

# Prácticas de Laboratorio de Mecánica de Fluídos

Concepción Paz Penín  
Eduardo Suárez Porto  
Miguel Concheiro Castiñeira  
Marcos Conde Fontenla

**Universidade de Vigo**

Servizo de Publicacións

2018

Edición

Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo

Edificio da Biblioteca Central

Campus de Vigo

36310 Vigo

© Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo, 2018

© Concepción Paz Penín, Eduardo Suárez Porto, Miguel Concheiro Castiñeira e Marcos Conde Fontenla

ISBN: 978-84-8158-795-1

D.L.: VG 489-2018

Impresión: Tórculo Comunicación Gráfica, S.A.

*Reservados todos os dereitos. Nin a totalidade nin parte deste libro pode reproducirse ou transmitirse por ningún procedemento electrónico ou mecánico, incluídos fotocopia, gravación magnética ou calquera almacenamento de información e sistema de recuperación, sen o permiso escrito do Servizo de Publicacións da Universidade de Vigo.*

# Prólogo

## Motivación e obxectivos

Tipicamente, dentro da maioría das titulacións de Enxeñería, a porcentaxe de materias ou partes das mesmas de natureza experimental é elevada. Esta tradición que ven de lonxe, segue a ser totalmente necesaria, se cadra con máis forza hoxe en día. As disciplinas como a Mecánica de Fluídos, non poden esquecer o traballo de laboratorio, de cara a validar de forma experimental e mediante a visualización, os resultados obtidos de forma teórica na aula.

O coñecemento experimental aporta ao alumnado unha visión real e intuitiva dos conceptos físicos, que é imprescindible para poder analizar dun xeito crítico os coñecementos teóricos. Deste xeito, os conceptos teóricos aséntanse en base á experimentación e sustentan un aprendizaxe estable e duradeiro. Citando a Confucio: ”Contáronmo e esquecino, o vin e o entendín, fíxeno e aprendino”.

Preténdese que este manual sexa empregado como referencia para realización das prácticas de laboratorio polo alumnado de Mecánica de Fluídos, de segundo curso das titulacións de Grado en Enxeñería Mecánica, Grado en Enxeñería en Tecnoloxías Industriais, Grado en Enxeñería Química Industrial, Grado en Enxeñería Electrónica Industrial e Automática, Grado en Organización Industrial, Grado en Enxeñería Eléctrica, Grao en Enxeñería da Enerxía, Grao en Enxeñería dos Recursos Mineiros e Enerxéticos, e Grado en Enxeñería Aeroespacial.

Pese ao feito constatado da importancia da experimentación en materias coma Mecánica de Fluídos, a literatura previa existente neste campo é es-

casa, non é recente (os laboratorios actualizan e modernizan a súa dotación cos anos), e ademais, encóntrase moi diseminada. Os autores, todos profesores con varios anos de docencia en Mecánica de Fluídos, consideran importante a recompilación e actualización destes contidos nun texto de referencia para o alumnado.

Tivéronse en conta catro aspectos para a realización do mesmo:

- Conducir ao estudante a unha comprensión clara dos principios da Mecánica de Fluídos, tendo en conta que estes son básicos para moitas materias posteriores que se sustentan sobre os coñecementos desta.
- Desenvolver unha aprendizaxe intuitiva mediante a inclusión de contidos de carácter máis descritivo. A este fin, este manual engade moita axuda visual: numerosas fotografías, gráficos, esquemas e diagramas conceptuais, especificamente creados para os nosos bancos de ensaio e así facilitar a comprensión dos montaxes e experimentos a realizar.
- Relacionar os coñecementos impartidos en teoría coa realización experimental das prácticas de laboratorio. Sen pretender substituíla, senón complementar a aquela, e relacionala dun xeito moi sinxelo coas medidas empíricas a realizar.
- Guiar dun xeito claro e sinxelo ao alumnado, sobre cales son os pasos a seguir para completar satisfactoriamente as diferentes prácticas de laboratorio, servíndolles de guión, pero fomentando a súa actitude crítica e participación na elaboración da mesma.

## Estrutura

Este libro está organizado en oito capítulos, correspondentes aos diferentes equipos do laboratorio de Mecánica de Fluídos. Atendendo ás diferentes prácticas que se poden facer con cada equipo, conforman un total de dez sesións prácticas de dúas horas de realización.

Na primeira instalación, mídese a xeración, evolución, e caracterización dun chorro de aire creado por un orificio en descarga libre á atmosfera. O segundo equipo constitúe a reprodución do famoso experimento de Reynolds,

para caracterizar o réxime de fluxo, laminar ou turbulento. O terceiro capítulo emprega un túnel de vento para medir en modelos a escala reducida o comportamento aerodinámico de diferentes obxectos. De seguido, no cuarto avalíanse os efectos hidrodinámicos no caso dunha lubricación de buxeiro. O seguinte equipo corresponde á instalación con soprador de aire, na que se miden caudais con diferentes métodos, obtéñense curvas características e mídense as perdas de carga na instalación. O sexto equipo é unha instalación de turbinas hidráulicas que permite caracterizar os parámetros dunha central hidroeléctrica. A sétima parte é unha instalación de bombas que permite caracterizar a asociación de bombas en serie e en paralelo. Por último cuantifícase o efecto dun golpe de ariete nunha instalación de auga comparando os efectos da lonxitude, material e diámetro da instalación.

Para cada un dos equipos facilítanse unhas normas de seguridade e descríbese a instalación experimental. En cada un dos capítulos, detállanse os fundamentos do seu funcionamento, establécese unha metodoloxía a seguir, e finalmente expónse un apartado de toma de datos e o traballo de gabinete necesario para a consecución dos resultados. Calquera información adicional como táboas, gráficas ou ábacos tamén figuran neste apartado.

