

CONTENIDO

Prefacio

xv

Primera parte Principios básicos de mecánica de fluidos

1	Nociones fundamentales	3
1.1	Nota histórica	3
1.2	Fluidos y el continuo	3
1.3	Dimensiones y unidades	5
1.4	Ley de la homogeneidad dimensional	7
1.5	Una nota sobre fuerza y masa	9
1.6	Ley de viscosidad de Newton: el coeficiente de viscosidad	10
*1.7	Una nota sobre materiales no newtonianos	15
1.8	El gas perfecto: ecuación de estado	17
*1.9	Compresibilidad de líquidos; tensión superficial	19
1.10	Colofón	27
2	Esfuerzo en un punto	37
2.1	Introducción	37
2.2	Cantidades escalares, vectoriales y tensores: campos	37
2.3	Fuerzas superficiales y de cuerpo; esfuerzo	38
2.4	Esfuerzo en un punto para un fluido en reposo y para flujos no viscosos	39
*2.5	Movimiento de fluidos viscosos	41
2.6	Propiedades de esfuerzo	43
2.7	El gradiente	45
2.8	Colofón	47
3	Estática de fluidos	53
3.1	Introducción	53
3.2	Variación de la presión en un fluido estático incompresible	53
3.3	Variación de la presión con la elevación para un fluido estático compresible	56

3.4	La atmósfera estándar	59
3.5	Efecto de la fuerza superficial sobre un fluido confinado que permanece estático	61
3.6	Fuerza hidrostática sobre una superficie plana sumergida en un fluido estático incompresible	61
3.7	Fuerza hidrostática sobre superficies curvas sumergidas	68
*3.8	Una nota sobre superficies curvas complejas	71
3.9	Ejemplos de fuerzas hidrostáticas sobre superficies curvas sumergidas	73
3.10	Leyes de boyamiento	77
*3.11	Consideraciones de estabilidad para cuerpos en flotación	83
3.12	Colofón	88
4	Fundamentos del análisis de flujo	107
4.1	El campo de velocidad	107
4.2	Dos puntos de vista	109
4.3	Aceleración de una partícula de flujo	110
4.4	Flujo irrotacional	113
4.5	Relación entre flujo irrotacional y viscosidad	119
4.6	Leyes básicas y secundarias para medios continuos	120
4.7	Sistemas y volúmenes de control	120
4.8	Una relación entre el enfoque de sistemas y el enfoque de volúmenes de control	121
4.9	Flujos unidimensionales	127
4.10	Colofón	131
5	Leyes básicas para sistemas finitos y volúmenes de control finitos, I: continuidad y <i>momentum</i>	137
5.1	Introducción	137
	Parte A. Conservación de la masa	137
5.2	Ecuación de continuidad	137
	Parte B. <i>Momentum</i> lineal	141
5.3	Análisis de sistemas	141
5.4	Volúmenes de control fijos en un espacio inercial	142
5.5	Empleo de la ecuación de <i>momentum</i> lineal en un volumen de control	144
*5.6	Volúmenes de control no inerciales	159
	*Parte C. Momento de <i>momentum</i>	163
5.7	Momento de <i>momentum</i> para un sistema	163
5.8	Método del volumen de control para la ecuación de momento de <i>momentum</i> en volúmenes de control inerciales	165
5.9	Ecuación de momento de <i>momentum</i> aplicada a bombas y turbinas	172
*5.10	Momento de <i>momentum</i> para volúmenes de control no inerciales	177
5.11	Colofón	182
viii	6 Leyes básicas para sistemas finitos y volúmenes de control finitos, II: termodinámica	203

