



## 4 Cinematica dei fluidi

### Obiettivi didattici

<b>4.1</b> Il campo di velocità	155
4.1.1 Descrizioni Euleriana e Lagrangiana del campo di moto	158
4.1.2 Correnti mono, bi, e tridimensionali	159
4.1.3 Moto permanente e moto vario	160
4.1.4 Linee di corrente, linee di fumo e traiettorie	161
<b>4.2</b> Il campo dell'accelerazione	164
4.2.1 La derivata totale o sostanziale	164
4.2.2 Effetti non stazionari	167
4.2.3 Effetti convettivi	167
4.2.4 Il sistema di riferimento intrinseco	171
<b>4.3</b> Volume di controllo e rappresentazioni del sistema	173
<b>4.4</b> Il teorema del trasporto di Reynolds	174
4.4.1 Formulazione del teorema del trasporto di Reynolds	176
4.4.2 Interpretazioni fisiche	181
4.4.3 Relazione fra il teorema del trasporto di Reynolds e la derivata totale	182
4.4.4 Effetti stazionari	182
4.4.5 Effetti non stazionari	183
4.4.6 Volumi di controllo mobili	184
4.4.7 Scelta del volume di controllo	186
<b>4.5</b> Sommario e guida allo studio	187
Bibliografia	188
Domande concettuali	188
Problemi	189

## 5 Equazioni globali dell'idrodinamica

### Obiettivi didattici

<b>5.1</b> L'equazione di continuità – Il principio di conservazione della massa	197
5.1.1 L'equazione globale di continuità	198
5.1.2 Volume di controllo fisso indeformabile	200
5.1.3 Volume di controllo mobile e indeformabile	206
5.1.4 Volume di controllo variabile	208
<b>5.2</b> La Seconda legge di Newton – Teorema della quantità di moto e principio di conservazione del momento angolare	211
5.2.1 Il teorema della quantità di moto	211
5.2.2 Applicazioni dell'equazione della quantità di moto	212
5.2.3 Il principio di conservazione del momento angolare	226
5.2.4 Applicazione dell'equazione del momento angolare	227

<b>5.3</b> Primo principio della termodinamica – L'equazione dell'energia	234
5.3.1 Derivazione dell'equazione dell'energia	234
5.3.2 Applicazione dell'equazione dell'energia	237
5.3.3 Confronto tra l'equazione dell'energia e l'equazione di Bernoulli	241
5.3.4 Applicazione dell'equazione dell'energia nel caso di moto non uniforme	247
5.3.5 L'equazione dell'energia e l'equazione del momento angolare	250
<b>5.4</b> Seconda legge della termodinamica – Fluidi irreversibili	251
<b>5.5</b> Sommario e guida allo studio	251
Bibliografia	253
Domande concettuali	253
Problemi	254

## 6 Equazioni differenziali dell'idrodinamica

### Obiettivi didattici

<b>6.1</b> Cinematica dei fluidi	276
6.1.1 Revisione dei campi di velocità e accelerazione	277
6.1.2 Traslazione e deformazione lineare	277
6.1.3 Deformazione angolare	278
<b>6.2</b> Conservazione della massa	281
6.2.1 Forma differenziale o indefinita dell'equazione di continuità	281
6.2.2 Coordinate polari cilindriche	284
6.2.3 La funzione di corrente	284
<b>6.3</b> Conservazione della quantità di moto	287
6.3.1 Descrizione delle forze che agiscono sull'elemento infinitesimo	288
6.3.2 Equazione della quantità di moto	290
<b>6.4</b> Fluidi perfetti	291
6.4.1 Le Equazioni di Eulero	291
6.4.2 L'Equazione di Bernoulli	291
6.4.3 Campo di moto irrotazionale	293
6.4.4 L'equazione di Bernoulli per moto irrotazionale	295
6.4.5 Il potenziale di velocità	295
<b>6.5</b> Alcuni esempi di moti piani a potenziale di velocità	298
6.5.1 Moto uniforme	299
6.5.2 Sorgente e pozzo	300
6.5.3 Vortice	302
6.5.4 Doppietta o dipolo	305
<b>6.6</b> Sovrapposizioni di campi di moto piani a potenziale	307
6.6.1 Sorgente in un campo di moto uniforme – Semi-corpo	307

