

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

LABORATÓRIOS INTEGRADOS EM ENGENHARIA BIOMÉDICA

TRABALHO PRÁTICO MF1

ESTUDO DO ESCOAMENTO NUMA TUBAGEM

1. Objetivos

A presente atividade experimental tem como principal objetivo a determinação de:

- Coeficiente de atrito viscoso em tubagens lisas, c_f ;
- Tensão de corte na parede, τ_0 ;
- Pressão estática;
- Perdas de carga localizadas;
- Perdas de carga distribuídas.

Para além disso, os alunos deverão ser capazes, com recurso ao manómetro de precisão, de determinar os seguintes pontos:

- Perfil de velocidades na secção da conduta;
- N° de Reynolds;
- Velocidade média, U_{med} ;
- Relação $U_{med}/U_{máx}$;
- Caudal volúmico e mássico;
- Coeficiente de descarga, C_d .

2. Materiais e Métodos

2.1. Descrição da Instalação Experimental

Todo o equipamento da presente instalação, à exceção dos manómetros, foi executado nas extintas Oficinas Gerais da Universidade do Minho. A instalação experimental está representada esquematicamente na Figura 1 e tem a seguinte constituição:

1. Tubeira de entrada elíptica;
2. Tubo liso de alumínio;
3. Ventilador centrífugo;
4. Difusor;
5. Suporte do tubo Pitot-estático;
6. Tubo Pitot-estático, com 3 mm de diâmetro e 4 furos opostos de 0.5 mm de diâmetro;
7. Tomadas de pressão estática ao longo do tubo 2;
8. Suporte do tubo de Pitot-total;
9. Tubo de Pitot-total, com 1 mm de diâmetro;
10. Micromanómetro de posicionamento do tubo Pitot-total;
11. Tomada de pressão estática;
12. Micromanómetro digital LOVE;
13. Micromanómetro digital LOVE;
14. Manómetro multitubos;
15. Estrutura de suporte, com nivelamento.

O princípio de funcionamento da instalação é simples, sendo o ar admitido no tubo de alumínio pela tubeira, por sucção do ventilador, ligado ao tubo pelo difusor.

