

MECÂNICA DOS FLUIDOS

Luis Adriano Oliveira / António Gameiro Lopes

Conceitos Fundamentais

Exercícios Resolvidos

Software com Interface Gráfica

Exemplos de Aplicação Prática



Mecânica dos Fluidos

6.^a Edição

Luis Adriano Oliveira
António Gameiro Lopes



Lidel – edições técnicas, lda.
www.lidel.pt

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	XVI
AGRADECIMENTOS.....	XVII
PREFÁCIO À QUINTA E À SEXTA EDIÇÕES	XVIII
PREFÁCIO À PRIMEIRA EDIÇÃO	XXI
TESTEMUNHO.....	XXIII
NOTA DOS AUTORES.....	XXV
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO. CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	1
1.1 – Noções preliminares. O conceito de fluido.....	1
1.2 – Da natureza discreta ao tratamento contínuo	2
1.2.1 – Estados sólido, líquido, gasoso	2
1.2.2 – A hipótese do <i>continuum</i>	5
1.2.3 – Abordagem típica de um problema em mecânica dos fluidos.....	6
1.3 – As leis básicas da física. Conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia.....	8
1.4 – As vias teórica e experimental na análise de escoamentos	9
1.5 – Linhas características usadas na análise de escoamentos	10
1.6 – Dois pontos de vista: Euler-Lagrange. Volume de controlo-sistema	12
1.7 – Derivada material.....	13
1.8 – Caudal volúmico e caudal mássico de um escoamento	15
1.9 – Propriedades termodinâmicas de um fluido.....	17
1.9.1 – Pressão, massa volúmica, temperatura e propriedades derivadas.....	18
1.9.2 – O conceito de energia interna usado em mecânica dos fluidos.....	19
1.9.3 – Viscosidade	20
1.9.4 – Condutibilidade térmica.....	25
1.9.5 – Difusibilidade de espécies químicas.....	27
1.9.6 – Analogia unidimensional entre as leis de Fick, de Newton e de Fourier	28
1.9.7 – Pressão de vapor. Cavitação.....	30
1.9.8 – Tensão superficial. Capilaridade	31
1.10 – Notas conclusivas.....	36
1.11 – Exercícios propostos.....	37

CAPÍTULO 2 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NUM FLUIDO 39

2.1 – Introdução.....	39
2.2 – Lei de Pascal.....	40
2.3 – Compressibilidade.....	43
2.4 – Força de pressão sobre um elemento de fluido.....	45
2.5 – Versão simplificada das equações de Navier-Stokes.....	46
2.6 – Hidrostática.....	48
2.6.1 – Equação fundamental da hidrostática.....	48
2.6.2 – Líquidos e gases incompressíveis.....	50
2.6.3 – Gases compressíveis. Equilíbrio da atmosfera. Atmosfera-padrão.....	53
2.6.4 – Forças hidrostáticas sobre superfícies submersas.....	56
2.6.4.1 – Superfícies planas.....	57
2.6.4.2 – Superfícies curvas.....	61
2.6.5 – Impulsão.....	65
2.6.6 – Estabilidade de corpos no seio de fluidos.....	66
2.7 – Movimento em bloco.....	71
2.7.1 – Translação em bloco com aceleração constante.....	74
2.7.2 – Rotação em bloco com velocidade angular constante.....	78
2.8 – Escoamento irrotacional incompressível em regime permanente. Equação de Bernoulli.....	82
2.9 – Caso geral.....	86
2.10 – Manómetros.....	87
2.11 – Notas conclusivas.....	92
2.12 – Exercícios propostos.....	92

CAPÍTULO 3 – RELAÇÕES INTEGRAIS APLICADAS A VOLUMES DE CONTROLO 103

3.1 – Introdução.....	103
3.2 – Relação entre sistema e volume de controlo.....	104
3.3 – Escoamentos tridimensionais, bidimensionais e unidimensionais.....	107
3.4 – Equação integral da continuidade.....	108
3.5 – Equação integral de conservação da quantidade de movimento linear.....	111
3.5.1 – Volume de controlo não inercial.....	116
3.6 – Equação integral de conservação de quantidade de movimento angular.....	119
3.7 – Equação integral de conservação da energia.....	123
3.8 – Escoamento de fluidos invíscidos.....	127
3.8.1 – Equação de Bernoulli.....	127
3.8.2 – A equação de Bernoulli e a primeira lei da termodinâmica.....	129
3.8.3 – Aplicações da equação de Bernoulli.....	130
3.8.3.1 – Tubo de Pitot-estático.....	130
3.8.3.2 – Medidor de Venturi.....	130
3.8.3.3 – Medidor de diafragma.....	132
3.8.3.4 – Medidor de bocal.....	135
3.8.3.5 – Descarregadores.....	136

3.9 – Notas conclusivas.....	136
3.10 – Exercícios propostos.....	137

CAPÍTULO 4 – RELAÇÕES DIFERENCIAIS APLICADAS A UM ELEMENTO DE FLUIDO..... 141

4.1 – Introdução.....	141
4.2 – Equação diferencial da continuidade.....	141
4.3 – Equação diferencial de conservação de quantidade de movimento.....	143
4.4 – Equação diferencial de conservação da energia.....	158
4.5 – Exemplo de solução exata: Escoamento de Couette.....	163
4.6 – Notas conclusivas.....	168

CAPÍTULO 5 – REGIME LAMINAR E REGIME TURBULENTO..... 171

5.1 – Introdução.....	171
5.2 – Número de Reynolds.....	172
5.3 – Regimes de escoamento.....	173
5.4 – Equações de Reynolds e tensões de Reynolds.....	174
5.5 – Uma possível definição de turbulência.....	179
5.6 – Leis semiempíricas de distribuição de velocidade.....	183
5.6.1 – Lei do defeito de velocidade.....	186
5.6.2 – Lei de potência.....	186
5.6.3 – Lei logarítmica.....	187
5.6.4 – Distribuição na subcamada viscosa.....	187
5.7 – Medição de velocidades em escoamentos.....	188
5.8 – Notas conclusivas.....	190

CAPÍTULO 6 – ESCOAMENTO NO INTERIOR DE CONDUTAS..... 193

6.1 – Introdução.....	193
6.2 – O coeficiente de perda de carga. Lei de Darcy-Weisbach.....	194
6.3 – Região de entrada e região de escoamento desenvolvido.....	196
6.4 – Perda de carga em regimes laminar e turbulento.....	197
6.4.1 – Regime laminar.....	198
6.4.2 – Regime turbulento.....	200
6.5 – Tubos de paredes rugosas.....	202
6.6 – Diâmetro equivalente.....	206
6.7 – Perdas de carga localizadas.....	207
6.8 – Inclusão de bomba, ventilador ou turbina no circuito.....	208
6.8.1 – Potência de uma bomba.....	209
6.8.2 – Potência de uma turbina.....	209
6.9 – Associação de condutas.....	212
6.9.1 – Associação em série.....	212
6.9.2 – Associação em paralelo.....	212
6.9.3 – Redes de condutas.....	214

6.10 – Notas conclusivas.....	215
6.11 – Exercícios propostos.....	216
CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA.....	219
7.1 – Introdução.....	219
7.2 – Méritos e limitações da análise dimensional.....	219
7.3 – O princípio da homogeneidade dimensional.....	221
7.4 – Dimensões.....	221
7.5 – Técnicas utilizadas em análise dimensional.....	222
7.5.1 – O método do produto de potências ou método indicial.....	222
7.5.2 – O teorema <i>II</i> de Buckingham.....	225
7.5.3 – Adimensionalização das equações.....	231
7.6 – Modelos e semelhança.....	233
7.6.1 – O princípio da semelhança física.....	233
7.6.2 – Semelhança geométrica.....	235
7.6.3 – Semelhança cinemática.....	236
7.6.4 – Semelhança dinâmica. Números de Reynolds, Froude, Euler, Mach, Weber.....	237
7.6.5 – Breve referência aos túneis aerodinâmicos e de água.....	244
7.7 – Notas conclusivas.....	246
7.8 – Exercícios propostos.....	246
CAPÍTULO 8 – ESCOAMENTO DE CAMADA LIMITE.....	249
8.1 – Introdução.....	249
8.2 – O conceito de camada limite.....	249
8.3 – As equações de camada limite.....	251
8.4 – Espessura de deslocamento e espessura de quantidade de movimento.....	256
8.5 – Separação de camada limite.....	260
8.6 – Resistência de atrito e resistência de forma.....	263
8.7 – Placa plana semi-infinita. Solução de Blasius.....	266
8.7.1 – A teoria de Blasius para regime laminar.....	266
8.7.2 – Aplicações da teoria de Blasius. Regime laminar.....	270
8.7.2.1 – Atrito parietal. Coeficientes médio e local de atrito.....	270
8.7.2.2 – Espessura de camada limite.....	271
8.7.2.3 – Espessura de deslocamento.....	272
8.7.2.4 – Espessura de quantidade de movimento.....	272
8.7.3 – A análise integral de von Karman.....	273
8.7.3.1 – Dedução da equação de von Karman.....	273
8.7.3.2 – Implementação do método integral.....	274
8.7.4 – Camada limite em regime turbulento.....	276
8.7.4.1 – Espessura de camada limite e de quantidade de movimento.....	277
8.7.4.2 – Atrito parietal. Coeficientes médio e local de atrito.....	279
8.7.4.3 – Espessura de deslocamento.....	280
8.8 – Notas conclusivas.....	285

