

A09
92

Stefano Bergero
Anna Chiari

Appunti di termodinamica



Copyright © MMVII
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 A/B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-1323-6

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: settembre 2007

INDICE

INTRODUZIONE	IX	
1	RICHIAMI DI STATICA DEI FLUIDI	1
1.1	Generalità	1
1.2	Pressione	2
1.3	Densità e volume specifico	3
1.4	Pressione in un fluido in quiete	4
1.5	Principio di Pascal	9
1.6	Manometri differenziali	11
1.7	Principio di Archimede	18
2	SISTEMI TERMODINAMICI	20
2.1	Generalità	20
2.2	Stato di un sistema termodinamico	23
2.3	Equilibrio termodinamico di un sistema isolato	26
2.4	Trasformazioni termodinamiche di un sistema chiuso	28
3	DEFINIZIONE OPERATIVA DI TEMPERATURA	37
3.1	Generalità	37
3.2	Principio zero della termodinamica	38
3.3	Termometro a mercurio	39
3.4	Termometro a gas a volume costante	46
3.5	Gas perfetti	54
3.6	Miscela di gas perfetti	58

4	LAVORO MECCANICO	63
4.1	Generalità	63
4.2	Valutazione del lavoro meccanico	65
4.3	Scambio di lavoro nelle trasformazioni reversibili	71
4.4	Potenza meccanica	74
5	DEFINIZIONE OPERATIVA DI QUANTITÀ DI CALORE	75
5.1	Generalità	75
5.2	Calorimetro di Bunsen	77
5.3	Legge di equivalenza di Mayer	80
5.4	Flusso termico	83
6	PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI CHIUSI	84
6.1	Fluosistema	84
6.2	Interpretazione analitica delle evidenze sperimentali	88
6.3	Primo principio della termodinamica per un sistema chiuso	90
6.4	L'energia interna è una funzione di stato	95
6.5	Il lavoro non è una funzione di stato	97
6.6	Il calore non è una funzione di stato	98
6.7	Calore specifico a volume costante	99
7	SISTEMI APERTI - 1	101
7.1	Generalità	101
7.2	Portata	103
7.3	Principio di conservazione della massa	107
7.4	Principio di conservazione dell'energia	109
7.5	Sistemi aperti in regime stazionario	116
7.6	L'entalpia è una funzione di stato	122
7.7	Calore specifico a pressione costante	124

8	ENERGIA INTERNA ED ENTALPIA	126
8.1	Energia interna ed entalpia delle sostanze incompressibili	126
8.2	Energia interna ed entalpia dei gas perfetti	130
8.3	Trasformazioni reversibili dei gas perfetti nel piano p-v	137
9	SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA PER SISTEMI CHIUSI	147
9.1	Generalità	147
9.2	Sorgente termica	152
9.3	Macchina termica	153
9.4	Disuguaglianza di Clausius	154
9.5	Enunciato di Kelvin-Planck	159
9.6	Enunciato di Clausius	162
9.7	Traccia termodinamica	167
9.8	Interpretazione analitica delle evidenze sperimentali	170
9.9	Secondo principio della termodinamica per un sistema chiuso	171
9.10	L'entropia è una funzione di stato	173
9.11	Scambio di calore nelle trasformazioni reversibili	175
9.12	Equazioni di validità generale	178
10	ENTROPIA	179
10.1	Entropia delle sostanze incompressibili	179
10.2	Entropia dei gas perfetti	180
10.3	Trasformazioni reversibili dei gas perfetti nel piano T-S	184
10.4	Irreversibilità	193

11	SISTEMI APERTI - 2	207
11.1	Principio di conservazione dell'energia in termini meccanici	207
11.2	Equazione di Bernoulli	210
12	PROPRIETÀ DELLE SOSTANZE PURE	212
12.1	Generalità	212
12.2	Diagrammi di stato delle sostanze pure	214
12.3	Il passaggio di fase liquido-vapore	227
12.4	Titolo	250
12.5	Energia interna, entalpia ed entropia delle sostanze pure	254
12.6	Piani T-S, H-S e p-H delle sostanze pure	258
12.7	Calore latente di vaporizzazione	279
12.8	Cenni sui passaggi di fase solido-vapore e solido-liquido	285
	TESTI DI RIFERIMENTO	287
	APPENDICE	288
A.1	Note sui differenziali esatti	288
A.2	Tabelle dei gas perfetti	289
A.3	Note sui diagrammi logaritmici	293
A.4	Scala internazionale di temperatura	298
A.5	Tabelle dell'acqua in fase liquida e aeriforme	300
A.6	Diagrammi dell'acqua in fase liquida e aeriforme	312

