

Marcio Alexandre Georgetti

**AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO DO FATOR DE ATRITO
PARA TUBOS DE ORIFÍCIO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para obtenção de título de
Engenheiro Mecânico.

Orientador :

Prof. Alberto Hernandez Neto

São Paulo

1997

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

INTRODUÇÃO	3
ETAPAS DE SOLUÇÃO	4
CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	4
AValiação PRELIMINAR	5
EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA	5
<i>Perda de Carga em Condutos</i>	6
<i>Perda de Carga Distribuída</i>	7
<i>Perda de Carga Singular</i>	9
<i>Mudança Brusca de seção</i>	10
<i>Coefficiente de atrito</i>	10
<i>Incertezas experimentais</i>	12
<i>Relações Matemáticas</i>	15
PRÉ-ESTUDO DAS VARIÁVEIS FÍSICAS ENVOLVIDAS	17
DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DA BANCADA E DA SEÇÃO DE TESTES	18
<i>Definição e avaliação da bomba</i>	19
<i>Definição e avaliação das junções</i>	20
<i>Definição e avaliação dos medidores de pressão</i>	20
<i>Definição e avaliação das válvulas reguladoras de vazão</i>	25
<i>Definição e avaliação da seção de testes</i>	27
<i>Definição e avaliação do medidor de vazão</i>	32
<i>Definição e avaliação do medidor de temperatura</i>	33
<i>Procedimento experimental</i>	34
AValiação DA CORRELAÇÃO PARA O FATOR DE ATRITO	35
<i>Tubo Marrom</i>	37
<i>Tubo Laranja</i>	40
<i>Tubo Vermelho</i>	43
<i>Tubo Azul</i>	46
CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXO 1 : AVALIAÇÕES PRELIMINARES	53
ANEXO 2 : TESTES DEFINITIVOS	54
TESTES TUBO MARROM	55
<i>Dados Testes 1 Tubo Marrom</i>	56
<i>Gráficos Teste 1 Tubo Marrom</i>	57
<i>Dados Teste 2 Tubo Marrom</i>	58
<i>Gráficos Teste 2 Tubo Marrom</i>	59
<i>Gráfico de Sobreposição dos Testes Tubo Marrom</i>	60
TESTES TUBO LARANJA	61
<i>Dados Testes 1 Tubo Laranja</i>	62
<i>Gráficos Teste 1 Tubo Laranja</i>	63
<i>Dados Teste 2 Tubo Laranja</i>	64
<i>Gráficos Teste 2 Tubo Laranja</i>	65
<i>Gráfico de Sobreposição dos Testes Tubo Laranja</i>	66
TESTES TUBO VERMELHO	67
<i>Dados Testes 1 Tubo Vermelho</i>	68
<i>Gráficos Teste 1 Tubo Vermelho</i>	69

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

<i>Dados Teste 2 Tubo Vermelho</i>	70
<i>Gráficos Teste 2 Tubo Vermelho</i>	71
<i>Gráfico de Sobreposição dos Testes Tubo Vermelho</i>	72
TESTES TUBO AZUL	73
<i>Dados Testes 1 Tubo Azul</i>	74
<i>Gráficos Teste 1 Tubo Azul</i>	75
<i>Dados Teste 2 Tubo Azul</i>	76
<i>Gráficos Teste 2 Tubo Azul</i>	77
<i>Gráfico de Sobreposição dos Testes Tubo Azul</i>	78
GRÁFICO DE SOBREPOSIÇÃO DE TODOS OS TUBOS	79
GRÁFICO DAS CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO	80
DIAGRAMA DE MOODY-ROUSE	81
ANEXO 3 : COTAÇÕES	82

INTRODUÇÃO

Nos sistemas de ar condicionado em automóveis, um dos dispositivos de expansão utilizados é o tubo de orifício.

Além do tubo de orifício propriamente dito, o dispositivo em questão é envolto por uma carcaça plástica, com dois o-rings, para sua vedação, e possui duas telas, uma na entrada que tem como objetivo reter impurezas e outra na saída visando diminuir o ruído causado pela passagem do fluido refrigerante através do tubo de orifício.

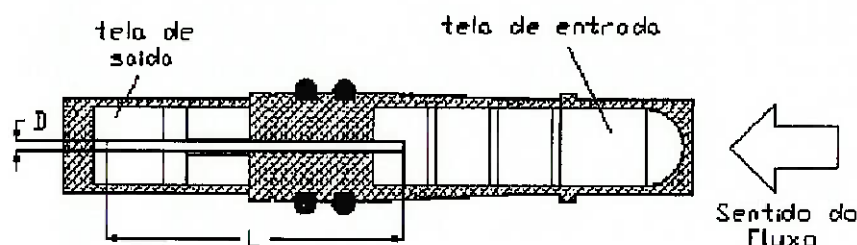


Fig.1: Corte do dispositivo

O Prof. Alberto Hernandez Neto desenvolve, como tema de Doutorado, o estudo do escoamento de fluidos refrigerantes em tubos de orifício. Uma das etapas de seu projeto, trata da determinação do fator de atrito para perda de carga distribuída em tais tubos. Em alguns testes preliminares por ele realizados, utilizando-se de nitrogênio como fluido de trabalho, observou-se que, devido a compressibilidade do nitrogênio, ocorre a bloqueio na saída do tubo de orifício, caracterizando um Escoamento de Fanno. Verificou-se também uma grande sensibilidade na avaliação do fator de atrito principalmente com relação ao diâmetro do tubo. Em tais testes, chegou-se a uma estimativa inicial para o fator de atrito que será utilizada como pré-projeto da bancada experimental, e que apresenta em média o valor $f = 0,01$.

O trabalho objetiva a determinação de uma correlação para o fator de atrito, construindo para tanto uma bancada experimental e utilizando-se água como fluido de trabalho. A tentativa inicial de utilizar-se água, visa minimizar essa grande influência do diâmetro, além de comparar com a correlação avaliada através dos testes feitos com nitrogênio e buscar uma melhor compreensão da perda de carga por atrito que ocorre nesses tubos.

ETAPAS DE SOLUÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Utilizaremos, a princípio, de uma faixa de Reynolds bastante ampla (2.000 a 100.000), para que possamos obter uma correlação para o fator de atrito para o maior campo de aplicação possível em tubos de orifício. Utilizando-se água como fluido de trabalho espera-se minimizar os efeitos de compressibilidade observados nos testes com nitrogênio, bem como diminuir a influência do diâmetro na determinação do fator de atrito. Os tubos de orifício disponíveis têm diâmetros nominais de 1,77mm (tubo azul), 1,55mm (tubo vermelho), 1,45mm (tubo laranja) e 1,22mm (tubo marrom), em que as cores citadas se referem à carcaça plástica, e todos eles têm comprimento nominal de 38,4mm. Além disso, todos os tubos têm uma incerteza decorrente de seu processo de fabricação que vale $\pm 0,008\text{mm}$ no diâmetro e $\pm 0,01\text{mm}$ no comprimento. Resumidamente temos :

Fluido de Trabalho	Água
Faixa do Número de Reynolds :	De 2.000 a 100.000
Diâmetro do tubo de orifício(\varnothing ou D) :	De 1,22mm a 1,70mm ($\pm 0,008\text{mm}$)
Comprimento do tubo (L) :	38,4mm ($\pm 0,01\text{mm}$)

AValiação PRELIMINAR

A bancada experimental nos deve fornecer condições satisfatórias para obtenção das variáveis influentes no processo, que no caso são vazão e pressão. Para tanto, pode-se utilizar de métodos indiretos, onde, através de funções matemáticas chega-se às variáveis de estudo propriamente ditas. Assim sendo, chegou-se a um pré-projeto da bancada experimental, que será melhor elaborado no decorrer do trabalho, e que determina a variável vazão indiretamente, através da massa de fluido e do tempo decorrido no teste, e a variável pressão diretamente, com medidor apropriado no próprio tubo de orifício. Um esquema básico da bancada é ilustrado a seguir :

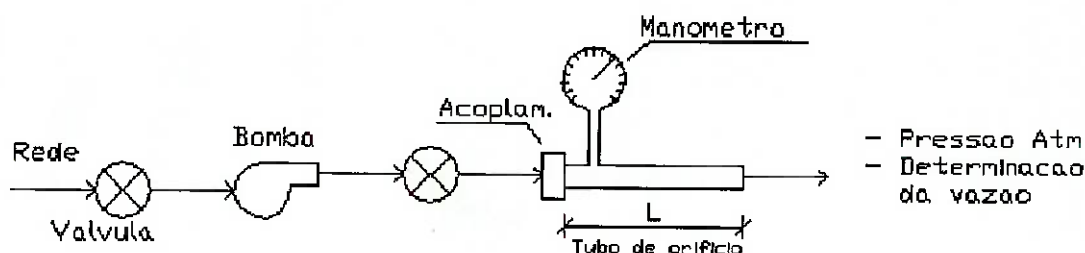


Fig. 2: Esquema simplificado da bancada experimental

EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA

O equacionamento do problema consiste, a partir de hipóteses coerentes ao modelo físico e, de teorias e equações encontradas na literatura, chegar a uma correlação matemática que representa com um razoável grau de confiabilidade o fator de atrito nas condições do problema. Assim sendo :

Perda de Carga em Condutos

Hipóteses:

- 1) *Regime Permanente;*
- 2) *Fluido Incompressível;*
- 3) *Regime dinamicamente estabelecido;*
- 4) *Propriedades uniformes em qualquer ponto do escoamento;*

Sabendo que a carga ou energia por unidade de peso de um fluido numa dada seção de um escoamento em um conduto é dada por :

$$H = \frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{P}{\gamma} + z \quad [2] \quad (\text{Eq.1})$$

Onde :

H = energia por unidade de peso;

v = Velocidade do fluido na seção;

g = Aceleração da gravidade local;

P = Pressão na seção;

γ = Peso específico do fluido;

z = Cota da seção.

Assim sendo, entre dois pontos quaisquer do escoamento, há dois tipos de perda de carga :

Perda de Carga Distribuída

São perdas devidas a efeitos de atrito viscoso em escoamentos plenamente desenvolvidos em dutos longos e de área constante.

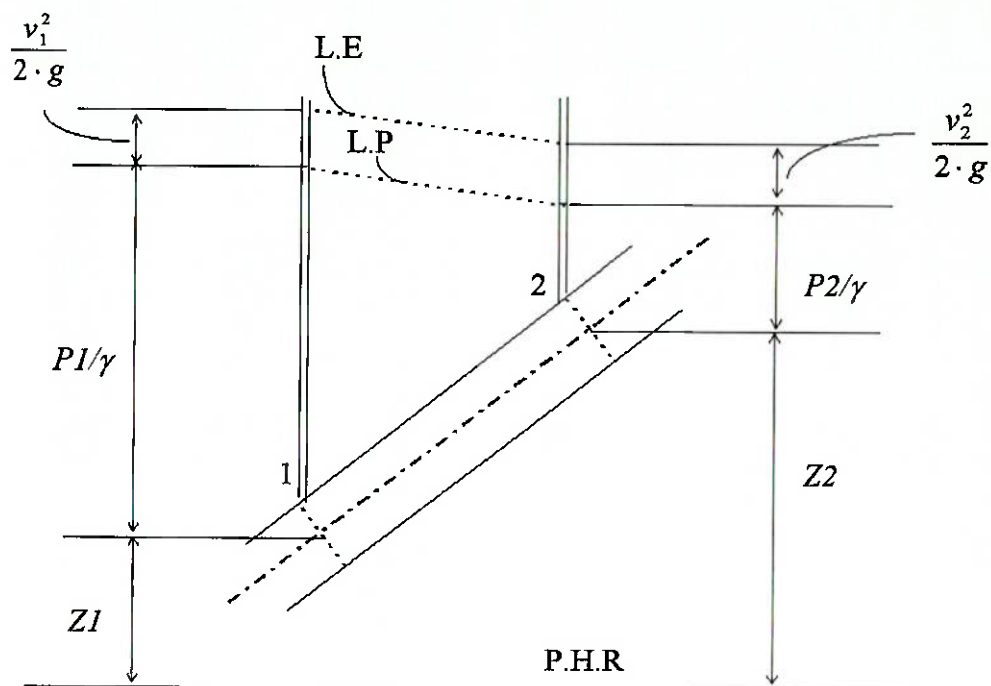


Fig. 3: Esquema para determinação da equação do fator de atrito

Onde :

L.P é a linha Piezométrica;

L.E é a linha de Energia;

P.H.R é o plano horizontal de referência.

I) Equação da Continuidade:

$$M = \rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 \text{ [2]} \quad (\text{Eq. 2})$$

Pela hipótese (4) temos que :

$$\rho_1 = \rho_2 \quad (\text{Eq.3})$$

E, admitindo-se que a área da seção transversal permanece constante, teremos:

$$v_1 = v_2 \quad (\text{Eq.4})$$

II) Equação da Energia Cinética (Eq. De Bernoulli):

$$h_f = \Delta H_{12} = \left(\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \right) \text{ [2]} \quad (\text{Eq.5})$$

Portanto para dutos horizontais , sem variação de área, teremos :

$$h_f = \Delta H_{12} = \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) \quad (\text{Eq.6})$$

III) Fórmula Universal da Perda de Carga :

A Perda de carga h_f , em unidades de pressão é dada por γh_f .

A experiência mostra que :

$$\gamma h_f = F (v, L, \rho, \mu, \varepsilon, D_h) \text{ [2]}$$

E aplicando o Teorema π , da teoria de números adimensionais, chegamos em :

$$h_f = f \left(\frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D_h} \right) \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [2] \quad (\text{Eq.7})$$

Onde f é o coeficiente de perda de carga distribuída, que é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa ε/D_h .

Perda de Carga Singular

São perdas devidas a singularidades intercaladas ao longo das instalações e se constituem de :

- Equipamentos \Rightarrow Válvulas, orifícios, bocais, venturis.
- Mudança de seção \Rightarrow Alargamentos e reduções.
- Mudança de direção \Rightarrow Cotovelos, curvas.

A perda de carga singular é dada por :

$$h_s = k_s \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde k_s é obtido experimentalmente como função do Número de Reynolds e coeficiente de forma para cada singularidade.

Algumas perdas de carga singulares que serão observadas durante o desenvolvimento do trabalho:

Mudança Brusca de seção

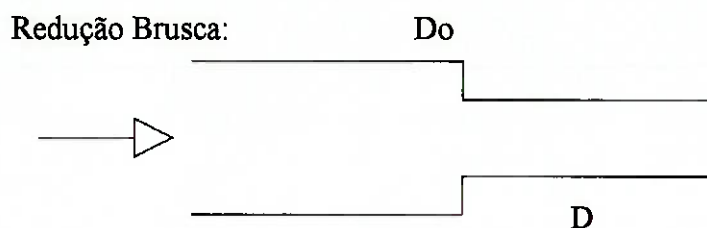


Fig. 4: Esquema da mudança de seção

Para tal situação , temos a seguinte fórmula empírica :

$$k_s = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \right] [1] \quad (\text{Eq. 9})$$

Coefficiente de atrito

O coeficiente de atrito f pode ser encontrado matematicamente para o escoamento laminar, mas não se tem nenhuma relação matemática simples para a variação de f em relação ao número de Reynolds no que diz respeito ao fluxo turbulento. Além disto, Nikuradse e outros pesquisadores determinaram que a rugosidade relativa do tubo (razão entre a grandeza entre as imperfeições superficiais e o diâmetro interno do tubo) também afeta o valor de f .

No escoamento laminar, as partículas do fluido movem-se em camadas ou lâminas segundo uma trajetória reta e paralela. A magnitude das velocidades das lâminas adjacentes não é a mesma. O escoamento laminar é regido pela lei que relaciona a tensão de cisalhamento à relação de deformação angular, isto é, o produto da viscosidade do fluido pelo gradiente velocidade. A viscosidade do fluido é dominante e assim elimina qualquer tendência às condições de turbulência. Para fluxo laminar temos:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Eq. 10})$$

Obs.: Re tem, na prática, um valor máximo de 2000 para o escoamento laminar.

No escoamento turbulento, as partículas do fluido movem-se de um modo confuso em todas as direções. É impossível traçar o movimento de uma partícula individual. Muitos pesquisadores têm conseguido equacionar o valor de f partindo dos resultados de experiências próprias e de outros.

Para tubos lisos, onde a turbulência é gerada principalmente pelas forças de inércia, f é função somente de Re, ou seja, $f = f(Re)$ e Blasius sugere que, para Re entre 3.000 e 100.000 :

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Para valores de Re até cerca de 3.000.000, a equação de Von Karman, modificada por Prandtl, é :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{f} - 0,8) \quad (\text{Eq. 12})$$

Para tubos rugosos, onde a turbulência é gerada principalmente pela rugosidade do conduto e $f = f\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$, temos :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 + 2 \cdot \log\left(\frac{D}{2 \cdot \varepsilon}\right) \quad (\text{Eq. 13})$$

Para *todos* os tubos, o Instituto de Hidráulica e muitos engenheiros consideram a equação de Colebrook aplicável ao cálculo de f . Esta equação é :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left[\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}} \right] \quad (\text{Eq. 14})$$

Incertezas experimentais

As grandezas físicas são determinadas experimentalmente, por medidas ou combinações de medidas que tem uma incerteza intrínseca que vem das características dos aparelhos usados na sua determinação. Quando fazemos a medida de uma grandeza física achamos um número que a caracteriza e com a confiança que este número representa a mesma.

Geralmente, ocorrem erros de vários tipos em uma mesma medida. Estes podem ser de natureza estatística ou sistemática. Erros estatísticos resultam de variações aleatórias no valor de uma grandeza , devido a fatores que não podem ou, por qualquer motivo, não são controlados. Seus efeitos podem ser minimizados através da repetição das medidas, uma vez que o valor médio de um grande número de medidas tem um erro estatístico menor. Erros sistemáticos podem ser: *instrumentais*, devido a erros na calibração do aparelho de medição; *teóricos*, resultantes de aproximações de fórmulas teóricas ou de constantes físicas utilizadas; *ambientais*, relativos a fatores de fatores ambientes, como temperatura e pressão; *observacionais*, devido a falhas de procedimento do observador.

