

Roteiro de experiência de laboratório:

Perdas de carga distribuída e localizada em escoamento turbulento

1 Introdução

Nesta experiência, serão medidas e analisadas as perdas de carga que ocorrem num escoamento turbulento forçado no interior de um tubo. Técnicas de medição de pressão e vazão serão empregadas para caracterizar tanto a parcela de perda de carga distribuída e quanto a parcela de perda de carga localizada, e determinar como variam com a vazão e o diâmetro do tubo.

O estudo de um escoamento turbulento totalmente desenvolvido em um tubo circular é de substancial interesse, pois é este tipo de escoamento que é observado na maioria das aplicações práticas. O escoamento turbulento é aquele caracterizado pelo movimento desordenado das partículas fluidas; em tubulações industriais, quando o número de Reynolds é superior a 4000 considera-se que o escoamento seja turbulento. Devido a este movimento desordenado, no escoamento turbulento não é possível avaliar a queda de pressão analiticamente; devemos recorrer a resultados experimentais e utilizar a análise dimensional para correlacioná-los.

Comparado com o que é observado para escoamentos laminares, a perda de carga distribuída em escoamentos turbulentos apresenta três diferenças importantes. A primeira é o valor da perda de carga, que é significativamente maior para os escoamentos turbulentos, devido principalmente às tensões turbulentas advindas das flutuações aleatórias das velocidades. A segunda é a forma da dependência da perda de carga com a vazão – enquanto para escoamentos laminares esta dependência é linear, para escoamentos turbulentos a perda de carga varia com uma potência maior da vazão. A terceira e última diferença é relativa aos efeitos da rugosidade da superfície interna do tubo, que podem ser muito importantes no escoamento turbulento enquanto que no escoamento laminar não tem influência alguma na perda de carga.

Além da perda de carga distribuída, será caracterizada a perda de carga localizada devido a uma ampliação ou redução brusca do diâmetro da tubulação. Perdas extras aparecem sempre que componentes adicionais, tais como válvulas, cotovelos e conexões, estão presentes na tubulação. Estas perdas são causadas principalmente pela separação do escoamento que ocorre nestes acessórios.

2 Objetivos

Esta experiência tem os seguintes objetivos:

- a) medir e caracterizar a perda de carga distribuída em um escoamento turbulento;
- b) determinar o fator de atrito para diversas condições de escoamento;
- c) determinar a rugosidade equivalente dos tubos utilizados a partir das medidas de perda de carga distribuída;
- d) medir e caracterizar a perda de carga localizada devida a uma ampliação ou redução brusca do diâmetro da tubulação.

3 Fundamentos

3.1 Aplicação da equação da energia e o conceito de perda de carga

Define-se *carga* em uma seção como a energia mecânica do escoamento por unidade de peso. Para escoamento incompressível e considerando que a pressão e a cota tenham variação desprezível ou nula ao longo da seção, a expressão da carga H_i numa seção i é:

$$H_i = \frac{p_i}{\gamma} + z_i + \frac{\alpha_i V_i^2}{2g}$$

onde p_i é a pressão estática na seção transversal considerada, γ é o peso específico do fluido, z_i é a cota em relação ao plano horizontal de referência, α_i é o coeficiente de energia cinética, V_i é velocidade média na seção e g é a aceleração da gravidade. Observe que a carga tem unidade de comprimento.

A equação da energia para um escoamento incompressível e permanente num duto, sem realização de trabalho externo pelo ou sobre o fluido, e com pressão e cota uniformes nas seções de entrada (1) e saída (2) pode ser integrada, resultando em

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) = H_1 - H_2 = h_{LT}, \quad (1)$$

onde h_L é a *perda de carga* do escoamento, que ocorre devido à conversão irreversível de energia mecânica (trabalho de fluxo) em energia interna e transferência de calor. Se o duto for horizontal e de seção transversal constante, a velocidade média e a cota também serão constantes. Portanto, neste caso a equação (1) pode ser simplificada para

$$\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} = h_{LT}. \quad (2)$$

A perda de carga h_{LT} pode ser dividida em duas parcelas, de acordo com a sua origem: a parcela de perda de carga *distribuída*, h_L , que é devida ao atrito presente no escoamento num trecho reto de tubulação, e a parcela de perda de carga *localizada* ou *singular*, h_s , que é causada por elementos adicionais presentes na tubulação, tais como válvulas, tês e curvas. Mas detalhes sobre como calcular cada uma destas parcelas são dados nas seções seguintes.