6.6.2	Ovali di Rankine	310	7.9.2	Correnti attorno a corpi immersi	378
6.6.3	Moto attorno ad un cilindro circolare	312	7.9.3	Correnti a superficie libera	382
<b>6.7</b>	Altri aspetti dell'analisi dei moti a potenziale di velocità	317	<b>7.10</b>	Similitudine fra le equazioni differenziali	385
<b>6.8</b>	Fluidi reali (viscosi)	318	<b>7.11</b>	Sommario e guida allo studio	388
6.8.1	Relazioni Sforzo-Deformazione	318		Bibliografia	389
6.8.2	Le equazioni di Navier-Stokes	319		Domande concettuali	390
<b>6.9</b>	Alcune semplici soluzioni delle eq. di Navier-Stokes per fluidi reali e incomprimibili in regime laminare	320		Problemi	390
6.9.1	Corrente laminare in moto permanente fra due lastre piane fisse parallele	321	<b>8 Correnti di fluidi viscosi in pressione</b>		
6.9.2	Moto alla Couette	323			403
6.9.3	Moto laminare permanente in tubi circolari	325		<i>Obiettivi didattici</i>	403
6.9.4	Moto laminare permanente in una sezione anulare	328	<b>8.1</b>	Caratteristiche generali delle correnti nelle tubazioni	404
<b>6.10</b>	Altri aspetti dell'analisi differenziale	330	8.1.1	Moto laminare e moto turbolento	405
6.10.1	Metodi numerici	330	8.1.2	La regione d'ingresso e la regione di moto completamente sviluppato	408
<b>6.11</b>	Sommario e guida allo studio	331	8.1.3	La pressione e lo sforzo tangenziale	409
	Bibliografia	333	<b>8.2</b>	Moto laminare completamente sviluppato	410
	Domande concettuali	333	8.2.1	Applicazione di $\mathbf{F} = \mathbf{m}\mathbf{a}$	410
	Problemi	334	8.2.2	Applicazione delle equazioni di Navier-Stokes	417
<b>7 Analisi dimensionale, similitudine e modelli</b>			8.2.3	Applicazione dell'analisi dimensionale	418
		347	8.2.4	Considerazioni energetiche. La cadente	419
	<i>Obiettivi didattici</i>	347	<b>8.3</b>	Moto turbolento completamente sviluppato	422
<b>7.1</b>	Analisi dimensionale	348	8.3.1	Transizione da moto laminare a moto turbolento	422
<b>7.2</b>	Teorema di Buckingham o del $\Pi$	350	8.3.2	Sforzi tangenziali nel moto turbolento	424
<b>7.3</b>	Determinazione dei numeri indice $\Pi$	351	8.3.3	La Distribuzione della velocità nel moto turbolento	429
<b>7.4</b>	Altri commenti sull'analisi dimensionale	356	8.3.4	I modelli della turbolenza	432
7.4.1	Selezione delle grandezze che governano il fenomeno	356	8.3.5	Caos e turbolenze	432
7.4.2	Determinazione delle dimensioni di riferimento	357	<b>8.4</b>	Analisi dimensionale della corrente in una tubazione	433
7.4.3	Univocità dei termini $\Pi$	359	8.4.1	Perdite distribuite	433
<b>7.5</b>	Determinazione dei gruppi $\Pi$ mediante ispezione	360	8.4.2	Perdite Localizzate	439
<b>7.6</b>	Gruppi adimensionali comuni nella meccanica dei fluidi	361	8.4.3	Condotti non Circolari	450
<b>7.7</b>	La correlazione dei dati sperimentali	365	<b>8.5</b>	Esempi di calcolo di correnti in sistemi di tubi	453
7.7.1	Problemi con un singolo gruppo $\Pi$	366	8.5.1	Sistemi con una condotta singola	453
7.7.2	Problemi con due o più gruppi $\Pi$	367	8.5.2	Sistemi di tubazioni	463
<b>7.8</b>	Modelli e similitudine	369	<b>8.6</b>	Misura di portata	468
7.8.1	Teoria dei modelli	369	8.6.1	Flussometri	468
7.8.2	Il rapporto di scala	373	8.6.2	Contatori volumetrici	473
7.8.3	Aspetti pratici nell'impiego di modelli	373	<b>8.7</b>	Sommario e guida allo studio	475
<b>7.9</b>	Alcuni problemi tipici studiati con modelli fisici	375		Bibliografia	476
7.9.1	Correnti in pressione	375		Domande concettuali	478
		375		Problemi	478