O procedimento básico para estimar a incerteza estatística consiste em repetir medidas. A partir de n resultados x_1, x_2, \dots, x_n de medidas idênticas, pode-se obter o valor médio \bar{x} e o desvio padrão na medida σ_m , que é a incerteza estatística em \bar{x} . O valor médio é dado por :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{Eq. 15})$$

O desvio padrão, que é o desvio que afeta em média cada uma das medidas é dado por :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{Eq. 16})$$

O desvio na média, que afeta a média das medidas é dado por :

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 17})$$

Este procedimento é válido para uma medição direta. No caso de medições indiretas, onde uma grandeza w é função de outras grandezas x, y, z, \dots são completamente independentes entre si, o erro padrão, em alguns casos simples, é dado por :

$$w = x \pm y \pm z \pm \dots \Rightarrow \sigma_w^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \dots \quad (\text{Eq. 18})$$

$$w = a \cdot x \cdot y \text{ (ou)} w = \frac{a \cdot x}{y} \Rightarrow \left(\frac{\sigma_w}{w}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 \quad (\text{Eq. 19})$$

$$w = a \cdot x^p \cdot y^q \Rightarrow \left(\frac{\sigma_w}{w}\right)^2 = \left(p \frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(q \frac{\sigma_y}{y}\right)^2 \quad (\text{Eq. 20})$$

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

Em nosso experimento, devemos analisar a seguinte equação :

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Eq. 21})$$

Sabendo que :

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$Q = \frac{M}{t \cdot \rho} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (\text{Eq. 24})$$

onde :

Q = vazão;

M = massa de água;

t = tempo decorrido.

Reorganizando, chegamos em :

$$f = \frac{\rho \cdot \pi^2 \cdot D^5 \cdot t^2 \cdot \Delta P}{8 \cdot L \cdot M^2} \quad (\text{Eq. 25})$$

Considerando-se a densidade constante, chegamos na seguinte equação de propagação de erros :

$$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(5 \cdot \frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\sigma_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(-1 \cdot \frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(-2 \cdot \frac{\sigma_M}{M}\right)^2 \quad (\text{Eq. 26})$$

Relações Matemáticas

A seguir serão agrupadas, de modo a facilitar observações matemáticas futuras, as principais relações envolvendo as variáveis do problema, variáveis estas fundamentais na determinação do fator de atrito e do erro a ele relacionado :

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$f = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log(\text{Re} \cdot \sqrt{f} - 0,8) \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 + 2 \cdot \log\left(\frac{D}{2 \cdot \varepsilon}\right) \quad (\text{Eq. 13})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left[\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{f}}\right] \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (\text{Eq. 21})$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$f = \frac{\rho \cdot \pi^2 \cdot D^5 \cdot t^2 \cdot \Delta P}{8 \cdot L \cdot M^2} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$\left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 = \left(5 \cdot \frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(2 \cdot \frac{\sigma_t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2 + \left(-1 \cdot \frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(-2 \cdot \frac{\sigma_M}{M}\right)^2 \quad (\text{Eq. 26})$$

$$\Delta P_s = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{D}{D_0}\right)^2\right] \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$v = \text{Re} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{1}{D} \quad (\text{Eq. 28})$$

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_s + \Delta P \quad (\text{Eq. 29})$$

Onde :

ΔP é a perda de pressão no tubo de orifício;

ΔP_s é a perda de pressão local devido a variação da seção de entrada do fluido;

v é a velocidade do fluido no tubo de orifício;

Re é o n° de Reynolds;

f é o fator de perda de carga distribuída;

Q é a vazão;

A é a área da seção;

D_o é o diâmetro do tubo que contém o dispositivo;

D é o diâmetro do tubo de orifício;

μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido;

ρ é a densidade do fluido;

γ é o peso específico do fluido;

ϵ é a rugosidade do tubo de orifício;

D_h é o diâmetro hidráulico, que para cilindros é o próprio D ;

t é o tempo decorrido no teste;

M é a massa de água;

L é o comprimento do tubo de orifício;

σ_i é o desvio padrão associado à variável i .

PRÉ-ESTUDO DAS VARIÁVEIS FÍSICAS ENVOLVIDAS

Para que a construção da bancada não fosse feita aleatoriamente, foi feito um estudo das principais variáveis físicas envolvidas no processo.

Este estudo nos possibilitou a seleção da bomba, dos acoplamentos, da seção de testes propriamente dita e de todas as variáveis envolvidas. Sem este, se tornaria impossível a escolha da “solução ótima”.

Para tal estudo foi adotado um valor para o fator de atrito, chegando-se assim, a alguns valores de pressão e perda de carga, de acordo com as variáveis do problema. Fazendo-se uso dos estudos preliminares desenvolvidos pelo professor Alberto Hernandez Neto, realizados com nitrogênio, onde $f \cong 0.01$ e de relações fundamentais da Mecânica dos Fluidos, obteve-se as planilhas de cálculos do **Anexo 1**, planilhas estas elaboradas para os casos limítrofes de diâmetro do tubo de orifício, ou seja, para $D = 1,22\text{mm}$ e para $D = 1,70\text{ mm}$. Nestas planilhas foram feitas simulações de como se comportariam as variáveis a serem medidas durante o experimento, fixando-se o fator de atrito e variando o número de Reynolds no intervalo de 2.000 a 100.000, e observando-se também as parcelas de influência de cada variável. Com tal procedimento pudemos estimar os intervalos de variação de cada variável, facilitando assim a seleção de medidores e a construção da bancada propriamente dita. A análise dos intervalos de variação de cada variável sobre o fator de atrito nos forneceu uma visão crítica de quais variáveis receberiam atenção especial durante todo experimento.

Fazendo agora um paralelo com as planilhas do **Anexo 1**, observamos os seguintes fatos principais :

- a) O fator de atrito se mostra muito influenciado pelo diâmetro do tubo de orifício, principalmente para número de Reynolds superior a 5.000. Nestes casos, a contribuição do diâmetro na determinação do desvio padrão do fator de atrito é superior a 95 %, fato que o coloca como a variável crítica no processo, merecendo portanto análise e considerações especiais no decorrer do trabalho.

- b) Para número de Reynolds inferior a 5.000 observa-se grande influência da variável pressão na determinação do fator de atrito, sendo responsável nesses casos por mais de 50% do erro relacionado ao fator de atrito. Portanto, a variável pressão torna-se a segunda variável crítica no processo e também será melhor abordada e tratada no decorrer do trabalho.
- c) As outras variáveis envolvidas (tempo, massa e comprimento do tubo) apresentam uma influência muito pequena em relação as anteriores e, portanto, serão abordadas e analisadas segundo suas importâncias e, em função principalmente de custo, adotou-se medidores menos precisos para tais variáveis.

DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DA BANCADA E DA SEÇÃO DE TESTES

Após diversas considerações iniciais e análises das situações envolvidas, nos deparamos agora com a construção da bancada e da seção de testes propriamente ditas e, como já foi dito anteriormente, estas terão a seguinte configuração básica :

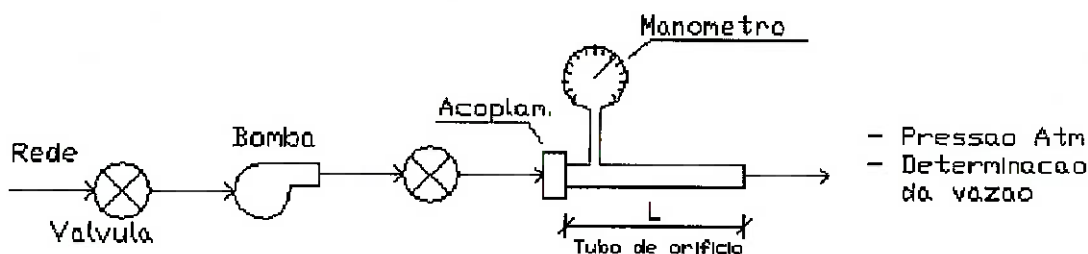


Fig. 2: Esquema simplificado da bancada experimental

Assim sendo, subdividiremos a construção da bancada experimental segundo os itens a saber :

Definição e avaliação da bomba

■ Definição :

Ao analisarmos as planilhas de cálculos do **Anexo 1**, notamos que, em situações limites, teremos um gradiente de pressão de aproximadamente $230 \text{ mH}_2\text{O}$ e vazões da ordem de 10 l/min . Portanto, a princípio, necessitaríamos de uma bomba que nos fornecesse cerca de $250 \text{ mH}_2\text{O}$ e cerca de 12 l/min , dados estes com uma pequena margem de segurança. Porém, para tal gradiente de pressão, teríamos dificuldades de vedação em junções e na própria seção de testes e seríamos impossibilitados de utilizar mangueiras como acoplamento, sem contar o alto custo proveniente da aquisição de tal bomba.

Foi feita uma consulta junto ao Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP quanto a disponibilidade de uma bomba que se adequasse ao nosso problema e, nos foi cedida uma, que segundo alguns testes preliminares, fornece cerca de $80 \text{ mH}_2\text{O}$ para cerca de 20 l/min . Portanto, a princípio, esta bomba será utilizada na construção da bancada de testes. Para efeito de segurança, foram feitas também algumas cotações de bombas no mercado, cotações estas mostradas no **Anexo 2**.

Portanto, devido a limitação da bomba, estaremos em uma faixa de trabalho menor do que a desejada. Trabalharemos então numa faixa de número de Reynolds de 2.000 a 50.000 , com gradientes de pressão em torno de $60 \text{ mH}_2\text{O}$.

■ Avaliação:

A bomba pré-selecionada portou-se muito bem durante todo o experimento, fornecendo pressão e vazão satisfatórias para nosso intento, a não ser por um pequeno vazamento interno que em nada prejudicou a realização dos testes.

Definição e avaliação das junções

■ Definição :

As conexões foram feitas basicamente de mangueiras e fixadas com abraçadeiras e foram utilizados tubos de metal na seção de testes. A utilização de tais junções e conexões se deu principalmente devido ao fácil manuseio e baixo custo, além de se comportarem muito bem para a faixa de trabalho do experimento.

■ Avaliação :

As conexões entre mangueiras e entre mangueiras e tubos foram um dos pontos a apresentarem vazamentos. Tentou-se, nesses casos, a utilização de vedantes que em muitas vezes diminuíram consideravelmente os focos de vazamentos, mas não os extinguiram por completo.

Os vazamentos entre junções não foram determinantes nas tomadas de dados, e por certo, em pouco influíram nos resultados finais, valendo entretanto, a citação do fato.

Definição e avaliação dos medidores de pressão

■ Definição:

Para a determinação da pressão na entrada do tubo de orifício, poder-se-á utilizar de transdutor de pressão, de manômetros de precisão ou ainda de coluna de mercúrio.

O medidor a ser utilizado nessa etapa deverá fornecer grande precisão de dados, para que as incertezas envolvidas no processo não prejudiquem o resultado final.

Foi feita nova consulta ao Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP quanto a disponibilidade de algum medidor adequado ao nosso experimento, e conseguimos a liberação de uma coluna de 2m de mercúrio, com precisão de 1mm. Uma coluna de mercúrio mede uma pressão relativa entre dois pontos distintos, que no caso será traduzida pelo gradiente de pressão observado entre um ponto qualquer do tubo de orifício e a pressão atmosférica.

A princípio, nos utilizaremos de tal coluna, mas para efeito de segurança foram feitas novas cotações de medidores junto ao mercado. Estas cotações estão no **Anexo 2**.

■ *Avaliação:*

Foi dito anteriormente que utilizaríamos apenas um medidor de pressão, e que este seria posicionado em um ponto qualquer do tubo de orifício, e que assim, com o diferencial de pressão, seria obtido o fator de atrito associado ao escoamento. Entretanto, após algumas reflexões, viu-se a utilidade da adoção de outro medidor de pressão pouco antes da entrada do tubo de orifício, e com isso, conseguir avaliar a perda de carga singular observada na mudança (redução) brusca de seção. Para tanto, utilizou-se de um medidor de pressão analógico, com mostrador em bar e escala mínima de 0,25 bar. Tal equipamento não apresenta boa precisão, e os erros a ele associados serão levados em conta na determinação do resultado final.

O medidor utilizado na determinação do gradiente de pressão no tubo de orifício propriamente dito foi a coluna de mercúrio previamente selecionada, de 2m de coluna de Hg, e com precisão de 1 mm de Hg. Tal medidor se mostrou, ao longo do experimento, o principal gerador de erros e de imprecisões.

O maior problema encontrado no entanto, foi a falta de praticidade da coluna de mercúrio e alguns transtornos a ela relacionados. A princípio, utilizou-se a coluna diretamente associada ao ponto de tomada de pressão, com as mangueiras de conexão tubo de orifício - coluna de mercúrio preenchidas com ar. Nos primeiros testes tudo

correu bem, até que a água proveniente do escoamento começou a subir pela conexão duto-coluna, acarretando em tomadas de pressão absurdas, totalmente fora da realidade do escoamento. Possivelmente, a compressibilidade do ar, associada aos vazamentos anteriormente citados e a coexistência de água e ar nas mangueiras da coluna de mercúrio prejudicaram as tomadas de pressão. Tentou-se então preencher as mangueiras e a coluna de mercúrio com água, evitando assim o efeito da compressibilidade do ar. Tal medida em nada contribuiu para que obtivéssemos dados de pressão satisfatórios, já que, se anteriormente entrava água nas mangueiras da coluna, agora passou a entrar ar, repetindo assim a situação anterior e obtendo-se portanto dados incompatíveis com a realidade física. Houveram situações, a título de ilustração, em que o valor esperado de pressão relativa no ponto do tubo de orifício era 100 mm de Hg enquanto que o aferido era de -20 mm de Hg, portanto, uma situação de depressão totalmente irreal, e que acarretaria um escoamento em sentido inverso ao observado. Assim sendo, para que pudéssemos alcançar os resultados vistos neste trabalho, tivemos que repetir os experimentos por diversas vezes e usar de bom senso para que pudéssemos descartar aqueles resultados que fossem absurdos e que não representassem o escoamento. A situação se tornou melhor quando a tomada de pressão passou a ser feita na vertical, (anteriormente esta tomada era feita na horizontal, contribuindo assim com o acúmulo de água na mangueira e prejudicando sensivelmente as tomadas de pressões) diminuindo assim a formação de bolsas de água na mangueira e, conseqüentemente, de zonas de depressão. Uma melhor solução para este problema seria a aquisição de transdutores de pressão, o que encareceria em muito o projeto original.

Com o decorrer do trabalho percebeu-se também que a coluna de mercúrio não possui acurácia necessária para medir o gradiente de pressão quando o escoamento é laminar ($Re < 2.000$). Assim sendo, foi feita nova consulta ao Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP quanto a disponibilidade de algum medidor adequado ao nosso experimento, e , conseguimos assim uma coluna inclinada de água, de 50 cm e com precisão de 1mm de coluna de H_2O . Tal coluna apresentou os mesmos problemas

observados na coluna de Hg, ou seja, a água proveniente do escoamento subia pelas mangueiras de conexão causando algumas medidas irreais, que foram descartadas da mesma maneira que as anteriores.

Ao analisarmos agora o manômetro analógico, percebemos sua baixa precisão, prejudicando assim a análise da correlação que associa a perda de carga singular com a variação brusca de diâmetro :

$$k_s = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \right] [1] \quad (\text{Eq. 9})$$

Tal problema poderia ser facilmente contornado com a aquisição de um manômetro mais preciso, o que encareceria o projeto. Esta medição no entanto não se mostrava prioritária, pois em nada prejudicava a determinação do fator de atrito, objetivo maior do trabalho. Seu único intuito era de avaliar a correlação empírica da perda de carga singular, sendo pra tanto de suficiente valia.

Um dos maiores problemas encontrados na construção da bancada e na tomada de dados foi como fazer a tomada de pressão no tubo de orifício de maneira eficaz. A dificuldade de se trabalhar com o diâmetro reduzido do tubo, com paredes finas, prejudicou sensivelmente as tomadas de dados.

A princípio, tentou-se a união do tubo de orifício propriamente dito com o duto associado à coluna de mercúrio através de solda quente. Esta solução foi rapidamente descartada devido a possíveis danos à parede do tubo, prejudicando inclusive o escoamento.

Uma segunda solução seria o uso de solda fria, com massa plástica. Um dos cuidados a tomar, é não bloquear o furo de 0,3mm (feito com broca especial e com o intuito de tomada de pressão local) no tubo de orifício, além de garantir a ausência de vazamentos. A dificuldade desse processo é enorme, pois têm-se que manter os tubos de orifício perpendicularmente em relação à conexão associada à coluna de mercúrio, manter um fio de arame no furo, a fim de evitar entupimento, espalhar massa plástica

uniformemente, a fim de evitar vazamentos, e manter os tubos imóveis até a perfeita secagem da solda fria. A figura abaixo mostra esquematicamente a união :



Fig. 5: Esquema de tomada de pressão

A solução acima descrita foi utilizada nas primeiras tomadas de dados e mostrou-se inadequada, tanto pela dificuldade de manuseio e construção, tanto pela funcionalidade, já que em muitas vezes houveram vazamentos que prejudicavam as tomadas de pressão. Todos os dados obtidos com tal configuração foram descartados.

Uma terceira solução, e aquela efetivamente utilizada é esquematizada abaixo :

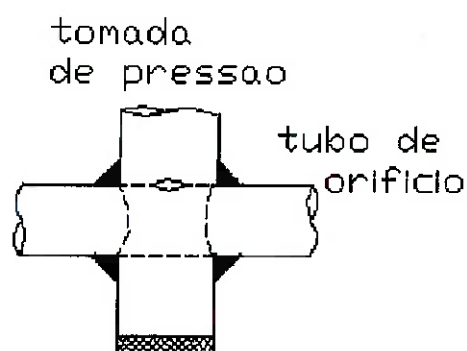


Fig. 6 : Esquema de tomada de pressão utilizada na bancada

Nesta configuração utilizamos um tubo de cobre com um furo de aproximadamente 2mm de diâmetro por onde passamos o tubo de orifício e, através de solda fria, fazemos a junção. A parte inferior do tubo de cobre foi amassada e soldada a fim de evitar vazamentos. A facilidade de construção e ausência de vazamentos são as principais virtudes de tal configuração.