## Notación e sistema de unidades

Seguindo a tradición na materia de Mecánica de Fluídos, a notación seguida é a máis estendida na bibliografía sobre a materia. En canto ao sistema de unidades, procurouse o uso do Sistema internacional (SI) na medida do posible. Pero é necesario considerar o feito de que na práctica é usual o emprego de, por exemplo, litros por minuto e bares para expresar caudais volumétricos e presións respectivamente, dados os rangos de operación habituais nas máquinas hidráulicas.



# Nomenclatura

$A$	Área	$[m^2]$
$c$	Celeridade de onda	$[ms^{-1}]$
$C_d$	Coeficiente de descarga	$[-]$
$C_D$	Coeficiente de arrastre	$[-]$
$C_L$	Coeficiente de sustentación	$[-]$
$C_q$	Coeficiente de caudal	$[-]$
$D, d$	Diámetro	$[m]$
$e$	Espesor	$[m]$
$E$	Módulo de elasticidade	$[Nm^{-2}]$
$f$	Factor de fricción	$[-]$
$F$	Forza	$[N]$
$g$	Aceleración da gravidade	$[ms^{-2}]$
$h$	Perdas de carga	$[m]$
$H$	Altura	$[m]$
$I$	Intensidade eléctrica	$[A]$
$K_m$	Coeficiente de descarga	$[-]$
$L$	Lonxitude	$[m]$

$\dot{m}, G$	Fluxo ou gasto máxico	$[kg s^{-1}]$
$M$	Par	$[Nm]$
$Ma$	Número de Mach	$[-]$
$n$	Velocidade de xiro	$[min^{-1}]$
$\vec{n}$	Vector normal	$[-]$
$p$	Presión	$[Nm^{-2}]$
$Q, \dot{V}$	Caudal volumétrico	$[m^3 s^{-1}]$
$r$	Radio	$[m]$
$Re$	Número de Reynolds	$[-]$
$S$	Superficie	$[m^2]$
$t$	Tempo	$[s]$
$T$	Período de tempo	$[s]$
$T^a$	Temperatura	$[K]$
$v$	Velocidade	$[ms^{-1}]$
$V$	Volume//Tensión eléctrica	$[m^3] // [V]$
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas	$[m]$
$W$	Peso	$[N]$
$\dot{W}, P$	Potencia	$[kg m^2 s^{-3}]$
$z$	Cota	$[m]$

**Símbolos gregos**

$\beta$	Coeficiente de descarga	$[-]$
$\Delta$	Variación	$[-]$



$\varepsilon$	Rugosidade absoluta	$[m]$
$\lambda$	Espesor relativo	$[-]$
$\mu$	Viscosidade dinâmica ou molecular	$[kg\,m^{-1}\,s^{-1}]$
$\eta$	Rendimento	$[-]$
$\rho$	Densidade	$[kg\,m^{-3}]$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$[m^2\,s^{-1}]$
$\gamma$	Peso específico	$[kg\,m^{-2}\,s^{-2}]$
$\tau$	Esforço cortante	$[Nm^{-2}]$
$\omega$	Velocidade angular de xiro	$[s^{-1}]$



# Índice

<b>Nomenclatura</b>	<b>7</b>
<b>1 Medición nun chorro libre de aire</b>	<b>23</b>
1.1 Descrición do banco de ensaios . . . . .	23
1.2 Normas de seguridade . . . . .	25
1.3 Obxectivos . . . . .	25
1.4 Fundamentos . . . . .	25
1.4.1 Chorro libre . . . . .	26
1.4.2 Tubo de Pitot . . . . .	27
1.4.3 Caudal . . . . .	28
1.4.4 Gasto máxico . . . . .	29
1.5 Metodoloxía experimental . . . . .	30
1.5.1 Distribución radial de presións-velocidades . . . . .	30
1.5.2 Gasto máxico . . . . .	31
1.5.3 Cantidade de movemento . . . . .	32
1.6 Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	34
<b>2 Experimento de Reynolds</b>	<b>39</b>
2.1 Descrición do banco de ensaios . . . . .	39
2.2 Normas de seguridade . . . . .	42
2.3 Obxectivos . . . . .	42
2.4 Fundamentos . . . . .	42
2.4.1 Explicación do fenómeno físico . . . . .	42
2.4.2 Características xerais dos fluxos laminares e turbulentos	46
2.5 Metodoloxía experimental . . . . .	49

2.5.1	Visualización dos diferentes réximes de fluxo . . . . .	49
2.5.2	Determinación do número de Reynolds . . . . .	50
2.5.3	Cálculo do factor de fricción . . . . .	50
2.6	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Medición en túnel de vento</b>	<b>53</b>
3.1	Descrición do banco de ensaios . . . . .	53
3.2	Normas de seguridade . . . . .	55
3.3	Obxectivos . . . . .	57
3.4	Fundamentos . . . . .	57
3.4.1	Tubo de Pitot . . . . .	57
3.4.2	Tubo de Prandtl . . . . .	58
3.4.3	Sonda de velocidade de fío quente . . . . .	59
3.4.4	Balanza de medida de forzas . . . . .	59
3.4.5	Medidores de presión manométrica . . . . .	60
3.5	Metodoloxía experimental . . . . .	61
3.5.1	Distribución de velocidades a distintos caudais de aire no túnel de vento . . . . .	61
3.5.2	Cálculo do coeficiente de arrastre dun cilindro . . . . .	61
3.5.3	Distribución de presións ao redor dun perfil de á . . . . .	62
3.5.4	Cálculo dos coeficientes aerodinámicos para un perfil de á NACA 0012 . . . . .	62
3.6	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Medición da presión en buxeiros</b>	<b>73</b>
4.1	Descrición do banco de ensaios . . . . .	73
4.2	Normas de seguridade . . . . .	76
4.3	Obxectivos . . . . .	76
4.4	Fundamentos . . . . .	77
4.4.1	Tipos de Lubricación . . . . .	77
4.4.2	Viscosidade . . . . .	79
4.4.3	Curva de Stribeck . . . . .	80
4.4.4	Lubricación hidrodinámica nun buxeiro cilíndrico . . . . .	80
4.5	Metodoloxía experimental . . . . .	82
4.5.1	Efecto da fendedura do buxeiro . . . . .	82

