperatura para a solução de METILCELULOSE a 2%

Viscosímetro			Picnometro			v
T(°C)	t(seg)	μ (cP)	m(g)	Vol. (cm ³)	ρ (g/cm ³)	(cm ² /s)
10,0	166,0	15,611	49,632	49,447	1,0037	0,155
15,1	136,7	12,847	49,601	49,453	1,0030	0,128
20,0	115,2	10,816	49,558	49,459	1,0020	0,108
24,8	98,0	9,190	49,504	49,465	1,0008	0,092
29,4	84,3	7,894	49,438	49,471	0,9993	0,079
33,5	74,0	6,920	49,374	49,475	0,9980	0,069

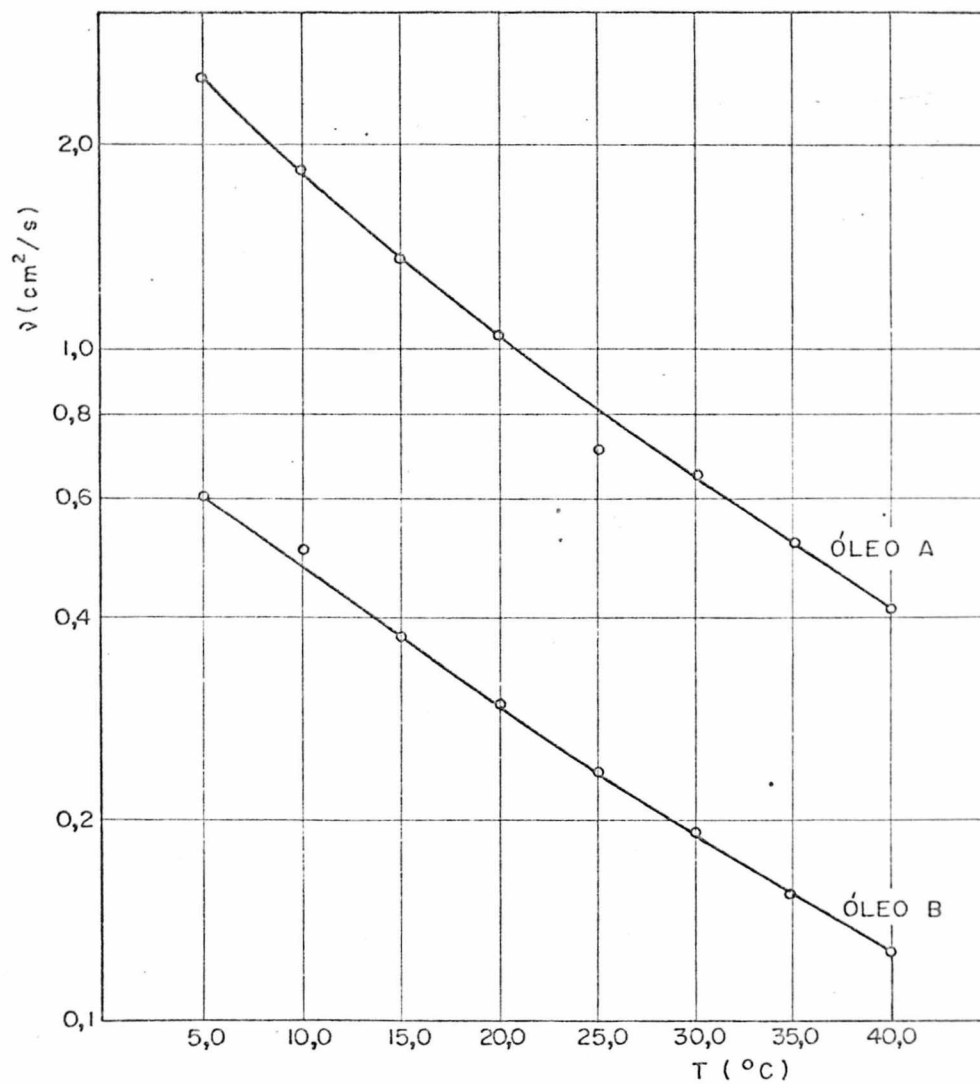


Fig. 36 - Curvas de variação da viscosidade cinemática, com a temperatura para os óleos A e B