Definição e avaliação das válvulas reguladoras de vazão

■ Definição:

Na seção anterior à bomba será utilizada uma válvula de gaveta simples (válvula 1), e sua função será de bloqueio do fluxo para montagem e/ou manutenção de algum elemento da bancada.

Já a segunda válvula (válvula 2), tem função reguladora. É ela quem vai controlar a vazão através do tubo de orifício, portanto, precisa ter um ajuste fino de vazão, sem grandes flutuações. Para esta função, foi selecionada uma válvula agulha de 3/8".

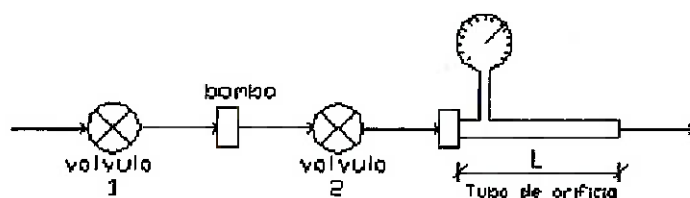


Fig. 7: Esquema teórico das válvulas reguladoras de vazão

■ Avaliação :

As válvulas reguladoras de vazão pré-selecionadas (uma válvula gaveta e uma válvula agulha) foram substituídas por duas válvulas de gaveta. Tal modificação se deu principalmente por :

- Válvula de gaveta tem custo muito menor que a válvula agulha;
- O ajuste fino representado pela válvula agulha não se fez tão fundamental quanto se era esperado, podendo a válvula gaveta substituí-la sem grandes perdas ao conjunto.

Outra mudança com relação as válvulas se deu em sua posição no circuito. A princípio, teria-se uma válvula gaveta antes da bomba e uma válvula agulha após a mesma. No entanto, percebeu-se a inutilidade de uma válvula antes da bomba, já que este ajuste de vazão poderia ser feito pela própria válvula que controla a alimentação via rede.

De acordo com tais observações, o arranjo definitivo foi o seguinte :

- Duas válvulas reguladoras de vazão do tipo gaveta;
- Ambas dispostas após a bomba da seguinte maneira :

O fluido de trabalho sai da bomba, percorre um trecho de cerca de 1m através de mangueira e encontra uma conexão do tipo T. Em cada uma das saídas da conexão são dispostas as válvulas reguladoras de vazão do tipo gaveta, onde uma delas monitora a vazão a ser dispensada e a outra monitora a vazão a ser utilizada pela seção de testes propriamente dita.

Tal configuração foi adotada principalmente para alívio do pico de pressão observado na partida da bomba. Para evitarmos que tal pico prejudique qualquer componente da bancada, a partida da bomba é dada com a válvula que regula a vazão a ser utilizada pela seção de testes totalmente fechada e a válvula que regula a vazão a ser jogada pra fora do sistema (esta válvula atua como uma válvula de alívio) totalmente aberta.

Após a partida e com uma regulação dessas válvulas , pode-se fixar a vazão e a pressão a ser fornecida na entrada da seção de testes.

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

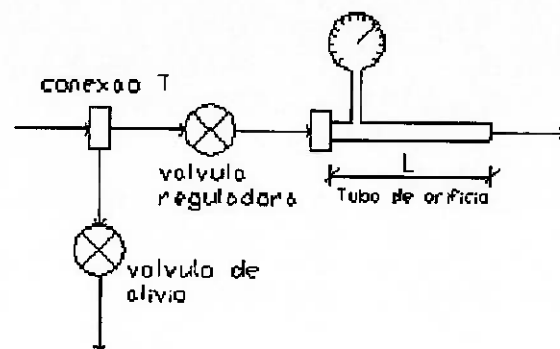


Fig. 8: Esquema da disposição das válvulas na bancada experimental

Definição e avaliação da seção de testes

■ **Definição:**

A seleção da seção de testes foi feita a partir de três possíveis soluções que serão apresentadas agora :

- Solução 1 :

A solução 1 consiste em retirarmos praticamente toda a carcaça plástica do dispositivo, mantendo somente a parte que contém os 2 anéis de vedação, segundo a figura 3

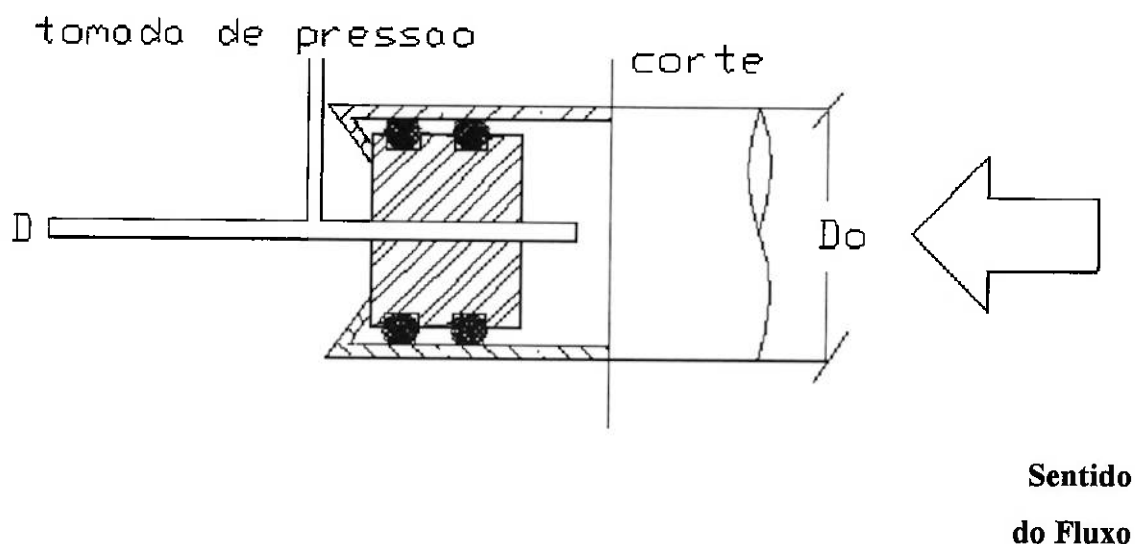


Fig. 9: Corte da solução 1

Em tal solução, o dispositivo seria colocado pelo lado direito da figura, e seria fixado pela própria ação do fluido sob pressão, comprimindo-o contra a parede dobrada do tubo externo, que a princípio seria de cobre. A vedação de tal acoplamento seria feita pelos próprios anéis de vedação do dispositivo.

Percebemos nessa solução a facilidade de montagem e vedação, porém, a determinação do fator de atrito será feita para um comprimento menor que os 38,4mm originais do tubo de orifício. A princípio, isto pode ser feito, pois a perda de pressão é diretamente proporcional ao comprimento, como já foi mostrado anteriormente.

- Solução 2

A solução 2 é de certa forma análoga à solução 1. A única diferença observada em tal solução, é que ao invés de deixarmos dois anéis de vedação deixamos apenas 1, o que pode comprometer a vedação, mas com vantagem na determinação do fator de atrito, pois teremos um comprimento menor que os 34,8mm originais, mas maior que o da solução anterior. Este aumento no comprimento proporcionará uma diminuição no cálculo da incerteza relativa a essa grandeza, $(\frac{\partial E}{\partial L})$ diminuindo, consequentemente, a incerteza total na determinação da correlação para o fator de atrito.

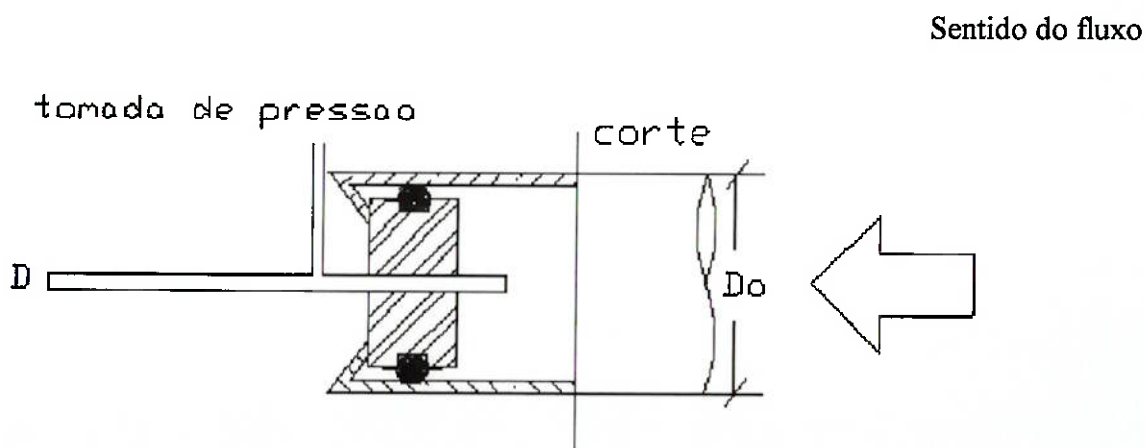


Fig. 10: Corte da Solução 2

Nessa solução a montagem será idêntica à solução anterior.

- Solução 3 :

A Solução 3 consiste na retirada de toda a carcaça do dispositivo, deixando somente o tubo de orifício.

Consiste também na construção de uma flange que seria soldada ao tubo e fixada ao tubo de cobre externo por meio de parafusos.

Nessa solução teríamos uma boa vedação e um comprimento de trabalho no tubo de orifício muito próximo dos 38,4 mm originais, mas, diferentemente das outras duas soluções, seria de difícil montagem, além da difícil usinagem da flange com uma tomada de pressão, sendo porém uma solução mais elaborada que as anteriores.

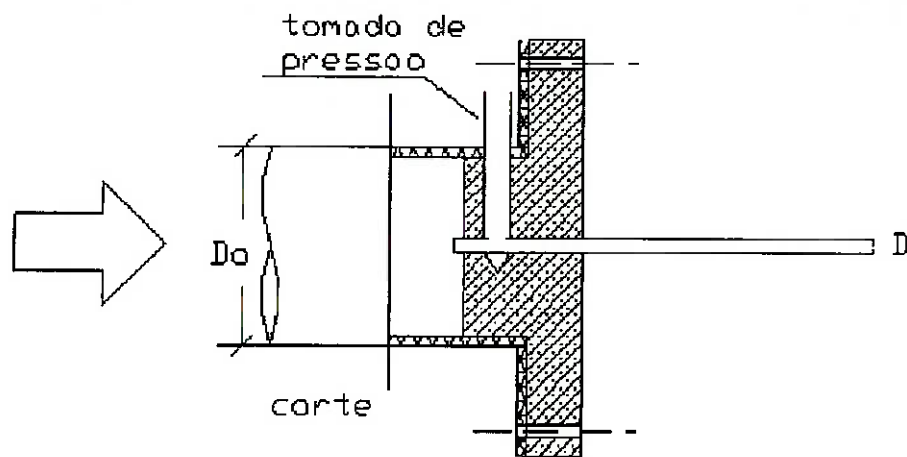


Fig. 11: Corte da solução 3

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> -Simples montagem; -Vedação garantida; -Baixo custo; -Simples execução. 	<ul style="list-style-type: none"> -Simples montagem; -Baixo Custo; -Simples execução; -Comprimento L do tubo original pouco alterado; 	<ul style="list-style-type: none"> -Praticamente nenhum comprometimento com comprimento L original. -Mais elaborada.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> -Diminuição do comprimento original do tubo; -Aumento do erro percentual relativo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Não há certeza sobre a vedação. 	<ul style="list-style-type: none"> -Necessidade de construção de uma matriz de teste para cada diâmetro a ser analisado; -Dificuldade de montagem; -Não há certeza sobre vedação.

A princípio, foi adotada a solução 1, que como será abordado no decorrer do trabalho, teve algumas alterações no sentido de facilitar o manuseio da seção de testes.

■ **Avaliação :**

A seção de testes definitiva difere daquelas pré-determinadas segundo o desenho a seguir :

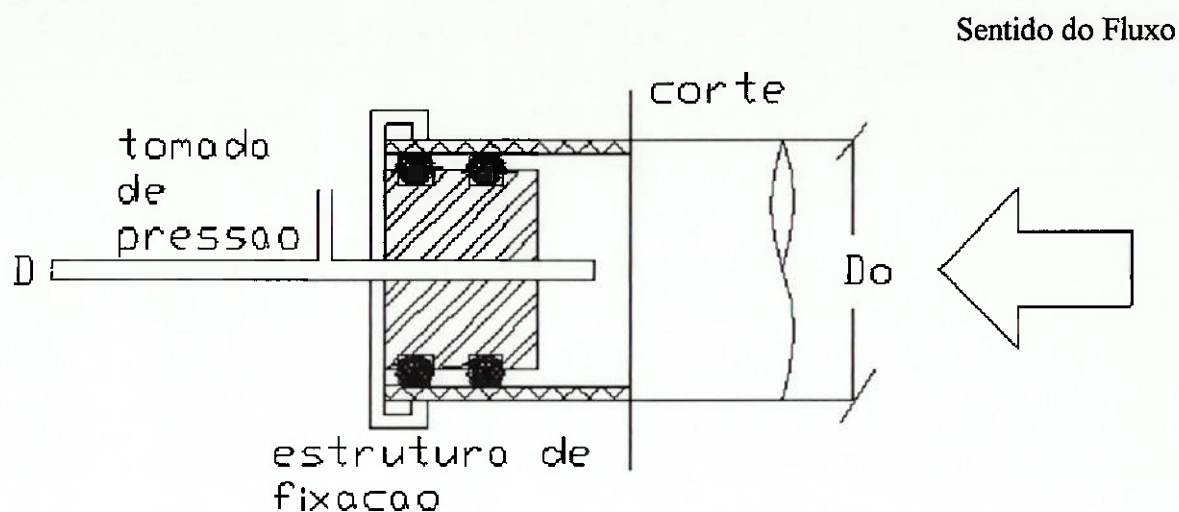


Fig. 12: Corte da Seção Definitiva

A seção de testes definitiva mostra uma praticidade muito maior ao ser comparada com as anteriores, principalmente por ser de fácil montagem e desmontagem, fator este fundamental devido aos diversos tubos de orifício a serem testados.

A estrutura de fixação do tubo de orifício consiste em um anel bipartido mostrado na figura a seguir, além de uma abraçadeira, que sustenta-o na seção de testes.

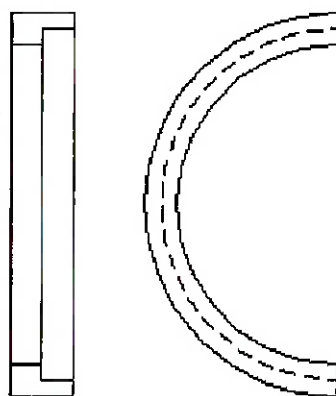


Fig. 13: Vistas do dispositivo de fixação

Os vazamentos encontrados na seção de testes, diferentemente dos encontrados nas junções, requerem um pouco mais de cuidado na avaliação. Devido às dimensões reduzidas do tubo de orifício, qualquer operação simples se torna complicada, além é claro da alta pressão envolvida.

No dispositivo de fixação ilustrado na figura acima, frequentemente a abraçadeira que o sustentava não suportava a pressão de trabalho, ocorrendo vazamentos entre a parte plástica do tubo de orifício, a estrutura de fixação e o tubo de metal que o continha.

Tal vazamento é mais preocupante que o anterior, não nas tomadas de dados em si, fato que em que pouco influenciou, mas sim devido ao constante perigo de escapar a estrutura de fixação, e por conseguinte, o tubo de orifício, colocando por perder as tomadas até então feitas.

Definição e avaliação do medidor de vazão

■ Definição :

A determinação da vazão será feita com o auxílio de um tanque, com capacidade para cerca de 120 l, uma balança e um cronômetro. Com a massa de água passada pela seção de testes, tempo decorrido para tanto e o valor da densidade do fluido, podemos facilmente determinar a vazão.

Seguimos o mesmo procedimento para baixos Re , com exceção da balança, que neste caso foi uma balança digital Filizola, com capacidade para 10 Kg e com precisão de ± 0.001 Kg.

Esse método poderá ser usado sem grandes prejuízos ao experimento, devido a pequena vazão envolvida.

■ **Avaliação :**

De acordo com o que foi previsto anteriormente, a determinação da vazão não trouxe grandes prejuízos para a determinação do fator de atrito e, apesar do método ser um tanto quanto primitivo, ele pôde ser utilizado de maneira satisfatória.

Definição e avaliação do medidor de temperatura

■ **Definição :**

A princípio, não houve preocupação com possíveis flutuações de temperatura durante o escoamento e que pudessem vir a influenciar a densidade da água no processo. Com o decorrer do trabalho, introduziu-se um termopar imediatamente antes da seção de testes e avaliou-se assim a variável densidade durante o escoamento.

■ **Avaliação :**

Com o intuito de se avaliar a variação de temperatura no escoamento, foi introduzido na bancada experimental um termopar, avaliando-se assim se haveriam variações significativas de densidade do fluido de trabalho. Entretanto, observou-se que, para uma larga faixa do número de Reynolds, a temperatura se mantinha praticamente constante e muito próxima da temperatura ambiente. Por isso avaliou-se a densidade do fluido no tubo de orifício na temperatura ambiente, considerando-a constante ao longo do escoamento.