4.5.2	Efecto da velocidade de xiro . . . . .	83
4.6	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Soprador de aire</b>	<b>87</b>
5.1	Descrición do banco de ensaios . . . . .	87
5.2	Normas de seguridade . . . . .	87
5.3	Soprador de aire. Medidas de caudal . . . . .	89
5.3.1	Obxectivos . . . . .	89
5.3.2	Fundamentos . . . . .	89
5.3.3	Metodoloxía experimental . . . . .	95
5.3.4	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	98
5.4	Soprador de aire. Perdas de carga . . . . .	99
5.4.1	Obxectivos . . . . .	99
5.4.2	Fundamentos . . . . .	99
5.4.3	Metodoloxía experimental . . . . .	104
5.4.4	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	104
5.5	Soprador de aire. Curvas características . . . . .	108
5.5.1	Obxectivos . . . . .	108
5.5.2	Fundamentos . . . . .	108
5.5.3	Metodoloxía experimental . . . . .	110
5.5.4	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Medición en banco de turbinas</b>	<b>115</b>
6.1	Descrición do banco de ensaios . . . . .	115
6.2	Normas de seguridade . . . . .	119
6.3	Obxectivos . . . . .	119
6.4	Fundamentos . . . . .	120
6.5	Metodoloxía experimental . . . . .	121
6.5.1	Curva característica dunha turbina Francis (velocidade de xiro constante) . . . . .	121
6.5.2	Curva característica dunha turbina Francis (posición fixa do distribuidor) . . . . .	124
6.5.3	Curva característica dunha turbina Pelton (posición fixa do inxector) . . . . .	125

6.5.4	Curva característica dunha turbina Pelton (velocidade de xiro constante) . . . . .	125
6.6	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	126
<b>7</b>	<b>Medición en banco de bombas</b>	<b>135</b>
7.1	Descrición do banco de ensaios . . . . .	135
7.2	Normas de seguridade . . . . .	137
7.3	Obxectivos . . . . .	137
7.4	Fundamentos . . . . .	138
7.5	Metodoloxía experimental . . . . .	140
7.5.1	Medida do caudal . . . . .	140
7.5.2	Curva característica da bomba e da instalación . . . . .	141
7.5.3	Curva característica de dúas bombas en serie . . . . .	142
7.5.4	Curva característica do acoplamento de dúas bombas en paralelo . . . . .	144
7.6	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	144
<b>8</b>	<b>Medición dun golpe de ariete</b>	<b>151</b>
8.1	Descrición do banco de ensaios . . . . .	151
8.2	Normas de seguridade . . . . .	155
8.3	Obxectivos . . . . .	155
8.4	Fundamentos . . . . .	156
8.4.1	Explicación do fenómeno físico . . . . .	156
8.4.2	Velocidade da onda de presión . . . . .	158
8.4.3	Período da tubaxe . . . . .	161
8.4.4	Tempo de peche . . . . .	161
8.4.5	Presión máxima en peche total, lento e uniforme da válvula . . . . .	162
8.4.6	Sistemas de atenuación do golpe de ariete . . . . .	163
8.5	Metodoloxía experimental . . . . .	165
8.5.1	Medida da velocidade da onda de presión . . . . .	165
8.5.2	Amortiguación dos efectos do golpe de ariete mediante cheminea de equilibrio . . . . .	167
8.5.3	Medida do tempo de estabilización . . . . .	169
8.5.4	Altura máxima de oscilación . . . . .	169

8.5.5	Medida da perda de carga no conduto . . . . .	169
8.6	Toma de datos e traballo de gabinete . . . . .	170
	<b>Bibliografía</b>	<b>175</b>





# Índice de Figuras

1.1	Banco de ensaios de chorro libre. . . . .	24
1.2	Distribución/perfil de velocidades nas proximidades dunha parede (capa límite). . . . .	26
1.3	Esquema simplificado do fluxo de aire no chorro creado. . .	26
1.4	Esquema simplificado de funcionamento dun tubo de Pitot.	27
1.5	Esquema de Pitot. . . . .	29
1.6	Comportamento do chorro, obtención da distribución radial de velocidades. . . . .	30
1.7	Volume de control de estudio do chorro. . . . .	31
1.8	Comportamento do chorro - Distribución radial de velocidades.	33
1.9	Comportamento do chorro - Evolución do diámetro do chorro coa altura. . . . .	36
1.10	Comportamento do chorro - Evolución das velocidades no eixo coa altura. . . . .	36
1.11	Comportamento do chorro - Evolución da impulso coa altura.	37
2.1	Esquema banco de ensaios. . . . .	40
2.2	Detalle das distintas formas do fío de colorante no tubo de visualización do fluxo [31]. . . . .	41
2.3	Fotografías dos diferentes réximes de fluxo observados na realización do experimento de Reynolds. . . . .	44
2.4	Transición Laminar - Turbulento. . . . .	45
2.5	Exemplos de fluxos turbulentos. No fume dun tren, nun rápido dun río, ou nunha estela de avión. . . . .	48