INTRODUZIONE

Il presente lavoro nasce dall'esperienza acquisita durante quasi un decennio di insegnamento svolto nell'ambito dei corsi di Fisica Tecnica presso le Facoltà di Architettura ed Ingegneria dell'Università di Genova.

In questa attività didattica abbiamo maturato la convinzione che lo studio della termodinamica presenti una difficoltà di approccio dovuta a diversi elementi: la complessità insita nella materia, la profondità di alcuni concetti che sono alla base della disciplina e la difficoltà di vedere e di comprendere gli innumerevoli sbocchi applicativi, alcuni dei quali si toccano con mano quotidianamente, "nascosti" dal cospicuo apparato teorico e dal rigoroso formalismo matematico che caratterizzano questa materia.

La termodinamica costituisce, infatti, la "struttura portante" delle discipline fisico-tecniche ed impiantistiche, in ambito industriale, per lo studio e la progettazione delle macchine e degli impianti, e in ambito ambientale, per lo studio e la progettazione dei sistemi energetici necessari al raggiungimento del benessere termoigrometrico, acustico e visivo delle persone.

L'obiettivo che ci siamo posti fin dall'inizio di questo lavoro è quello di fornire agli studenti uno strumento didattico direttamente funzionale allo studio ed alla preparazione degli esami, seguendo le modalità e lo schema delle lezioni dei corsi di Fisica Tecnica tenute in questi anni.

Il titolo del volume non è stato scelto a caso: il testo è infatti strutturato come se fosse una raccolta ordinata di appunti presi a lezione.

In particolare, abbiamo cercato di conferire al testo le seguenti caratteristiche:

- gli argomenti, nel rispetto del necessario rigore scientifico, sono esposti in modo semplice e sintetico presumendo che

il lettore abbia conoscenze elementari di analisi matematica e di fisica generale;

- il formalismo matematico è ridotto al minimo indispensabile e, dove necessario, sono riportati i passaggi matematici, anche se elementari e ripetitivi;
- le unità di misura, espresse nel Sistema Internazionale (S.I.), vengono richiamate con particolare insistenza;
- il testo è corredato da numerose figure ed esempi che aiutano il lettore a farsi un quadro immediato dei concetti esposti;
- anche le cose più scontate ed ovvie vengono comunque evidenziate nei N.B. (nota bene);
- alcune importanti considerazioni, che possono rappresentare una divagazione rispetto alla trattazione principale, sono evidenziate nelle osservazioni.

Nel presente volume sono trattati gli aspetti fondamentali della termodinamica che costituiscono la base per lo studio delle discipline fisico-tecniche ed impiantistiche. Dopo un iniziale richiamo di alcuni elementi di statica dei fluidi, viene introdotto il concetto di sistema termodinamico e sono definite le grandezze temperatura, lavoro e calore. Vengono quindi enunciati il primo ed il secondo principio della termodinamica per i sistemi chiusi ed aperti, con particolare attenzione alle grandezze di stato energia interna, entalpia ed entropia. L'ultimo capitolo è dedicato alle sostanze pure e ai relativi diagrammi di stato.

Al termine di questa breve introduzione, desideriamo ringraziare i colleghi che, con i loro preziosi commenti, suggerimenti e con le loro critiche ci hanno aiutato nella realizzazione di questo volume. Ringraziamo anche gli studenti che, con il loro apporto critico durante le lezioni e le esercitazioni, ci hanno incoraggiato ad intraprendere questo lavoro.

Genova, luglio 2007

1 RICHIAMI DI STATICA DEI FLUIDI

1.1 GENERALITÀ

La *statica dei fluidi* studia il comportamento dei *fluidi in quiete*.