Procedimento experimental

Após montarmos a bancada, fixamos o tubo de orifício na seção de testes e, com o auxílio de massa plástica, vedamos todas as possíveis fontes de vazamento, como por exemplo, a junção da mangueira da coluna de mercúrio com a seção de testes, foi adotado o seguinte procedimento experimental:

- a) Abrir toda a válvula que funciona como escape;
- b) Fechar toda a válvula que alimenta a seção de testes;
- c) Fornecer água ao circuito;
- d) Regular as válvulas adequadamente de modo a garantir uma determinada vazão na seção de testes;
- e) Após tal regulagem, determina-se uma referência na balança e parte-se o cronômetro;
- f) Espera-se cerca de 2 min até que a coluna de mercúrio se estabilize e mede-se a pressão na entrada do tubo de orifício (manômetro) e a pressão num ponto determinado do tubo de orifício (coluna de mercúrio);
- g) Espera-se entre 8 e 15 min, e determina-se o diferencial de massa associado ao tempo decorrido, tendo-se assim uma boa aproximação para a vazão;
- h) Varia-se a regulagem das válvulas, de modo a se obter outro número de Reynolds associado ao escoamento, e repete-se os itens de e) a g);
- i) Ao conseguirmos a vazão máxima, ou seja, toda alimentação vai pra seção de testes, liga-se a bomba e repete-se os itens de b) a h);
- j) Após fazermos os testes numa determinada e apropriada faixa de número de Reynolds, troca-se o tubo de orifício e repete-se os itens de a) a i), fechando-se assim um ciclo.

AValiação da Correlação para o Fator de Atrito

Após todas essas considerações e de posse da planilha com os testes definitivos, estamos aptos a discutir a correlação obtida para o fator de atrito. Apesar de utilizarmos água como fluido de trabalho e de sua incompressibilidade, observou-se grande influência do diâmetro na determinação do fator de atrito. Ao analisarmos a fórmula abaixo explicitada e anteriormente explicada, torna-se simples verificar que o diâmetro do tubo é a principal influência sobre o fator de atrito, e que qualquer alteração em seu valor gera grande variação no fator de atrito obtido. Entretanto, devido principalmente a problemas nos processos de fabricação destes tubos, como desgaste de ferramentas e falta de manutenção das mesmas, seu diâmetro nominal difere do diâmetro efetivo de um valor maior que a tolerância dada pela fábrica e que é de 8 centésimos de milímetro. Assim sendo, consideramos como diâmetro efetivo e aquele realmente utilizado nos cálculos, o diâmetro obtido com o auxílio de um paquímetro de precisão que forneceu os seguintes valores:

Tubo	Diam. Nominal	Diam. Efetivo	σD
Azul	1.77 mm	1.50 mm	0.05 mm
Vermelho	1.55 mm	1.35 mm	0.05 mm
Laranja	1.45 mm	1.20 mm	0.05 mm
Marrom	1.22 mm	0.90 mm	0.05 mm

Para cada um dos tubos de orifício foram realizados dois testes para cada um dos pontos (cada um dos Reynolds), e foram obtidos assim os fatores de atrito segundo a equação abaixo (Eq. 25). Devido a grande dificuldade de obtenção dos mesmos números de Reynolds para cada uma das observações, plotamos ambos os resultados e verificamos a uniformidade e repetibilidade dos dados.

$$f = \frac{\rho \cdot \pi^2 \cdot D^5 \cdot t^2 \cdot \Delta P}{8 \cdot L \cdot M^2} \quad (\text{Eq. 25})$$

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

Sabemos também que para $Re < 2000$ (Regime Laminar), o fator de atrito é função somente do número de Reynolds, ou seja, é somente função do diâmetro. Assim sendo, pudemos, de posse do fator de atrito, verificar o diâmetro dos tubos da seguinte maneira :

1. Determinou-se f experimentalmente :

$$f = \frac{\rho \cdot \pi^2 \cdot D^5 \cdot t^2 \cdot \Delta P}{8 \cdot L \cdot M^2} \quad (\text{Eq. 25})$$

2. Para $Re < 2000$, tem-se :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Eq. 10})$$

Substituindo-se agora o valor de Re e reorganizando para determinarmos o diâmetro, chegamos em :

$$D = \frac{4 \cdot M \cdot f}{64 \cdot t \cdot \pi \cdot \mu} \quad (\text{Eq. 30})$$

3. Podemos também determinar o erro relacionado ao diâmetro segundo :

$$\sigma D = D \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\sigma f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma t}{t}\right)^2} \quad (\text{Eq. 31})$$

Assim sendo, ao examinarmos as planilhas em que se determina efetivamente o fator de atrito para os diversos tubos estudados chegamos às seguintes correlações para o fator de atrito :

Tubo Marrom

O tubo marrom, de diâmetro nominal 1,22mm e diâmetro efetivo 0,90mm teve comportamento dentro do esperado. Todos os dados e gráficos obtidos com o tubo marrom estão no **Anexo 2 - Tubo Marrom** e as principais conclusões obtidas serão agora detalhadas :

Tubo Marrom - Testes 1

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00090 \pm 0.00004$ m. Para a primeira bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = \frac{64.019}{Re} \quad (\text{Eq. 32})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

$$f = 0.3199 \cdot Re^{-0.2513} \quad (\text{Eq. 33})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo marrom-testes1 estão no **ANEXO 2**.

Tubo Marrom - Testes 2

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00090 \pm 0.00004$ m. Para a segunda bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = 65,286 \cdot Re^{-1.0028} \quad (\text{Eq. 34})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

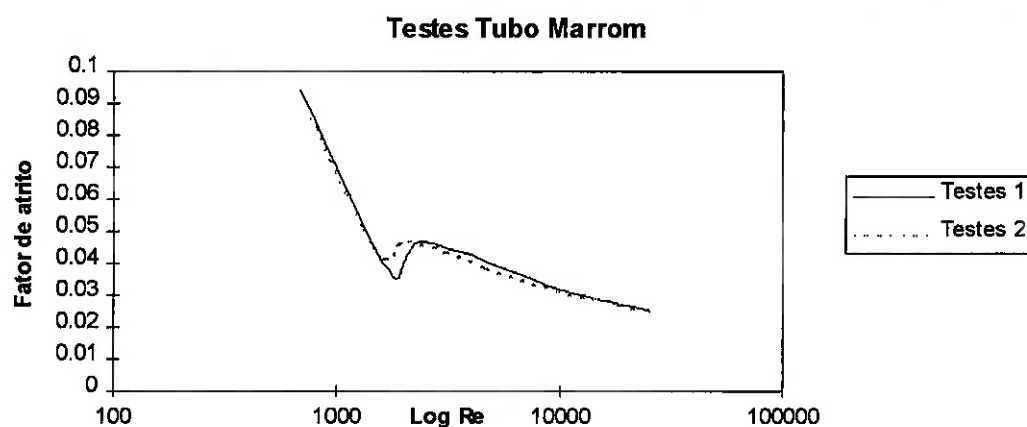
$$f = 0.3155 \cdot Re^{-0.2498} \quad (\text{Eq. 35})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo marrom-testes1 estão no **ANEXO 2**.

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

Avaliação de Repetibilidade nos Experimentos e do Fator de Atrito para o Tubo Marrom

Os testes realizados com o tubo marrom mostraram boa repetibilidade, ou seja, ambas as tomadas de dados mostraram-se consistentes como pode ser observado no gráfico abaixo :



Podemos observar que, exceto na zona de transição ($2000 < Re < 5000$), os valores do fator de atrito para ambos os testes se mostraram muito próximos e, se considerarmos as incertezas experimentais, podemos determinar as seguintes correlações para o fator de atrito

:

Intervalo de Reynolds	Correlação
$0 < Re < 2000$	$f = \frac{64}{Re}$
$2000 < Re < 5000$	Não há uma função matemática que correlacione o fator de atrito com qualquer uma das variáveis do escoamento
$5000 < Re < 50000$	$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$

Tubo Laranja

O tubo laranja, de diâmetro nominal 1,45mm e diâmetro efetivo 1,20mm teve comportamento dentro do esperado. Todos os dados e gráficos obtidos com o tubo laranja estão no **Anexo 2 - *Tubo Laranja*** e as principais conclusões obtidas serão agora detalhadas :

Tubo Laranja - Testes 1

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00120 \pm 0.00005$ m. Para a primeira bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = 63.943 \cdot Re^{-0.9999} \quad (\text{Eq. 36})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

$$f = 0.3153 \cdot Re^{-0.2498} \quad (\text{Eq. 37})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo laranja-testes1 estão no **ANEXO 2**.

Tubo Laranja - Testes 2

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00120 \pm 0.00005$ m. Para a segunda bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = 63.408 \cdot Re^{-0.9987} \quad (\text{Eq. 38})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

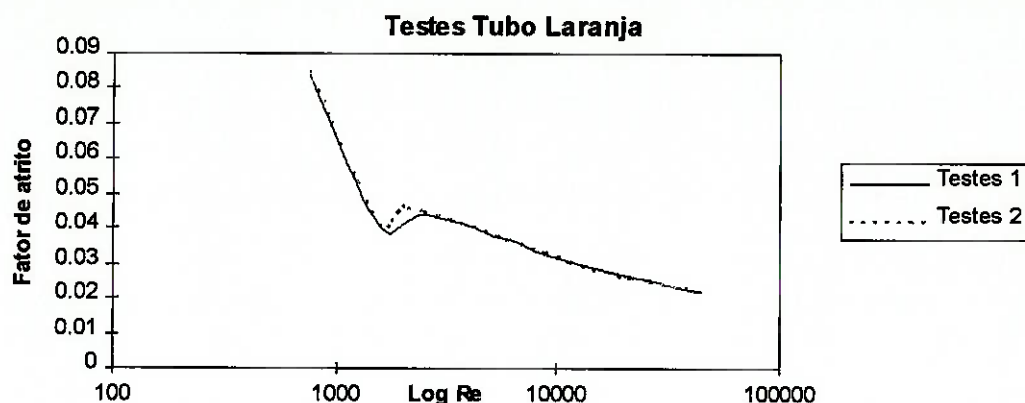
$$f = 0.3166 \cdot Re^{-0.2502} \quad (\text{Eq. 39})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo laranja-testes1 estão no ANEXO 2.

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

Avaliação de Repetibilidade nos Experimentos e do Fator de Atrito para o Tubo Laranja

Os testes realizados com o tubo laranja mostraram boa repetibilidade, ou seja, ambas as tomadas de dados mostraram-se consistentes como pode ser observado no gráfico abaixo :



Podemos observar que, exceto na zona de transição ($2000 < Re < 5000$), os valores do fator de atrito para ambos os testes se mostraram muito próximos e, se considerarmos as incertezas experimentais, podemos determinar as seguintes correlações para o fator de atrito :

Intervalo de Reynolds	Correlação
$0 < Re < 2000$	$f = \frac{64}{Re}$
$2000 < Re < 5000$	Não há uma função matemática que correlacione o fator de atrito com qualquer uma das variáveis do escoamento
$5000 < Re < 50000$	$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$

Tubo Vermelho

O tubo vermelho, de diâmetro nominal 1,55mm e diâmetro efetivo 1,35mm teve comportamento dentro do esperado. Todos os dados e gráficos obtidos com o tubo vermelho estão no **Anexo 2 - *Tubo Vermelho*** e as principais conclusões obtidas serão agora detalhadas :

Tubo Vermelho - Testes 1

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00135 \pm 0.00007$ m. Para a primeira bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = 63.954 \cdot Re^{-0.9999} \quad (\text{Eq. 40})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

$$f = 0.3108 \cdot Re^{-0.2483} \quad (\text{Eq. 41})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo vermelho-testes1 estão no **ANEXO 2**.

Tubo Vermelho - Testes 2

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00135 \pm 0.00007$ m. Para a segunda bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = 64.607 \cdot Re^{-1.0013} \quad (\text{Eq. 42})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

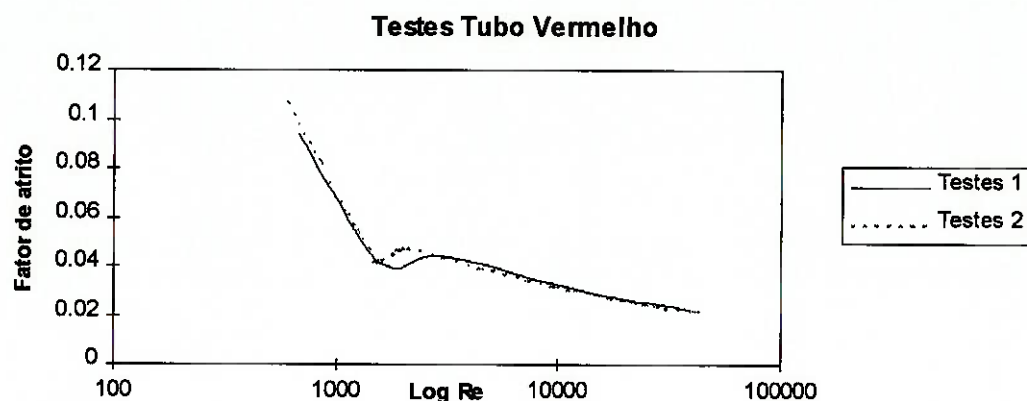
$$f = 0.3159 \cdot Re^{-0.25} \quad (\text{Eq. 43})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo vermelho-testes1 estão no **ANEXO 2**.

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

Avaliação de Repetibilidade nos Experimentos e do Fator de Atrito para o Tubo Vermelho

Os testes realizados com o tubo vermelho mostraram boa repetibilidade, ou seja, ambas as tomadas de dados mostraram-se consistentes como pode ser observado no gráfico abaixo :



Podemos observar que, exceto na zona de transição ($2000 < Re < 5000$), os valores do fator de atrito para ambos os testes se mostraram muito próximos e, se considerarmos as incertezas experimentais, podemos determinar as seguintes correlações para o fator de atrito :

Intervalo de Reynolds	Correlação
$0 < Re < 2000$	$f = \frac{64}{Re}$
$2000 < Re < 5000$	Não há uma função matemática que correlacione o fator de atrito com qualquer uma das variáveis do escoamento
$5000 < Re < 50000$	$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$

Tubo Azul

O tubo azul, de diâmetro nominal 1,77mm e diâmetro efetivo 1,50mm teve comportamento dentro do esperado. Todos os dados e gráficos obtidos com o tubo azul estão no **Anexo 2 - *Tubo Azul*** e as principais conclusões obtidas serão agora detalhadas :

Tubo Azul - Testes 1

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00150 \pm 0.00014$ m. Para a primeira bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = 64.285 \cdot Re^{-1.0006} \quad (\text{Eq. 44})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

$$f = 0.3164 \cdot Re^{-0.2502} \quad (\text{Eq. 45})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo azul-testes1 estão no **ANEXO 2**.

Tubo Azul - Testes 2

1. Para Regime laminar ($Re < 2000$), a relação $f = \frac{64}{Re}$ (Eq. 10) foi satisfeita, e pudemos através dela determinar o diâmetro do tubo $D = 0.00150 \pm 0.00016$ m. Para a segunda bateria de testes chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito:

$$f = 64.722 \cdot Re^{-1.0015} \quad (\text{Eq. 46})$$

2. Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.
3. Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

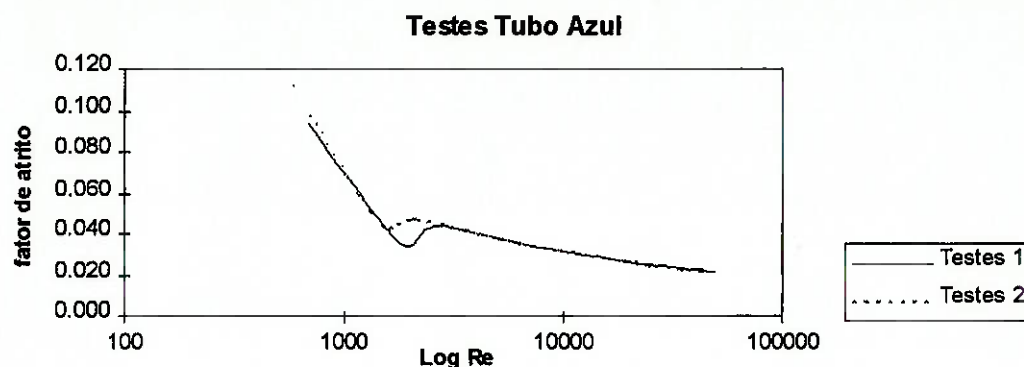
$$f = 0.3128 \cdot Re^{-0.2489} \quad (\text{Eq. 47})$$

Obs.: Todos os dados referentes ao tubo azul-testes1 estão no **ANEXO 2**.

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

Avaliação de Repetibilidade nos Experimentos e do Fator de Atrito para o Tubo Azul

Os testes realizados com o tubo azul mostraram boa repetibilidade, ou seja, ambas as tomadas de dados mostraram-se consistentes como pode ser observado no gráfico abaixo :



Podemos observar que, exceto na zona de transição ($2000 < Re < 5000$), os valores do fator de atrito para ambos os testes se mostraram muito próximos e, se considerarmos as incertezas experimentais, podemos determinar as seguintes correlações para o fator de atrito :

Intervalo de Reynolds	Correlação
$0 < Re < 2000$	$f = \frac{64}{Re}$
$2000 < Re < 5000$	Não há uma função matemática que correlacione o fator de atrito com qualquer uma das variáveis do escoamento
$5000 < Re < 50000$	$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$

CONCLUSÃO

Podemos concluir que o trabalho alcançou plenamente os objetivos básicos na determinação do fator de atrito, e os principais resultados e comentários são agora abordados :

- Para regime laminar ($Re < 2000$), o fator de atrito comportou-se dentro do esperado com a seguinte correlação :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Correlação 1})$$

Neste intervalo, o fator de atrito é uma função exclusiva do número de Reynolds, e por consequência, do diâmetro do tubo. Dada a grande influência do diâmetro na determinação do fator de atrito e a sua importância no processo, foi realizado um estudo onde verificávamos, dado o fator de atrito previamente calculado, o diâmetro do tubo de orifício através correlação acima convenientemente rearranjada. Tal estudo apresentou os seguintes resultados :

Tubo	Diâmetro	σD
Marrom	0.00090	0.00004
Laranja	0.00120	0.00005
Vermelho	0.00135	0.00007
Azul	0.00150	0.00014

- Para o intervalo de Reynolds entre 2000 e 5000 obtivemos um salto para o fator de atrito. Tal salto já era esperado, pois trata-se da transição entre o regime laminar e o turbulento e nesta região o fator de atrito não apresenta um comportamento regular, tornando-se impossível a determinação de uma correlação para o fator de atrito para tal intervalo.