3.1	Fotografía do túnel de vento en funcionamento. . . . .	54
3.2	Esquema e imaxe do túnel de vento empregado. . . . .	54
3.3	Detalles dos principais compoñentes do túnel: (a) balanza e columnas de manómetros, (b) variador de frecuencia, (c) sección de traballo, (d) distribuidor de caudal e ventilador, (e) reixa de protección entrada. . . . .	56
3.4	Esquema dos aparatos de medida. . . . .	58
3.5	Esquema do Tubo de Prandtl. . . . .	58
3.6	Detalle do anemómetro de fío quente. . . . .	59
3.8	Detalle das columnas de auga de medición de presión. . . .	60
3.7	Detalle da balanza de medida de forzas. . . . .	60
3.9	Esquema conceptual do arrastre nun cilindro. . . . .	61
3.10	Esquema conceptual de perda de sustentación nun á, asociado ao ángulo de ataque. . . . .	63
3.11	Representación gráfica da distribución / perfil de velocidades a diferentes alturas, para dous caudais. . . . .	65
3.12	Gráficas experimentais do arrastre en cilindros e esferas [1–3].	66
3.13	Gráfica de resultado a modo de exemplo. . . . .	67
3.14	Distribución de presións sobre o á para diferentes ángulos de ataque. . . . .	68
3.15	Coefficiente de sustentación en función do ángulo de ataque.	69
3.16	Coefficiente de arrastre en función do ángulo de ataque. . . .	70
3.17	Cociente $C_L/C_D$ en función do ángulo de ataque. . . . .	71
3.18	Valores publicados para o perfil NACA 0012 pola NASA [9].	72
4.1	Fotografía do banco de ensaios. . . . .	74
4.2	Equipo de indicación e mando. Manual TM 260 Gunt. . . .	74
4.3	Esquema do banco de ensaios de lubricación de buxeiro. Manual TM 260.06 Gunt. . . . .	75
4.4	Viscosidade, analoxía. . . . .	79
4.5	Curva típica de Stribeck, e espesor da película de fluído asociado. . . . .	81
4.6	Arranque dun buxeiro con lubricación perfecta. . . . .	81
4.7	Detalle dun buxeiro con lubricación perfecta. . . . .	82

4.8	Modo de traballo da unidade de axuste para a cuncha do buxeiro (anchura da fendadura do buxeiro). . . . .	83
4.9	Distribución de presións sobre a cuncha do buxeiro. A presión aumenta ao reducir a fendadura do buxeiro. . . . .	84
4.10	Gráfica de resultados. Distribución de presións asociada a diferentes excentricidades do eixo de xiro. Dende 'a' ata 'e', varía a excentricidade, a velocidade constante, en 'c' en está centrado. . . . .	85
4.11	Gráfica de resultados. Distribución de presións asociada a diferentes velocidades de xiro. Dende 'a' ata 'e', e dende 'f' ata 'j', aumentamos a velocidade de xiro. . . . .	86
5.1	Fotografía do banco de ensaios do soprador. . . . .	88
5.2	Esquema completo da instalación. . . . .	88
5.3	Detalles dos principais compoñentes do banco de ensaios: (a) manómetros de auga, (b) válvula de diafragma, (c) cóbado na tubaxe, (d) tubo de Pitot-Prandtl, (e) soprador, e (f) venturímetro. . . . .	90
5.4	Esquema do flotámetro ou rotámetro. . . . .	91
5.5	Esquema do diafragma ou placa orificio. . . . .	92
5.6	Esquema do venturímetro. . . . .	94
5.7	Esquema do tubo de Pitot-Prandtl. . . . .	95
5.8	Coeficiente Km (Placa orificio). . . . .	96
5.9	Coeficiente de descarga fronte a Reynolds (Placa orificio). . . . .	97
5.10	Coeficiente de descarga fronte a Reynolds (Venturi). . . . .	97
5.11	Coeficiente de velocidades fronte a Re. (Pitot-Prandtl). . . . .	98
5.12	Diagrama de Moody. . . . .	105
5.13	Esquema de obtención do punto de funcionamento. . . . .	110
5.14	Gráficas de resultados obtidos. . . . .	111
6.1	Fotografía do banco de ensaios. . . . .	116
6.2	Fotografía das dúas turbinas dispoñibles: turbina Pelton (esquerda), e turbina Francis (dereita). . . . .	116
6.3	Esquema do banco de ensaios e principais compoñentes do mesmo. . . . .	117

6.4	Esquema do percorrido da auga nunha turbina tipo Pelton e Francis [22]. . . . .	122
6.5	Detalle da turbina Pelton en funcionamento. . . . .	126
6.6	Curva característica. Velocidade de xiro constante. Posición panca - Potencia no eixo $[W]$ . . . . .	128
6.7	Curva característica. Velocidade de xiro constante. Posición panca - Rendemento total [%]. . . . .	129
6.8	Curva característica. Posición fixa distribuidor. Velocidade de xiro, $n$ $[rpm]$ - Par, $M$ $[Nm]$ . . . . .	132
6.9	Curva característica. Posición fixa distribuidor. Velocidade de xiro, $n$ $[rpm]$ - Potencia no eixo, $P_a$ $[W]$ . . . . .	133
6.10	Curva característica. Posición fixa distribuidor. Velocidade de xiro, $n$ $[rpm]$ - Rendemento total [%]. . . . .	134
7.1	Fotografía do banco de ensaios. . . . .	136
7.2	Esquema do banco de bombas. . . . .	136
7.3	Esquema de funcionamento de bombas en serie. . . . .	139
7.4	Esquema de funcionamento de bombas en paralelo. . . . .	139
7.5	Curva característica bomba. $H - Q$ . . . . .	146
7.6	Curva característica bomba. $P - Q$ . . . . .	147
7.7	Curva característica bomba. $\eta_t - Q$ . . . . .	148
7.8	Curva característica coas bombas traballando en serie. $H - Q$ . . . . .	149
7.9	Curva característica coas bombas traballando en paralelo. $H - Q$ . . . . .	150
8.1	Fotografía do banco de ensaios. . . . .	152
8.2	Depósito de nivel constante. . . . .	153
8.3	Detalle das válvulas de impacto ou de peche rápido. . . . .	154
8.4	Detalle das chemineas de equilibrio. . . . .	154
8.5	Variación teórica da presión na válvula, sen considerar perdas por fricción. . . . .	157
8.6	Variación real da presión na válvula, considerando perdas por fricción. . . . .	158
8.7	Esquema da evolución do golpe de ariete, de arriba cara abaixo, evolución temporal. . . . .	159

8.8 Pulsos de presión sen cheminea de equilibrio. . . . .	166
8.9 Pulsos de presión con cheminea de equilibrio. . . . .	168



# Capítulo 1

## Medición nun chorro libre de aire

### 1.1 Descrición do banco de ensaios

No banco de ensaios desta practica, fotografía da figura 1.1, o elemento máis importante é un soprador de aire, que dende o interior da bancada principal subministra aire que se descarga á atmosfera a través do orificio de saída. A regulación do caudal faise cunha válvula manual.