Le sostanze esistono in natura in tre *fasi: solida, liquida e aeriforme*, caratterizzate da forze di coesione tra le molecole di diversa entità.

Nei **solidi** le forze di coesione sono elevate e le molecole sono disposte secondo una struttura ordinata tridimensionale rigida, detta *reticolo cristallino*.

Nei **liquidi** e negli **aeriformi** (*gas e vapori*) le forze di coesione sono piccole e le molecole non sono più disposte secondo una struttura ordinata, ma si muovono le une rispetto alle altre.

È detta **fluida** una sostanza che "*scorre*" se soggetta ad una forza tangenziale. Pertanto in un *fluido in quiete* le forze agenti sulle superfici di confine sono *normali* alle superfici stesse.

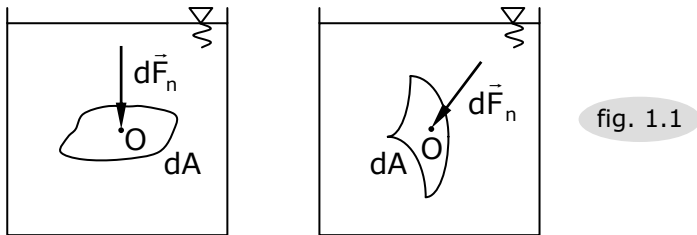
Sono fluidi le sostanze in fase liquida e aeriforme.

I fluidi assumono la forma del recipiente che li contiene: gli aeriformi occupano per intero il volume del contenitore, i liquidi occupano un volume definito e presentano superfici libere.

1.2 PRESSIONE

Si considera un recipiente al cui interno è contenuto un fluido in quiete.

Sia dA la superficie infinitesima centrata nel punto O interno alla massa fluida (fig.1.1).



Si definisce **pressione** in O il modulo della forza normale per unità di superficie:

$$p = \frac{dF_n}{dA}$$

dF_n = modulo della forza normale infinitesima $d\vec{F}_n$ che agisce sulla superficie infinitesima dA .

La pressione p non ha proprietà direzionali, cioè assume lo stesso valore indipendentemente dall'orientamento della superficie dA : è una *grandezza scalare*.

N.B. Infatti, pur essendo la forza normale $d\vec{F}_n$ un vettore, nella definizione di pressione compare solo il suo modulo.

S.I. $[p] = [N/m^2] = [Pa]$ (pascal)

Altre unità di misura comunemente usate per la pressione:

$[p] = [bar]$	(bar)	1 bar = 10^5 Pa
$[p] = [atm]$	(atmosfera)	1 atm = 101325 Pa
$[p] = [mmHg]$	(millimetro di mercurio)	1 atm = 760 mmHg

1.3 DENSITÀ E VOLUME SPECIFICO

Si definisce **densità** o **massa volumica** di una sostanza la massa per unità di volume:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

S.I. $[\rho] = [\text{kg}/\text{m}^3]$

In generale una sostanza è **comprimibile**, ovvero la densità è funzione della temperatura e della pressione:

$$\rho = \rho(T, p)$$

In molte applicazioni la variazione della densità in funzione di T e p è trascurabile per i *liquidi* e per i *solidi*, che possono essere considerati con buona approssimazione incompressibili. Una sostanza si dice **incompressibile** se la sua densità è costante:

$$\rho = \text{cost}$$

Si definisce **volume specifico** di una sostanza il volume per unità di massa:

$$v = \frac{V}{m}$$

S.I. $[v] = [\text{m}^3/\text{kg}]$

$$v = \frac{1}{\rho}$$

Si definisce **peso specifico** la forza peso per unità di volume:

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

S.I. $[\gamma] = [\text{N}/\text{m}^3]$

$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{mg}{V} = \frac{\rho Vg}{V} = \rho g$$

g = accelerazione di gravità

1.4 PRESSIONE IN UN FLUIDO IN QUIETE

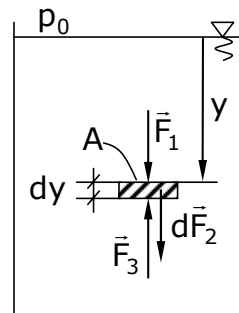
Si considera un recipiente al cui interno è contenuto un fluido in quiete (fig. 1.2).