6.1	Introducción	203
6.2	Nota preliminar	203
6.3	Análisis de sistemas	204
6.4	Análisis del volumen de control	205
6.5	Problemas que involucran la primera ley de la termodinámica	210
6.6	Ecuación de Bernoulli a partir de la primera ley de la termodinámica	216
6.7	Una nota sobre la segunda ley de la termodinámica	222
*6.8	La segunda ley de la termodinámica	222
6.9	Colofón	224
7	Formas diferenciales de las leyes básicas	237
7.1	Introducción	237
	Parte A. Desarrollo elemental de las formas diferenciales de las leyes básicas	238
7.2	Conservación de la masa	238
7.3	Ley de Newton; ecuación de Euler	240
*7.4	Líquidos bajo aceleración lineal uniforme o bajo velocidad angular constante	241
7.5	Integración de la ecuación de Euler para flujo permanente; ecuación de Bernoulli	249
7.6	Ecuación de Bernoulli aplicada a flujo irrotacional	250
*7.7	Ley de Newton para flujos generales	251
7.8	Problemas que involucran flujos laminares paralelos	254
	*Parte B. Forma diferencial de las leyes básicas: una aproximación más general	262
7.9	Notación índice y fórmula de Cauchy	262
7.10	Teorema de Gauss	264
7.11	Conservación de la masa	266
7.12	Ecuaciones de <i>momentum</i>	266
7.13	Primera ley de la termodinámica	268
7.14	Segunda ley de la termodinámica	271
7.15	Leyes básicas en coordenadas cilíndricas	272
7.16	Colofón	273
8	Análisis dimensional y similitud	281
8.1	Grupos adimensionales	281
	Parte A. Análisis dimensional	281
8.2	Naturaleza del análisis dimensional	281
8.3	Teorema de π de Buckingham	283
8.4	Grupos adimensionales importantes en mecánica de fluidos	285
8.5	Cálculo de los grupos adimensionales	285
	Parte B. Similitud	291
8.6	Similitud dinámica	291
8.7	Relación entre análisis dimensional y similitud	293

8.8	Significado físico de grupos adimensionales importantes en mecánica de fluidos	297
8.9	Uso práctico de los grupos adimensionales	300
8.10	Similitud cuando se conoce la ecuación diferencial	302
8.11	Colofón	303
Segunda parte Análisis de flujos internos importantes		
<hr/>		
9	Flujo viscoso incompresible a través de tuberías	315
	Parte A. Comparación general entre flujos laminares y flujos turbulentos	315
9.1	Introducción	315
9.2	Flujos laminares y turbulentos	316
	Parte B. Flujo laminar	318
9.3	Primera ley de la termodinámica para flujo en tuberías; pérdida de altura	318
9.4	Problemas de flujo laminar en tuberías	323
9.5	Condiciones de entrada a la tubería	326
	Parte C. Flujos turbulentos: consideraciones experimentales	327
9.6	Nota preliminar	327
9.7	Pérdida de altura en una tubería	328
9.8	Perfil de velocidad y esfuerzo cortante en la pared para flujo turbulento	333
9.9	Pérdidas menores en sistemas de tuberías	335
	Parte D. Problemas de flujo en tuberías	340
9.10	Solución a problemas de tuberías en serie	340
9.11	Líneas de altura piezométrica y de energía total	349
9.12	Conductos no circulares	351
	Parte E. Flujos turbulentos con números de Reynolds elevados	353
9.13	Esfuerzo aparente	353
9.14	Perfiles de velocidad para flujos turbulentos con números de Reynolds elevados	355
9.15	Detalles de los perfiles de velocidad para tuberías lisas y rugosas	362
9.16	Problemas para flujos con números de Reynolds elevados	367
	Parte F. Flujo en tuberías en paralelo	370
*9.17	Problemas de tuberías en paralelo	370
*9.18	Tuberías ramificadas	374
9.19	Colofón	378
10	Flujo viscoso incompresible general: las ecuaciones de Navier-Stokes	397
10.1	Introducción	397
	Parte A. Flujo laminar	398
*10.2	Ley de viscosidad de Stokes	398
10.3	Ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo laminar incompresible	403
10.4	Flujo paralelo: consideraciones generales	406
x 10.5	Problemas de flujo paralelo laminar	408
10.6	Una nota	414