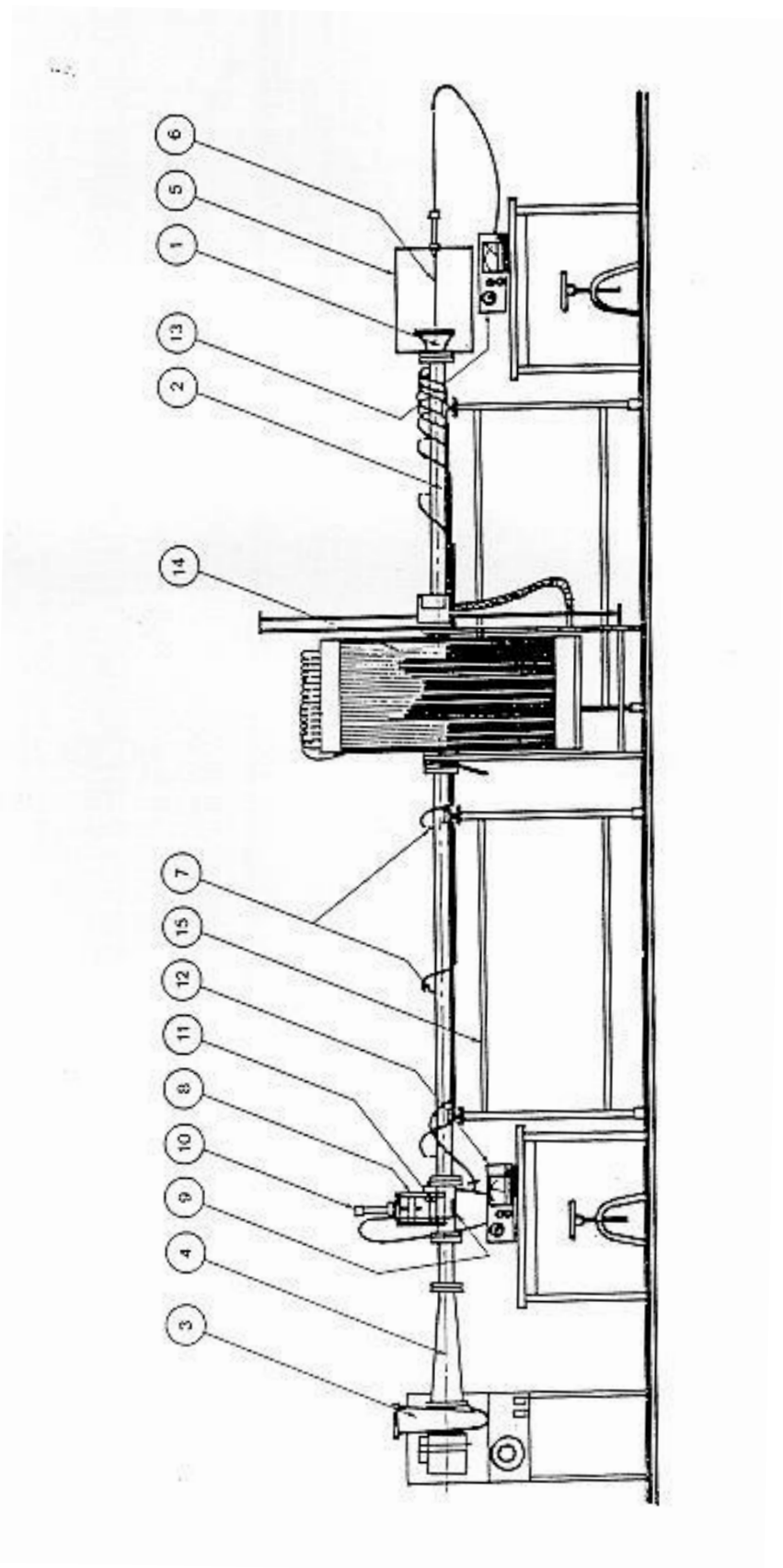


Figura 1 – Representação esquemática da instalação.

A tubeira de entrada (Figuras 2 e 3) tem um diâmetro de boca de 72 mm (entrada) e 36 mm de garganta (parte final da tubeira). Como o tubo tem 55 mm de diâmetro interno, há um alargamento súbito na passagem da tubeira para o tubo, o qual permite o estudo da perda de carga localizada numa zona de alargamento. Esta geometria permite um rápido estabelecimento de um escoamento completamente desenvolvido na tubagem, não sendo por essa razão necessária uma tubagem de grandes dimensões que inviabilizasse a sua montagem no laboratório.

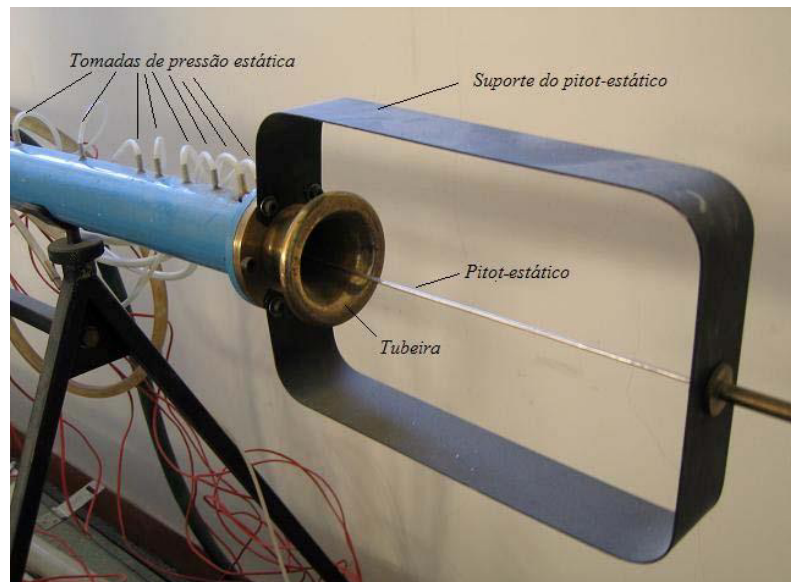


Figura 2 – Pormenor da tubeira de entrada.

De modo a permitir a determinação da evolução da pressão estática do escoamento ao longo da tubagem, foram executadas diversas tomadas de pressão na parede da mesma, convenientemente espaçadas (ver Tabela 2), que são monitorizadas em simultâneo no manómetro multitubos (Figura 3). Destas tomadas de pressão, 5 distam entre si 1 m, permitindo dessa forma calcular:

- A perda de carga ao longo de 4 m de tubo;
- A perda de pressão por unidade de comprimento;
- Coeficiente de atrito na tubagem.