Está dotado de dúas columnas de auga, unha para a medida da presión no interior da cámara, e outra acoplada a un tubo de Pitot para a medida da velocidade do chorro na atmosfera. O equipo ten unha guía cilíndrica vertical escalada, na que se conectan os dous sistemas de medida principais:

- O xa mencionado tubo de Pitot, está acoplado mediante parafusos de aperte ao eixo, posibilitando o xiro do dispositivo. Emprégase un goniómetro graduado para a realización de medidas en diferentes alturas e ángulos respecto ao eixe vertical do chorro. Esta versatilidade permite caracterizar a evolución do chorro na atmosfera e a súa apertura.
- Un medidor da forza xerada polo chorro de aire a diferentes alturas, empregando, ben un prato plano ou ben un cilíndrico.

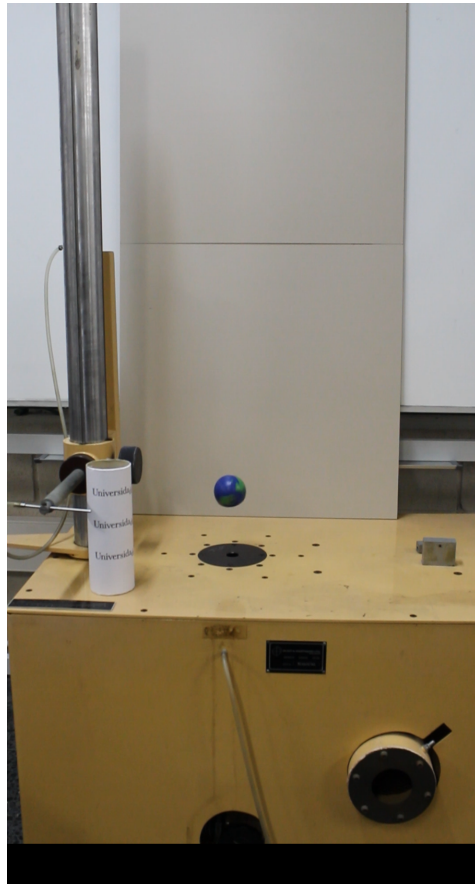


Figura 1.1: Banco de ensaios de chorro livre.



## 1.2 Normas de seguridade

En beneficio de todos e co fin de evitar contratempos innecesarios, débense cumprir escrupulosamente as seguintes medidas de seguridade:

- Non obstruír por completo a saída do chorro de aire.
- Manipular coidadosamente o equipo (evitar caídas sobre a bancada) tanto nas medicións de forza coma nas de velocidade.
- Non regular o caudal do chorro de aire durante a realización da práctica.
- En caso de ruído ou vibracións excesivas ou anómalas, apagar o equipo.
- Consultar ao profesor responsable da práctica ante calquera dúbida.

## 1.3 Obxectivos

A realización desta práctica ten como obxectivos os seguintes:

- Demostración experimental dos principios de conservación da masa e conservación da cantidade de movemento.
- Determinación da forza exercida polo chorro sobre un obxecto coma consecuencia da desviación das liñas de fluxo a diferentes distancias á tobeira.
- Introducción ao comportamento dos fluxos libres ou non confinados, en contraposición cos fluxos en condutos.

## 1.4 Fundamentos

Entendemos por turbulencia libre a turbulencia dunha corrente que non circula entre paredes ríxidas. Distinguimos tres casos: estelas (ou sombras dinámicas), bordes de chorro libre e o propio chorro libre obxecto do experimento. Son movementos moito máis inestables que os confinados (Re

que marca a transición  $\cong 10^2$ ). Os esforzos viscosos son desprezables fronte aos turbulentos. Ademais, os problemas de turbulencia libre teñen sempre carácter de capa límite, é dicir, a extensión transversal é pequena en relación á lonxitudinal e existe un forte gradiente de velocidade na dirección transversal.

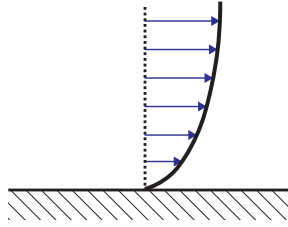


Figura 1.2: Distribución/perfil de velocidades nas proximidades dunha parede (capa límite).

### 1.4.1 Chorro libre

Fórmase un chorro libre cando unha corrente sae por un orificio. Prescindindo das velocidades moi pequenas, o chorro libre faise turbulento por completo case inmediatamente, consecuencia pola cal se mestura parcialmente co fluído ambiente en repouso, que é parcialmente arrastrado augas abaixo, crecendo así o caudal e a anchura, e diminuíndo a velocidade, figura 1.3. O impulso consérvase.

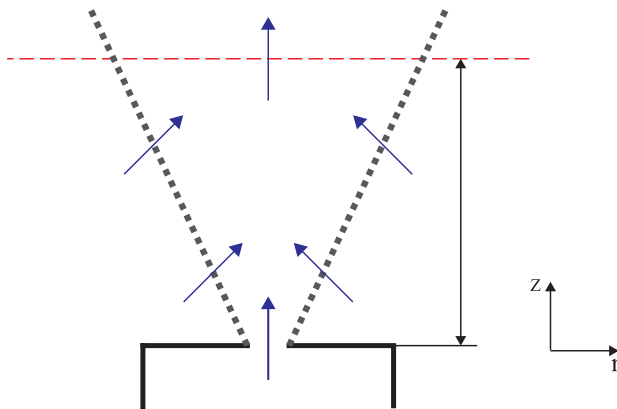


Figura 1.3: Esquema simplificado do fluxo de aire no chorro creado.