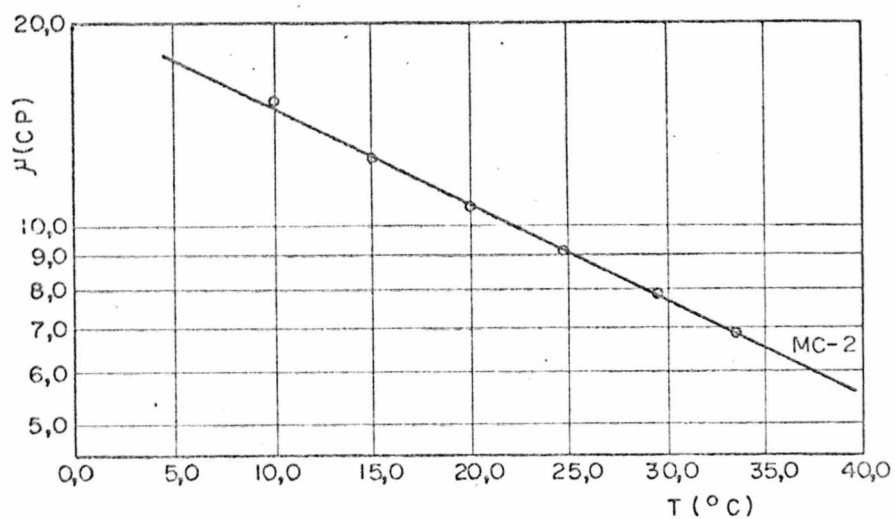


Fig. 37 - Variação da viscosidade absoluta com a temperatura para a solução de Metilcelulose a 2%

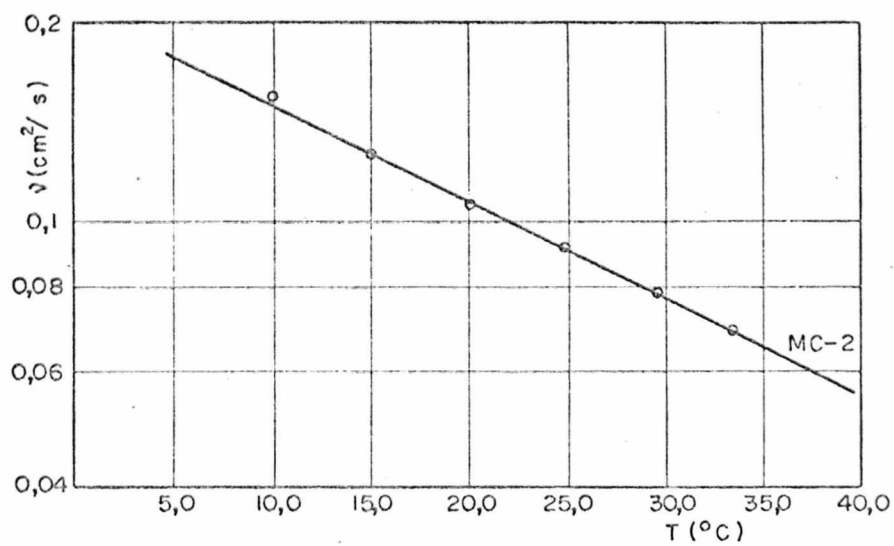


Fig. 38 - Variação da viscosidade cinemática com a temperatura para a solução de Metilcelulose a 2%

4 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL

4.1 - Processo de calibração:

A calibração do transdutor de pressões representa um dos passos mais importantes para a obtenção de perfis de velocidade confiáveis. Por este motivo, procurou-se tomar o máximo cuidado no levantamento dos dados para a curva de calibração do aparelho.

O fabricante [10] recomenda que se processe a calibração em função da deformação da membrana do transdutor, relativa à variação da pressão diferencial, segundo a expressão:

$$P_x = P_N \frac{100\mu}{S_N} \cdot \frac{A_x}{A_{100}} \quad (A4-1)$$

onde: P_N = pressão nominal do transdutor

S_N = deformação da membrana em microns à pressão nominal, conforme carta de calibração do respectivo transdutor

A_x = Indicação de escala ou voltagem de saída da ponte amplificadora à pressão P_x

A_{100} = Indicação de escala ou voltagem de saída da ponte amplificadora no valor de calibração 100 μ (microns)

No entanto, devido à inexistência da carta de calibração do transdutor, procurou-se estabelecer uma solução alternativa.