Para a determinação da evolução da pressão estática ao longo do eixo da tubeira, é necessário recorrer ao tubo de Pitot-estático (Figura 2) colocado à entrada da tubeira e ao seu mecanismo de suporte, que permite o posicionamento do tubo de Pitot-estático ao longo do eixo da tubeira, desde uma posição 20 mm exterior ao plano da secção de entrada da tubeira, até um limite máximo de 130 mm para o interior do mesmo plano. A Figura 4 apresenta uma vista da secção de entrada da tubeira. O tubo de Pitot-estático deverá ser conectado com o manómetro digital por forma a realizar as medições.

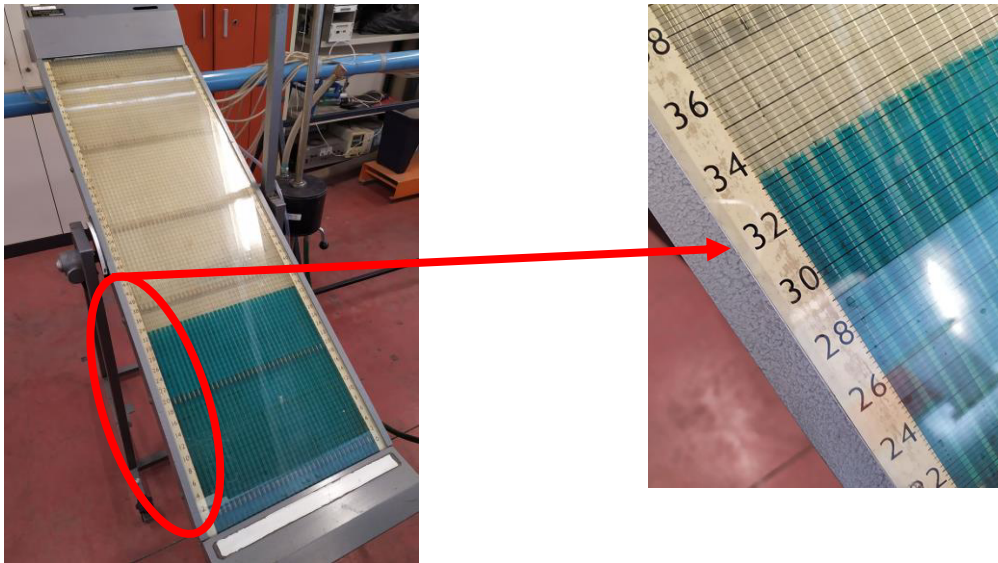


Figura 3 – Manómetro multitubos.

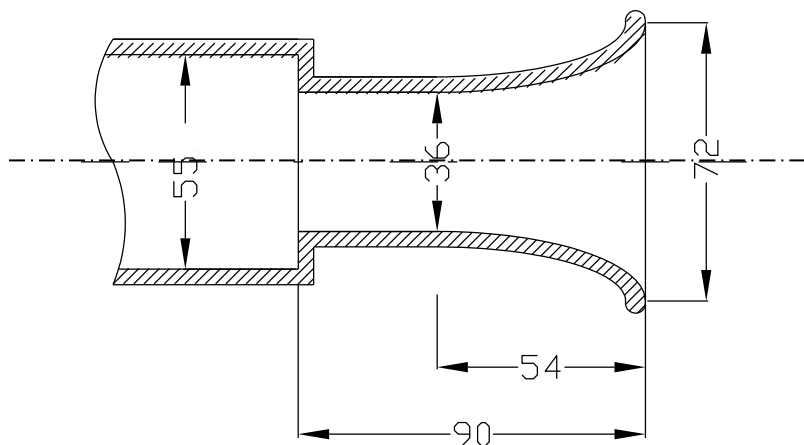


Figura 4 – Secção da tubeira de entrada.

Na região próxima do ventilador existe uma secção em acrílico, Figura 5, suportado por um mecanismo, dotado de um micrómetro que serve para movimentar e posicionar um tubo de Pitot-total.