3.2 Cálculo da perda de carga distribuída

O cálculo da perda de carga distribuída em um escoamento turbulento é baseado na aplicação da análise dimensional. Verifica-se experimentalmente que a queda de pressão Δp num escoamento turbulento plenamente desenvolvido, ocorrendo em um trecho de tubo reto e horizontal, de diâmetro constante, é função de outros seis parâmetros,

$$\Delta p = \Delta p(D, L, \epsilon, \bar{V}, \rho, \mu),$$

onde D é o diâmetro do tubo, L é o comprimento do trecho considerado, ϵ é a rugosidade equivalente da superfície interna do tubo, \bar{V} é a velocidade média do escoamento, ρ é a massa específica e μ a viscosidade dinâmica do fluido. Aplicando as técnicas de análise dimensional, esta relação pode ser reescrita em forma adimensional como

$$\frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho\bar{V}^2} = \phi \left(Re, \frac{L}{D}, \frac{\epsilon}{D} \right).$$

Considerando que a perda de carga seja somente devida à parcela distribuída, podemos substituir o resultado da equação 2, chegando a

$$\frac{h_L}{\frac{\bar{V}^2}{2g}} = \phi \left(Re, \frac{L}{D}, \frac{\epsilon}{D} \right).$$

Além disso, experiências mostram que a perda de carga distribuída é diretamente proporcional a L/D . Sendo assim,

$$\frac{h_L}{\frac{\bar{V}^2}{2g}} = \frac{L}{D} \phi_1 \left(Re, \frac{\epsilon}{D} \right).$$

A função $\phi_1 \left(Re, \frac{\epsilon}{D} \right)$ é definida como fator de atrito, f ,

$$f \equiv \phi_1 \left(Re, \frac{\epsilon}{D} \right)$$

e, portanto,

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g}. \quad (3)$$

A equação (3) é chamada de fórmula universal de perda de carga de Darcy-Weisbach.

3.2.1 Efeito da rugosidade na perda de carga distribuída

A influência da rugosidade superficial na perda de carga distribuída num escoamento turbulento está diretamente ligada à forma do perfil de velocidades encontrada neste escoamento. O perfil de velocidades observado num escoamento turbulento no interior de um tubo é mais “achatado” do que o perfil para escoamento laminar, pois a turbulência intensifica fortemente a mistura no plano perpendicular ao escoamento. Para determinar o perfil de velocidades no escoamento turbulento é necessário recorrer a dados experimentais e empregar técnicas de análise dimensional. Uma correlação muito utilizada para o perfil de velocidade em escoamentos turbulentos é o de potência

$$\frac{u}{V_c} = \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}},$$

onde V_c é a velocidade no centro do tubo e n é uma função do número de Reynolds, cujos valores típicos vão de 6, para $Re \approx 2 \times 10^4$ a 10, para $Re \approx 3 \times 10^6$. A figura 1(a) mostra os perfis obtidos para diversos valores de n e o perfil de escoamento laminar, para comparação.

Considerando os perfis típicos dos escoamentos turbulentos, podemos concluir que as tensões viscosas são dominantes apenas numa região muito próxima à parede do tubo, onde há gradiente significativo de velocidades. Esta região é chamada de *subcamada viscosa*, e tem espessura δ_s . Dentro desta subcamada, a dissipação viscosa é capaz de amortecer as perturbações provocadas pelos elementos de rugosidade. Por conseguinte, se a subcamada viscosa for espessa o suficiente para cobrir os elementos de rugosidade, eles não causarão nenhuma perda adicional significativa, além daquelas já decorrente das dissipações viscosa e turbulenta. Nesta condição, dizemos que o escoamento está em regime *hidraulicamente liso*.

Entretanto, a espessura da subcamada viscosa é sensivelmente influenciada pelo número de Reynolds, pois o aumento deste parâmetro faz com que o perfil de velocidades se torne cada vez mais achatado. Como mostra a figura 1(b), para pequenos valores de Re , a espessura da subcamada viscosa pode ser suficiente para cobrir os elementos de rugosidade da parede do conduto. À medida que Re aumenta, δ_s diminui e, para um dado Re suficientemente elevado, alguns dos elementos de rugosidade emergem do filme laminar e penetram no núcleo turbulento, intensificando o caráter aleatório do escoamento e influenciando o atrito de forma bastante