A solução encontrada envolve uma correlação entre a deflexão do indicador de escala da ponte amplificadora ligada ao transdutor e a pressão diferencial medida em um micromanômetro de tubo inclinado ligado em paralelo, através de um tubo de Pitot segundo Prandtl conectado a um túnel de vento ou equipamento similar com controle de velocidade do ar.

O esquema de montagem do conjunto de calibração é mostrado na figura 39, a seguir.

As pressões diferenciais são determinadas com base nas informações de inclinação e comprimento de deslocamento do líquido manométrico do micromanômetro, segundo a expressão:⁽¹⁶⁾

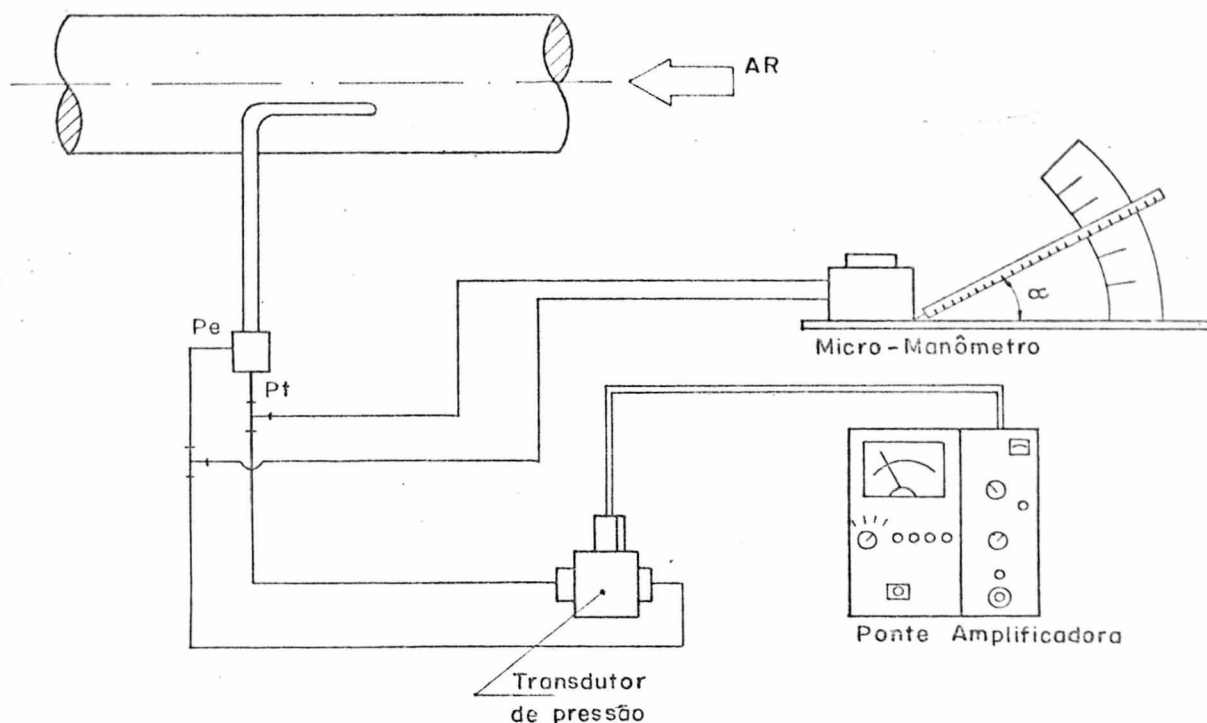


Fig. 39 = Esquema de montagem do conjunto de calibração do transdutor de pressão diferencial.

$$\Delta p = n \cdot (\rho_f - \rho) \operatorname{sen} \alpha \cdot g \quad (\text{N/m}^2) \quad (\text{A4-2})$$

ou

$$\Delta p = n \cdot (\rho_f - \rho) \operatorname{sen} \alpha \cdot g / g_n \quad (\text{kgf/m}^2) \quad (\text{A4-3})$$

onde: n = comprimento da coluna de líquido (m)

ρ_f = densidade do líquido manométrico (kg/m^3)

ρ = densidade do meio (kg/m^3)

α = ângulo de inclinação do micromanômetro

g = aceleração gravitacional local (m/s^2)

g_n = aceleração gravitacional normal = $9,80665 \text{ (m/s}^2)$

A densidade do meio pode ser desprezada, considerando que a influência do ar à baixa pressão é muito pequena.