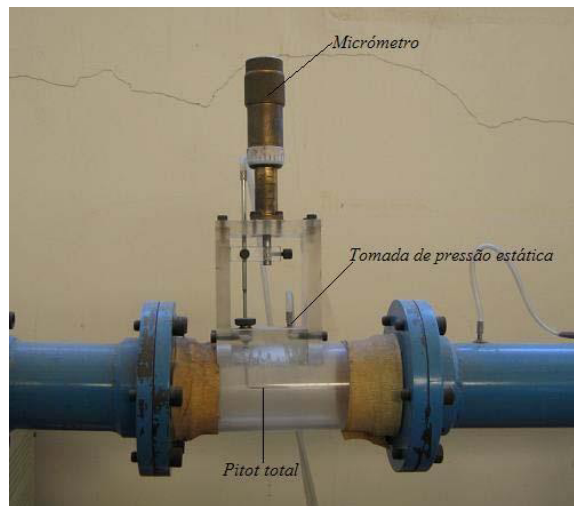


Figura 5 – Localização do micrómetro para auxílio nas medições.

2.2. Procedimento Experimental

Antes do início do ensaio os alunos devem certificar-se:

- Que a instalação se encontra nivelada e, caso não esteja, proceder ao seu nivelamento com o auxílio dos parafusos de ajuste existentes nos suportes da tubagem (15);
- Que nenhum corpo estranho se encontra na zona de aspiração ou no interior da tubagem;
- Do estado e da sequência das ligações das diferentes tomadas de pressão;
- Da inclinação do manómetro multitubos a 30°;
- Do ajuste do zero do manómetro multitubos, registando esse valor (valor que corresponde à pressão atmosférica);

Após a verificação de todos os pontos anteriores, é necessário ligar o ventilador (3) e esperar cerca de 5 minutos para permitir que o escoamento estabilize, antes de dar início à recolha de valores.

Nota 1 – Invariavelmente, quando se fazem leituras em escoamentos turbulentos verifica-se a existência de flutuações nos valores da pressão, sendo necessário estimar um valor médio. Por vezes, para se conseguir a obtenção de um valor médio razoável, é necessário fazer uma observação durante cerca de meio minuto.

Nota 2 – Os valores observados para cada ponto de leitura, devem ser registados de acordo com as escalas dos aparelhos utilizados, ficando o tratamento dos dados, inclusive a conversão de unidades (caso se justifique), para mais tarde, por exemplo, neste caso no manómetro multitubos é possível ler *cm de álcool* com uma inclinação α e é esse valor

que vai ser registado, deixando a conversão para a pressão equivalente em $mm\ H_2O$ ou Pa para mais tarde, caso seja necessário.

Nota 3 – os valores lidos no manómetro multitubos são sempre relativos ao seu zero, neste caso a pressão atmosférica, e cujo valor é necessário registar previamente, para efetuar as devidas conversões no final.

Nota 4 – a massa volúmica do álcool utilizado no manómetro multitubos é de $790\ kg/m^3$.

2.2.1. Determinação da evolução da pressão estática

Uma vez passados os 5 minutos após a ligação do ventilador podem efetuar as leituras dos valores das 14 tomadas de pressão estática e registar os mesmos numa tabela semelhante à que é aqui apresentada (Tabela 1).

O posicionamento das diversas tomadas de pressão ao longo da tubagem encontra-se definido na segunda coluna da Tabela 1, relativamente ao início da instalação, que coincide com a secção de entrada da tubeira ($X=0\ mm$) e é positivo no sentido do escoamento.

Tabela 1 – Registo da pressão estática ao longo da tubagem.

Tomada	X (mm)	l man 30° (cm álcool)	Δl man 30° (cm álcool)	ΔH (mm H ₂ O)	Δp (Pa)
ambiente	0				
1	72				
2	94				
3	126				
4	162				
5	198				
6	234				
7	314				
8	434				
9	684				
10	1000				
11	2000				
12	3000				
13	4000				
14	5000				

No final desta fase do trabalho os alunos devem apresentar os valores da pressão estática em $cm\ álcool$, $mm\ H_2O$ e Pa e representar graficamente a evolução da pressão estática ao longo do escoamento (leituras 1 a 14), utilizando para tal uma folha de cálculo (Excel).

2.2.2. Determinação do perfil de velocidades

No que diz respeito à determinação do perfil de velocidades, para determinar os valores locais da velocidade é necessário conhecer o valor da pressão dinâmica, que não é mais do que a diferença entre a pressão total nesse local (valor do Pitot-total) e o valor da pressão estática, lida na mesma secção do Pitot-total. Essa diferença é lida num micromanómetro digital (Figura 6), que nos fornece a diferença de pressões entre o Pitot-total do micromanómetro e a tomada de pressão estática nessa mesma secção (tomada 15 da instalação).