8.9 – Exercícios propostos.....	286
---------------------------------	-----

CAPÍTULO 9 – ESCOAMENTO POTENCIAL A DUAS DIMENSÕES DE UM FLUIDO INCOMPRESSÍVEL..... 289

9.1 – Introdução.....	289
9.2 – Função de corrente.....	290
9.3 – Função potencial de velocidade.....	292
9.4 – Representação de escoamentos potenciais através das funções de corrente e potencial de velocidade.....	293
9.5 – Escoamentos elementares planos.....	295
9.5.1 – Escoamento uniforme.....	295
9.5.2 – Fonte e poço bidimensionais.....	296
9.5.3 – Vórtice irrotacional ou livre.....	298
9.6 – Circulação. Teorema de Kelvin.....	299
9.7 – Sobreposição de escoamentos.....	301
9.8 – Fonte e poço de iguais intensidades. Dipolo.....	302
9.9 – Escoamento em torno de um cilindro de secção circular.....	306
9.9.1 – Cilindro sem circulação.....	306
9.9.1.1 – Arrasto e sustentação. O paradoxo de d'Alembert.....	308
9.9.2 – Cilindro com circulação.....	311
9.9.2.1 – Efeito de Magnus.....	311
9.9.2.2 – Teorema de Kutta-Joukowski.....	311
9.10 – Outras configurações resultantes da sobreposição de escoamento uniforme com fontes, poços e vórtices.....	315
9.10.1 – Corpo semi-infinito.....	315
9.10.2 – Oval de Rankine.....	316
9.10.3 – Oval de Kelvin.....	316
9.10.4 – Escoamento em espiral.....	317
9.11 – Método das imagens.....	317
9.12 – Potencial complexo.....	318
9.13 – Transformação conforme.....	322
9.14 – Escoamentos de canto.....	324
9.15 – Teoria elementar dos perfis alares.....	326
9.15.1 – Nomenclatura.....	326
9.15.2 – A condição de Joukowski.....	327
9.15.3 – A transformação de Joukowski.....	331
9.15.4 – Uma representação alternativa: Folha de fontes e folha de vórtices.....	336
9.15.5 – Centro de pressões.....	340
9.15.6 – Outros exemplos de superfícies sustentadoras.....	342
9.15.6.1 – Turbina axial.....	342
9.15.6.2 – Hélice de propulsor ou de ventilador.....	342
9.15.6.3 – Vela de barco.....	343
9.15.7 – A realidade tridimensional. Resistência induzida.....	343
9.15.8 – Modelação numérica: Breve referência.....	345

9.15.8.1 – Diferenças finitas	345
9.15.8.2 – Elementos finitos	346
9.15.8.3 – O método de painel	346
9.16 – Notas conclusivas	348
9.17 – Exercícios propostos	349

CAPÍTULO 10 – ESCOAMENTO DE FLUIDOS COMPRESSÍVEIS.....351

10.1 – Introdução	351
10.2 – Conceitos termodinâmicos relevantes	352
10.2.1 – Gás perfeito	352
10.2.2 – Processo isentrópico	354
10.2.3 – Temperatura e entalpia de estagnação	356
10.2.4 – A celeridade do som e o número de Mach. Pressão de estagnação	358
10.2.5 – Condições críticas. Relações para um gás perfeito	363
10.3 – escoamento unidimensional isentrópico de área variável	364
10.3.1 – Comportamentos distintos em regime subsônico e supersônico	364
10.3.2 – Relações para gases perfeitos	366
10.3.3 – Valor máximo do caudal mássico. Limitação de caudal	370
10.4 – Ondas elásticas e ondas de choque	370
10.4.1 – O cone de Mach	371
10.4.2 – Onda de choque normal	373
10.4.2.1 – Linhas de Fanno e de Rayleigh	373
10.4.2.2 – Relações do choque normal	375
10.4.2.3 – Onda de choque móvel	380
10.4.3 – Onda de choque oblíqua	381
10.4.4 – Ondas de expansão de Prandtl-Meyer	387
10.5 – O tubo de Pitot em escoamentos de massa volúmica variável	393
10.6 – Operação de tuberias de tipo convergente-divergente	396
10.7 – Difusor	399
10.8 – Túnel aerodinâmico supersônico	400
10.9 – Perfil sustentador supersônico	401
10.10 – escoamento compressível em condutas de secção constante	406
10.10.1 – escoamento unidimensional com atrito	407
10.10.2 – escoamento unidimensional com transferência de calor	416
10.10.3 – escoamento unidimensional isotérmico	421
10.11 – Notas conclusivas	424
10.12 – Exercícios propostos	425

CAPÍTULO 11 – ESCOAMENTO COM SUPERFÍCIE LIVRE 429

11.1 – Introdução	429
11.2 – Conceitos gerais e hipóteses de partida	429
11.2.1 – Linha de energia, gradiente de energia, energia específica	429
11.2.2 – Classificação dos diferentes tipos de escoamento	432
11.3 – Onda infinitesimal de superfície. Número de Froude	433

11.4 – Escoamento permanente uniforme. Fórmulas de Chézy e de Manning.....	437
11.5 – Diagrama de energia específica. Profundidade crítica.....	441
11.6 – O ressalto hidráulico.....	449
11.7 – Escoamento gradualmente variado.....	453
11.7.1 – Equações do escoamento.....	454
11.7.2 – Classificação das curvas de regolfo.....	456
11.8 – Descarregadores.....	458
11.8.1 – Descarregadores de soleira delgada.....	458
11.8.2 – Descarregadores de soleira espessa.....	461
11.9 – Notas conclusivas.....	463
11.10 – Exercícios propostos.....	464
CAPÍTULO 12 – TURBOMÁQUINAS	467
12.1 – Introdução.....	467
12.2 – Bomba centrífuga.....	468
12.2.1 – Diagrama de velocidades, balanço energético, rendimento.....	469
12.2.2 – As pás do rotor, enquanto perfis sustentadores.....	473
12.2.3 – Características de operação de uma bomba centrífuga. Cavitação.....	474
12.3 – Bomba axial e bomba de escoamento misto.....	478
12.3.1 – Diagrama de velocidades e força de sustentação.....	478
12.4 – Turbina radial.....	479
12.4.1 – Diagrama de velocidades, balanço energético, rendimento.....	480
12.4.2 – As pás do rotor, enquanto perfis sustentadores.....	483
12.4.3 – Características de operação de uma turbina radial. Cavitação.....	484
12.5 – Turbina axial e turbina de escoamento misto.....	485
12.5.1 – Diagrama de velocidades e força de sustentação.....	485
12.6 – Turbina de impulsão.....	487
12.6.1 – Turbina Pelton. Diagrama de velocidades.....	487
12.7 – Características adimensionais. Velocidade específica.....	489
12.8 – Rendimento e potência: Generalização para turbomáquinas de fluido compressível.....	496
12.8.1 – Turbomáquinas térmicas.....	497
12.8.2 – Rendimento de turbomáquinas motrizes.....	501
12.8.3 – Rendimento de turbomáquinas movidas.....	504
12.8.4 – Síntese das expressões de potência aplicáveis a turbomáquinas.....	506
12.8.5 – Potência de uma hélice propulsora.....	507
12.9 – Notas conclusivas.....	508
12.10 – Exercícios propostos.....	508
CAPÍTULO 13 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO PRÁTICA	511
13.1 – Introdução.....	511
13.2 – Tensão superficial: Os fluidos em pequena escala.....	512
13.3 – Marés oceânicas: Abordagem simples de um fenómeno complexo.....	516

13.4 – Energia das ondas: Uma fonte de elevada densidade energética.....	519
13.4.1 – A energia do mar	521
13.4.2 – Elementos físicos sobre energia das ondas	524
13.4.3 – Dispositivos de captação de energia das ondas	526
13.4.4 – Viabilidade prática.....	532
13.5 – Ventilador e hélice propulsora: A mesma realidade, vista de referenciais distintos	532
13.6 – Energia eólica: Um potencial incontornável	541
13.7 – Propulsão a jato: A via para alta velocidade	547
13.7.1 – Equação do efeito propulsor.....	548
13.7.2 – Motor turborreator	551
13.7.2.1 – Difusor	551
13.7.2.2 – Compressor.....	552
13.7.2.3 – Câmara de combustão	553
13.7.2.4 – Turbina	555
13.7.2.5 – Bocal de saída.....	555
13.7.2.6 – Diagrama p - v	556
13.7.3 – Motor turboventilador.....	557
13.7.4 – Motor estatorreator	560
13.7.5 – Motor-foguete	564
13.8 – Fundamentos de cálculo numérico de escoamentos (<i>CFD</i>).....	567
13.8.1 – Equações de conservação.....	568
13.8.2 – Discretização e integração	570
13.8.3 – O algoritmo <i>SIMPLEC</i>	575
13.8.4 – Resolução das equações.....	578
13.8.5 – Sequência de procedimentos do algoritmo <i>SIMPLEC</i>	579
13.8.6 – Breve referência a alguns tópicos avançados	580
13.9 – Água: Um bem essencial que importa distribuir	582
13.9.1 – Consumo de água	583
13.9.2 – Sistema de abastecimento	583
13.9.2.1 – Adutoras em superfície livre	584
13.9.2.2 – Adutoras sob pressão	585
13.9.2.3 – Reservatórios	588
13.9.2.4 – Torres de pressão	591
13.9.3 – Distribuição de água	592
13.10 – Túneis aerodinâmicos: A realidade à escala	593
13.10.1 – Ensaio de veículos automóveis em túnel aerodinâmico.....	594
13.10.1.1 – Elevação do modelo	595
13.10.1.2 – Tapete rolante	596
13.10.1.3 – Sucção através de uma plataforma porosa.....	597
13.10.1.4 – O método da simetria	598
13.10.2 – O efeito de blocagem	599
13.10.3 – Simulação de escoamentos de camada limite atmosférica.....	601
13.10.4 – Breve referência a alguns trabalhos de simulação experimental em túnel.....	602