Trabalho de Formatura
Avaliação da Correlação do Fator de Atrito em Tubos de Orifício

- Para $Re > 5000$ percebemos que o tubo de orifício se comportava como um tubo liso, ou seja, a turbulência era gerada principalmente pelas forças de inércia e o fator de atrito era função somente do número de Reynolds. Para o intervalo de Reynolds entre 5000 e 50000 chegamos à seguinte correlação para o fator de atrito :

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (\text{Correlação 2})$$

Sugere-se aqui um trabalho complementar a este, onde se possa alcançar Reynolds maiores (50000 à 200000) e obter assim regime turbulento plenamente desenvolvido, onde o fator de atrito é função somente da rugosidade relativa, cobrindo assim todo o campo de aplicação para tubos de orifício.

Outro possível trabalho complementar seria a determinação das perdas de carga singulares em escoamentos, como mudança de direção, mudança de seção, entre outras. No decorrer do trabalho tentou-se a verificação da relação empírica dada por:

$$k_s = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \right] [1]$$

Esta equação relaciona a perda de carga singular ao mudarmos de uma seção com diâmetro D_0 para outra de diâmetro D . Os valores observados (Anexo2) se mostram coerentes somente para Reynolds acima de 45.000. Tal observação se deve principalmente pelo fato de termos utilizado um manômetro pouco preciso antes da singularidade. Assim sendo, o erro relacionado a tomada de pressão inviabiliza uma análise complexa do escoamento e a compreensão do fenômeno físico envolvido no processo de mudança brusca de seção.

A determinação dos fatores de atrito propriamente ditos se deu de maneira satisfatória, a não ser pelas dificuldades de obtenção de valores coerentes de pressão utilizando-se de colunas de mercúrio e água. Os principais problemas enfrentados foram a falta de praticidade de tais instrumentos devido a presença de ar e água proveniente do escoamento nas conexões tubo de orifício-medidores. A compressibilidade do ar prejudicou as tomadas de dados, e, em muitas vezes, obtivemos dados completamente irreais ao processo, fato que nos obrigou a repetir cada experimento por diversas vezes. Entretanto, podemos dizer que obtivemos correlações consistentes para o fator de atrito em tubos de orifício para o intervalo de Reynolds de 0 à 50000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) IDELCHIK, I.E. *Flow Resistance: A design guide for engineers*, Hemisphere Publication Co., New York, 1989.
- 2) IKEDA, S. *Apostilas de Mecânica dos Fluidos*, UPUSP
- 3) VAN WYLEN, Gordon J. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*, Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1993.
- 4) PIMENTA, M.M., *Apostilas de Termodinâmica dos Fluidos Compressíveis*, EPUSP.
- 5) GILES, R.V., *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica*, McGraw-Hill, São Paulo, 1975.

ANEXO 1 : AVALIAÇÕES PRELIMINARES

ANEXO 1: ESTUDO DOS ERROS

L	f	Re	Diam1	AP1	Q1	Mas	Tempo	cf	Inf D	Inf T	Inf L	Inf M	Inf DP	Tot
[m]			[m]	[Pa]	[L/min]	[Kg]	[Seg]							
0.0384	0.01	2000	0.00132	334	0.12	100	48229	0.00501	36.5%	0.0%	0.0%	0.0%	63.4%	100.0%
0.0384	0.01	5000	0.00132	2087	0.31	100	19292	0.00310	95.7%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	100.0%
0.0384	0.01	10000	0.00132	8348	0.62	100	9646	0.00303	99.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	100.0%
0.0384	0.01	20000	0.00132	33392	1.24	100	4823	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	30000	0.00132	75131	1.87	100	3215	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	40000	0.00132	133567	2.49	100	2411	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	50000	0.00132	208699	3.11	100	1929	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	60000	0.00132	300526	3.73	100	1608	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	70000	0.00132	409049	4.35	100	1378	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	80000	0.00132	534268	4.98	100	1206	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	90000	0.00132	676183	5.60	100	1072	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	100000	0.00132	834794	6.22	100	965	0.00303	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

L	f	Re	Diam2	AP2	Q2	Massa	Tempo	cf	Inf Dia	Inf T	Inf L	Inf M	Inf DP	Tot
[m]			[m]	[Pa]	[L/min]	[Kg]	[Seg]							
0.0384	0.01	2000	0.00177	138.5	0.17	100	35967	0.00989	5.2%	0.0%	0.0%	0.0%	94.8%	100.0%
0.0384	0.01	5000	0.00177	865.6	0.42	100	14387	0.00274	68.3%	0.0%	0.0%	0.0%	31.7%	100.0%
0.0384	0.01	10000	0.00177	3462.4	0.83	100	7193	0.00229	97.2%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	100.0%
0.0384	0.01	20000	0.00177	13849.7	1.67	100	3597	0.00226	99.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	100.0%
0.0384	0.01	30000	0.00177	31161.9	2.50	100	2398	0.00226	99.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	40000	0.00177	55398.9	3.34	100	1798	0.00226	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	50000	0.00177	86560.8	4.17	100	1439	0.00226	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	60000	0.00177	124648	5.00	100	1199	0.00226	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	70000	0.00177	169659	5.84	100	1028	0.00226	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	80000	0.00177	221596	6.67	100	899	0.00226	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	90000	0.00177	280457	7.51	100	799	0.00226	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
0.0384	0.01	100000	0.00177	346243	8.34	100	719	0.00226	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

ANEXO 2 : TESTES DEFINITIVOS

TESTES TUBO MARROM

TESTES 1 TUBO MARROM

Unidades : S.I.

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	P _{man} (Bar)	P	$\Delta\%$
415	0.2	0.0009	0.02	4.5	682	0.0939	0.0046	1149	142	0.1	9800	13%
482	0.6	0.0009	0.02	11.6	1761	0.0363	0.0016	2968	949	0.1	9800	40%
469	0.8	0.0009	0.02	28	2413	0.0467	0.0021	7167	1763	0.2	19600	46%
501	3.5	0.0009	0.02	318	9883	0.0317	0.0014	81525	29903	1.5	147000	76%
498	5.0	0.0009	0.02	601	14204	0.0290	0.0013	153829	61765	3.0	294000	73%
472	7.0	0.0009	0.02	1,189	20981	0.0263	0.0012	304450	134763	6.0	588000	75%
418	7.5	0.0009	0.02	1,660	25384	0.0250	0.0011	424927	197255	7.2	705600	88%
524	9.5	0.0009	0.02	1,685	25648	0.0249	0.0011	431413	201393	7.4	725200	87%

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

 σf = desvio padrão de f ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seçãoP_{man} = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

 $\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

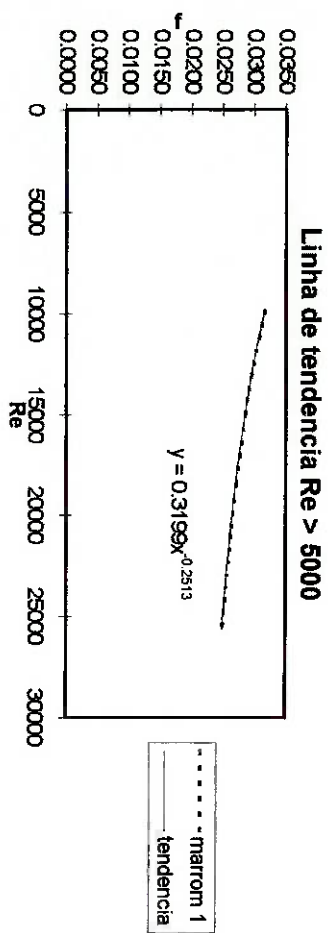
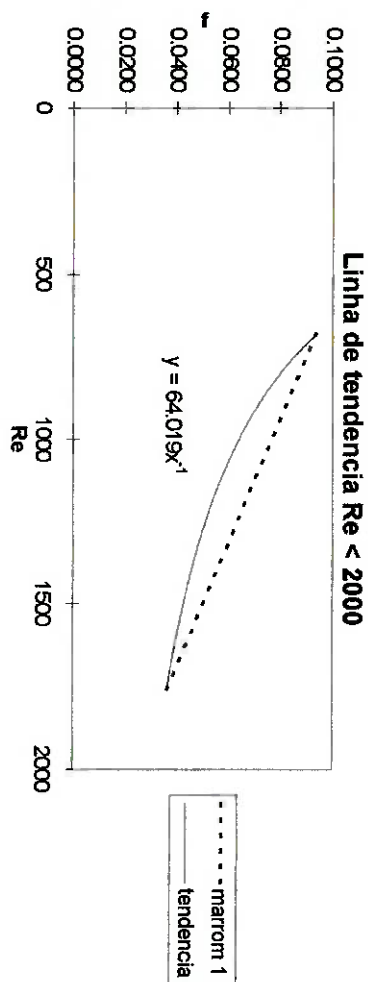
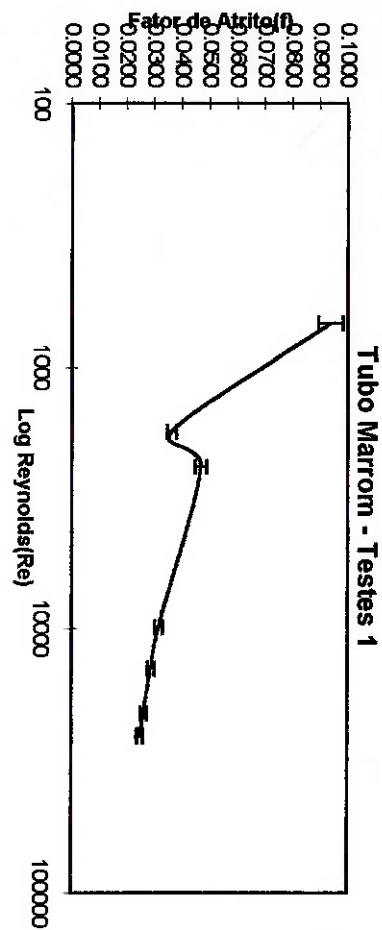
Re	f	D	σD
682	0.0939	0.00090	0.00004
1761	0.0363	0.00090	0.00004

Onde:

Re = Número de Reynolds

f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$ σD = erro relacionado à medida experimental D



TESTES 2 TUBO MARRON

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	P _{man} (Bar)	P	$\Delta\%$
583	0.3	0.0009	0.02	4.8	728	0.0880	0.0042	1229	162	0.1	9800	14%
547	0.6	0.0009	0.02	10	1552	0.0412	0.0019	2614	737	0.1	9800	34%
468	0.7	0.0009	0.02	20	2116	0.0467	0.0021	5507	1371	0.1	9800	70%
569	3.0	0.0009	0.02	195	7459	0.0340	0.0015	49820	17032	0.9	88200	76%
501	5.0	0.0009	0.02	595	14119	0.0290	0.0013	152255	61027	3.0	294000	73%
465	7.0	0.0009	0.02	1,221	21297	0.0262	0.0012	312491	138851	6.0	588000	77%
409	7.0	0.0009	0.02	1,528	24213	0.0253	0.0011	391260	179477	7.2	705600	81%
314	6.0	0.0009	0.02	1,857	27067	0.0246	0.0011	475438	224286	7.5	735000	95%

Unidades : S.I.

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

σf = desvio padrão de f

ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício

Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seção

P_{man} = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

$\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

Re	f	D	σD
728	0.0880	0.00090	0.00004
1552	0.0412	0.00090	0.00004

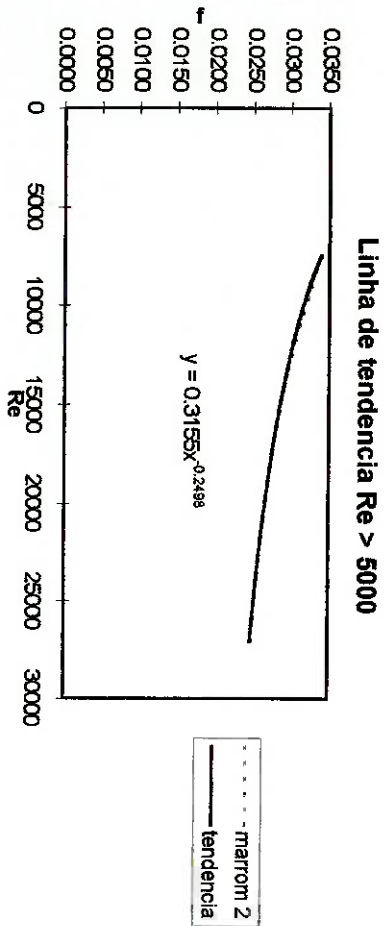
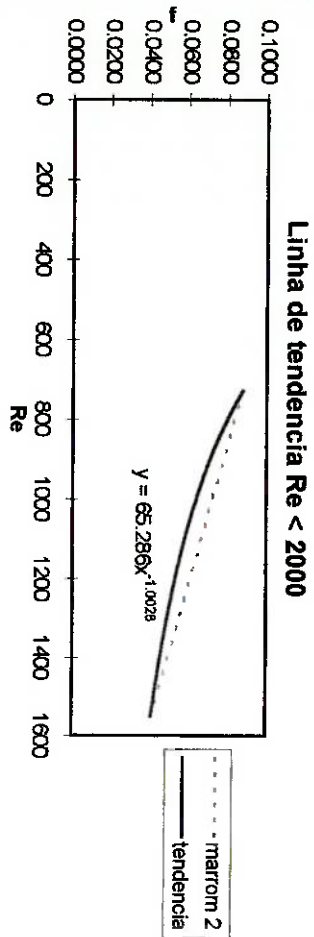
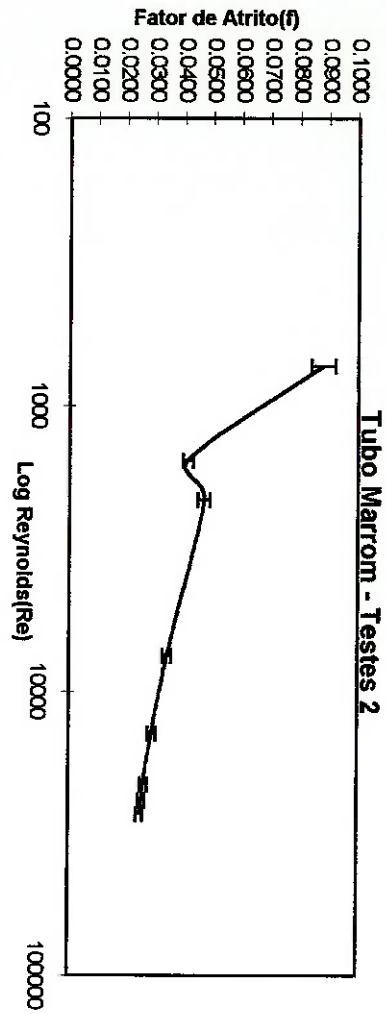
Onde:

Re = Número de Reynolds

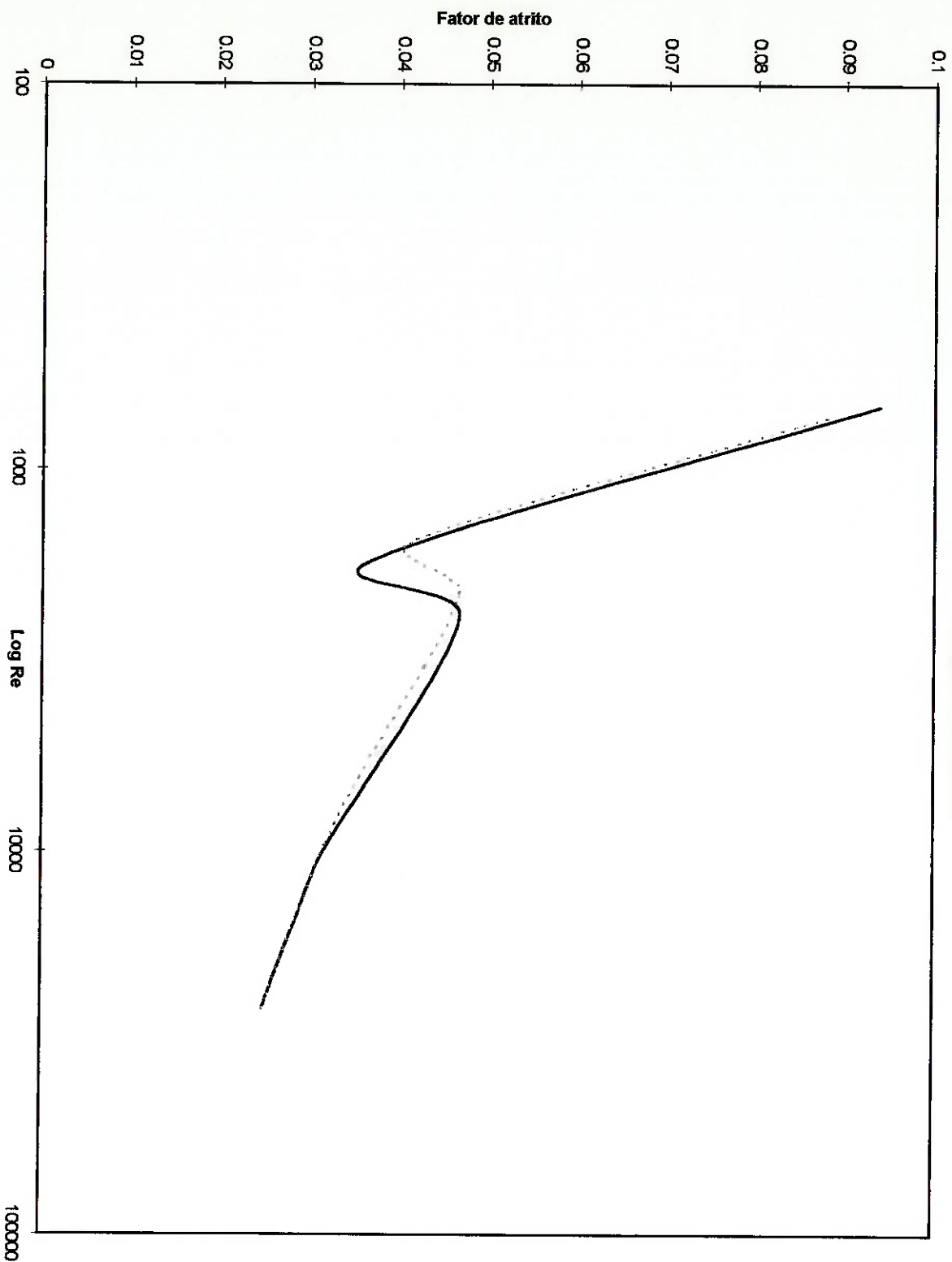
f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$

σD = erro relacionado à medida experimental D



Testes Tubo Marrom



— Testes 1
- - - Testes 2

TESTES TUBO LARANJA

TESTES 1 TUBO LARANJA

Unidades : S.I.