*10.7	Ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas para una placa de flujo muy delgada	415
*10.8	Ley de similitud dinámica a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes	418
	*Parte B. Flujo turbulento	422
10.9	Un comentario	422
10.10	Promedios temporales para flujo turbulento permanente	422
10.11	Ecuaciones de Navier-Stokes para las magnitudes medias temporales: esfuerzo aparente	423
10.12	Manifestación del esfuerzo aparente: viscosidad de remolino	427
10.13	Colofón	427
11	Flujo compresible unidimensional	431
11.1	Introducción	431
	Parte A. Preliminares básicos	432
11.2	Relaciones termodinámicas para un gas perfecto	432
11.3	Propagación de una onda elástica	434
11.4	El cono de Mach	438
11.5	Una nota sobre flujo compresible unidimensional	440
	Parte B. Flujo isentrópico con cambio simple de área	440
11.6	Leyes básicas y secundarias para flujo isentrópico	440
11.7	Propiedades locales en el punto de estancamiento isentrópico	444
11.8	Una diferencia importante entre flujo subsónico y flujo supersónico unidimensional	446
11.9	Flujo isentrópico de un gas perfecto	448
11.10	Flujo en una boquilla real en condiciones de diseño	451
	Parte C. La onda de choque normal	454
11.11	Introducción	454
11.12	Líneas de Fanno y de Rayleigh	455
11.13	Relaciones para una onda de choque normal	458
11.14	Relaciones de onda de choque normal para un gas perfecto	459
11.15	Una nota sobre ondas de choque oblicuas	464
	Parte D. Operación de boquillas	468
11.16	Una nota sobre chorros libres	468
11.17	Operación de boquillas	469
	*Parte E. Flujo a través de un ducto de sección constante con fricción	473
11.18	Introducción	473
11.19	Ecuaciones de flujo adiabático en sección constante para un gas perfecto	474
	*Parte F. Flujo permanente a través de un ducto de sección constante con transferencia de calor	482
11.20	Introducción	482
11.21	Relaciones para un gas perfecto	483
11.22	Colofón	488

Tercera parte Análisis de flujos externos importantes

12	Flujo potencial	501
12.1	Introducción	501

	Parte A. Consideraciones matemáticas	502
12.2	Circulación: conectividad de regiones	503
12.3	Teorema de Stokes	505
12.4	Circulación en flujos irrotacionales	505
12.5	Potencial de velocidad	507
	Parte B. Función de corriente y relaciones importantes	507
12.6	Función de corriente	509
12.7	Relación entre la función de corriente y el campo de velocidad	510
12.8	Relación entre la función de corriente y las líneas de corriente	
12.9	Relación entre la función de corriente y el potencial de velocidad para flujos irrotacionales, bidimensionales e incompresibles	511
12.10	Relaciones entre las líneas de corriente y las líneas de potencial constante	512
	Parte C. Análisis básico de flujo bidimensional, incompresible e irrotacional	513
12.11	Un análisis acerca de las cuatro leyes básicas	516
12.12	Condiciones de frontera para flujos no viscosos	516
12.13	Coordenadas polares	520
	Parte D. Flujos simples	520
12.14	Naturaleza de los flujos simples que se estudiarán	521
12.15	Metodologías de solución para flujo potencial	524
12.16	Flujo uniforme	524
12.17	Fuentes y sumideros bidimensionales	526
12.18	El vórtice simple	528
12.19	El doblete	533
	Parte E. Superposición de flujos simples bidimensionales	533
12.20	Nota introductoria sobre el método de superposición	533
12.21	Sumidero con vórtice	535
12.22	Flujo alrededor de un cilindro sin circulación	537
12.23	Sustentación y arrastre para un cilindro sin circulación	538
12.24	Caso del cilindro giratorio	541
12.25	Sustentación y arrastre para un cilindro con circulación	545
	*Parte F. Flujos axisimétricos tridimensionales	545
12.26	Introducción	546
12.27	Función de corriente de Stokes	
12.28	Relación entre líneas de corriente, función de corriente y campo de velocidad	547
12.29	Aplicación de las leyes básicas	549
12.30	Flujo uniforme	550
12.31	Fuentes y sumideros tridimensionales	551
12.32	Doblete tridimensional	552
12.33	Flujo permanente alrededor de una esfera	553
12.34	Flujos alrededor de cuerpos de revolución	555
12.35	Colofón	558
	— 13 Teoría de capa límite	571
		571
xii	13.1 Anotaciones introductorias	572
	13.2 Espesor de la capa límite	