A aceleração gravitacional local pode ser determinada em função da latitude (ϕ) e altitude (h) do local de medição, segundo a expressão:

$$g = 9,906056 - 0,025028 \cdot \cos^2 \phi - 0,000003 \cdot h \quad (\text{A4-4})$$

Assim, considerando $\phi = 27^\circ 58'$ sul e h desprezível:

$$g = 9,8865 \quad (\text{m/s}^2)$$

A densidade do líquido manométrico é - $\rho_f = 0,8 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} \text{Finalmente: } \Delta p &= 0,3148 \cdot n \quad (\text{N/m}^2) \quad \text{ou} \\ \Delta p &= 0,0324 \cdot n \quad (\text{kgf/m}^2) \end{aligned} \quad (\text{A4-5})$$

Desta maneira obtem-se um diagrama de calibração do transdutor, função da variação da pressão diferencial a várias velocidades do ar no túnel de vento, relativamente à indicação de escala para determinada sensibilidade de leitura da ponte amplificadora, indicado na Figura nº 40.

Os resultados obtidos estão tabelados abaixo, para quatro blocos de medições.

TABELA 14 - Valores de indicação de escala (I.E.) em função da variação de pressão diferencial.

n (mm)	ΔP (N/m ²)	ΔP (kgf/m ²)	I.E.	n (mm)	ΔP (N/m ²)	ΔP (kgf/m ²)	I.E.
BLOCO 1 (o)				BLOCO 2 (Δ)			
8,0	2,52	0,26	1,0	10,0	3,15	0,32	1,0
13,2	4,15	0,43	1,6	12,0	3,78	0,39	1,4
25,0	7,84	0,81	3,0	17,5	5,50	0,58	2,2
37,5	11,80	1,21	4,5	33,0	10,39	1,07	4,0
51,0	16,05	1,65	6,3	41,6	13,09	1,35	5,0
66,0	20,78	2,14	8,0	55,0	17,31	1,78	6,7
85,6	26,95	2,77	10,3	72,0	22,66	2,33	8,7
BLOCO 3 (x)				BLOCO 4 (\square)			
10,0	3,15	0,32	1,2	7,5	2,36	0,24	0,8
20,5	6,45	0,66	2,5	16,0	5,04	0,52	2,0
34,5	10,86	1,12	4,3	33,0	10,39	1,07	4,0
51,5	16,21	1,67	6,3	49,5	15,58	1,60	6,0
83,0	26,13	2,69	10,2	81,0	25,50	2,62	9,8
-	-	-	-	88,0	27,70	2,85	10,6