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	P _{man} (Bar)	P	$\Delta\%$
415	0.3	0.0012	0.019	2.02	767	0.0834	0.0042	545	101	0.1	9800	7%
463	0.7	0.0012	0.019	4.23	1604	0.0399	0.0015	1141	440	0.1	9800	16%
487	1.2	0.0012	0.019	13	2614	0.0443	0.0015	3368	1170	0.2	19600	23%
498	5.0	0.0012	0.019	146	10653	0.0311	0.0011	39215	19419	1.5	147000	40%
465	9.0	0.0012	0.019	459	20536	0.0264	0.0009	123708	72163	3.0	294000	67%
501	14.0	0.0012	0.019	874	29650	0.0241	0.0008	235404	150424	4.8	470400	82%
436	16.0	0.0012	0.019	1,407	38937	0.0225	0.0008	379023	259420	7.2	705600	90%
478	20.0	0.0012	0.019	1,769	44395	0.0218	0.0007	476737	337241	8.5	833000	98%

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

 σf = desvio padrão de f ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seçãoP_{man} = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

 $\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

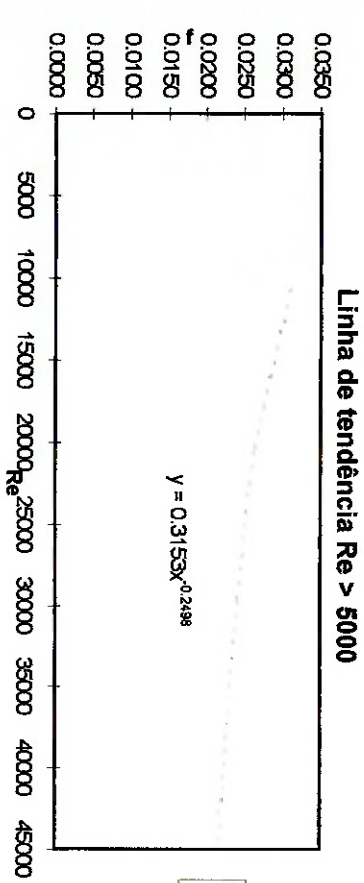
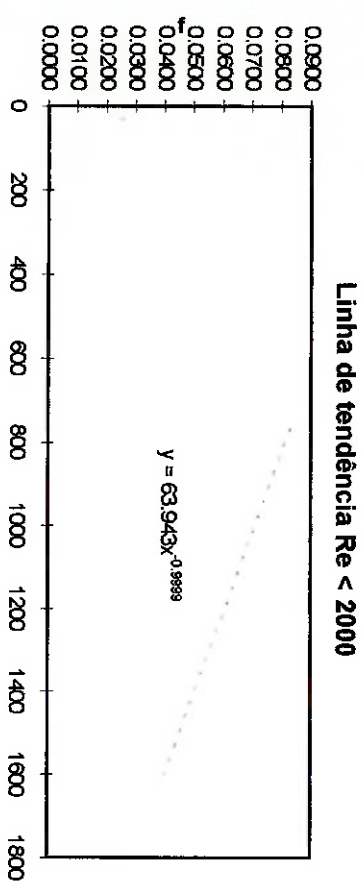
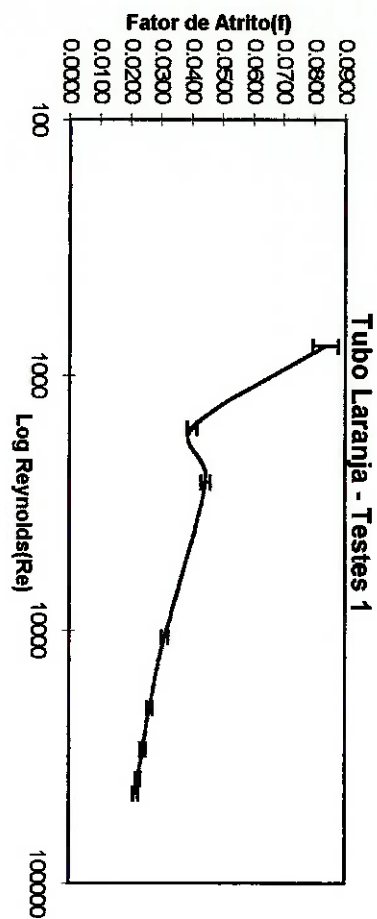
Re	f	D	σD
767	0.0834	0.00120	0.00006
1604	0.0399	0.00120	0.00005

Onde:

Re = Número de Reynolds

f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$ σD = erro relacionado à medida experimental D



TESTES 2 TUBO LARANJA

64

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	P _{man} (Bar)	P	$\Delta\%$
423	0.3	0.0012	0.019	1.98	753	0.0850	0.0043	535	97	0.1	9800	6%
468	0.7	0.0012	0.019	4.19	1587	0.0403	0.0015	1129	431	0.1	9800	16%
497	1.0	0.0012	0.019	5.62	2135	0.0466	0.0017	2360	780	0.1	9800	32%
501	6.0	0.0012	0.019	67.0	12707	0.0298	0.0010	53410	27629	1.5	147000	55%
465	10.0	0.0012	0.019	214.0	22818	0.0257	0.0009	148735	89090	3.0	294000	81%
520	16.0	0.0012	0.019	446.0	32647	0.0235	0.0008	278404	182377	4.8	470400	98%
498	19.0	0.0012	0.019	678.0	40481	0.0223	0.0008	405638	280405	7.2	705600	97%
468	18.0	0.0012	0.019	689.0	40809	0.0222	0.0008	411403	284964	7.4	725200	96%

Unidades : S.I.

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

σf = desvio padrão de f

ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício

Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seção

P_{man} = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

$\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

Re	f	D	σD
753	0.0850	0.00120	0.00006
1587	0.0403	0.00120	0.00005

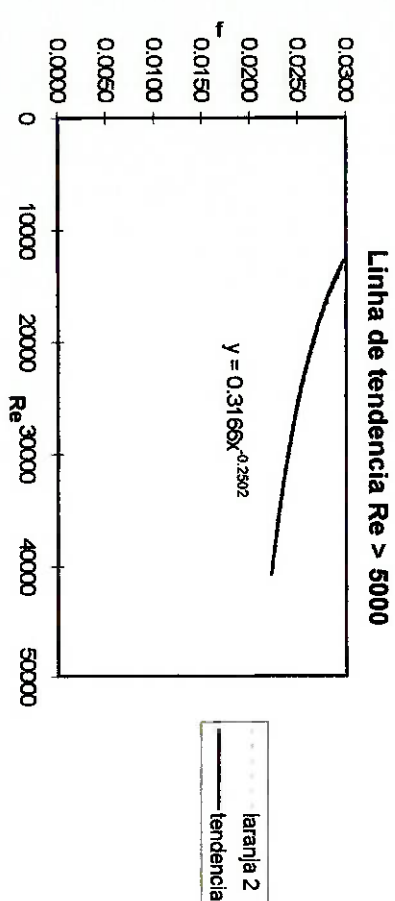
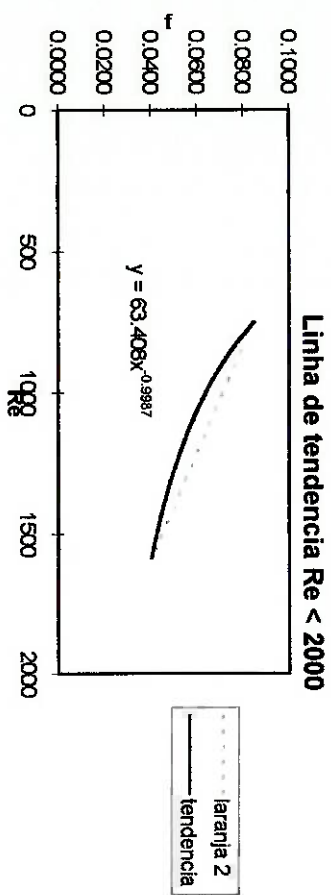
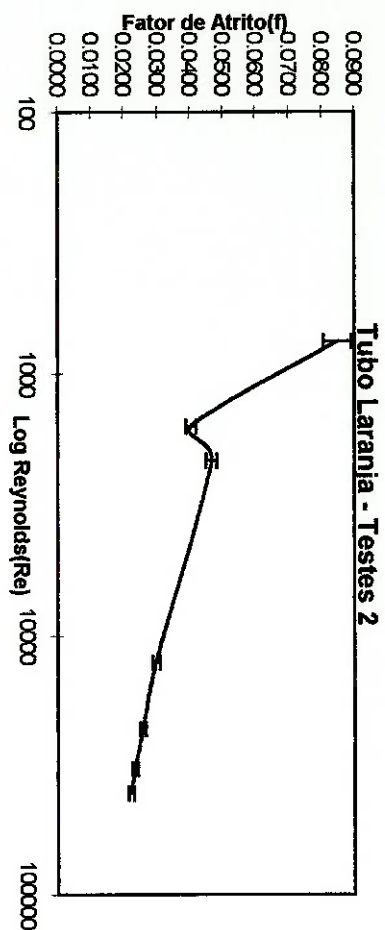
Onde:

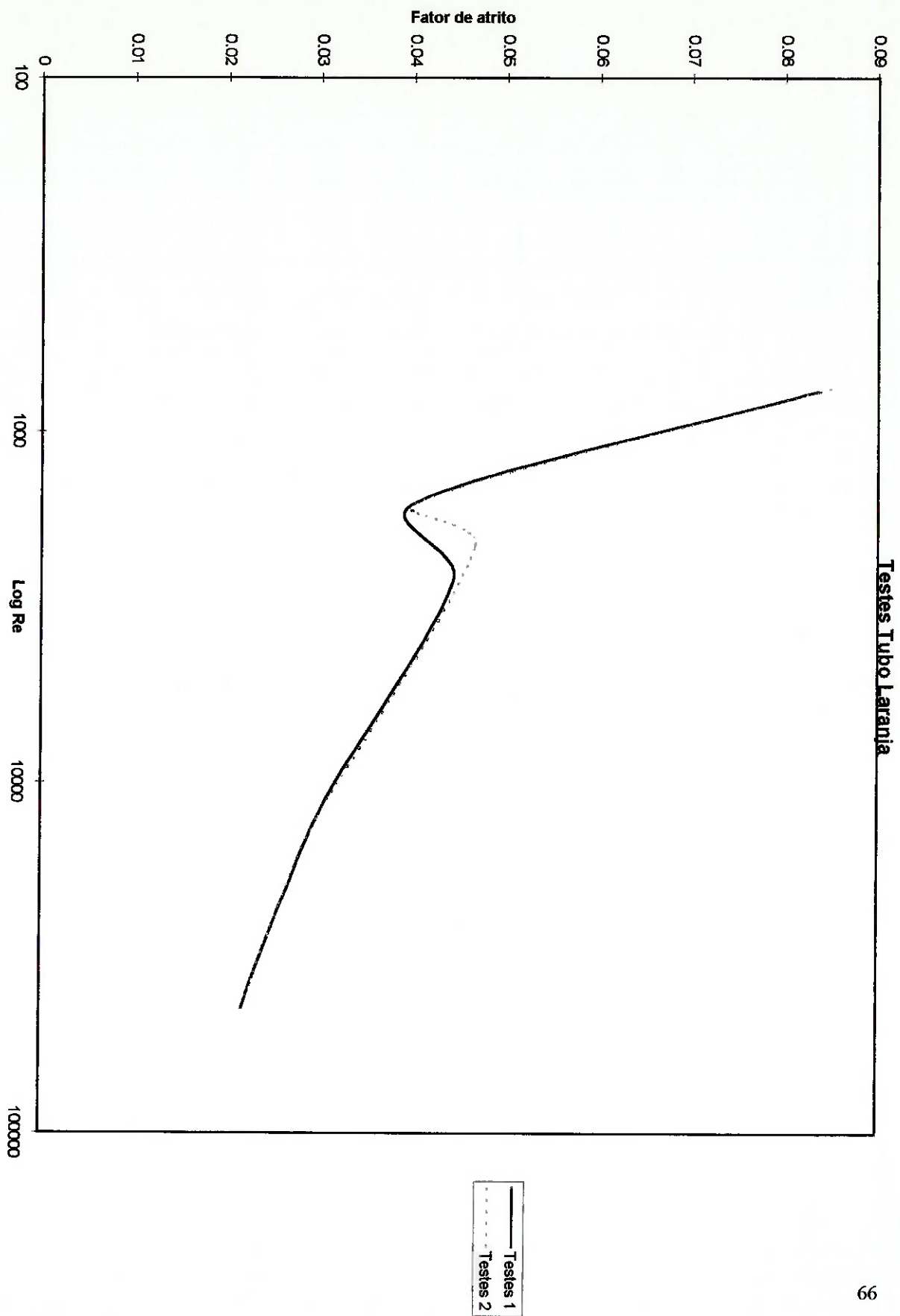
Re = Número de Reynolds

f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$

σD = erro relacionado à medida experimental D





TESTES TUBO VERMELHO

TESTES 1 TUBO VERMELHO

88

Unidades : S.I.

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	P _{man} (Bar)	P	$\Delta\%$
415	0.3	0.00135	0.02	1.3	682	0.0939	0.0059	341	63	0.1	9800	4%
426	0.7	0.00135	0.02	3.0	1550	0.0413	0.0016	774	323	0.1	9800	11%
475	1.5	0.00135	0.02	12	2978	0.0444	0.0014	3072	1195	0.1	9800	44%
412	5.5	0.00135	0.02	144	12590	0.0298	0.0009	36864	21349	0.8	78400	74%
498	11.0	0.00135	0.02	348	20832	0.0263	0.0008	89071	58447	2.3	225400	65%
501	15.0	0.00135	0.02	593	28238	0.0244	0.0007	151827	107385	3.2	313600	83%
468	18.0	0.00135	0.02	920	36275	0.0229	0.0007	235501	177211	5.0	490000	84%
475	22.0	0.00135	0.02	1.272	43682	0.0219	0.0007	325605	256978	6.0	588000	99%

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

σf = desvio padrão de f

ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício

Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seção

P_{man} = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

$\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

Re	f	D	σD
682	0.0939	0.00135	0.00009
1550	0.0413	0.00135	0.00005

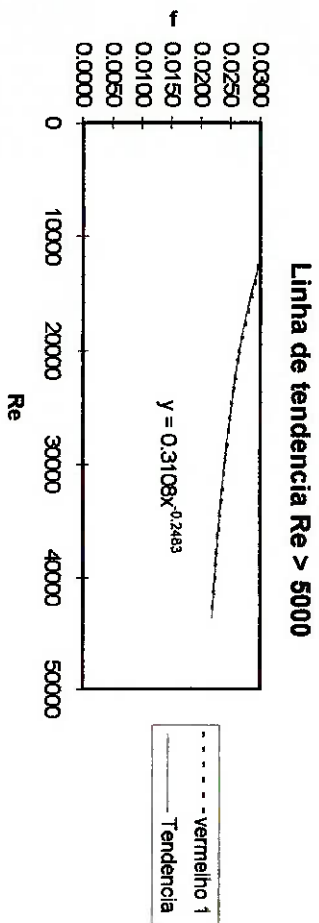
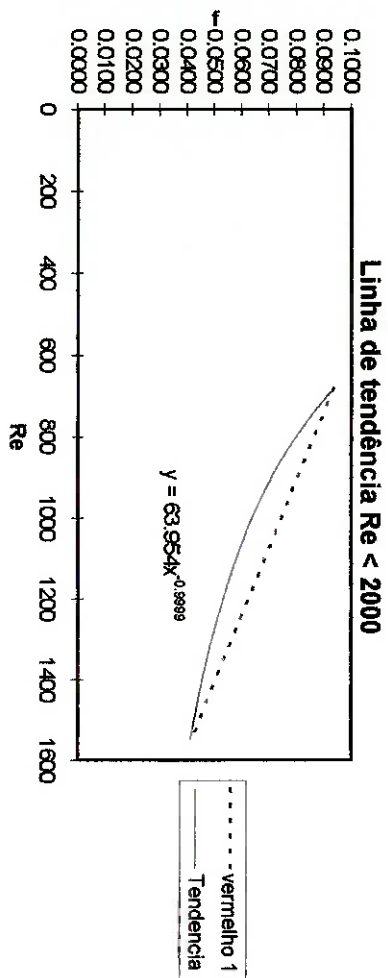
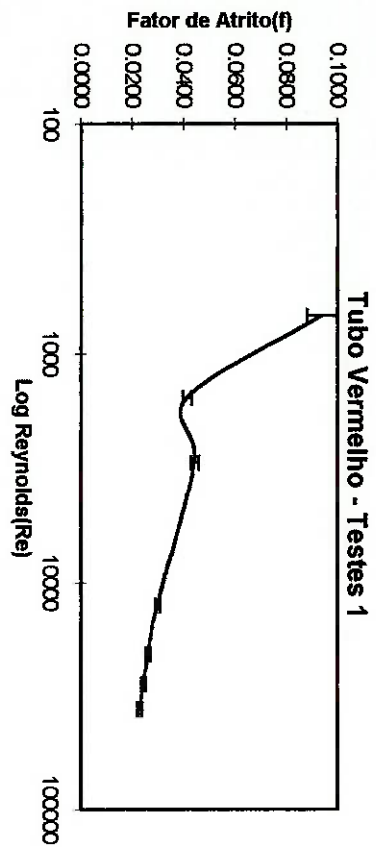
Onde:

Re = Número de Reynolds

f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$

σD = erro relacionado à medida experimental D



TESTES 2 TUBO VERMELHO

Unidades : S.I.