Si vuole determinare la pressione idrostatica p alla generica profondità y rispetto al pelo libero del fluido.

Sia p_0 la pressione esercitata sul pelo libero ($y = 0$) dall'ambiente esterno.

Alla quota y si isola un cilindro infinitesimo di fluido di base A e altezza dy .

fig. 1.2



Sul cilindro agiscono le seguenti forze:

\vec{F}_1 = forza agente sulla base superiore alla quota y dovuta alla pressione p esercitata dalla colonna di fluido soprastante:

$$F_1 = pA$$

$d\vec{F}_2$ = forza peso

$$dF_2 = dm g = \rho dV g = \rho A dy g$$

In condizioni statiche deve esistere necessariamente una forza \vec{F}_3 che equilibri \vec{F}_1 e $d\vec{F}_2$, legata alla pressione ($p + dp$) esercitata sulla base inferiore alla quota ($y + dy$):

$$F_3 = (p + dp)A$$

Applicando la prima legge della dinamica:

$$\vec{F}_1 + d\vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$$

$$F_1 + dF_2 - F_3 = 0$$

$$pA + \rho Ag dy - (p + dp)A = 0$$

$$p + \rho g dy - p - dp = 0$$

$$dp = \rho g dy$$

N.B. La differenza di pressione dp compensa il peso del cilindro infinitesimo di fluido.

Integrando a partire dal pelo libero ($y = 0, p = p_0$), si ottiene l'andamento della pressione p in funzione della profondità y :

$$\int_{p_0}^p dp = \int_0^y \rho g dy$$

Nell'ipotesi di *fluido incompressibile* ($\rho = \text{cost}$):

$$\int_{p_0}^p dp = \rho g \int_0^y dy$$

$$p = p_0 + \rho g y$$

Tale espressione è nota come **legge di Stevino** e rappresenta l'equazione fondamentale dell'idrostatica.

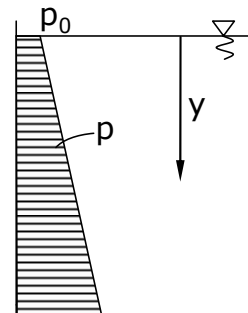


fig. 1.3

N.B.

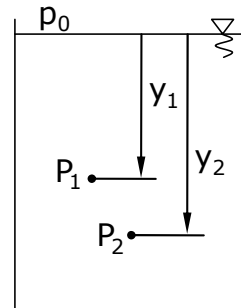
- La pressione è la stessa in tutti i punti del recipiente posti alla stessa profondità, qualunque sia la forma del recipiente.
- La pressione aumenta linearmente con la profondità: in fig. 1.3 è rappresentato l'andamento di p in funzione di y .

La differenza di pressione tra due punti P_1 e P_2 posti rispettivamente a profondità y_1 e y_2 (fig. 1.4) risulta:

$$\int_{P_1}^{P_2} dp = \rho g \int_{y_1}^{y_2} dy$$

$$P_2 - P_1 = \rho g (y_2 - y_1)$$

fig. 1.4



N.B. La differenza di pressione ($p_2 - p_1$) non dipende dalla pressione p_0 esercitata sul pelo libero.

Nell'ipotesi di **fluido comprimibile** per risolvere $\int_0^y \rho g dy$ è necessario conoscere $\rho = \rho(T(y), p(y))$.