Figura 6 – Micromanómetro digital.

Nota 1 - Invariavelmente, quando se fazem leituras em escoamentos turbulentos verifica-se a existência de flutuações nos valores da pressão, sendo necessário estimar um valor médio. Por vezes, para se conseguir a obtenção de um valor médio razoável, é necessário fazer uma observação de cerca de meio minuto.

Nota 2 - Os valores observados para cada ponto de leitura, devem ser registados de acordo com as escalas dos aparelhos utilizados, ficando o tratamento dos dados, inclusive a conversão de unidades (caso se justifique), para mais tarde.

As leituras na região próxima da parede devem ser feitas com pequenos intervalos de distância, de acordo com o indicado na Tabela 2, pelo facto de aí ocorrerem os principais gradientes de pressão. Na região central as leituras poderão ser mais espaçadas. A leitura inicial é feita com o tubo de Pitot-total encostado à parede do tubo, a que corresponde uma distância de 0,5mm entre a parede e a linha de eixo do tubo de Pitot, dado este ter 1 mm de diâmetro. Uma vez feita a leitura neste ponto, desloca-se o Pitot-total para a posição seguinte

com o auxílio do micrómetro, repetindo-se o processo até à última leitura ($y=30$ mm). As leituras indicadas (Tabela 2) varrem todo o raio inferior, existindo uma leitura no eixo da tubagem (27.5 mm) e uma última para além do eixo, que serve para verificar a existência de simetria axial.

Tabela 2 – Variação da pressão dinâmica ao longo da secção.

Medição	Raio (mm)	Y (mm)	Δp (Pa)	u (m/s)	Caudal (L/s)	u/U_{\max}
1	27.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	27.0	0.5				
3	26.5	1.0				
4	26.0	1.5				
5	25.0	2.5				
6	22.5	5.0				
7	20.0	7.5				
8	17.5	10.0				
9	15.0	12.5				
10	12.5	15.0				
11	10.0	17.5				
12	7.5	20.0				
13	5.0	22.5				
14	2.5	25.0				
15	0.0	27.5				
16	2.5	30.0				

Os valores para o primeiro ponto, ao qual corresponde $Y=0$ mm, já estão naturalmente preenchidos: velocidade nula na parede à qual corresponde caudal local também nulo, pois como todos se recordarão o caudal é igual ao produto da velocidade pela área da secção normal ao escoamento.

O valor de Y é medido desde a parede inferior, sendo arbitrado como positivo o sentido ascendente. Relativamente ao raio, o seu valor é obtido em relação ao eixo.

Cada volta no parafuso de deslocamento do micromanómetro equivale a 2.5 mm.

Conforme já foi dito anteriormente, os valores de pressão obtidos correspondem à pressão dinâmica e esta permite o cálculo da velocidade local.

Uma vez obtidos os valores da velocidade que compõem a tabela 1, é então possível obter a representação gráfica da evolução do perfil de velocidades ao longo da secção, assim como o perfil de velocidades adimensional.

Compare o perfil obtido com o perfil fornecido pela lei da potência um sétimo:

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{R} \right)^{1/7} \quad (1)$$

Uma vez definido o perfil de velocidades, o passo seguinte consiste em obter o valor do caudal através da sua integração numérica. A determinação do caudal, Q , e da velocidade média, U , é feita a partir do perfil de velocidades, pressupondo a existência de simetria axial (ver Figura 5):

$$Q = U\pi R^2 = \int_0^R 2\pi r u(r) dr \cong 2\pi \sum_{i=0}^z \frac{u_i + u_{i+1}}{2} \frac{r_i + r_{i+1}}{2} (r_{i+1} - r_i) \quad (2)$$

em que z é o número de leituras até ao eixo inclusive, e U a velocidade média.