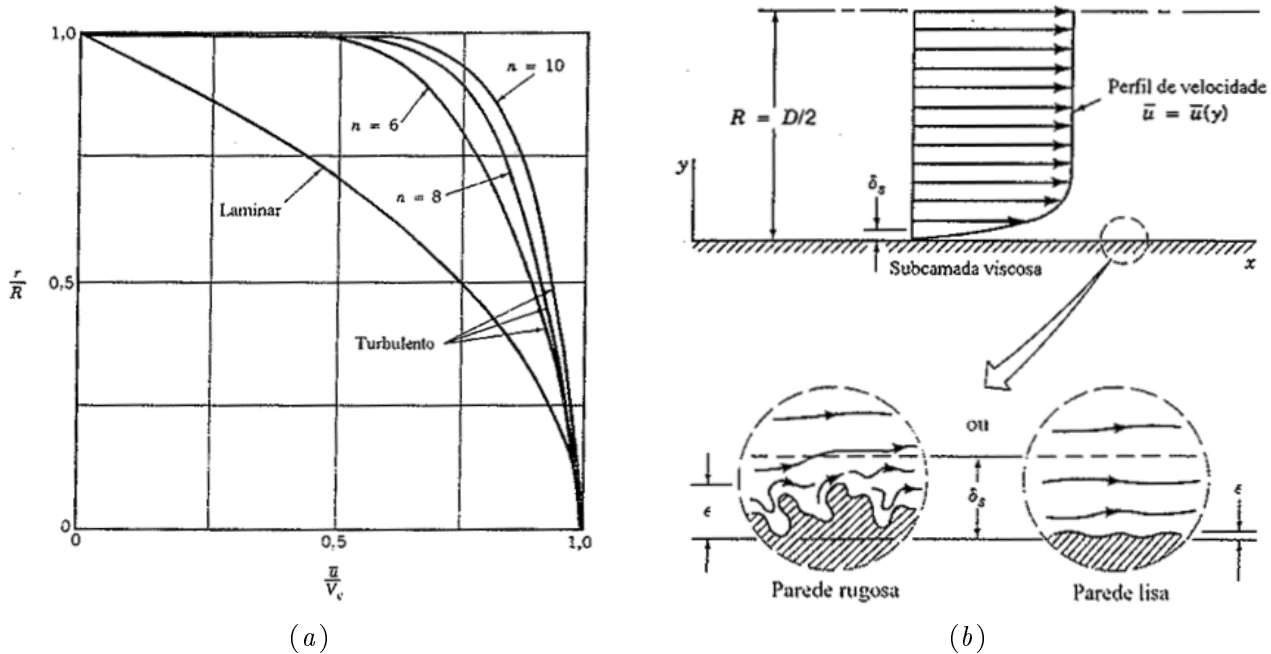


FIGURA 1 – (a) Perfis de velocidade de escoamentos no interior de tubos, laminar e turbulento com diversos valores de n , (b) Subcamada viscosa e efeito de elementos de rugosidade. Extraído de Munson *et al.* (2004).

significativa. A partir deste momento, o fator de atrito torna-se uma função do número de Reynolds e também da rugosidade relativa.

Para número de Reynolds ainda maiores, a maioria dos elementos de rugosidade na parede do tubo emerge através da subcamada viscosa, dominando completamente a natureza do escoamento na região próxima à parede. O arrasto e, por conseguinte, a perda de pressão, passa a depender somente do tamanho dos elementos de rugosidade. Tal situação é chamada de regime de escoamento *hidraulicamente rugoso* ou *completamente turbulento*. Neste regime, o fator de atrito depende apenas de ϵ/D .

Nikuradse (1933) realizou experimentos em que procurou quantificar a dependência do fator de atrito em relação à rugosidade e à variação do número de Reynolds. Para tanto, ele utilizou condutos com rugosidade uniforme controlada, colando na parte interna de diversos condutos areia de granulidade uniforme, obtendo assim um conjunto de condutos com diferentes valores de ϵ/D . Utilizando estes condutos, ele mediu os valores de perda de carga distribuída para diversas velocidades do fluido, isto é, diferentes números de Reynolds. Os resultados obtidos estão no gráfico apresentado na figura 2, no qual podem ser distinguidas 5 regiões diferentes, identificadas com algarismos romanos:

- (I) $Re < 2000$: nesta faixa de Reynolds o escoamento é laminar, o diagrama é uma reta e nota-se que o fator de atrito é função somente do número de Reynolds, havendo uma única reta para todos os valores de rugosidade relativa testados. Verifica-se que nesta região $f = 64/Re$.
- (II) $2000 < Re < 4000$: região de transição entre os regimes laminar e turbulento.
- (III) Reta na parte inferior da região de escoamento turbulento: nesta região, o escoamento é hidraulicamente liso, ou seja, os elementos de rugosidade estão imersos na subcamada viscosa. Quando isto acontece, o fator de atrito só depende do número de Reynolds e as curvas relativas aos diferentes valores de rugosidade relativa são coincidentes. Com o aumento do número de Reynolds, a subcamada viscosa fica cada vez mais delgada e as