Esempio

Andamento della **pressione atmosferica**:

$$p_{\text{atm}} = p_{\text{atm},0} e^{-ah}$$

p_{atm} = pressione atmosferica alla generica altezza h sul livello del mare

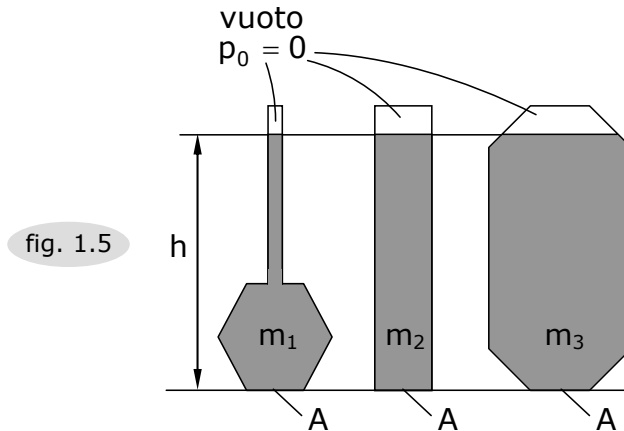
$p_{\text{atm},0}$ = 101325 Pa = pressione atmosferica al livello del mare

$a = 1.16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ alla temperatura di 20 °C

La pressione diminuisce all'aumentare dell'altezza h dal livello del mare e non varia linearmente con la quota.

Conseguenze della legge di Stevino

Si considerano **recipienti di forma diversa**, aventi *stessa area di base A* e riempiti con *diverse quantità di liquido* che raggiunge lo *stesso livello h* (fig. 1.5).



La forza esercitata dal fluido sul fondo di ciascun recipiente è la stessa:

$$F = pA = \rho ghA$$

La forza esercitata dai singoli recipienti (i) sul piano d'appoggio è pari alla forza peso ed è diversa per ciascun recipiente:

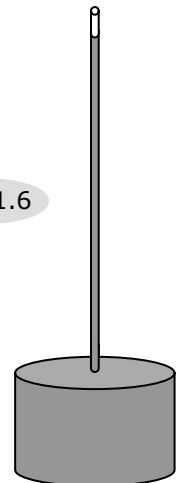
$$F_i = m_i g = \rho V_i g$$

Paradosso idrostatico

Il raggiungimento di un elevato livello di liquido nel tubo può comportare la rottura del recipiente (fig. 1.6).

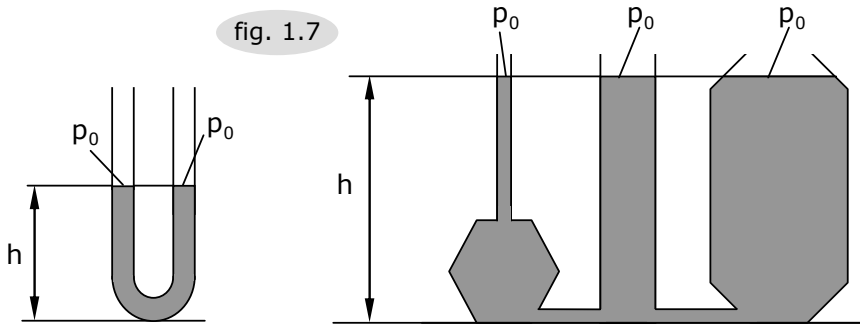
Infatti la forza esercitata dal fluido sulle pareti del recipiente dipende dall'altezza della colonna di liquido e non dal suo peso.

fig. 1.6



Principio dei vasi comunicanti

- Caso di vasi comunicanti in cui è contenuto un solo liquido (fig. 1.7).

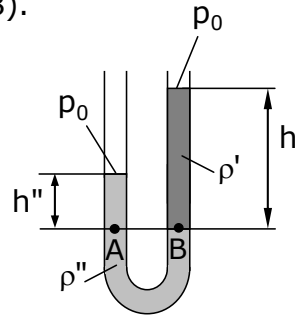


Se i vasi comunicanti sono soggetti alla stessa pressione esterna p_0 , in ciascuno di essi il fluido raggiunge lo stesso livello h .

- Caso di vasi comunicanti in cui sono contenuti due liquidi non miscibili di densità ρ' e ρ'' (fig. 1.8).

Se i vasi comunicanti sono soggetti alla stessa pressione esterna p_0 , in ciascuno di essi il fluido raggiunge un livello diverso.