## 9 Correnti fluide attorno a corpi

<i>Obiettivi didattici</i>	491
<b>9.1</b> Caratteristiche generali del campo di moto dei fluidi attorno ai corpi	492
9.1.1 Introduzione ai concetti di azione di trascinamento o resistenza e di portanza	493
9.1.2 Caratteristiche del campo di moto attorno a un corpo	496
<b>9.2</b> Caratteristiche dello strato limite	500
9.2.1 Struttura e spessore dello strato limite su di una lastra piana	501
9.2.2 Soluzione dello strato limite di Prandtl-Blasius	504
9.2.3 Equazione globale del moto nello strato limite su una lastra piana	508
9.2.4 Transizione da moto laminare a moto turbolento nello strato limite	513
9.2.5 Strato limite turbolento	515
9.2.6 Gli effetti del gradiente di pressione	519
9.2.7 Equazione globale del moto dello strato limite (gradiente di pressione non nullo)	524
<b>9.3</b> L'Azione di trascinamento (resistenza)	525
9.3.1 Resistenza di attrito	525
9.3.2 Resistenza di pressione	527
9.3.3 Valori del coefficiente di resistenza. Esempi pratici	529
<b>9.4</b> Portanza	542
9.4.1 Distribuzione della pressione sulla superficie dei corpi	543
9.4.2 La circolazione	551
<b>9.5</b> Sommario e guida allo studio	556
Bibliografia	558
Domande concettuali	559
Problemi	559

## 10 Correnti a superficie libera

<i>Obiettivi didattici</i>	571
<b>10.1</b> Caratteristiche generali delle correnti a superficie libera	572

<b>10.2</b> Caratteristiche geometriche della sezione	573
<b>10.3</b> Moto uniforme	577
10.3.1 La formula di Chézy	578
10.3.2 Esempi di moto uniforme	582
<b>10.4</b> Considerazioni energetiche	585
10.4.1 Energia specifica	586
10.4.2 L'altezza critica $k$	587
<b>10.5</b> Le correnti lineari o gradualmente variate	591
10.5.1 I profili di moto permanente	592
10.5.2 Tracciamento del profilo della superficie libera	594
<b>10.6</b> Correnti non lineari	602
10.6.1 Il risalto idraulico	603
10.6.2 Stramazzo in parete sottile a spigolo vivo	609
10.6.3 Stramazzo a larga soglia	612
10.6.4 Luci di fondo	613
<b>10.7</b> Sommario e guida allo studio	615
Bibliografia	616
Domande concettuali	617
Problemi	618

## Appendice A

629

## Appendice B

### Moto vario nelle correnti in pressione

(di Michele La Rocca)	631
<b>1</b> Celerità delle onde elastiche nelle correnti in pressione	631
<b>2</b> Ordini di grandezza	634
<b>3</b> Soluzione fondamentale nel caso di assenza di dissipazioni. Il colpo d'ariete	635
<b>4</b> Presenza di dissipazioni. Il metodo delle caratteristiche	640

## Indice dei video

645

## Crediti fotografici

649

## Indice dei nomi

651