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	Pman(Bar)	P	$\Delta\%$
468	0.3	0.00135	0.02	1.2	605	0.1060	0.0074	302	49	0.1	9800	4%
375	0.6	0.00135	0.02	3	1509	0.0424	0.0017	754	307	0.1	9800	11%
456	1.0	0.00135	0.02	6	2068	0.0472	0.0015	1576	576	0.1	9800	22%
568	7.0	0.00135	0.02	124	11623	0.0304	0.0009	32082	18194	0.8	78400	64%
521	13.5	0.00135	0.02	461	24438	0.0253	0.0008	117774	80432	2.3	225400	88%
503	16.0	0.00135	0.02	661	30001	0.0240	0.0007	168636	121211	3.2	313600	92%
431	18.0	0.00135	0.02	1,062	39389	0.0224	0.0007	271565	208943	5.0	490000	98%
469	21.0	0.00135	0.02	1,202	42230	0.0220	0.0007	306731	240177	5.7	558600	98%

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

σf = desvio padrão de f

ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício

Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seção

Pman = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

$\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

Re	f	D	σD
605	0.1060	0.00135	0.00009
1509	0.0424	0.00135	0.00005

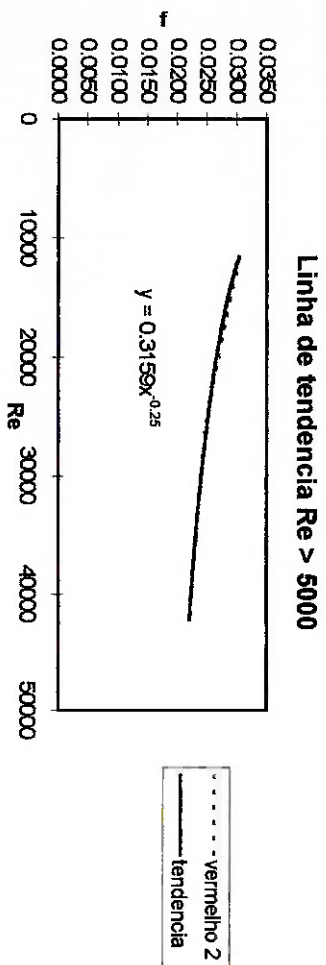
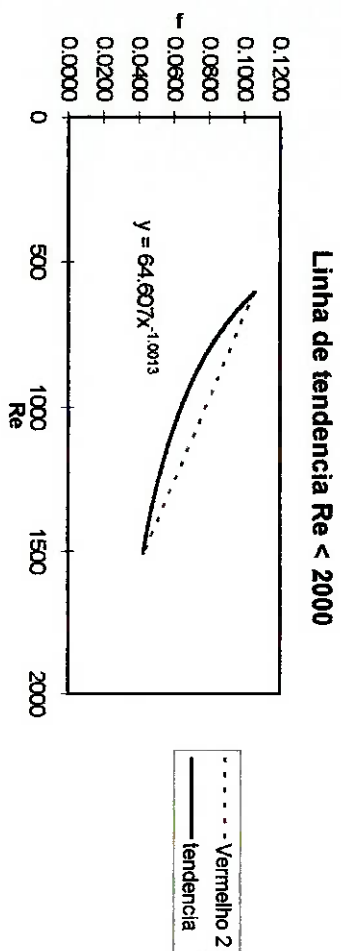
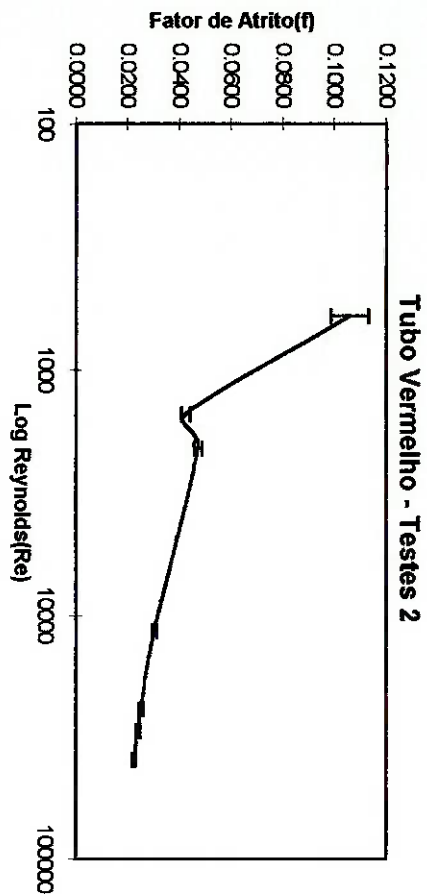
Onde:

Re = Número de Reynolds

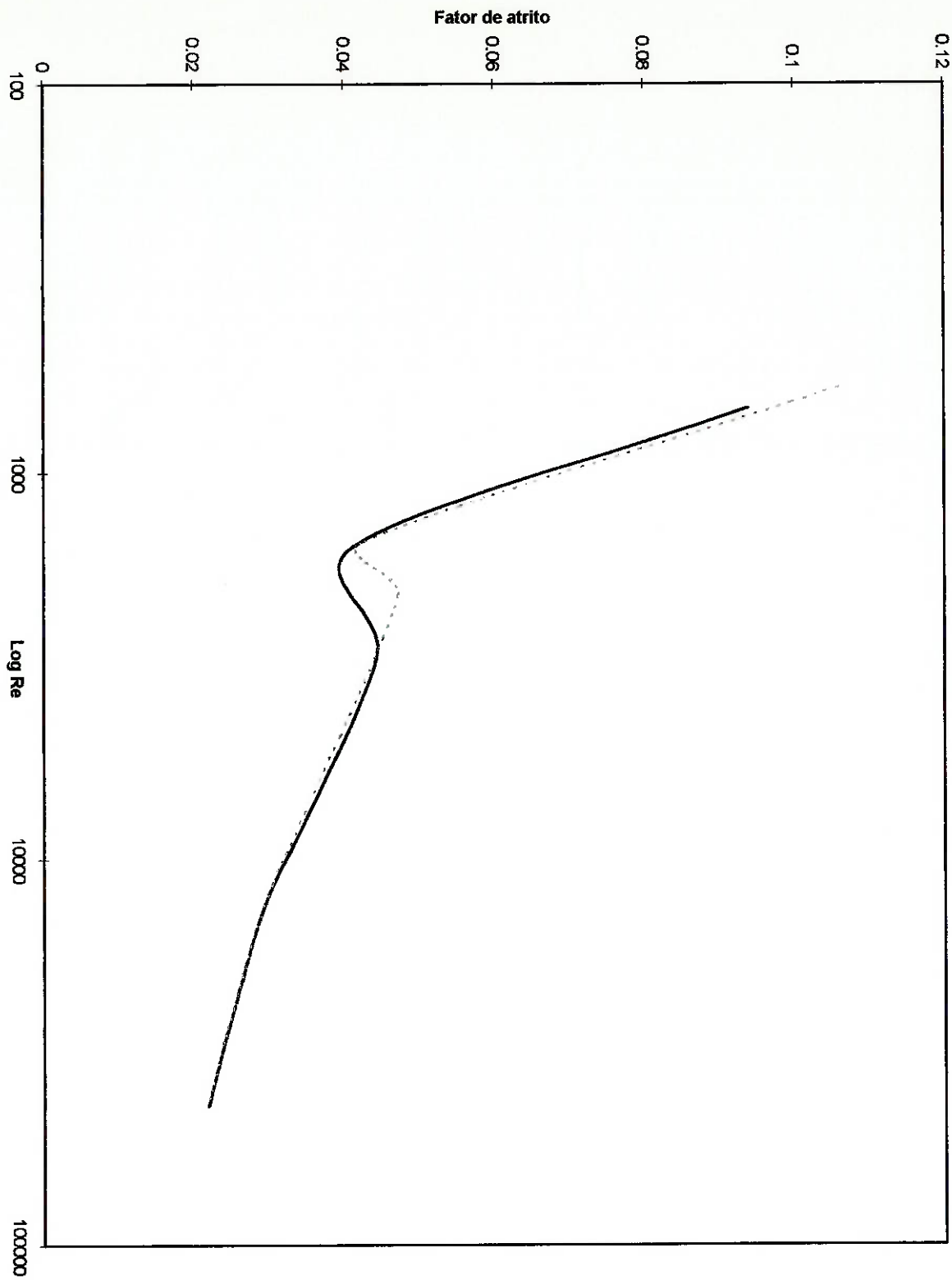
f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$

σD = erro relacionado à medida experimental D



Testes Tubo Vermelho



— Testes 1
- - - Testes 2

TESTES TUBO AZUL

TESTES 1 TUBO AZUL

74

Unidades : S.I.

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	Pman(Bar)	P	$\Delta\%$
498	0.4	0.0015	0.023	0.60	682	0.0939	0.0119	248	50	0.1	9800	3%
467	1.0	0.0015	0.023	1.6	1818	0.0352	0.0019	662	359	0.1	9800	10%
459	1.4	0.0015	0.023	4	2589	0.0437	0.0014	1665	728	0.1	9800	24%
478	4.0	0.0015	0.023	24	7103	0.0344	0.0009	9874	5480	0.4	39200	39%
501	11.5	0.0015	0.023	139	19484	0.0267	0.0007	57663	41232	1.2	117600	84%
478	16.0	0.0015	0.023	269	28413	0.0243	0.0007	111782	87679	2.6	254800	78%
468	22.0	0.0015	0.023	485	39902	0.0223	0.0006	201987	172928	4.0	392000	96%
429	24.0	0.0015	0.023	660	47487	0.0214	0.0006	274529	244918	5.5	539000	96%

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

σf = desvio padrão de f

ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício

Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seção

Pman = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

$\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

Re	f	D	σD
682	0.0939	0.00150	0.00019
1818	0.0352	0.00150	0.00008

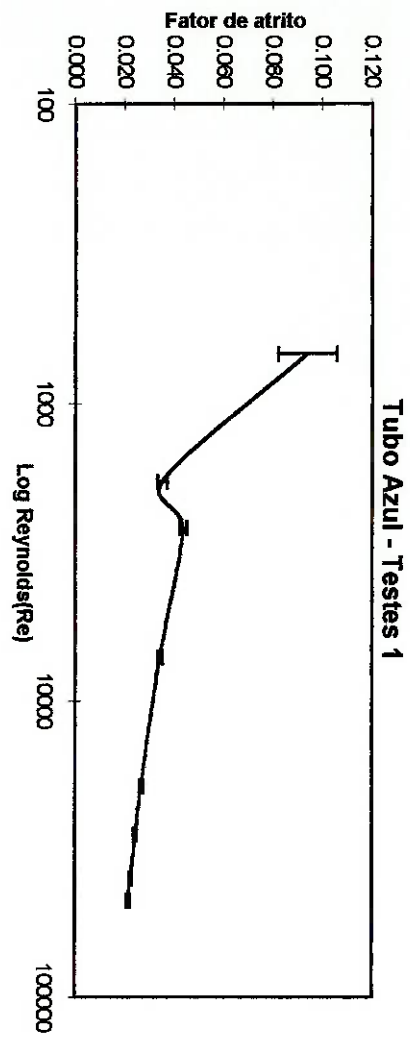
Onde:

Re = Número de Reynolds

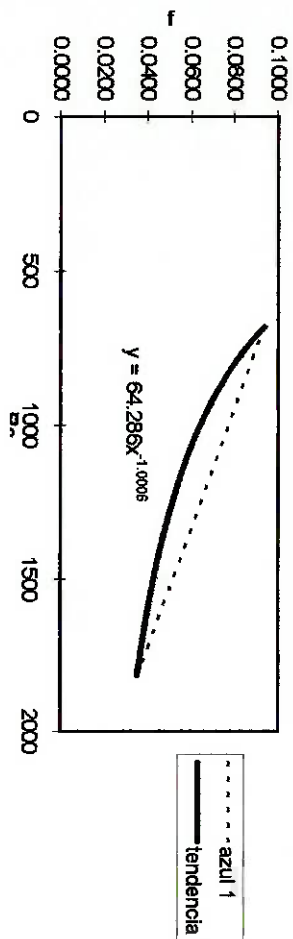
f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$

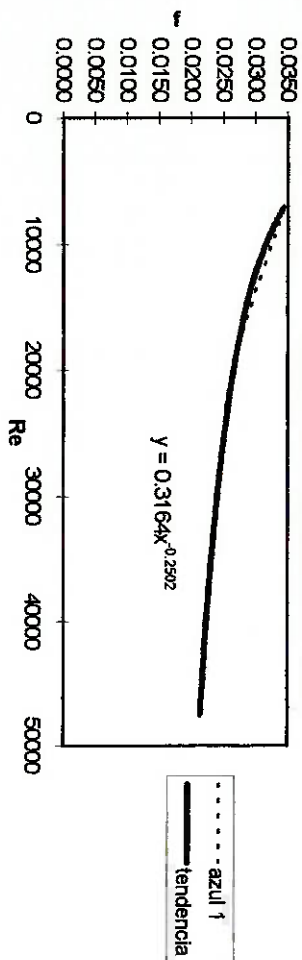
σD = erro relacionado à medida experimental D



Linha de tendencia Re < 2000



Linha de tendencia Re > 5000



TESTES 2 TUBO AZUL

Unidades : S.I. 76

Tempo	Massa	Diâmetro	Comprim.	P(mmHg)	Re	f	σf	ΔP	Δp_{sing}	Pman(Bar)	P	$\Delta\%$
589	0.4	0.0015	0.023	0.5	576	0.1112	0.0165	210	36	0.1	9800	3%
580	1.0	0.0015	0.023	1.0	1463	0.0437	0.0036	533	233	0.1	9800	8%
512	1.3	0.0015	0.023	1.5	2155	0.0480	0.0027	1268	504	0.1	9800	18%
603	3.9	0.0015	0.023	4	5490	0.0367	0.0012	6294	3273	0.4	39200	24%
598	11.2	0.0015	0.023	33	15898	0.0281	0.0011	40402	27450	0.9	88200	77%
514	16.0	0.0015	0.023	92	26423	0.0248	0.0007	98499	75827	2.0	196000	89%
602	26.5	0.0015	0.023	186	37365	0.0228	0.0006	181092	151639	3.5	343000	97%
588	35.0	0.0015	0.023	735	50525	0.0211	0.0006	306429	277264	6.0	588000	99%

Onde :

Tempo = Duração do teste

Massa = Massa efetiva medida

Diâmetro = Diâmetro efetivo do tubo

Comprim. = Comprimento efetivo

P(mmHg) = Diferencial de pressão, em mm de Mercúrio, no tubo de orifício

Re = Número de Reynolds

f = Fator de atrito associado ao escoamento

σf = desvio padrão de f

ΔP = Perda de pressão extrapolada para todo tubo de orifício

Δp_{sing} = Perda de pressão associada à mudança brusca de seção

Pman = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício

P = Pressão medida com o auxílio do manômetro imediatamente antes da entrada do tubo de orifício, transformada para unidades do S.I.