Ao saír, o chorro faíno cun certo perfil de velocidades, que pode ser uniforme. Con todo, o fluído exterior frea a corrente e nos bordos do chorro orixínanse capas de mestura que proporcionan unha transición suave entre o fluído exterior en repouso e o que está en movemento no chorro. Estas zonas de mestura ensánchanse a medida que aumentamos en altura do xeito amosado na figura 1.3.

A masa que leva o chorro é da mesma orde da que se incorpora, e polo tanto, pode sufrir incrementos da orde de ela mesma. Con todo, o impulso que se incorpora pola dirección radial anúlase por simetría, polo que a cantidade de movemento que entra polo orificio é a mesma que a que sae pola parte superior do mesmo.

### 1.4.2 Tubo de Pitot

Analizando a figura 1.4, cos puntos indicados podemos relacionar o estado enerxético entre os diferente puntos seguindo unha liña de corrente.

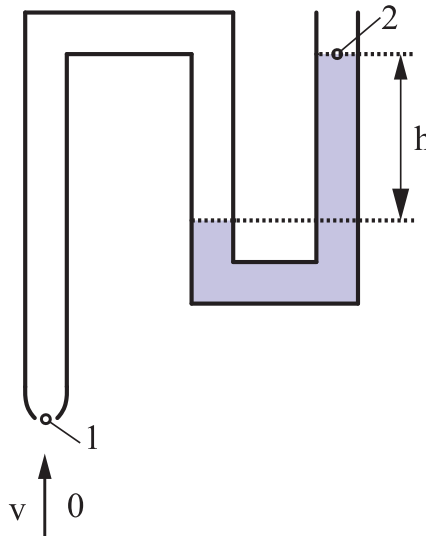


Figura 1.4: Esquema simplificado de funcionamento dun tubo de Pitot.

O punto 1 é un punto de remanso ( $v_1 = 0$ ). Aplicando Bernoulli entre 0 e 1, obtense:

$$p_1 - p_0 = \frac{\rho_{\text{aire}} V_0^2}{2}$$

Como o chorro se move no aire,  $p_0 = p_a$ . Entre os puntos 1 e 2, pódese aplicar a ecuación fundamental da fluídoestática, e ao ser  $p_2 = p_a$ , desprezando pesos de columna de aire, obtense:

$$g\rho_{\text{auga}}h = \frac{1}{2}\rho_{\text{aire}}v^2$$

de modo que a velocidade da corrente de aire se pode calcular:

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma_{\text{auga}}h}{\rho}}$$

A densidade do aire a unha temperatura  $T$  e unha presión  $p$ , ven dada pola ecuación dos gases ideais:  $\rho = \frac{p}{RT}$ , onde  $R = 287 \text{ Nm/kgK}$ .

Substituíndo esta expresión na ecuación das velocidades, temos:

$$v = 273.3 \sqrt{\frac{hT}{p}}$$

con  $h$  en  $\text{cm}$ ,  $T$  en  $\text{K}$  e  $p$  en  $\text{N/m}^2$ . Como no noso caso o chorro desenrólase no aire,  $p = p_a$ :

$$v = 273.3 \sqrt{\frac{hT}{p_a}}$$

### 1.4.3 Caudal

O caudal que sae da cámara está dado por:

$$Q = KAv$$

onde  $A$  é a área de paso,  $v$  a velocidade e  $K$  o factor de descarga, función da xeometría da sección de saída.

$$A_t = \frac{\pi d_t^2}{4}, \quad K = 0.88, \quad d_t = 0.025 \text{ m}$$

Para calcular a velocidade na tobeira de saída aplicamos la ecuación de Bernoulli xeneralizada entre un punto da cámara e un da tobeira, segundo a figura 1.5.

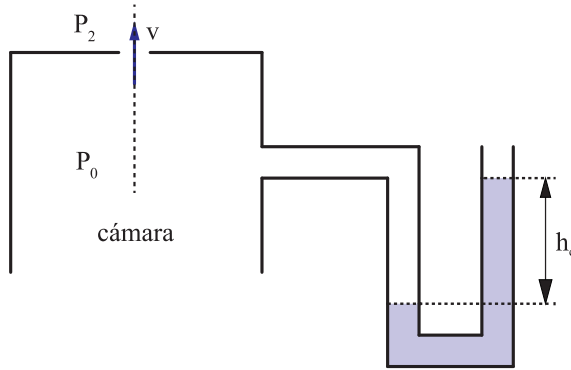


Figura 1.5: Esquema de Pitot.

Supoñendo que a velocidade na cámara é practicamente nula e desprezando o peso das columnas de aire, chegamos a:

$$v_t = 273.3 \sqrt{\frac{h_c T}{p_c}}$$

onde  $p_c = p_a + \gamma_{auga} h_c = p_a + 9.81 \cdot 1000 \cdot 10^{-2} h_c = p_a + 9.81 h_c$ , con  $h_2$  en *cm*. Substituíndo estes datos:

$$Q_t = 0.1025 \sqrt{\frac{h_c T}{p_c}}$$

#### 1.4.4 Gasto máxico

A través da sección de saída, podemos escribir o gasto máxico como:

$$G_t = \rho Q_t = 3.57 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{h_c p_c}{T}}$$

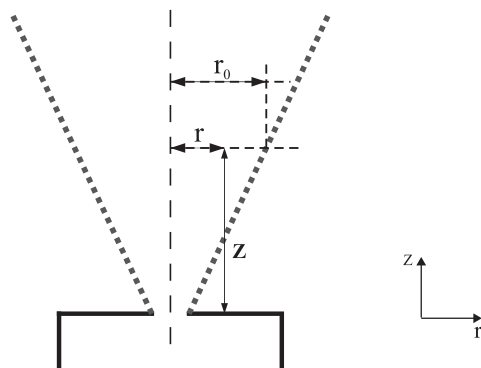


Figura 1.6: Comportamento do chorro, obtención da distribución radial de velocidades.