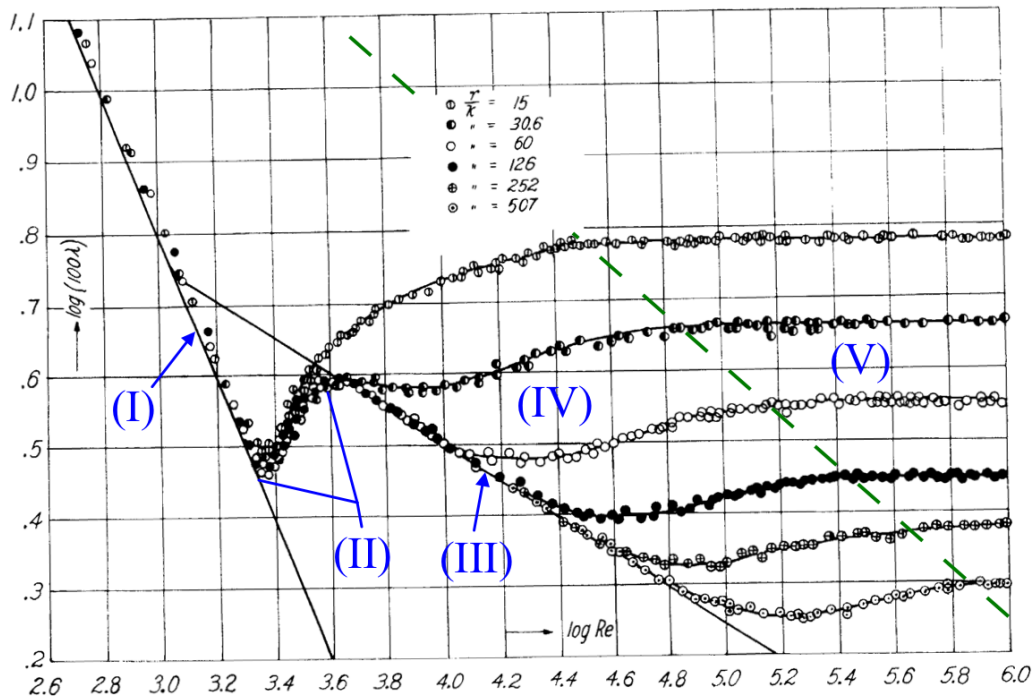


FIGURA 2 – Variação do fator de atrito em função do número de Reynolds e da rugosidade dos tubos, adaptado do artigo de Nikuradse (1933). Neste gráfico, o fator de atrito é denotado por λ , a rugosidade por k e o raio do tubo por r .

curvas acabam por deixar a região (III) para uma dado número de Reynolds. Note que quanto maior o valor de rugosidade relativa, menor é número de Reynolds para o qual as curvas começam a se distanciar desta região.

- (IV) Região entre a reta (III) e a linha tracejada que delimita a região (V): nesta região, as curvas relativas às diferentes rugosidades relativas se afastam do regime hidraulicamente liso. O fator de atrito depende tanto do número de Reynolds quanto da rugosidade relativa.
- (V) Região de curvas paralelas ao eixo das abcissas: esta região é delimitada pela linha tracejada no gráfico e corresponde à condição de escoamento hidraulicamente rugoso. Nesta região, o fator de atrito é função exclusiva da rugosidade relativa.

Uma dificuldade na obtenção de dados confiáveis é a determinação da rugosidade do duto, pois a rugosidade dos tubos comerciais não é tão uniforme e bem definida como aquela dos tubos ensaiados por Nikuradse. Entretanto, é possível arbitrar uma rugosidade relativa efetiva para os tubos comerciais típicos. Colebrook (1939), ao repetir o experimento de Nikuradse (1933) com condutos industriais, verificou que o comportamento das curvas era análogo. Superpondo então seus resultados aos de Nikuradse, Colebrook criou o conceito de *rugosidade equivalente*, isto é, o valor correspondente à rugosidade uniforme do tubo artificial para o qual os resultados de Colebrook, com tubos industriais, superpõem-se àqueles de Nikuradse na região hidraulicamente rugosa.

É importante notar que, ao longo do tempo, a maioria dos tubos apresenta um aumento de rugosidade relativa (provocado pela corrosão e presença de depósitos na superfície em contato com o fluido).

3.2.2 Cálculo do fator de atrito

Para calcularmos a perda de carga distribuída utilizando a equação (3) precisamos antes determinar o valor do fator de atrito, f . Para escoamentos turbulentos, o fator de atrito é determinado experimentalmente. Moody (1944) compilou os resultados de diversas medições do fator de atrito para uma vasta faixa de número de Reynolds e diversos valores de rugosidade equivalente. Os resultados deste trabalho são reproduzidos no gráfico da figura 3, que ficou conhecido por diagrama de Moody.