$\Delta\%$ = Variação percentual entre as perdas de carga envolvidas e a pressão na entrada do tubo

Verificação do diâmetro no regime laminar

Re	f	D	σD
576	0.1112	0.00150	0.00022
1463	0.0437	0.00150	0.00012

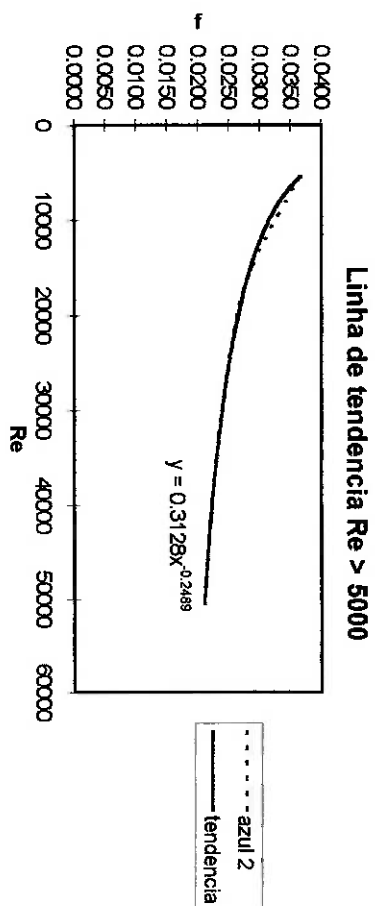
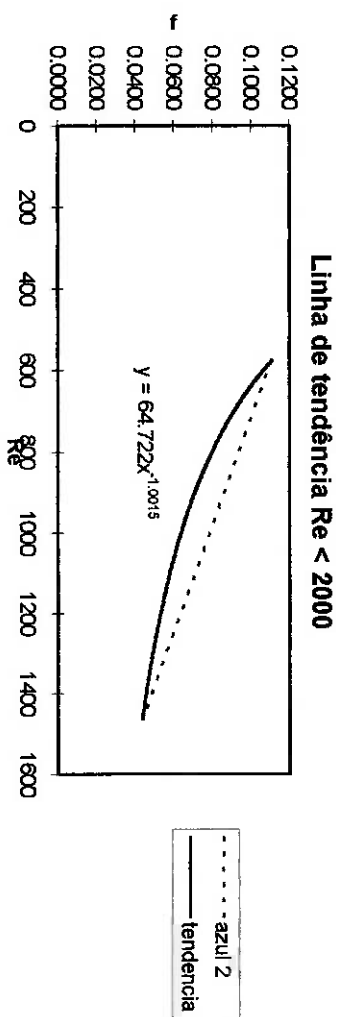
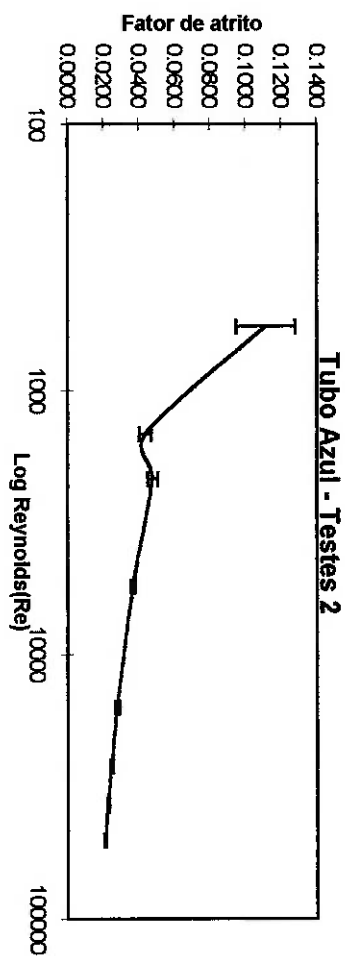
Onde:

Re = Número de Reynolds

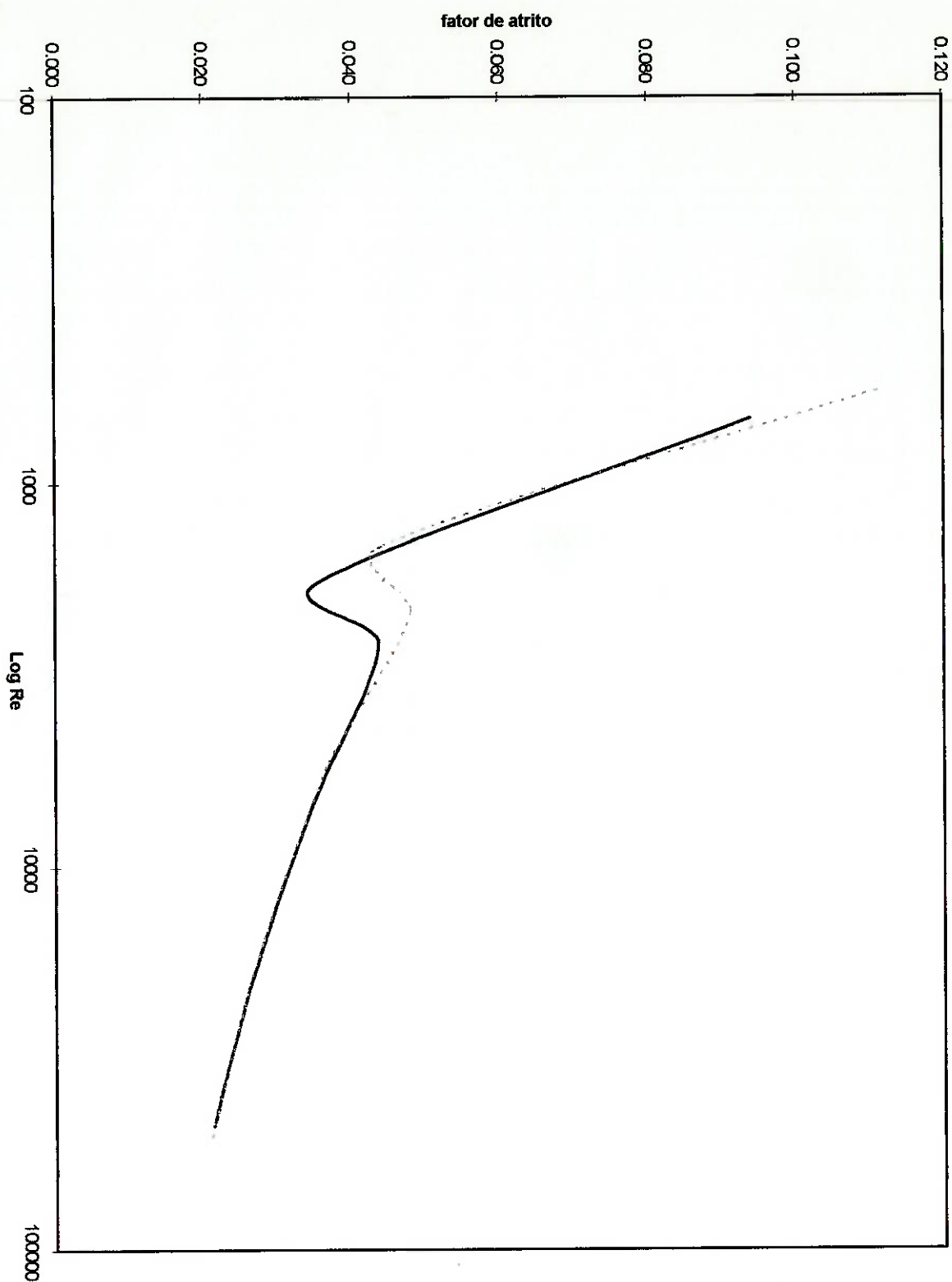
f = fator de atrito

D = diâmetro calculado através de $f=64/Re$

σD = erro relacionado à medida experimental D

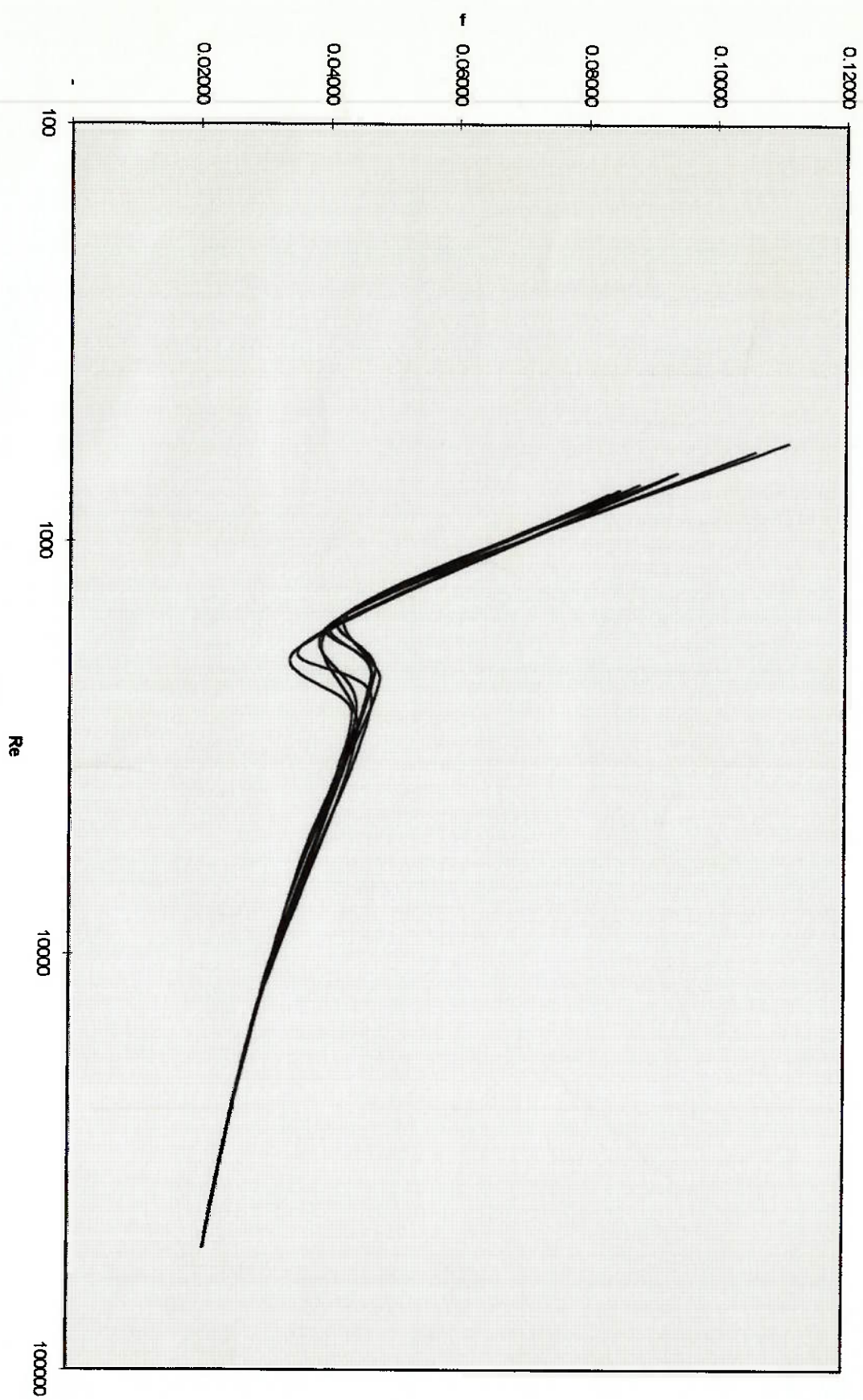


Testes Tubo Azul



— Testes 1
- - - Testes 2

Sobreposição de todos os testes



Correlação para o fator de atrito

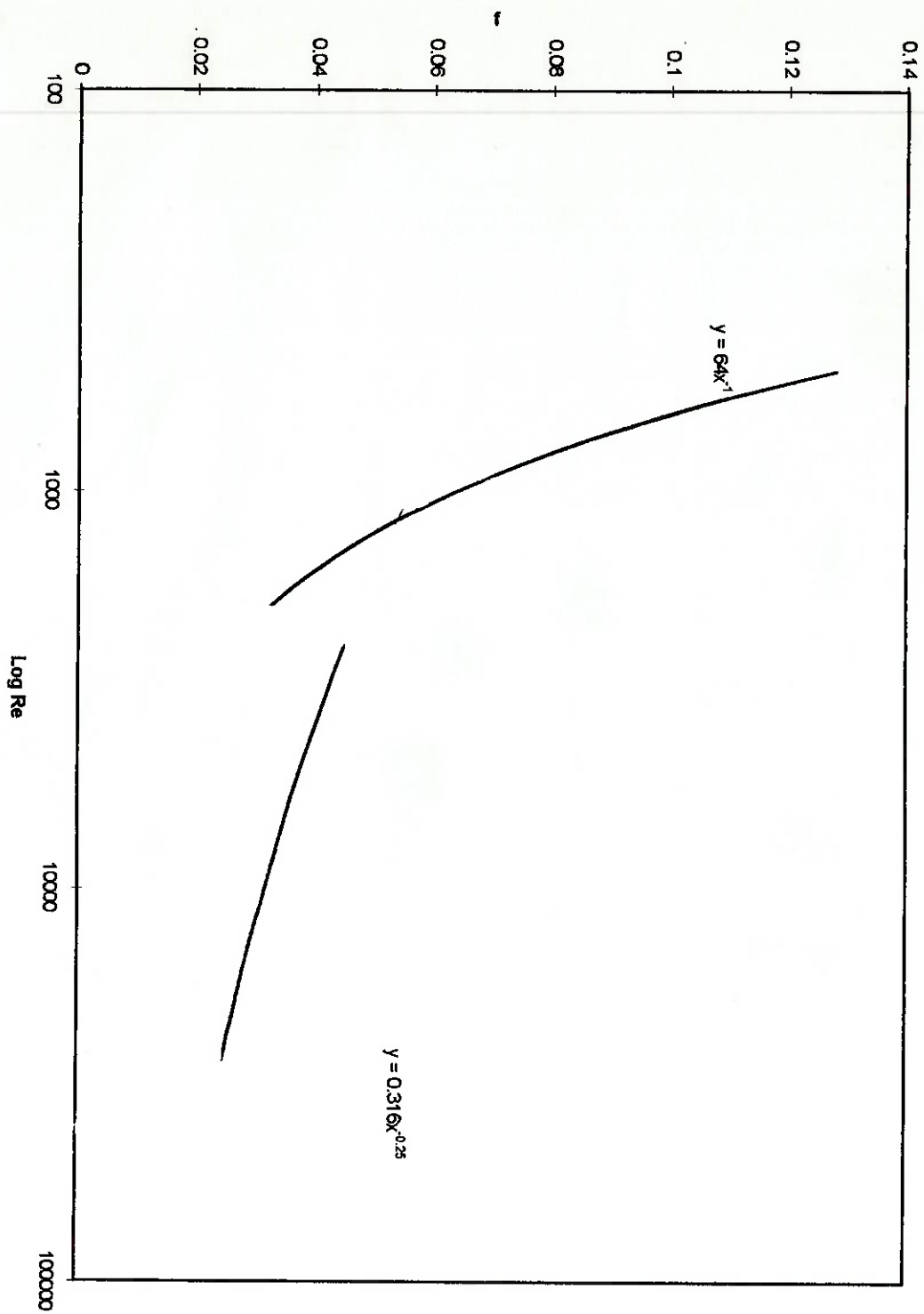
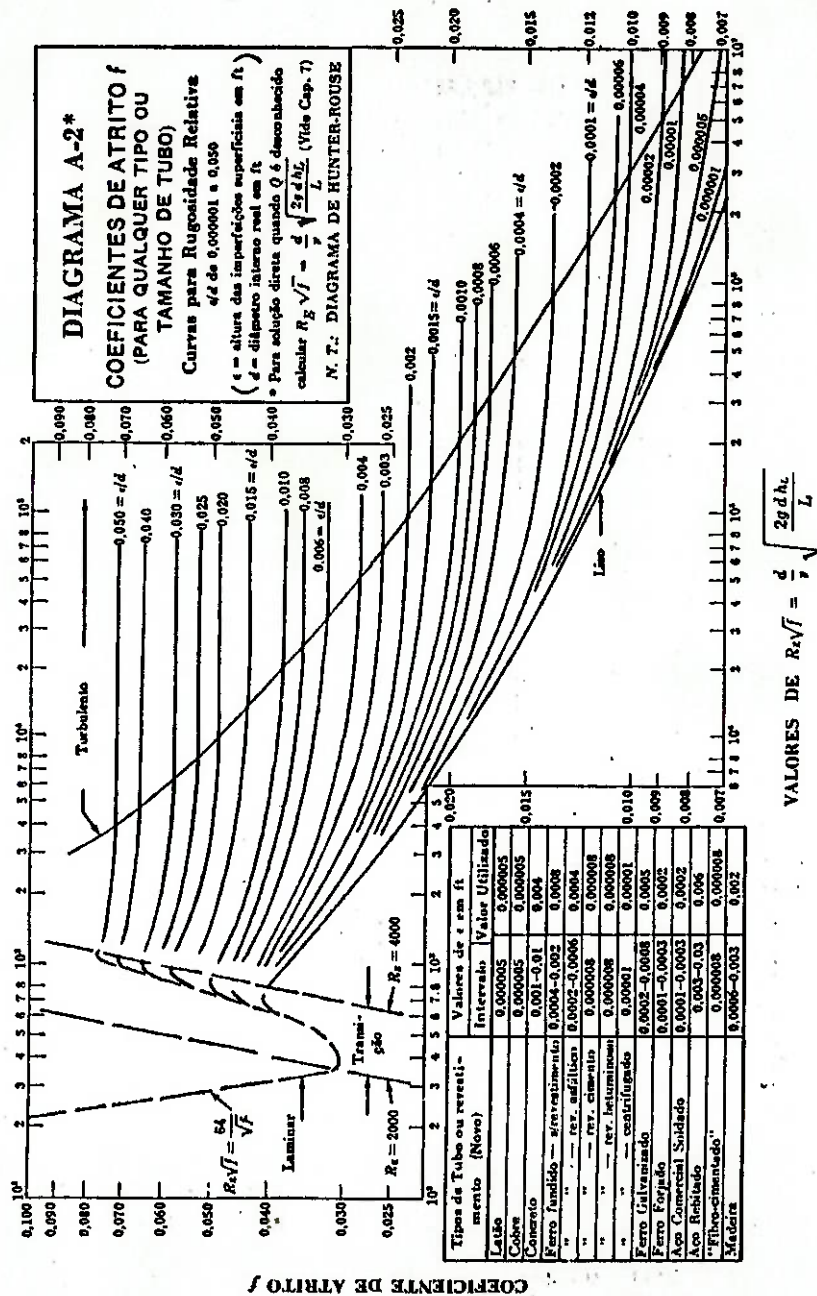


DIAGRAMA DE MOODY-ROUSE

APÊNDICE - TABELAS E DIAGRAMAS



ANEXO 3 : COTAÇÕES

MEDIDORES DE PRESSÃO

- 1) Transdutor de pressão Cole-Parmer, modelo H-68845-10
Capacidade de medição : 0 a 100 psi
Precisão : +/- 0.5 %
Preço US\$ 344,00
- 2) Manômetro portátil digital Cole-Parmer, modelo H-68920-72
Capacidade de medição : 0 a 7 bar
Precisão : 0.01 bar
Preço US\$ 617,00
- 3) Manômetro de precisão digital Cole-Parmer, modelo H-68920-38
Capacidade de medição : 0 a 100 psi
Precisão : 0.1 psi
Preço US\$ 324,00
- 4) Transdutor de pressão Cole -Parmer, modelo H-68001-04
Capacidade de medição : 0 a 100 psi
Precisão : +/- 0.25 %
Preço US\$ 395,00
- 5) Manômetro digital de alta precisão Cole-Parmer, modelo H-68921-06
Capacidade de medição : 0 a 100 psi
Precisão : +/- 0.25 %
Preço US\$ 559,0

BOMBAS :

1) Bombas Califórnia:

Bomba modelo DS9 Mark

Entrada 2", Saída 1,5"

Trifásica, Potência de 7,5 CV

Capacidade: 50mca, 18 m^3/h

Preço : R\$ 651,00