13.10.4.1 – Estudo do campo de ventos na zona de implantação da EXPO'98.....	604
13.10.4.2 – Estudo da ação do vento num edifício	608
13.11 – Aerodinâmica automóvel: A forma faz a diferença.....	610
13.11.1 – Um pouco de história.....	611
13.11.2 – O escoamento em torno de um veículo automóvel.....	612
13.11.3 – Forças aplicadas num veículo automóvel	613
13.11.4 – Força de arrasto <i>versus</i> força de rolamento.....	614
13.11.5 – Força de arrasto e sua dependência com o número de Reynolds.....	615
13.11.6 – Breve análise da influência de algumas características geométricas no desempenho aerodinâmico.....	617
13.11.6.1 – A inclinação da traseira do veículo	617
13.11.6.2 – A utilização de <i>spoilers</i>	618
13.11.6.3 – O efeito de solo e o apoio aerodinâmico	620
13.11.7 – Projeto de automóveis de elevado desempenho aerodinâmico.....	621
13.12 – <i>Windsurf</i> : Breve curso em 10 imagens	623
13.13 – Astronáutica: O aquecimento aerodinâmico na reentrada atmosférica.....	630
13.13.1 – Velocidade de escoamento e aquecimento aerodinâmico	630
13.13.2 – Aquecimento aerodinâmico na reentrada atmosférica	632
13.14 – Ressalto hidráulico: Um fenómeno do quotidiano	641
13.14.1 – Ressalto hidráulico circular.....	641
13.14.2 – Ressalto hidráulico na gestão dos cursos de água.....	642
13.14.3 – Ressalto hidráulico na natureza e no desporto náutico	644
13.15 – Aproveitamento da Aguieira: Um exemplo de barragem hidroelétrica.....	646
13.16 – Efeito de Coanda: Uma vertente subtil, mas relevante, em aplicações práticas de fluidos em escoamento.....	651
13.17 – Golpe de ariete: Uma onda de pressão transiente com efeito potencialmente destruidor.....	659
13.17.1 – Geração e propagação da onda transiente	660
13.17.2 – Cálculo da celeridade e da amplitude das ondas de pressão	667
13.17.3 – Câmara de equilíbrio.....	670
13.18 – Notas conclusivas	671
RESOLUÇÃO DOS EXERCÍCIOS PROPOSTOS.....	673
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	769
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	779
ÍNDICE REMISSIVO	785
GLOSSÁRIO DE TERMOS – PORTUGUÊS EUROPEU E PORTUGUÊS DO BRASIL	797

CONTEÚDO DISPONÍVEL NA INTERNET (www.lidel.pt) **ANEXOS DE TIPO T (APOIO TEÓRICO)¹**

- T0.1 – OPERADORES E EQUAÇÕES VETORIAIS EM COORDENADAS CARTESIANAS, CILÍNDRICAS E ESFÉRICAS**
- T0.1.1 – Introdução
 - T0.1.2 – Alguns operadores vetoriais
 - T0.1.2.1 – Gradiente de uma função escalar
 - T0.1.2.2 – Divergente de uma função vetorial
 - T0.1.2.3 – Rotacional de uma função vetorial
 - T0.1.2.4 – Laplaciano de uma função escalar
 - T0.1.2.5 – Laplaciano de uma função vetorial
 - T0.1.3 – Equação da continuidade: Coordenadas cilíndricas
 - T0.1.4 – Equações de Navier-Stokes: Coordenadas cilíndricas
 - T0.1.5 – Equação diferencial de conservação da energia: coordenadas cartesianas e coordenadas cilíndricas
- T4.1 – DEDUÇÃO DETALHADA DE EXPRESSÕES DO CAPÍTULO 4**
- T4.1.1 – Função de dissipação. Dedução da equação (4.54)
 - T4.1.2 – Função de dissipação. Dedução da equação (4.56)
 - T4.1.3 – Função de dissipação. Dedução da equação (4.56.(a))
 - T4.1.4 – Equação diferencial de conservação da energia. Dedução da equação (4.60)
- T5.1 – DEDUÇÃO DETALHADA DE EXPRESSÕES DO CAPÍTULO 5**
- T5.1.1 – Conservação de massa em regime turbulento. Dedução da equação (5.9.(a/b))
 - T5.1.2 – Conservação de quantidade de movimento em regime turbulento. Dedução das equações (5.10.(a)), (5.10.(b)) e (5.10.(c))
 - T5.1.3 – Lei logarítmica de distribuição de velocidade em regime turbulento. Dedução da equação (5.18)
- T6.1 – DEDUÇÃO DETALHADA DE EXPRESSÕES DO CAPÍTULO 6**
- T6.1.1 – Perfil de velocidade em regime turbulento na zona de escoamento desenvolvido. Dedução da equação (6.26)
 - T6.1.2 – Relação entre velocidades média e máxima, em regime turbulento. Comparação com a mesma relação em regime laminar. Dedução da equação (6.35)
- T8.1 – DEDUÇÃO DETALHADA DE EXPRESSÕES DO CAPÍTULO 8**
- T8.1.1 – Dedução da equação de Blasius, expressão (8.30)
 - T8.1.2 – Solução da equação de Blasius sob forma tabelar
- T9.1 – DEDUÇÃO DETALHADA DE EXPRESSÕES DO CAPÍTULO 9**
- T9.1.1 – Escoamento em torno de um cilindro com circulação: Localização dos pontos de estagnação para diferentes intensidades do vórtice
- T9.2 – TRANSFORMAÇÃO CONFORME. FUNDAMENTOS**

¹ Nota – Anexo Ti: anexo relativo ao capítulo i.

- T9.2.1 – Introdução
- T9.2.2 – Noção de transformação conforme
- T9.2.3 – Exemplos ilustrativos de transformação conforme
- T9.2.4 – Transformações sucessivas
- T10.1 – DEDUÇÃO DETALHADA DE EXPRESSÕES DO CAPÍTULO 10
 - T10.1.1 – Relação de Rankine-Hugoniot para um gás perfeito. Dedução da equação (10.60)
 - T10.1.2 – Relação de Rankine-Hugoniot para um gás perfeito. Dedução da equação (10.61)
 - T10.1.3 – Onda de choque oblíqua. Dedução da equação (10.79)
- T10.2 – TABELAS DO CAPÍTULO 10
 - T10.2.1 – Relações Isentrópicas ($\gamma = 1.4$)
 - T10.2.2 – Choque Normal ($\gamma = 1.4$)
 - T10.2.3 – Ângulo de Prandtl-Meyer ($\gamma = 1.4$)
 - T10.2.4 – Escoamento com atrito ($\gamma = 1.4$)
 - T10.2.5 – Escoamento com transferência de calor ($\gamma = 1.4$)
- T11.1 – DEDUÇÃO DETALHADA DE EXPRESSÕES DO CAPÍTULO 11
 - T11.1.1 – Velocidade crítica. Dedução da equação (11.28.(a))
- T11.2 – TABELAS DO CAPÍTULO 11
 - T11.2.1 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning

ANEXOS DE TIPO S (*SOFTWARE*)²

- S1.1 – Programa *Props_Liq*: Cálculo de propriedades de líquidos
 - S1.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S1.1.2 – Listagem da versão *MatLab*
- S1.2 – Programa *Props_gas*: Cálculo de propriedades de gases
 - S1.2.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S1.2.2 – Listagem da versão *MatLab*
- S2.1 – Programa *Atmosf*: Cálculo de propriedades da Atmosfera Padrão
 - S2.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S2.1.2 – Listagem da versão *MatLab*
- S2.2 – Programa *F_Hidro*: Cálculo de forças hidrostáticas em superfícies planas submersas
 - S2.2.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S2.2.2 – Listagem da versão *MatLab*
- S2.3 – Programa *Rotacao*: Cálculo da rotação em bloco para recipientes cilíndricos
 - S2.3.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S2.3.1.1 – Situação em que o fundo do recipiente não descobre
 - S2.3.1.2 – Situação em que o fundo do recipiente descobre
 - S2.3.2 – Listagem da versão *MatLab*
- S3.1 – Programa *F_Condutas*: Cálculo da força exterior aplicada sobre um troço de conduta

² Nota – Anexo Si: anexo relativo ao capítulo i.