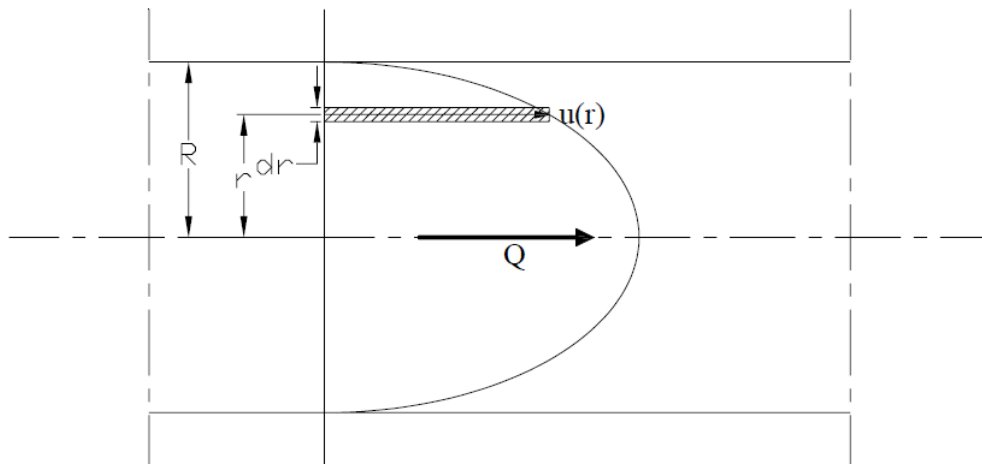


Figura 5 – Perfil de velocidades de um escoamento com simetria axial.

Uma forma alternativa de apresentar o problema para o cálculo do caudal, Q (que não é mais do que a soma dos caudais locais que podemos associar a cada velocidade determinada, dividindo a área da secção numa série de anéis), passa pelo cálculo desses mesmos caudais locais, Q_r , para o que é recomendável que associem a cada velocidade local a área de um anel, A_r , de raio exterior igual ao raio médio entre o ponto em análise e o anterior (na sequência da forma como surgem na tabela 2) e de raio interior e igual ao raio médio do ponto em análise e do seguinte, ou seja,

$$Q_r = u_r A_r \quad (3)$$

Em que,
$$A_r = \pi \left[\left(\frac{r_{i+1} + r_i}{2} \right)^2 - \left(\frac{r_i + r_{i-1}}{2} \right)^2 \right], \text{ sendo } r_{i+1} > r_i \quad (4)$$

$$r_e = \frac{r_{i+1} + r_i}{2} \text{ e } r_i = \frac{r_i + r_{i-1}}{2}, \text{ exceto claro está para o primeiro e último anéis.}$$

A velocidade média encontrada, confirma ou não o valor teórico esperado?

$$\begin{aligned} U_{med} &\approx 0.81 U_{max}, \text{Re} > 2100 \\ U_{med} &= 0.5 U_{max}, \text{Re} < 2100 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2.3. Determinação do coeficiente de atrito e da tensão de corte.

Uma vez determinada a queda de pressão ao longo da tubagem, Δp , para a zona onde o escoamento se encontra estabilizado (entre a tomada de pressão 10 e 14) e sendo conhecidas as seguintes propriedades:

- Comprimento do tubo, L .
- Diâmetro, d .
- Massa volúmica do fluido do escoamento, ρ .
- Velocidade média do escoamento, U .

É então possível calcular o coeficiente de atrito c_f , usando a seguinte equação:

$$\Delta p = 2c_f \frac{L}{D} \rho U^2 \quad (6)$$

Uma vez obtido o valor de c_f , o valor da tensão de corte na parede, τ_0 , pode ser facilmente calculado através de:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} c_f \rho U^2 \quad (7)$$

No final desta secção, devem comparar os valores de c_f e τ_0 calculados com os valores teóricos que seriam obtidos recorrendo às expressões teóricas fornecidas pela Lei de Blasius:

$$c_f = 0.079 \text{Re}^{-1/4} \quad (8)$$

$$\tau_0 = 0.0395 \rho \nu^{1/4} d^{-1/4} U^{7/4} \quad (9)$$

Em que U é a velocidade média [m/s] e ν a viscosidade cinemática [m²/s] ($\nu = \mu/\rho$).

2.2.4. Determinação do perfil de velocidades na tubeira e da pressão estática no alargamento súbito

O valor da velocidade pode ser facilmente determinado recorrendo à equação de Bernoulli (eq. 10), para cada uma das secções da tubeira, para as quais se conhece o valor da pressão estática e o respetivo diâmetro.

$$\frac{p_x}{\gamma} + \frac{U_x^2}{2g} + z_x = cte \quad (10)$$

Onde:

$\frac{p}{\gamma}$ - o termo piezométrico [m], sendo p a pressão [Pa] e γ o peso específico [N/m³].