Para evitar a necessidade do uso de métodos gráficos na obtenção do fator de atrito para escoamentos turbulentos, diversas expressões matemáticas foram criadas através de curvas de ajuste dos dados experimentais. A expressão mais usual para o fator de atrito é a equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

3.3 Perda de carga singular

O escoamento em uma tubulação pode exigir a passagem do fluido através de uma variedade de acessórios, curvas ou mudanças de área. Ao passar por estes dispositivos, perdas de carga adicionais, chamadas de *perdas de carga localizadas* ou *singulares*, são encontradas, sobretudo como resultado da separação do escoamento. Essas perdas variam de dispositivo para dispositivo e, devido à complexidade do escoamento no interior destes, esta perda de carga adicional normalmente é determinada experimentalmente e, para a maioria dos componentes, são fornecidas na forma adimensional. A expressão mais comumente utilizada para modelar uma perda de carga localizada, h_s , é

$$h_s = K_s \frac{\bar{V}^2}{2g}, \quad (4)$$

onde K_s é o coeficiente de perda de carga singular, função da geometria da singularidade e do número de Reynolds característico do escoamento. Ou seja,

$$K_s = K_s(Re, \text{geometria da singularidade}) = \frac{2gh_s}{\bar{V}^2}. \quad (5)$$

Em muitas situações reais, o número de Reynolds é grande o suficiente para que o escoamento através do componente seja dominado pelos efeitos de inércia e a dependência do coeficiente de perda de carga localizada em relação ao número de Reynolds seja muito pequena. Dessa forma, na maioria dos casos práticos, K_s é função somente da geometria do dispositivo considerado.

Outra informação relevante para esta experiência é que no caso da perda de carga singular ser causada por uma redução ou ampliação de diâmetro, a velocidade média, \bar{V} , que deve ser utilizada nas expressões (4) e (5) é a maior, ou seja, aquela que ocorre na tubulação de menor diâmetro.

3.4 Linhas piezométrica e de energia

Os conceitos de linha piezométrica (LP) e linha de energia (LE) nos permitem realizar uma interpretação geométrica do escoamento e podem ser utilizados para propiciar um melhor entendimento do mesmo. Estas linhas estão ilustradas na figura 4.

A pressão estática, medida pelos tubos piezométricos, é igual a soma da carga de pressão e de elevação, e esta soma é denominada carga piezométrica. A *linha piezométrica* de um escoamento é o gráfico onde os valores da carga piezométrica são traçados em função da distância longitudinal no duto. Em outras palavras, é a linha formada pela série de medições piezométricas num escoamento.