- S3.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
- S6.1 – Programa *Redes*: Cálculo do escoamento em redes de condutas
 - S6.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S6.1.1.1 – Definições gerais
 - S6.1.1.2 – Definição do problema físico
 - S6.1.1.3 – Equações de conservação
 - S6.1.1.4 – Método de resolução
 - S6.1.2 – Utilização do programa *Redes* – Versão *Visual*
 - S6.1.2.1 – Definição do problema
 - S6.1.2.2 – Construção da rede
 - S6.1.2.3 – Cálculo
 - S6.1.2.4 – Pós-processamento
 - S6.1.3 – Resolução de um problema envolvendo reservatórios
 - S6.1.4 – Programa *Redes*. Versão *MatLab*
 - S6.1.5 – Listagem da versão *MatLab*
- S8.1 – Programa *Blasius*: Integração da equação de Blasius pelo método de Runge-Kutta
 - S8.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S8.1.1.1 – O método de Runge-Kutta de quarta ordem
 - S8.1.1.2 – Integração da equação de Blasius
 - S8.1.2 – Listagem da versão *MatLab*
- S9.1 – Programa *Potencial*: Cálculo de escoamento potencial através da sobreposição de escoamentos elementares planos
 - S9.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S9.1.2 – Utilização do programa *Potencial*
- S9.2 – Programa *Painel*: Aplicação do método de painel ao cálculo de escoamento potencial sem circulação
 - S9.2.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S9.2.1.1 – A essência do método de painel
 - S9.2.1.2 – Cálculo da função de corrente
 - S9.2.1.3 – Cálculo do coeficiente de pressão nos pontos de controle
 - S9.2.2 – Utilização do programa *Painel*
- S10.1 – Programa *Compress*: Cálculo de propriedades de escoamentos de fluidos compressíveis
 - S10.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S10.1.1.1 – Escoamento isentrópico
 - S10.1.1.2 – Choque normal e oblíquo
 - S10.1.1.3 – Onda de expansão de Prandtl-Meyer
 - S10.1.1.4 – Escoamento com atrito
 - S10.1.1.5 – Escoamento com transferência de calor
- S11.1 – Programa *Sup_Livre*: Cálculo de escoamentos com superfície livre
 - S11.1.1 – Introdução. Fundamentação teórica
 - S11.1.2 – Descrição do programa *Sup_Livre*

PROGRAMAS DE CÁLCULO

<i>Props_Liq:</i>	Cálculo de propriedades de líquidos; versão <i>MatLab</i> (M) e versão executável interativa (Visual, V)
<i>Props_Gas:</i>	Cálculo de propriedades de gases; versão (M) e versão (V)
<i>Atmosf:</i>	Cálculo das propriedades da atmosfera padrão; versão (M) e versão (V)
<i>F_Hidro:</i>	Cálculo de forças em superfícies planas submersas; versão (M) e versão (V)
<i>Rotacao:</i>	Cálculo de líquidos em rotação em bloco; versão (M) e versão (V)
<i>F_Conduitas:</i>	Cálculo da força exterior aplicada sobre um trecho de conduta; versão (V)
<i>EasyCFD:</i>	Cálculo numérico de escoamentos (CFD - Mecânica dos Fluidos Computacional); versão (V)
<i>Redes:</i>	Cálculo de redes de condutas; versão (M) e versão (V)
<i>Conv_Redex:</i>	Conversão de dados de entrada da versão Visual para a versão <i>MatLab</i> (M) do programa Redes; versão (V)
<i>Blasius:</i>	Resolução da equação de Blasius; versão (M)
<i>Potencial:</i>	Cálculo de escoamento potencial através da sobreposição de escoamentos elementares; versão (V)
<i>Painel:</i>	Cálculo do escoamento potencial através do método de painel; versão (V)
<i>Compress:</i>	Resolução de equações para fluidos compressíveis; versão (V)
<i>Onda_Obliqua:</i>	Cálculo de uma onda de choque oblíqua; versão (M)
<i>Sup_Livre:</i>	Cálculo de escoamentos com superfície livre; versão (V)
<i>Bisseccao:</i>	Resolução de equações através do método da bissecção; versão (M)

AGRADECIMENTOS

Este livro não o seria sem a participação ativa dos Alunos, antigos e atuais, a quem prioritariamente se dirige.

Agradecemos também aos Colegas e Amigos, fonte inesgotável de motivação e enriquecimento. De entre eles, será justo destacar os Colegas da Universidade de Coimbra que aceitaram, com competência e amizade crítica, a pesada tarefa de ler e comentar a primeira versão do texto atual: Professor José Joaquim Costa, pela revisão da componente teórica; Professor Domingos Xavier Viegas, pela leitura crítica do capítulo 10; Professores Manuel Carlos Gameiro da Silva e Jorge Campos André, pela revisão dos exercícios ilustrativos e propostos, e das correspondentes resoluções.

A partir da terceira edição, foi incluído um décimo terceiro capítulo, contendo um conjunto de exemplos de aplicação prática, ilustrativos de alguns itens da matéria abordada nos restantes 12. Este capítulo adicional foi, em muito, enriquecido pela valiosíssima troca de impressões que os autores puderam estabelecer com diversos Colegas especialistas nas matérias versadas. Destacaremos, de entre eles, os Professores da Universidade de Coimbra José Alfeu de Sá Marques, Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira, José Manuel Baranda Ribeiro, Almerindo Domingues Ferreira e, ainda, os Eng.^{os} Francisco António Martins da Costa, da empresa EDP – Energias de Portugal, e Afonso Emanuel da Cruz Jordão, Oficial da Marinha Portuguesa.

As figuras de capa das edições até agora publicadas incluem um trabalho de conceção e análise numérica do desempenho aerodinâmico de um veículo, realizado na Universidade de Coimbra pelo Eng.^o Nuno Rosmaninho de Almeida, no âmbito de um trabalho de fim de curso em Engenharia Mecânica.

Agradecemos também ao Professor António Rafael Janeiro Borges a pronta disponibilidade com que aceitou prefaciara a primeira edição do livro.

A partir da 5.^a edição, o livro é prefaciado pelo Professor José Alberto Caiado Falcão de Campos e inclui também o testemunho da Eng.^a Ana Catarina Mendes Barradas, antiga aluna da cadeira de Mecânica dos Fluidos, na Universidade de Coimbra. A ambos, os Autores agradecem o gesto, reconhecidamente.

A experiência de utilização quotidiana das sucessivas edições deste trabalho, por parte dos Alunos que vêm frequentando disciplinas centradas na área da mecânica dos fluidos, tem-se revelado particularmente gratificante e enriquecedora: sugestões de clarificação, de correção, e mesmo de inclusão de novos tópicos considerados relevantes, são testemunho vivo do interesse despertado pelo livro. Sem este público atento, empenhado e saudavelmente crítico, o presente trabalho perderia todo o sentido. Cabe aqui referência particular à ex-aluna Ana Catarina Mendes Barradas: presença assídua e interventiva – não raro crítica, mas sempre construtiva! – nas aulas, foi dela que partiu a primeira sugestão para elaboração de um “capítulo 0”, contendo recordatório de bases físicas e matemáticas imprescindíveis à formação ministrada no âmbito da disciplina. Em boa hora o fez: esse material de base foi, entretanto, publicado sob a forma de livro de apoio (Oliveira & Lopes, 2016), a que seguidamente se faz referência em Nota dos Autores.

Uma palavra final de apreço pela sempre amável e competente colaboração da Editora.

PREFÁCIO À QUINTA E À SEXTA EDIÇÕES

A obra que agora chega às mãos dos leitores em sexta edição atualizada é já uma obra consagrada. Fruto de uma vasta experiência pedagógica de Luis Adriano Oliveira e António Gameiro Lopes no ensino da mecânica dos fluidos a alunos de engenharia mecânica da Universidade de Coimbra, onde os autores são distintos professores, esta obra cedo conquistou um lugar único como obra de referência fundamental nos cursos das universidades portuguesas onde aquele ensino é ministrado.

A mecânica dos fluidos, na hipótese de meio contínuo, é passível de uma formulação em termos dos princípios da mecânica e termodinâmica da física clássica. Estes princípios de conservação da massa, da variação da quantidade de movimento por ação externa de acordo com a segunda lei de Newton e da conservação da energia de um sistema de acordo com a primeira lei da termodinâmica constituem a base para a formulação de qualquer problema da mecânica dos fluidos. Os cursos modernos de introdução à mecânica dos fluidos que privilegiam esta abordagem fundamental dedicam invariavelmente os capítulos iniciais à formulação geral das equações que governam o movimento de um fluido na sua forma integral e diferencial. Este livro não constitui exceção e fá-lo de uma forma que combina simultaneamente o rigor e a generalidade exigidos pela formulação com a exemplificação da sua aplicação a problemas de mecânica dos fluidos. Estes, ainda que simplificados, revestem-se de importância prática e permitem, desde logo, pela sua diversidade, ilustrar o enorme alcance da formulação geral.

A aparente facilidade com que as equações que “governam” o movimento de um fluido num caso particular podem ser conhecidas a partir da formulação geral poderá esconder, para muitos que se iniciam neste estudo, a enorme riqueza e complexidade física que caracteriza o escoamento de um fluido, resultante das instabilidades próprias do seu movimento, e que se traduz, frequentemente, no fenómeno que é conhecido por turbulência. Não são menores as dificuldades que se colocam à solução das equações não-lineares que governam o movimento de um fluido viscoso newtoniano na generalidade dos casos de escoamento turbulento de um fluido em domínios de geometria complexa. Contudo, o ramo da mecânica dos fluidos denominado de computacional e conhecido por CFD (de *Computational Fluid Dynamics*) tem permitido dar resposta, através de simulações de crescente grau de fidelidade do escoamento de um fluido, a questões não só de natureza fundamental, como também de natureza aplicada com grande relevância prática em problemas de engenharia. Este ramo da mecânica dos fluidos conheceu um desenvolvimento notável desde a segunda metade do século XX e tem sido estimulado mais recentemente pelo progresso vertiginoso do poder de cálculo da computação paralela e pelo desenvolvimento simultâneo de métodos numéricos de grande sofisticação.