## 1.5 Metodoloxía experimental

### 1.5.1 Distribución radial de presións-velocidades

A velocidade é proporcional a  $h_3$  (altura manométrica en calquera punto do chorro, como se pode ver na figura 1.4), da forma:

$$v = 237.3 \sqrt{\frac{h_3 T}{p_a}} \quad (1.1)$$

Por tanto, coa medida da presión  $h_3$  podemos sacar conclusións para a distribución de velocidades.

O primeiro experimento consiste en obter a distribución radial de velocidades ao variar en sentido radial a posición do tubo de Pitot, medindo  $h_3$ , para un desprazamento radial,  $r$ . Efectuarase para distintas  $z$  (distancia á sección de saída medida sobre o eixe do chorro) para ver a variación da distribución de velocidades radiais na dirección de avance do chorro, figura 1.6. Unha vez feitas as medidas (táboa 1.1), representar na figura 1.8.

Débase comprobar que o chorro ten a forma indicada na figura 1.6, é dicir, o chorro diverxe a medida que aumenta a distancia á tobeira. Para iso representamos as alturas  $z$  ás que se realizan as medidas fronte aos radios do chorro (valor de  $r$  cando a velocidade se anula) a esas alturas. Grafíquese neste caso a figura 1.9.

Así mesmo, débese comprobar tamén que a velocidade do chorro medida

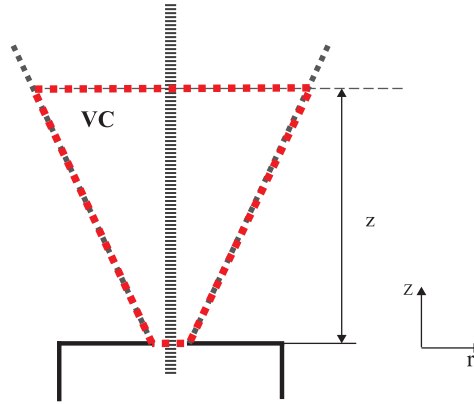


Figura 1.7: Volume de control de estudio do chorro.

no eixe varía inversamente coa distancia á tobeira para  $z/d_t > 10$ . Para iso representamos  $v_t/v_{co}$ , sendo  $v_t$  a velocidade no centro da tobeira  $v_{co}$  a velocidade do chorro no eixe, fronte a  $z/d_t$ , onde  $z$  é a distancia do tubo de Pitot á tobeira e  $d_t$  é o diámetro da tobeira. Graficaranse neste caso as velocidades no eixo, figura 1.10.

### 1.5.2 Gasto máxico

A ecuación de continuidade para un fluxo estacionario ven dada por:

$$0 = \int_{SC} \rho \vec{v} \vec{n} dS \quad (1.2)$$

Aplicando esta ecuación ao volume de control da figura 1.7, calculamos o gasto máxico a través da tobeira e a través da sección superior. Pola diferenza entre ambos calculamos o gasto que se incorpora lateralmente ao volume de control.

O gasto máxico a través da sección superior calcúlase:

$$G = \int_S \rho \vec{v} \vec{n} dS = \int_S \rho v dS = \int_0^{r_0(z)} \rho v(r) 2\pi r dr = 2\pi \rho \int_0^{r_0(z)} v(r) r dr \quad (1.3)$$

onde  $r_0(z)$  fai referencia a que o radio do chorro depende da altura á que se estea calculando o gasto.

Integrando numericamente:

$$G = 2\pi\rho \sum_{i=1}^{n-1} \frac{v_{i+1} + v_i}{2} \frac{r_{i+1} + r_i}{2} (r_{i+1} - r_i) \quad (1.4)$$

onde  $n$  é o número de puntos de medida.

### 1.5.3 Cántidade de movemento

A ecuación da cantidade de movemento:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{v} dV + \underbrace{\int \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS}_M = \int \bar{c} \vec{n} dS \quad (1.5)$$

Por estar en réxime estacionario e non aplicarse esforzos a través das paredes do volume de control, todos os termos anularíanse excepto o M.

- Impulso a través da sección superior:

$$\vec{F} = \int_S \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_S \rho v^2 dS \vec{k} = 2\pi\rho \int_0^{r_0(z)} v^2(r) r dr \vec{k} \quad (1.6)$$

Integrando numericamente:

$$F = 2\pi\rho \sum_{i=1}^{n-1} \left( \frac{v_{i+1} + v_i}{2} \right)^2 \frac{r_{i+1} + r_i}{2} (r_{i+1} - r_i) \quad (1.7)$$

- Impulso a través da tobeira:

$$\vec{F}_t = \int_{A_t} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \rho v_t^2 A_t \vec{k} = \rho v_t^2 \frac{\pi d_t^2}{4} \vec{k} \quad (1.8)$$

- Medida directa da forza exercida polo chorro.

A medida directa da forza de impulso faise substituindo o tubo de Pitot polo prato difusor, facendo que o centro do prato coincida co centro da tobeira. Tomaranse medidas para distintos valores do parámetro  $z/d_t$ , onde  $z$  é a distancia do prato á tobeira e  $d_t$  é o



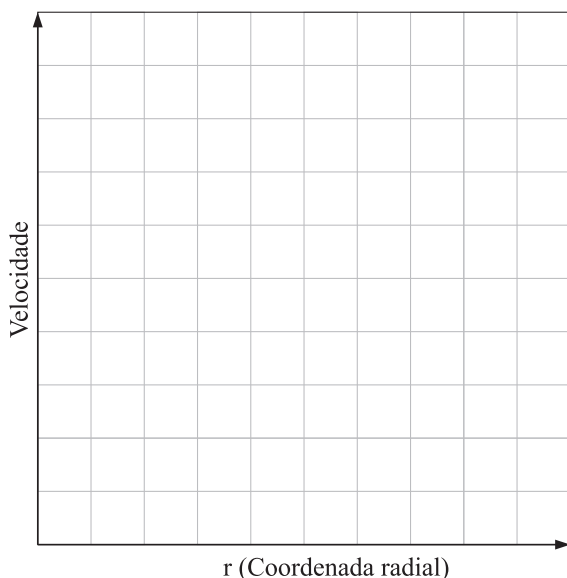


Figura 1.8: Comportamento do chorro - Distribución radial de velocidades.

diámetro da tobeira. Datos que se deben anotar na táboa 1.2, e graficar a evolución do impulso medido coa altura na figura 1.11.