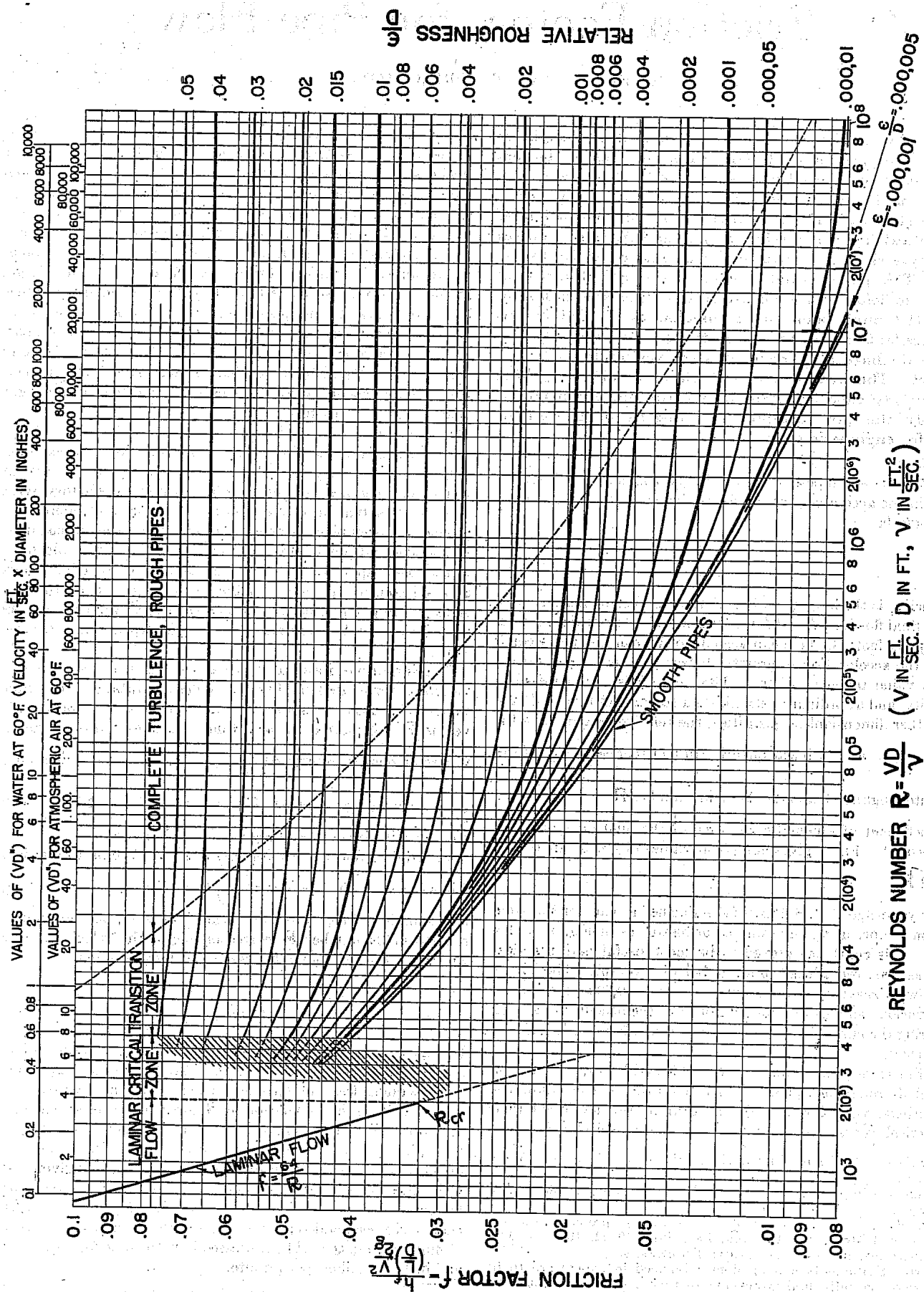


FIGURA 3 – Diagrama de Moody (1944).

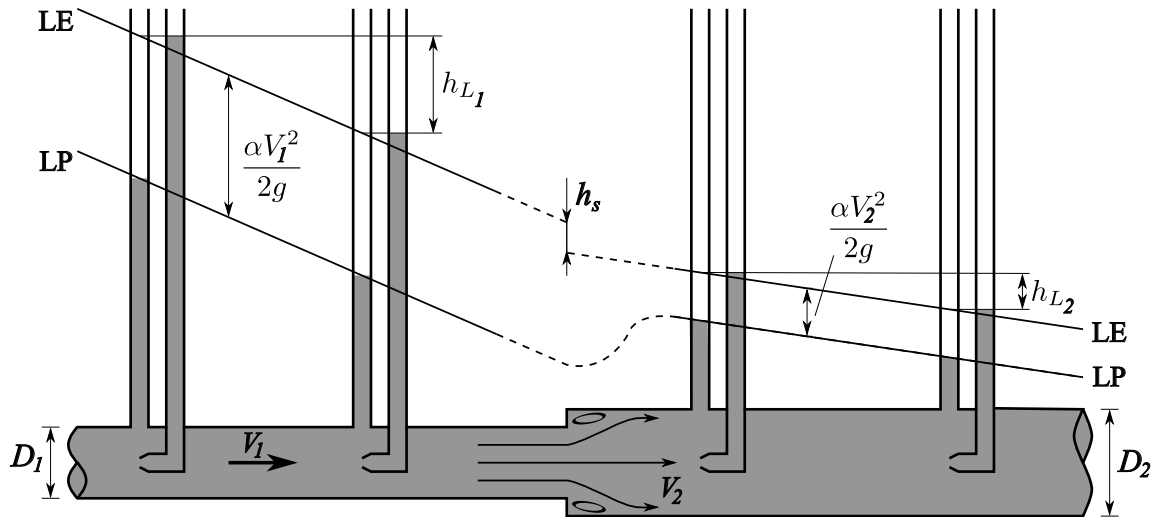


FIGURA 4 – Linha piezométrica (LP) e linha de energia (LE), com as perdas distribuídas e localizadas indicadas.

Já a *linha de energia* é o gráfico onde os valores da carga total, isto é, considerando também a energia cinética além da pressão e da cota, são traçados em função da distância longitudinal. A elevação da linha de energia pode ser obtida a partir da pressão de estagnação medida com um tubo de Pitot.

A LP está sempre abaixo da LE pela distância $\alpha V^2/2g$. Para tubulação reta, com diâmetro constante e sem perdas de carga localizadas, a linha de energia é paralela à linha piezométrica, pois o termo $\alpha V^2/2g$ é constante. A LE e, conseqüentemente, a LP, inclinam-se para baixo na direção do escoamento devido à perda de carga distribuída no tubo; quanto maior é a perda por unidade de comprimento, maior é a inclinação. Sendo assim, a perda de carga distribuída num escoamento pode ser estimada através da linha de energia, pois a diferença de cotas entre dois pontos quaisquer da linha de energia fornecerá o valor da perda de carga no trecho entre esses pontos.