Esta realidade recente, brevemente esboçada nas considerações anteriores, não pode deixar de provocar uma reflexão em todos os que se dedicam ao ensino da mecânica dos fluidos, a diferentes níveis. Atualmente, um profissional de engenharia, quando confrontado com um problema de mecânica dos fluidos, tem enorme facilidade de acesso a

simulações, dispondo potencialmente de um elevado grau de fidelidade, obtidas através de códigos de mecânica dos fluidos computacional e meios de cálculo que se podem encontrar diretamente à sua disposição, ou simplesmente produzidas por agentes ou instituições especializadas. A confiança que deve ser depositada nos resultados dessas simulações pelos seus utilizadores tem de ser estabelecida através de procedimentos rigorosos de verificação e validação que têm sido objeto de recentes e importantes desenvolvimentos. Não é raro verificar-se que, por ausência destes procedimentos, as simulações são de baixa fiabilidade, comprometendo-se, em muitos casos, a sua aplicação prática. Mais uma vez neste contexto, a aparente facilidade com que se produzem simulações de escoamento de um fluido poderá esconder, para os não avisados que se iniciam neste domínio, as dificuldades inerentes à obtenção de simulações confiáveis.

Seguindo o Professor Janeiro Borges, que no prefácio da primeira edição enquadrou no passado a génese deste livro, permitam-me agora um olhar para o futuro. Seguramente que os avanços que se registam na mecânica dos fluidos computacional e experimental terão uma penetração crescente no ensino destas matérias nos currículos dos diversos cursos de engenharia. Estes encontram-se já consideravelmente compactados, e esta natural evolução colocará sob pressão o ensino de algumas das matérias ditas clássicas da mecânica dos fluidos. As consequências serão de lhes dedicar menos tempo ou, no limite, omiti-las. Creio que todos nós, com mais ou menos experiência de ensino neste campo, deveremos ponderar essas consequências.

Decorre daquela simples constatação que o ensino básico da mecânica dos fluidos é de importância capital. É nele que se estruturam os conceitos fundamentais e se constrói a base do edifício interpretativo que permite análises proficuas dos escoamentos complexos desvendados pelas modernas simulações. É através dele que se conseguem obter, em muitos casos, soluções simples de problemas aparentemente complexos em engenharia.

Creio que este livro, cobrindo os fundamentos dos principais temas clássicos da mecânica dos fluidos, cumpre admiravelmente os propósitos que devem pautar o curso básico. Muito embora reclamando sempre uma natureza introdutória para os diferentes tópicos, os autores levam a cobertura das correspondentes matérias para além do que é possível acomodar num primeiro curso de dois semestres, pelo que será sempre necessário recorrer a uma seleção. O capítulo final, intitulado “Exemplos de Aplicação Prática”, constitui uma “janela” para muitos domínios onde a mecânica dos fluidos assume um papel relevante e onde os conceitos apreendidos nos anteriores capítulos de modelação possibilitam um novo olhar acrescido de compreensão.

Sei, por experiência, que o texto possui qualidades pedagógicas assinaláveis, conjugando rigor na argumentação física com o encadeamento lógico das formulações matemáticas sem deixar de se alongar, sempre que possível, em explicações sugestivas que ajudam a amenizar a “secura” de um tratamento mais formal. Existiu a preocupação louvável de adaptar o nível de dificuldade dos exemplos e exercícios a um primeiro contacto do leitor com a matéria, inculcando, desde logo, confiança na sua capacidade de aprendizagem e estimulando o seu progresso. A componente de Internet do livro, por um lado, complementa largamente o texto e, por outro, possibilita a incursão em matérias de maior complexidade através de códigos, alguns deles agora disponibilizados em versão *Matlab*.

A partir da quinta edição, esta obra vem acompanhada de uma outra dos mesmos autores na forma de livro de apoio, que versa as noções fundamentais de física e matemática invocadas no texto do livro *Mecânica dos Fluidos*. Esta é uma extensão de grande utilidade para o leitor, que, uma vez na posse dessas noções, obtidas quer por estudo prévio quer por consulta dirigida, não verá o seu foco desviado da essência das matérias tratadas neste livro.

Mostra a experiência, pelo menos a minha, que a aprendizagem da mecânica dos fluidos se faz por passagens múltiplas, revisitando as mesmas matérias básicas com um conhecimento enriquecido por estudos mais avançados. Em qualquer dos casos, a sólida formação adquirida no curso introdutório é a que se revela, porventura, determinante no percurso de cada aluno num dado domínio. A comunidade de professores e alunos de cursos superiores, de profissionais de engenharia ou de simples leitores interessados no tema da mecânica dos fluidos poderá continuar a contar com uma obra escrita em língua portuguesa, amadurecida por 14 anos de bem-sucedida experiência de ensino e que saberá corresponder às exigências deste tempo.

Lisboa, dezembro de 2020

J. A. C. Falcão de Campos

Professor Associado do Instituto Superior Técnico, onde é responsável pela disciplina de Mecânica dos Fluidos I, no Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica

TESTEMUNHO

É irônico, posso assegurar, introduzir o livro que compôs o epílogo da minha formação acadêmica. Abandonei o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra a braços com os últimos vestígios da minha atividade lá desenvolvida. Deles posso contar uma resma de folhas e o livro que agora me honra testemunhar. Acompanhou-me até ao fim, mais por opção do que por necessidade. Não foi acontecimento isolado, devo dizer, uma vez que este livro foi consistentemente uma presença assídua nos meus estudos. Por diversas vezes, socorri-me dos seus textos para apoiar decisões, fundamentar matérias relacionadas e refrescar tópicos não exclusivos da cadeira de Mecânica dos Fluidos.

Relatar a influência que este livro exerceu no meu percurso é um exercício simples. Mais difícil é, contudo, refletir sobre a afinidade que me liga a ele. Ainda que o seu propósito seja didático, outras viagens se iniciam, distantes do seu esperado formalismo académico. Em cada leitura surge um convite para explorar o inconsciente lógico que existe na Mecânica dos Fluidos. Debatendo-me sobre isso, julgo que isso se deve ao decalque dos fluidos sobre papel químico: o mais que se lhes retira são as leis que os regem, tão clarividentes no estado matemático quanto no modo como se expressam no perímetro da realidade.

A compreensão inesperada da semântica da Mecânica dos Fluidos acontece como se da aprendizagem de uma nova língua se tratasse. Este livro marca uma extraordinária evolução de conceitos que os torna acessíveis e muito intuitivos, quando relacionados entre si. Acresce-lhe, por isso, a eficácia no incentivo à autonomia, fator de elevada importância no percurso universitário.

A responsabilidade de tão positiva experiência recai, naturalmente, sobre os autores do livro. O Professor Doutor Luis Adriano Oliveira deixa uma inconfundível impressão digital naquilo que diz e escreve. É lógico e objetivo, sem a quadratura de quem é lógico e sem a vulgaridade de quem é objetivo. O Professor Doutor António Gameiro Lopes introduz uma visão mais atualizada da mecânica dos fluidos, à luz das aplicações informáticas que facilitam o estudo da dinâmica dos fluidos. A ambos, devo agradecer o contributo que deram para a formação da presente geração de engenheiros.

Se o livro dependesse exclusivamente da minha experiência pessoal, nada mais sugeriria acrescentar. No entanto, dediquei atenção aos comentários e dificuldades dos meus colegas de curso e pude identificar carências a nível do relacionamento dos conteúdos da Mecânica dos Fluidos com os fundamentos matemáticos que a suportam, motivadas pelo desfasamento temporal entre os momentos de aprendizagem. Neste contexto, a 5.^a Edição introduziu um suporte teórico na forma de livro de apoio, designado por *Mecânica dos Fluidos – Fundamentos de Física e Matemática*. O livro de apoio, tal como o nome indica, revisita os fundamentos de matemática que vestem as leis da mecânica dos fluidos e confere-lhes sentido físico.

As ideias tangíveis eliminam os constrangimentos das abstrações (não raramente mal-amadas pelos estudantes de engenharia). Quanto mais tangível for o conhecimento, maior

interesse se gera à sua volta. Por esse motivo, acredito que o livro de apoio aproxima ainda mais a mecânica dos fluidos da compreensão metódica, que, por sua vez, “desagua” na interpretação ágil e intuitiva dos fenômenos.

Quando saí pela última vez do Departamento de Engenharia Mecânica, tinha este livro nas mãos. Estava certa de que encerrara um dos mais belos capítulos da minha vida, mas longe de imaginar que iria introduzir os capítulos de quem encerrara os meus.