$\frac{U_x^2}{2g}$ - o termo cinético, sendo U a velocidade média [m/s] e g a aceleração da gravidade [m/s²].

z - a cota ou altura [m].

Nota – a equação de Bernoulli é um caso particular da equação da energia. Considerando que não existem trocas de calor com o exterior, que o fluido é invíscido e incompressível e que o regime de escoamento é estacionário, então é possível escrever a equação na forma apresentada na equação (10).

Para conhecer a pressão estática numa dada secção da tubeira é necessário recorrer ao tubo de Pitot-estático (Figura 2), instalado no suporte existente à entrada da tubeira. Este tubo de Pitot-estático permite a recolha do valor da pressão estática numa amplitude de 150 mm ao longo do eixo da tubeira, desde 20 mm antes do início desta, até 130 mm após a secção de entrada.

O número de leituras a efetuar para avaliar a evolução do perfil de pressões depende da precisão pretendida, no entanto, é aconselhável usar intervalos de 10 mm entre as leituras, conforme indicado na Tabela 3. A primeira leitura deverá ser efetuada localizando a tomada de pressão 20 mm antes do início da tubeira, repetindo as leituras de 10 em 10 mm até aos 130 mm (16 leituras no total).

Tabela 3 – Registo dos valores da evolução da pressão na tubeira.

	X (mm)	ΔP (Pa)	U (m/s)
1	-20		
2	-10		
3	0		
4	10		
5	20		
6	30		
7	40		
8	50		
9	60		
10	70		
11	80		
12	90		
13	100		
14	110		
15	120		
16	130		

A partir dos valores recolhidos é possível construir um gráfico com a evolução da pressão na tubeira e outro com a evolução da velocidade.

Nota – Para a determinação do caudal teórico para efeitos de cálculo do coeficiente de descarga, C_d , é recomendável que utilizem a leitura para $X = 80$ mm, como referência para o cálculo do caudal teórico.

Além da elaboração dos gráficos com a evolução da pressão e da velocidade na região da tubeira e da determinação do C_d para o ponto recomendado ($x=80$ mm), é desejável que no final determinem o valor do caudal teórico e respetivo C_d , tendo como referência as localizações indicadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de caudal teórico e C_d tendo como referência diferentes pontos.

X (mm)	$Q_{\text{teórico}}$ (m ³ /s)	C_d
0		
20		
40		
60		
80		
100		

- Uma vez efetuados os cálculos, justifique as diferenças encontradas nos valores da Tabela 3.
- Haverá alguma justificação para a escolha de $X = 80$ mm como referência, nestes cálculos?

O coeficiente de descarga é por definição a relação entre o caudal real e o caudal teórico.

$$C_d = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{teórico}}} \quad (11)$$

O caudal teórico resulta do facto de se admitir que as perdas ao nível da tubeira de entrada são desprezáveis. Partindo desse pressuposto, é possível obter o valor do caudal, conhecendo-se o valor da velocidade numa secção (admitindo que as perdas na região da tubeira de entrada são nulas, então perfil de velocidades será constante e igual à velocidade média) e o respetivo diâmetro.

Nesta altura dispõem já de todos os dados necessários para a análise da evolução da pressão na região do alargamento súbito, que se encontra a 90 mm de distância do início da tubeira. As últimas cinco leituras recolhidas na Tabela 3 encontram-se na região do

alargamento súbito (leituras 12 a 16), assim como as tomadas 2 e 3 da Tabela 1, devendo ser usadas para a análise da evolução da pressão nessa zona.

- Compare os resultados obtidos com as curvas teóricas resultantes da aplicação da equação de Bernoulli.

3. Bibliografia

Teixeira, J.C. – Apontamentos de Transferência de Fluidos e Calor, Universidade do Minho.

Almeida, H. – Apontamentos de Mecânica dos Fluidos, Universidade do Minho, 1985.

Nunes, A.V.A. – Síntese de Noções Básicas sobre Escoamentos em Tubagens, Universidade do Minho, 1991.

White, F.M. – Mecânica dos Fluidos, McGraw Hill, 2002.

Munson; Young; Okiishi – Fundamentals of Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, 1994