Infatti per la legge di Stevino in un fluido in quiete due punti A e B alla stessa quota hanno la stessa pressione:



$$p_A = p_B$$

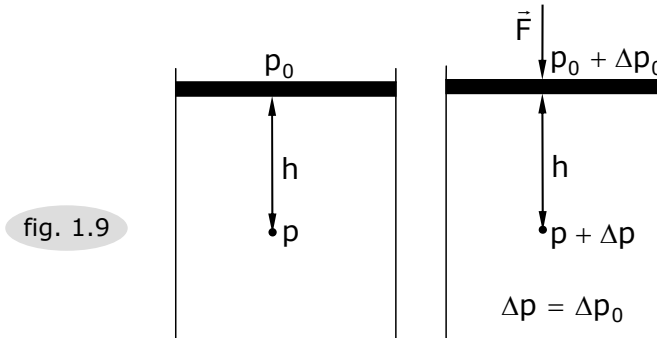
$$p_A = p_0 + \rho''gh'' \Rightarrow p_0 + \rho'gh' = p_0 + \rho''gh'' \Rightarrow \rho'h' = \rho''h''$$

$\rho' < \rho'' \Rightarrow h' > h''$ il fluido con densità minore raggiunge una quota maggiore.

$\rho'' = \rho' \Rightarrow h' = h''$ i due fluidi si portano alla stessa quota.

1.5 PRINCIPIO DI PASCAL

Si considera un recipiente munito di coperchio mobile, al cui interno è contenuto un fluido *incomprimibile* in quiete (fig. 1.9).



Sia p_0 la pressione esercitata sul fluido dall'esterno e p la pressione del fluido alla profondità h :

$$p = p_0 + \rho gh$$

Se si applica sul coperchio una forza esterna \vec{F} la pressione esterna aumenta di una quantità Δp_0 .

Dal momento che la quantità ρgh rimane invariata, alla profondità h si ha una variazione di pressione Δp pari a Δp_0 .

Principio di Pascal: una variazione di pressione applicata ad un fluido confinato viene trasmessa inalterata ad ogni punto del fluido e alle pareti del contenitore.

N.B. Ad esempio, se si pone sul pistone di area A un peso di massa m , risulta $\Delta p_0 = mg/A$.

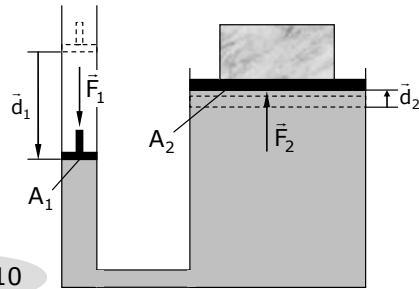
Applicazione: martinetto idraulico

Sfrutta la diversa sezione di due vasi comunicanti contenenti un liquido (ad es. olio) per generare una forza di sollevamento elevata \vec{F}_2 applicando una forza relativamente piccola \vec{F}_1 (fig. 1.10).

L'applicazione sulla sezione A_1 di una forza esterna \vec{F}_1 determina per il principio di Pascal un aumento di pressione Δp in ogni punto del fluido:

$$\Delta p = \frac{F_1}{A_1}$$

fig. 1.10



Sulla sezione A_2 agisce quindi una forza \vec{F}_2 :

$$F_2 = \Delta p A_2$$

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1}$$

Essendo $A_2 > A_1$ risulta $F_2 > F_1$.

Osservazioni

- Se il pistone di sezione più piccola scende di un tratto d_1 , il pistone di sezione più grande sale di un tratto d_2 minore di d_1 . Infatti il volume di liquido mosso da entrambi i pistoni è uguale:

$$V = A_1 d_1 = A_2 d_2$$

$$d_2 = d_1 \frac{A_1}{A_2}$$

Essendo $A_2 > A_1$ risulta $d_2 < d_1$.

- In accordo con il principio di conservazione dell'energia meccanica, il lavoro L_2 compiuto dalla forza \vec{F}_2 è uguale al lavoro L_1 compiuto dalla forza \vec{F}_1 :

$$L_2 = \vec{F}_2 \cdot \vec{d}_2 = F_2 d_2$$

$$L_1 = \vec{F}_1 \cdot \vec{d}_1 = F_1 d_1$$

$$L_2 = F_2 d_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} d_1 \frac{A_1}{A_2} = F_1 d_1 = L_1$$