Coimbra, maio de 2016

Ana Catarina Mendes Barradas
Antiga aluna de Mecânica dos Fluidos I e II e Mestre em Engenharia Mecânica pela
Universidade de Coimbra. Atualmente a exercer funções em investigação e
desenvolvimento de sistemas térmicos

NOTA DOS AUTORES

A mecânica dos fluidos é temática vasta e diversificada, tanto a nível dos campos científicos que abrange, como no tocante aos domínios de aplicação prática a que permite aceder. Não será de estranhar, assim, que a literatura científica atualmente disponível inclua excelentes trabalhos dedicados à familiarização com tão relevante matéria. Nestas condições, a oportunidade da edição de um novo texto pedagógico consagrado ao assunto deverá ser criteriosamente questionada e ponderada: uma opção positiva apenas se revelará legítima se decorrer da garantia de que não se trata apenas de mais um texto, total ou parcialmente redundante em relação aos existentes.

O presente livro encerra, com efeito, um conjunto de características específicas, que motivaram a sua publicação e que a seguir se resumem.

Embora se encontrem disponíveis algumas traduções, para português, de textos originais em língua inglesa (na sua grande maioria, efetuadas por tradutores de nacionalidade brasileira), são raras as obras sobre mecânica dos fluidos geral e introdutória, concebidas e redigidas, de raiz, em língua portuguesa. Ao longo do presente trabalho procura-se, assim, usar o português enquanto língua (também) científica, preservando empenhadamente a qualidade de expressão.

Na convicção de que a análise de questões concretas, levantadas por circunstâncias de aplicação prática, representa um contributo de importância inestimável para a sólida compreensão da matéria exposta, o texto teórico é intercalado com um conjunto de exercícios ilustrativos, partindo de dados fisicamente realistas. Espera-se, através deles, apoiar uma estrutura de trabalho que poderá privilegiar a vertente de ensino acompanhado ou, em alternativa, a via não presencial ou mesmo de autoaprendizagem. Com vista a este último cenário, todos os exercícios propostos são objeto de resolução integral, em que se faz sistemático apelo às expressões do texto teórico.

A matéria versada é particularmente favorável à utilização de métodos numéricos, que se podem estender desde formulações elementares até às mais elaboradas técnicas de dinâmica dos fluidos computacional. Procurando encorajar um percurso iniciático nesta área particularmente promissora, o presente livro é dotado de um conjunto de programas simples, redigidos em linguagem *MatLab*⁴ e de acesso inteiramente aberto, que permitem o uso da via computacional na resolução de vários problemas propostos. Cada programa, pronto a ser corrido ou modificado livremente, é precedido de breve explicação, baseada no texto teórico. Numa outra perspetiva, visando utilização mais expedita e carácter mais aplicado, são também disponibilizados programas interativos, em fonte fechada, com interface gráfica. O utilizador pode, por esta segunda via, beneficiar das vantagens de interface amigável, que, no caso de algumas aplicações particulares (cálculo de escoamentos potenciais, resolução de redes de condutas, ...), se revela particularmente expressiva e esclarecedora.

⁴ Acompanhando a tendência atual manifestada pela comunidade científica, a linguagem de programação *MatLab* substitui, assim, a linguagem *Fortran* usada até à quinta edição do livro.

Todos os programas anteriormente referidos são descritos, teoricamente fundamentados e disponibilizados nos **anexos de tipo S** (designação decorrente do seu conteúdo: *Software*) da **componente Internet do livro**. Podem ser usados quer em estudo individual quer em aulas de tipo convencional ou digital (neste último caso, por recurso a um quadro interativo em rede com os computadores do docente e dos alunos).

No presente texto impresso do livro, cada referência a um item da componente Internet é acompanhada do símbolo identificativo .

A utilização dos programas de cálculo, que de forma alguma é indispensável, exige, naturalmente, um conhecimento mínimo da linguagem de programação *MatLab*.

O trabalho apresentado resulta de exercício pedagógico que se vem praticando, ao longo de vários anos, no âmbito do mestrado integrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra e corresponde, sensivelmente, a um ano letivo (o terceiro, no presente currículo). O conteúdo é, entretanto, também relevante na formação de base em outros ramos de engenharia (ambiente, civil, química, biomedicina, ...) e ainda em âmbitos distintos, como a física ou a matemática aplicada.

O texto teórico é estruturado através de um total de 13 capítulos, sendo o **capítulo 1** centrado na apresentação de conceitos introdutórios (desde logo, a própria noção de “fluido”), de princípios físicos de conservação e de propriedades termodinâmicas, cujo conhecimento se revela imprescindível a uma abordagem profícua de toda a matéria subsequente. Uma das propriedades que mais condiciona o comportamento de um fluido é a pressão, cuja distribuição no seu interior constitui, assim, o tema central do **capítulo 2**. A aplicação, ao escoamento de um fluido, dos princípios físicos de conservação introduzidos no primeiro capítulo – conservação de massa, de quantidade de movimento, de energia – é formulada numa perspetiva integral, no **capítulo 3**, e numa ótica diferencial, no **capítulo 4**. No **capítulo 5**, faz-se uma distinção entre dois regimes de escoamento de um fluido – laminar e turbulento – procurando-se, em ambos os casos, representar os mecanismos de transporte mais influentes, bem como os instrumentos teóricos e laboratoriais que permitem, respetivamente, calculá-los e medi-los. Um domínio de aplicação prática de tais instrumentos é o escoamento no interior de condutas, onde importa avaliar, para vencer, as perdas de energia ocorrentes por atrito entre o fluido e as paredes que o delimitam, e também pela interposição de obstáculos de diversa natureza. Este aspeto, particularmente relevante em inúmeras circunstâncias práticas, é contemplado no **capítulo 6**. A capacidade de compactação e de sistematização, resultante da formulação de um problema físico em termos adimensionais, é explorada no **capítulo 7**. Aí se introduzem, também, os principais parâmetros adimensionais que caracterizam o escoamento de um fluido e que permitem assegurar que as conclusões decorrentes da análise de um modelo laboratorial são realmente aplicáveis ao protótipo que esse modelo é suposto representar. Em diversas circunstâncias práticas, caracterizadas por efeitos de inércia relativamente importantes, afigura-se realista dividir o domínio total de escoamento em duas classes de regiões: uma, dita “zona de camada limite”, onde se encontram essencialmente localizados os efeitos de dissipação por atrito viscoso; outra, designada por “zona de escoamento potencial”, onde tais efeitos podem ser comparativamente ignorados. Em cada uma destas regiões é viável a adoção de importantes hipóteses simplificadoras, que em muito sistematizam e facilitam a correspondente análise: o **capítulo 8** é centrado no estudo de escoamentos em regiões de

tipo camada limite; e o **capítulo 9** é dedicado aos escoamentos de tipo potencial. Uma outra e importante hipótese simplificadora consiste em considerar a massa volúmica do fluido como sendo uma propriedade constante em todo o domínio de escoamento. Tal pressuposto, que equivale a encarar o fluido como sendo “incompressível”, é geralmente aceitável no caso de líquidos. Sê-lo-á também se o fluido em apreço for um gás, sob condição de as velocidades reinantes não ultrapassarem cerca de um terço da celeridade local do som. Porém, para velocidades de escoamento superiores a este limiar – escoamentos em regime sónico, supersónico, ou hipersónico –, a hipótese de incompressibilidade deixa de ser realista: a massa volúmica deve, então, ser entendida como uma variável no espaço e no tempo, ou seja, o fluido passa a ser considerado “compressível”. O escoamento de fluidos compressíveis, que apresenta características fascinantes e não raro surpreendentes, constitui o tema central do **capítulo 10**. Enquanto visão iniciática e como aplicação dos capítulos anteriores, é apenas de forma introdutória e algo sucinta que aqui se contemplam as temáticas dos escoamentos com superfície livre – no **capítulo 11** – e das turbomáquinas – no **capítulo 12**. Trata-se, com efeito, de áreas de algum modo especializadas, objeto de inúmeras e excelentes obras mais desenvolvidas, para cuja leitura se pretende aqui, simplesmente, despertar motivação e assegurar o nível mínimo necessário de preparação física e matemática. A partir da sua terceira edição, o livro passou a ser dotado de um capítulo adicional, o **capítulo 13**, em que é feita a inclusão de um conjunto de exemplos de aplicação prática, apresentados em estreita coordenação com o material teórico desenvolvido nos 12 capítulos precedentes. Dois exemplos adicionais são expostos a partir da 5.^a edição. Destaca-se, nesta segunda vertente, a introdução à **mecânica dos fluidos computacional (CFD)**, com inclusão de um código de cálculo de interface amigável – *EasyCFD* – pronto a ser usado na modelação de uma gama muito abrangente de escoamentos de fluidos em condições de aplicação corrente. Para a motivação e a escolha deste novo material, em muito contribuíram sugestões formuladas por diversos leitores e utilizadores das edições precedentes.

Para além de se enquadrar na estrutura curricular de distintos percursos formativos, o livro poderá, ainda, apoiar ações de iniciação, atualização ou requalificação de profissionais, que careçam de noções introdutórias em mecânica dos fluidos. Com efeito, a sua leitura profícua não exige qualquer conhecimento prévio na área em apreço. São, no entanto, pressupostas algumas noções básicas de cálculo vetorial, de análise diferencial e integral, bem como de física geral (mecânica e termodinâmica), todas elas normalmente adquiridas na fase propedêutica da estrutura curricular, e comuns aos diferentes ramos de ciência e de engenharia.