Uma mudança súbita ocorre na LP e na LE sempre que ocorre uma perda devido a uma mudança súbita de geometria, como mostrado na figura 4. A mudança de diâmetros pode fazer com que a linha piezométrica apresente um salto positivo ou negativo dependendo se o diâmetro à jusante é maior ou menor do que o diâmetro à montante. Já a linha de energia sempre apresenta um salto negativo, pois este comportamento reflete a perda adicional de energia mecânica que ocorre devido à mudança brusca de diâmetros. Traçando-se as linhas de energia para os condutos de montante e de jusante da singularidade, e prolongando-as até a posição da singularidade, fica determinada graficamente, como indicado na figura, a perda de carga suplementar h_s , introduzida na instalação pela singularidade.

4 Aparato experimental

A instalação do laboratório, esquematizada na figura 5, é constituída por:

- a) Uma bomba centrífuga
- b) Um trecho de tubulação com diâmetro D_1 conhecido.
- c) Uma redução ou uma ampliação concêntrica da seção de escoamento (depende da bancada)
- d) Um trecho de tubulação com diâmetro D_2 conhecido.

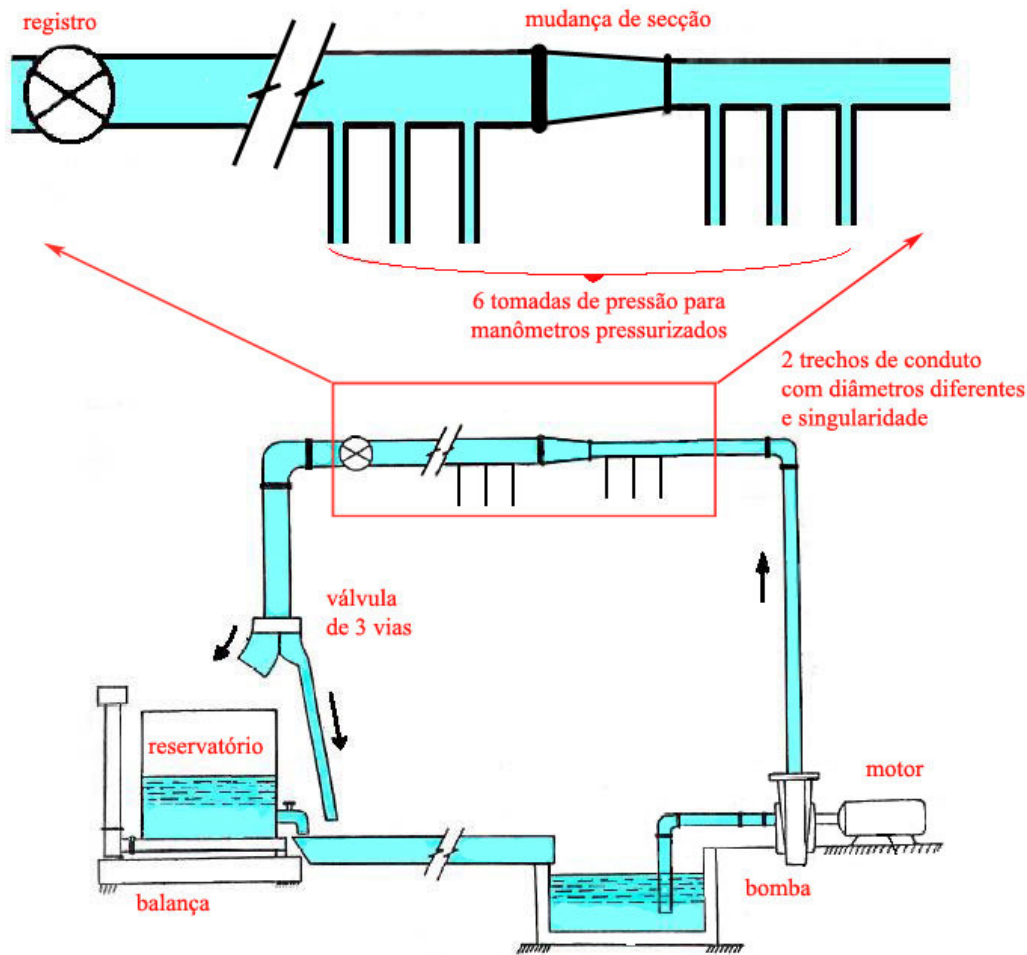


FIGURA 5 – Instalação do laboratório.