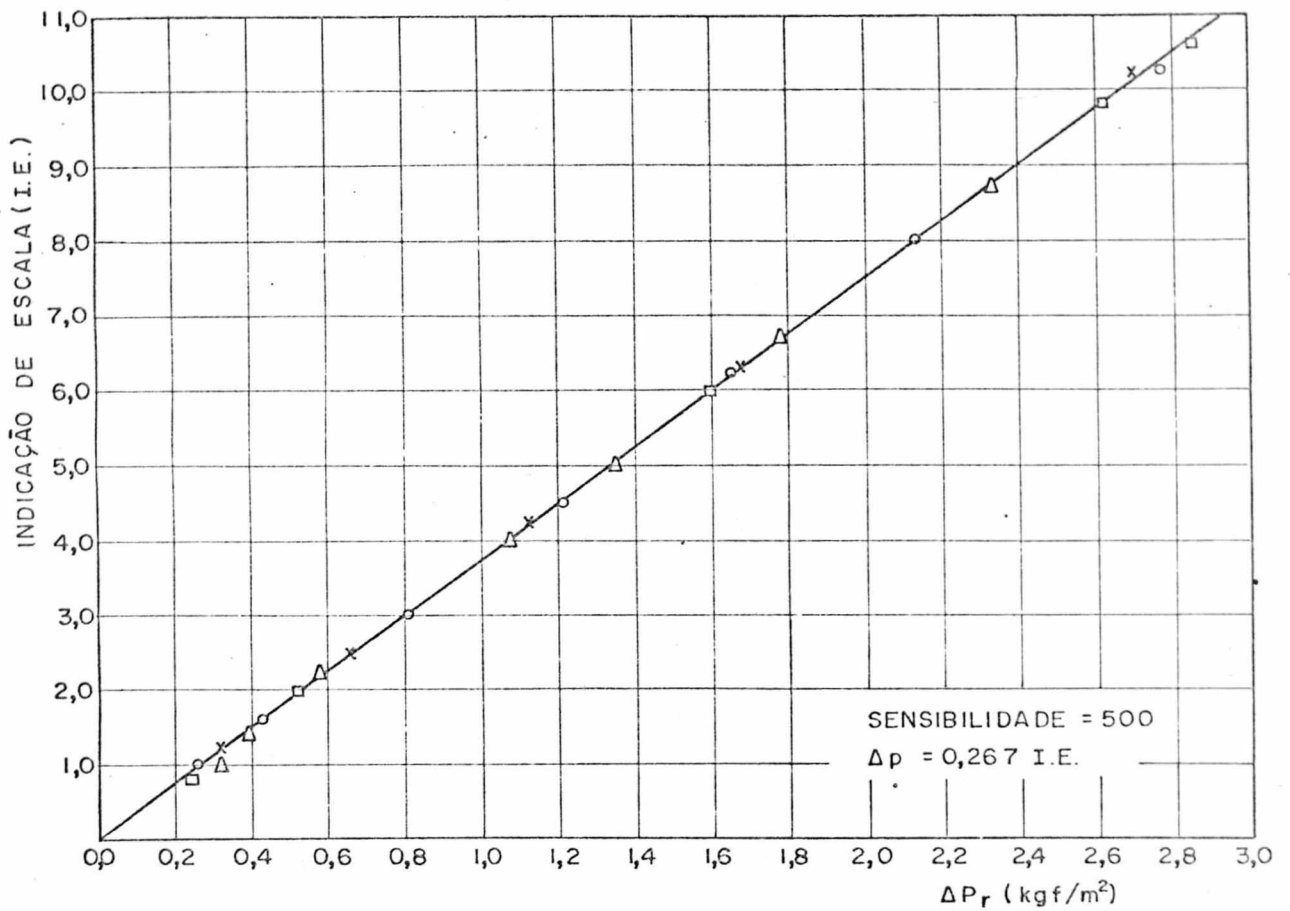


Fig. 40 = Curva de calibração do transdutor de pressão diferencial

4.2 - Equipamentos utilizados:

PONTE AMPLIFICADORA INDUTIVA - MARCA - Hottinger Baldwin
 Messtechnik GMBH - Germany
 TIPO - TVE - 01
 Indicação de escala - 0 a 20
 Resolução - 0,5
 Sensibilidade Faixa - 0 a 100000

- TRANSDUTOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL -

MARCA - Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH - Germany

TIPO - PD 1/0,01

G. N° - 13551 - F. N° - 3410

Frequência - 300 Hz

Pressão diferencial - Faixa - 0,0 a 0,01 kgf/cm²

Não linearidade <1,0%

- MICROMANÔMETRO DE TUBO INCLINADO -

MARCA - Wilh. Lambrecht KG - Gottingen

Modelo- 655

Líquido manométrico - Alcol etílico

Resolução - 0,5mm ($\alpha = 90^\circ$)

- TUBOS DE PITOT SEGUNDO PRANDTL -

MARCA - Wilh. Lambrecht KG - Gottingen

TIPO - 630b ($d_{ext} = 3,0mm$)

- DUTO DE AR COM CONTROLE DE VELOCIDADE -

Montagem da bancada de tese do Prof. Edson Bazzo.