*13.3	Ecuaciones simplificadas de la capa límite para flujo laminar; ecuación de Blasius	575
13.4	Ecuación integral de <i>momentum</i> de Von Kármán y fricción superficial	581
	Parte A. Capas límites laminares	583
13.5	Uso de la ecuación integral de <i>momentum</i> de Von Kármán	583
13.6	Fricción superficial para flujo en una capa límite laminar	586
13.7	Transición para flujo en una placa plana	591
	Parte B.1 Capas límites turbulentas: placas lisas	593
13.8	Espesor de la capa límite sobre placas planas lisas	593
13.9	Arrastre por fricción superficial sobre placas lisas	596
	Parte B.2 Capas límites turbulentas: placas rugosas	602
13.10	Arrastre por fricción superficial en capa límite turbulenta sobre placas rugosas	602
	Parte C. Flujo sobre cuerpos curvos sumergidos	606
13.11	Flujo sobre fronteras curvas; separación	606
13.12	Arrastre sobre cuerpos sumergidos	609
*13.13	Estela detrás de un cilindro	620
*13.14	Perfiles de alas; comentarios generales	621
*13.15	Temas adicionales sobre perfiles de alas, arrastre inducido y flujo transónico	625
13.16	Colofón	628
14	Flujo a superficie libre	645
14.1	Introducción	645
14.2	Consideración del perfil de velocidad	645
14.3	Flujo normal	646
14.4	Flujo normal: métodos modernos	651
14.5	Sección hidráulicamente óptima	655
14.6	Ondas gravitacionales	658
14.7	Energía específica; flujo crítico	660
14.8	Flujo variado en canales rectangulares cortos	668
*14.9	Flujo gradualmente variado sobre canales largos	672
*14.10	Clasificación de los perfiles superficiales para flujos gradualmente variados	677
14.11	Flujo rápidamente variado; el resalto hidráulico	682
14.12	Colofón	687
— 15	*Turbomaquinaria	699
	Parte A. Consideraciones generales	699
15.1	Introducción	699
15.2	Relaciones de similitud para turbomáquinas	701
15.3	Velocidad específica	704
15.4	Las leyes básicas	707
	Parte B. Turbinas	710
15.5	Comentarios introductorios	710
15.6	Turbinas de impulso	710

15.7	Turbinas de reacción de flujo radial y axial	715
15.8	Turbinas (y compresores) de reacción con cascadas de álabes	720
	Parte C. Ventiladores, bombas, sopladores y compresores	723
15.9	Anotaciones introductorias	723
15.10	Bombas y sopladores de flujo radial	724
15.11	Colofón	731
16	*Mecánica computacional de fluidos	739
16.1	Introducción	739
	Parte A. Métodos numéricos I	739
16.2	Operaciones numéricas para derivación e integración	739
	Parte B. Problemas de flujo representados mediante ecuaciones diferenciales ordinarias	745
16.3	Un comentario	745
16.4	Introducción a la integración numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias	747
16.5	Notas sobre programación	748
16.6	Problemas	
	Parte C. Problemas de flujo permanente representados mediante ecuaciones diferenciales parciales	760
16.7	Introducción a los problemas de flujo permanente con valores frontera	760
16.8	Flujo potencial	764
16.9	Flujo viscoso laminar incompresible en un ducto	767
16.10	Proyectos	770
	Respuestas a problemas seleccionados	773
	Bibliografía	779
A.I	Métodos de medición	781
A.I.1	Introducción	781
A.I.2	Medición de presiones	783
A.I.3	Medición de velocidades	784
A.I.4	Medición de caudal en flujo incompresible en tuberías	789
A.I.5	Medición de caudal en flujo compresible en tuberías	793
A.I.6	Medidas de flujo a superficie libre; el vertedero	796
A.I.7	Medición de la viscosidad	800
A.I.8	Colofón	
A.II	Deducción de la ecuación diferencial para el flujo adiabático en área constante para un gas perfecto	801
B	Curvas y tablas	803