Por diversas razões – formação curricular propedêutica ainda não completada ou totalmente sedimentada; anos seguidos no exercício de atividade profissional sem necessidade imperiosa de praticar ou recordar a formação teórica adquirida em fase académica, já longínqua; ... –, é frequente tais noções básicas de física e matemática não estarem ainda – ou terem já deixado de estar! – inteiramente asseguradas no momento de iniciar (ou retomar) um curso de mecânica dos fluidos. Tendo em consideração esta circunstância, a 5.^a edição do presente livro introduziu a primeira edição do livro de apoio intitulado *Mecânica dos Fluidos – Fundamentos de Física e Matemática* (Oliveira & Lopes, 2016). Embora elaborado com a intenção de constituir, de alguma forma, um “capítulo zero” do presente livro, o referido livro de apoio destina-se também a um público

mais alargado: o universo de potenciais leitores que, pelas razões anteriormente apontadas, pretendem sentir-se um pouco mais confortáveis na sua preparação básica para adquirir, recordar ou sedimentar formação científica na área de mecânica dos fluidos.

Para que um raciocínio seja solidamente fundamentado, é indispensável que os passos intermédios possam ser integralmente compreendidos. Assim, cada expressão usada no presente texto é, de um modo geral, exaustivamente deduzida. No entanto, deduções matemáticas detalhadas, cuja extensão possa perturbar a unidade de uma argumentação física, são remetidas para **anexos de tipo T** (designação decorrente do seu conteúdo, de natureza Teórica), incluídos na já mencionada componente Internet do livro.

Com a presente edição é ainda disponibilizado um vasto conjunto de diapositivos (elaborados e utilizados pelos autores nas suas aulas) destinados a apoiar a componente teórica de um curso introdutório de mecânica dos fluidos. Docentes interessados nesse material poderão solicitá-lo junto da Editora, através do endereço eletrónico www.lidel.pt.

Em resumo, a partir da 5.^a edição – com a qual se assinalou a passagem de dez anos sobre a data do seu primeiro lançamento (julho de 2006) – o livro reúne as seguintes características, que o distinguem das edições anteriores: texto redigido segundo o acordo ortográfico atualmente em vigor; *software* de cálculo de escoamentos elaborado em linguagem *MatLab*; inclusão de dois exemplos adicionais no capítulo 13, que contém ilustrações de aplicação prática; disponibilização de diapositivos de apoio à leção de aulas teóricas; e associação ao lançamento do livro de apoio (Oliveira & Lopes, 2016).

Um texto introdutório, desejavelmente compacto, dedicado a uma temática tão abrangente como é a mecânica dos fluidos, terá necessariamente de incorrer em insuficiências e mesmo omissões. O que se espera deste livro é que do seu uso, desejavelmente lúdico, resulte a interiorização de conceitos básicos indispensável ao acesso a fontes mais especializadas, onde se encontre disponível toda a informação que aqui não foi possível apresentar ou aprofundar.

Embora cuidado, o trabalho de revisão não terá certamente filtrado por completo erros e gralhas. Nesse sentido, eventuais correções, comentários ou sugestões serão essenciais à melhoria de futuras edições, pelo que desde já se agradecem vivamente. Para o efeito, os endereços eletrónicos de ambos os autores são indicados de seguida.

Luis Adriano Oliveira
luis.adriano@dem.uc.pt

António Gameiro Lopes
antonio.gameiro@dem.uc.pt

DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NUM FLUIDO

Cap. 2

2.1 – Introdução

A natureza apenas dispõe de dois mecanismos para exercer uma força sobre um fluido: a ação de **tensões tangenciais**; e a presença de **distribuições de pressão**. O escoamento de Couette (introduzido na secção 1.9.3 e a desenvolver na secção 4.5) constitui um exemplo do primeiro caso. Do segundo, é elucidativo o escoamento de um fluido no interior de uma conduta horizontal: só ocorrerá movimento se a pressão à entrada for superior à da saída, isto é, se for imposto, como veremos no capítulo 6, um gradiente de pressão ao longo do tubo. Ainda que se trate de fluido em repouso, o simples peso do fluido (ação gravítica) faz com que a pressão aumente com a profundidade. Esse efeito é pouco sensível num gás, mas pode ser muito importante num líquido: pense-se na enorme pressão (e na força que dela decorre) a que estão sujeitas as paredes da barragem de uma central hidroelétrica e nas consequências dramáticas que poderá ter a cedência de uma delas. Pressão é, pois, uma propriedade cujo conhecimento se revela determinante na análise do comportamento de qualquer fluido, em repouso ou em escoamento. Parece justificado, assim, que se lhe dedique por inteiro o presente capítulo.

A definição de **pressão**, enquanto propriedade termodinâmica e função de ponto, foi já introduzida na secção 1.9. Neste capítulo, a pressão será entendida como constituindo a única incógnita: $p = p(x, y, z, t)$. Todas as restantes distribuições de variáveis dependentes (velocidade, massa volúmica, temperatura, ...) são, portanto, consideradas conhecidas. O suporte matemático que usaremos para explicitar a pressão é a segunda lei de Newton.

O estudo da distribuição da pressão no seio de um fluido resulta consideravelmente simplificado se o mesmo se encontrar em **repouso**. Em tais condições, de que se ocupa a hidrostática, a variação da pressão – e o conseqüente campo de forças que dela decorre – é, apenas, o reflexo da ação do peso do fluido. Insere-se, nesse âmbito, a análise do equilíbrio da atmosfera e, também, das forças exercidas sobre superfícies mergulhadas num fluido e em corpos nele submersos ou flutuantes. Por seu turno, o conhecimento da distribuição de pressão no interior de um fluido cujo movimento ocorre **em bloco** é substancialmente facilitado pela ausência de tensões tangenciais. De todos estes casos se ocupa a sequência do capítulo. O **caso geral**, que inviabiliza qualquer simplificação relevante, é referido na suposição de que o campo de velocidade seja conhecido. Na última secção do capítulo é feita uma breve referência aos principais tipos de dispositivos correntemente usados para efetuar medições sobre o campo de pressão.

Conforme referido no final do capítulo 1, a presente análise da distribuição de pressão, no interior de um ou vários fluidos, será efetuada com base no pressuposto de serem desprezáveis quaisquer efeitos de tensão superficial.

$$d\vec{f}_p = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \hat{i} - \frac{\partial p}{\partial y} \hat{j} - \frac{\partial p}{\partial z} \hat{k} \right) dx dy dz \quad (2.7)$$

ou, por unidade de volume:

$$\vec{f}_p = -\overline{\text{grad } p} \quad (2.8)$$

O sinal “menos” de (2.8) significa que o sentido que se toma como sendo positivo para a força \vec{f}_p é orientado segundo as pressões decrescentes (gradiente negativo). Pense-se, nomeadamente, no escoamento de ar no interior de um tubo: o ar desloca-se do extremo com maior pressão para o extremo com menor pressão, ou seja, no sentido do gradiente de pressão negativo.

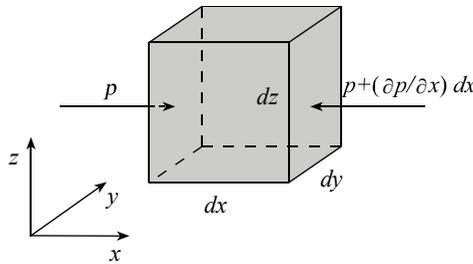


FIGURA 2.3 – Forças de pressão e gradiente de pressão.

2.5 – Versão simplificada das equações de Navier-Stokes

Além das forças de pressão, outros tipos de solicitações há que podem igualmente atuar sobre um elemento de fluido. Recordemos, da secção 2.2, a classificação das forças externas $d\vec{f}$, exercidas sobre um elemento de fluido, em dois grupos, nomeadamente as **forças de campo**, $d\vec{f}_c$, e as **forças de superfície**, $d\vec{f}_s$: $d\vec{f} = d\vec{f}_c + d\vec{f}_s$.

Das forças de campo apenas nos interessarão, como foi também referido, as originadas pelo campo gravítico, ou seja, o peso do elemento de fluido:

$$d\vec{f}_g = \rho \vec{g} dx dy dz \quad (2.9)$$

ou, por unidade de volume:

$$\vec{f}_g = \rho \vec{g} \quad (2.10)$$

Tal como vimos com a pressão, uma distribuição uniforme de tensões viscosas não produzirá qualquer aceleração no elemento de fluido. Apenas existirá uma força líquida de atrito se houver diferença entre as forças provocadas pela tensão viscosa em faces opostas do elemento, ou seja, se o gradiente das tensões viscosas for diferente de zero. A título ilustrativo, uma vez que o perfil da figura 1.5 (capítulo 1) é linear – caso conhecido como **escoamento de Couette**, que será desenvolvido na secção 4.5 –, a tensão τ , de (1.19), é constante ao longo de y . Assim, a face horizontal superior do elemento de fluido da figura 1.6 está sujeita a uma força de módulo ($\tau dx dz$), que aponta para a direita (fluido superior

mais rápido) e a inferior a uma força de igual módulo e sentido oposto (fluido inferior mais lento). A força líquida é a soma algébrica de ambas, ou seja, nula. Se o perfil da referida figura 1.5 não fosse linear, a tensão τ iria variar com y e o elemento de fluido da figura 1.6 encontrar-se-ia sujeito a uma força líquida segundo a direção do escoamento, dada por:

$$df_v = \lim_{dy \rightarrow 0} \left[\mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y+dy} - \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_y \right] dx dz = \frac{d}{dy} \left(\mu \frac{du}{dy} \right) dy dx dz \quad (2.11)$$

em que dz representa a dimensão do elemento segundo a direção normal ao plano da figura. Por unidade de volume e supondo μ constante, vem:

$$f_v = \mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (2.12)$$

No caso mais geral de um escoamento tridimensional, ocorrerão naturalmente componentes de atrito viscoso segundo as três direções espaciais. Provar-se-á, na secção 4.3, que, se μ e ρ se puderem considerar constantes, os gradientes das tensões viscosas conduzem, então, a uma força líquida resultante, cuja expressão, por unidade de volume, toma a forma:

$$\vec{f}_v = \mu \nabla^2 \vec{V} = \mu \left(\frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

em que \vec{V} , de componentes (u, v, w) , é o vetor-velocidade e $\nabla^2 \vec{V}$ o seu laplaciano (cf. Oliveira & Lopes, 2016).