- e) Seis piezômetros graduados sendo três em cada trecho de tubulação, conectados a uma linha de ar comprimido.
- f) Um registro regulador de vazão.
- g) Uma válvula de três vias.
- h) Uma balança.

5 Procedimento experimental

O procedimento experimental consiste em:

- a) Medir a distância entre as tomadas de pressão e a posição da singularidade na tubulação.
- b) Medir a temperatura da água no reservatório com termômetro fornecido (pode ser feito em qualquer momento da experiência). Imergir somente a ponta do termopar no reservatório.
- c) O aparato experimental deverá estar funcionando na sua vazão máxima, preparado pelo técnico. Caso o aparato esteja desligado, ligar o conjunto motor-bomba, com o registro fechado, abrindo-o gradualmente para determinar a vazão máxima (obter o máximo desnível possível dos piezômetros).

d) Medir a vazão correspondente através do método das pesagens:

Registrar a massa inicial do reservatório sobre a balança e em seguida coletar uma quantidade de fluido no reservatório, mudando a posição da válvula de três vias. O tempo de coleta deve ser medido com um cronômetro e a quantidade de fluido coletada superior a três quartos da capacidade do reservatório, para diminuir a incerteza experimental. A massa final do reservatório cheio deve ser registrada. A vazão mássica pode ser então calculada dividindo a diferença entre massa final e massa inicial pelo tempo de enchimento. A vazão volumétrica é igual à vazão mássica dividida pela massa específica do fluido.

e) Efetuar a leitura dos seis piezômetros, enquanto o fluido está sendo coletado no reservatório da balança.

f) Reduzir gradativamente a vazão, de modo a se obter cinco valores intermediários entre a vazão máxima e a nula, repetindo, em cada condição, os itens 'd)' e 'e)'.

6 Questões propostas

Onde necessário, utilize o valor de $g = 9,79 \text{ m/s}^2$ para a aceleração da gravidade¹.

1. Determine a viscosidade e a massa específica da água a partir da temperatura medida. Isto pode ser feito usando, por exemplo, as tabelas encontradas nos apêndices dos livros indicados na bibliografia deste curso de Mecânica dos Fluidos ou aquelas afixadas na sala de túneis de vento.
2. Para cada uma das vazões:
 - a) Determine a vazão volumétrica no sistema e a velocidade média e número de Reynolds para cada um dos trechos de tubulação. Forneça numa tabela os resultados obtidos.
 - b) Trace a linha piezométrica ($LP = p/\gamma + z$) e a linha de energia ($LE = \alpha V^2/2g + p/\gamma + z$) no mesmo gráfico e em escala conveniente. Justifique o comportamento das curvas.
 - c) Calcule, para cada um dos trechos de tubulação, o valor de $h'_L = h_L/L$ e do fator de atrito f . Calcule também a perda de carga devida à singularidade h_s e o respectivo coeficiente de perda K_s . Mostre seus resultados numa tabela.
3. Trace, para cada um dos trechos de tubo, o gráfico da função $h'_L = h'_L(Q)$, onde $h'_L = h_L/L$ é a perda de carga por unidade de comprimento do tubo e Q é a vazão volumétrica, e justifique analiticamente o comportamento das curvas.
4. Determine, usando a equação de Colebrook, a rugosidade equivalente relativa (ϵ/D) dos dois trechos de tubo para cada uma das vazões. A partir desses dados, calcule a média e o desvio padrão de ϵ/D para cada trecho.
5. Num gráfico bilogarítmico de $f = f(Re)$, plote os pontos referentes aos valores de fator de atrito de cada trecho de tubo obtidos na questão 2.c) e as curvas obtidas usando a equação de Colebrook com os valores médios de ϵ/D calculados na questão 3. Comente. Qualitativamente, os pontos obtidos seguem os resultados obtidos por Nikuradse? Em caso afirmativo, em quais das regiões assinaladas na figura 2 os pontos se encontram?

¹www.iag.usp.br/geofisica/geodesia/laboratorio.htm

6. Trace o gráfico da função: $K_s = K_s(Re)$, ou seja, o coeficiente de perda de carga singular da redução (ou ampliação) dos diâmetros e compare os resultados com valores disponíveis na literatura, anexando a tabela ou gráfico utilizado, quando for o caso, citando a fonte bibliográfica.

Referências

- COLEBROOK, C. F. 1939. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *Journal of the Institute of Civil Engineers*, **11**(4), 133–156.
- MOODY, L. F. 1944. Friction factors for pipe flow. *Transactions of the ASME*, **66**(8), 671–684.
- MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., & OKIISHI, T. H. 2004. *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. 4ª ed. São Paulo: Blucher.
- NIKURADSE, J. 1933. Stromungsgesetze in rauhen Rohren. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, **4**(B), 361.