Débese comprobar que os valores obtidos en 1.6 e 1.7 coinciden, (consérvese o impulso). E coincidirá tamén coa ecuación 1.8 mentres a elevación do prato sexa intermedia. Para valores de  $z$  elevados, as medidas fallan porque o diámetro do prato non é o suficientemente grande para actuar como difusor. Débese observar que para distancias pequenas, a forza actúa como forza de succión, non conseguindo o efecto buscado de impulso transmitido.

A medida que o prato aproxímase á tobeira, prodúcese un efecto de colchón de aire consecuencia do fluxo radial no espazo anular entre prato de impulsos e a superficie de saída da tobeira. A distancias moi pequenas, da orde de 0.05 veces o diámetro da tobeira, a forza cambia de signo, alcanzando valores positivos moi altos, xa que o sentido do fluxo invértese.

## 1.6 Toma de datos e traballo de gabinete

Ensaio para $h_c =$									
	$z / d_t$	2	4	6	8	12	16	24	32
$r$ (cm)	$z = 0$	5	10	15	20	30	40	60	80
0									
0.4									
0.8									
1.2									
1.6									
2									
2.4									
2.8									
3.2									
3.6									
4									
5									
6									
7									
8									

Táboa 1.1: Táboa de resultados. Medidas directas co tubo de Pitot.

Prato difusor ( $h_c =$ )		
$z$	$z / d_t$	F (N)
0	0	
1	0.4	
2	0.8	
5	2	
10	4	
15	6	
25	10	
30	12	
35	14	
40	16	
45	18	
50	20	
55	22	
60	24	
70	28	
80	32	
90	36	

Táboa 1.2: Táboa de resultados. Medidas directas de forza co prato difusor.

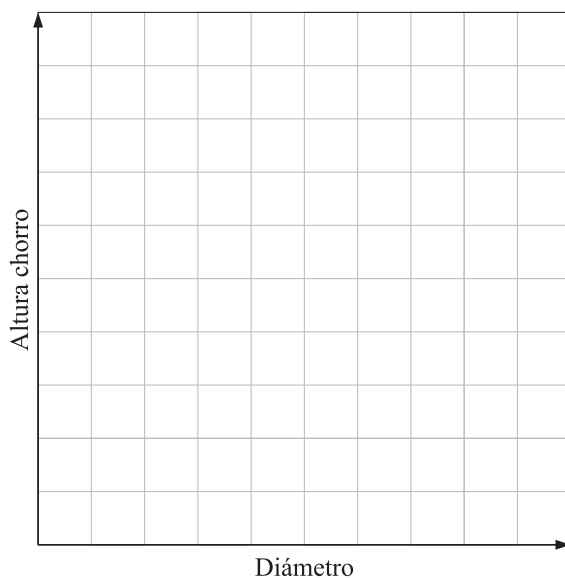


Figura 1.9: Comportamento do chorro - Evolución do diámetro do chorro coa altura.

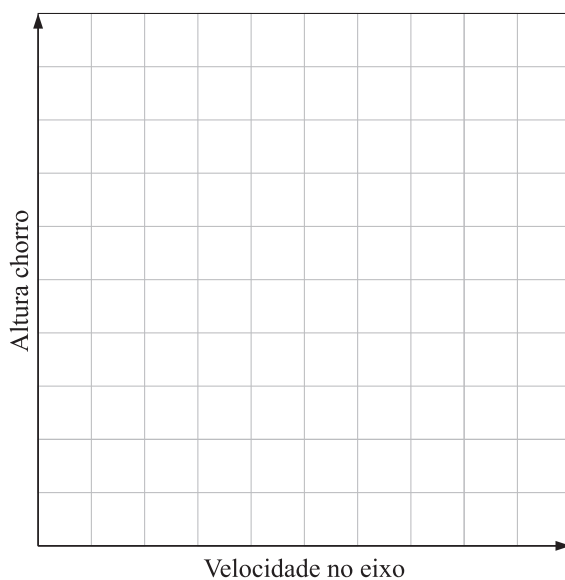


Figura 1.10: Comportamento do chorro - Evolución das velocidades no eixo coa altura.

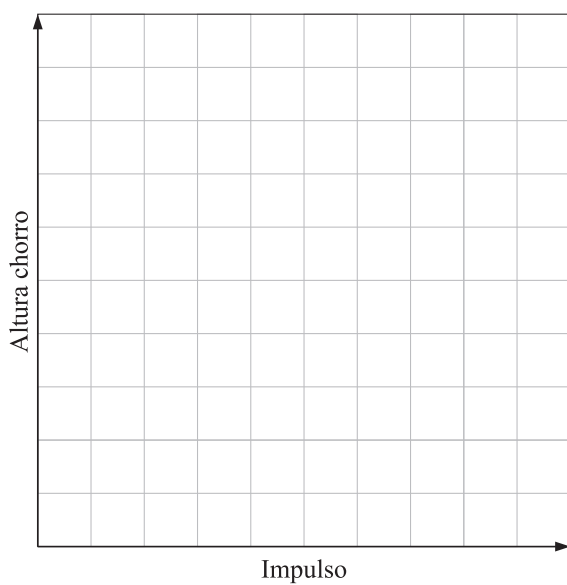


Figura 1.11: Comportamento do chorro - Evolución da impulso coa altura.