A segunda lei de Newton permite-nos, agora, relacionar a resultante das forças externas (de superfície e volúmicas), que atuam sobre o elemento de volume, com a correspondente aceleração que lhe é comunicada. Recordando, da secção 1.7, a noção de derivada material e notando que $\vec{a} = D\vec{V} / Dt$, vem:

$$\rho \vec{a} = \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \overline{\text{grad}}) \vec{V} \right] = -\overline{\text{grad}} p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.14)$$

Esta é uma versão simplificada (válida para $\rho = c.^{te}$, $\mu = c.^{te}$) das conhecidas equações de Navier-Stokes, que serão reiteradamente referidas na sequência do livro. A correspondente dedução, na sua forma mais geral, será apresentada na secção 4.3.

Explicitando a pressão, que é, lembremo-lo, a presente incógnita:

$$\overline{\text{grad}} p = \rho (\vec{g} - \vec{a}) + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.15)$$

As equações de Navier-Stokes, sob a forma (2.15), permitir-nos-ão o estudo da distribuição de pressão, em diferentes tipos de escoamento:

- **Repouso** (hidrostática) ou **movimento uniforme** (aceleração nula, em relação a um referencial de inércia);
- **Translação em bloco**;

Explicitando a incógnita ρ_1 , vem:

$$\rho_1 = \frac{p_A - p_B + \rho_{\text{água}} g(z_A - z_F + h_1) - \rho_{\text{água}} g(z_B - z_F)}{g h_1}$$

$$\rho_1 = \frac{124195 + 10^3 \times 9.81 \times (1.2 - 0 + 1) - 10^3 \times 9.81 \times (1.3 - 0)}{9.81 \times 1} = 13560 \text{ kg/m}^3$$

Exercício de Aplicação 2.2

Enunciado: Determine a dependência do nível de mercúrio na superfície livre B com a pressão no reservatório A , sabendo que o tubo é de secção circular com diâmetro constante e $h_1 = 1 \text{ m}$, $h_2 = 2.5 \text{ m}$, $h_3 = 0.5 \text{ m}$, $h_4 = 1 \text{ m}$.

Resolução:

Dados: $h_1 = 1 \text{ m}$ $h_2 = 2.5 \text{ m}$
 $h_3 = 0.5 \text{ m}$ $h_4 = 1 \text{ m}$

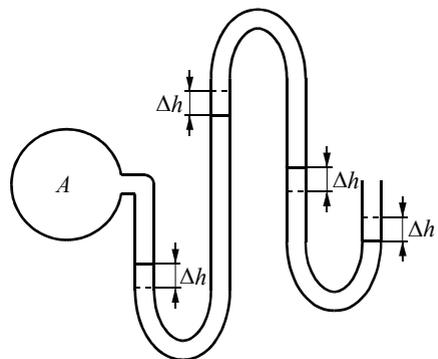
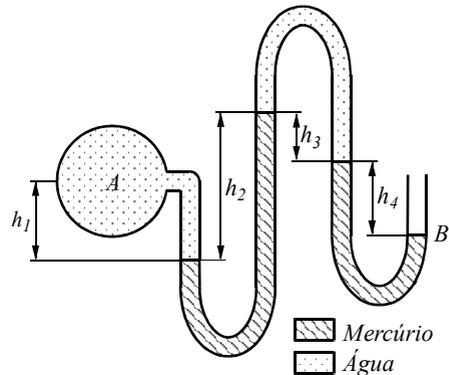
Para um determinado valor da pressão no reservatório e considerando os níveis iniciais das interfaces, obtém-se a seguinte expressão:

$$p_B = p_A + \rho_{\text{água}} g h_1 - \rho_{\text{Hg}} g h_2 + \rho_{\text{água}} g h_3 + \rho_{\text{Hg}} g h_4 \tag{1}$$

A pressão p_A , figurando como única incógnita na expressão anterior ($p_B = p_{\text{atm}}$), poderia ser imediatamente determinada, se bem que, como se verá adiante, o seu valor não é necessário para a resolução do presente problema.

Devido ao aumento de pressão Δp_A no reservatório, os níveis dos líquidos alteram-se de acordo com a representação qualitativa da figura ao lado (o traço interrompido representa a nova posição das interfaces). Note-se que a grandeza Δh é a mesma em todas as interfaces, devido ao facto de o diâmetro do tubo ser constante. A análise da nova condição de equilíbrio resulta em:

$$p'_B = p'_A + \Delta p_A + \rho_{\text{água}} g (h'_1 + \Delta h) - \rho_{\text{Hg}} g (h'_2 + 2\Delta h) + \rho_{\text{água}} g (h'_3 + 2\Delta h) + \rho_{\text{Hg}} g (h'_4 - 2\Delta h)$$



Mecânica dos Fluidos é um texto de nível introdutório sobre o comportamento dos fluidos (líquidos e gases) em repouso ou em movimento. Esta 6.^a edição apresenta melhorias no texto de modo a facilitar a leitura e expõe, de forma clara e desenvolvida, o essencial dos conceitos básicos necessários à iniciação em áreas específicas como aerodinâmica subsónica ou supersónica (escoamentos internos ou externos), hidrodinâmica (escoamentos em condutas ou de superfície livre) ou turbomáquinas. Inclui um vasto conjunto de exercícios ilustrativos intercalados na exposição teórica e de exercícios propostos que são integralmente resolvidos no final do texto.

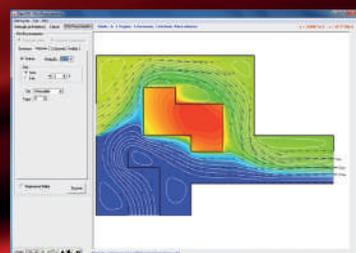
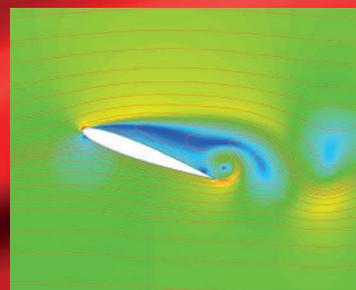
O último capítulo, agora enriquecido com a inclusão de duas temáticas adicionais, é inteiramente dedicado à análise de exemplos concretos, que ilustram a aplicação da teoria dos capítulos anteriores à prática corrente de engenharia. Em total articulação com a versão impressa, é paralelamente disponibilizada uma extensa componente Internet de forte pendor interativo, contendo, por um lado, *software* de cálculo em linguagem *MatLab* com acesso inteiramente aberto e, por outro, aplicações informáticas com interface gráfica amigável, cuja utilização não pressupõe conhecimentos em linguagem de programação e que permitem simular sugestivos exemplos de interesse prático.

É ainda contemplada uma introdução à mecânica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), que se faz acompanhar de um código de cálculo ilustrativo (*EasyCFD*). A utilização do *software MatLab* é uma das novidades.

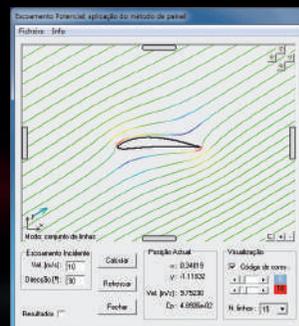
Está disponível, desde a 5.^a edição, um primeiro volume, em coleção, *Mecânica dos Fluidos – Fundamentos de Física e Matemática*, impresso e em eBook.

Destina-se essencialmente a alunos dos cursos de diferentes áreas de engenharia, de universidades e de institutos politécnicos, servindo de suporte a disciplinas de primeiro, segundo e terceiro ciclos, incluindo mestrados integrados. Pode também apoiar ações de iniciação ou de atualização de profissionais que careçam de conhecimentos em mecânica dos fluidos.

Prefácio de Professor Doutor J. A. C. Falcão de Campos, Professor Associado do Instituto Superior Técnico, onde é responsável pela disciplina de Mecânica dos Fluidos I no Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica, e inclui também o testemunho de Ana Catarina Barradas, Mestre em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.



Exemplo de escoamento em domínio confinado, na vizinhança de um degrau – aplicação do código *EasyCFD*



Escoamento em torno de um perfil alar – aplicação do código *Painel*



O software e as aplicações informáticas apresentadas neste livro estão disponíveis em www.lidel.pt até o livro se esgotar ou ser publicada nova edição atualizada ou com alterações