

Prefazione alla prima edizione di *Gino Moncada Lo Giudice di Monforte*

La Fisica Tecnica sta subendo processi di cambiamento più rapidi della consapevolezza che gli stessi "professionisti" e "utenti" della materia possono avere sugli effetti globali delle innovazioni in atto. Sul piano culturale appare ormai scontato il principio del risparmio energetico, che comporta la necessità di impiego di tecniche costruttive diverse e di energie alternative pulite, e quello del rispetto della natura e del benessere della comunità, che impone standard e normative diversi, sia pure nella ottica di una dinamica industriale che appare irreversibile. Le logiche e i modelli di questa rivoluzione sono sotto gli occhi di tutti ed anche i mass media rovesciano informazioni - per la verità non sempre sufficientemente elaborate - sui problemi della energia nucleare, dall'energia solare, dell'effetto serra, dell'uso indiscriminato di clorofluorocarburi. Sul piano operativo, questo si traduce nella necessità di affrontare od affinare campi di studio sinora non trattati o trascurati. A ciò si aggiunga che la Fisica Tecnica, per definizione, è portata ad analizzare tematiche diverse che vanno dalla Termodinamica alla Trasmissione del calore, dall'Acustica Ambientale all'Illuminotecnica. Volendo comunque considerare il solo aspetto didattico, c'è da chiedersi quale sia, in questo quadro, il significato ed il ruolo di un libro di testo di Fisica Tecnica in una Facoltà di Ingegneria. Non va, infatti, dimenticato che la Fisica Tecnica si è sempre posta, quale obiettivo ambizioso, quello di rappresentare l'interfaccia tra la fisica di base e le materie applicative. Errato, quindi, sarebbe spingere la "specializzazione" di alcuni capitoli - da lasciare a corsi successivi, quali quelli ad esempio di Energetica, di Impianti tecnici edili, di Acustica ed Illuminotecnica, di Impianti Termotecnici, di Tecnica del Controllo Ambientale, di Tecnica del Freddo e così via - a scapito di un'impostazione didattica globale, che maturi nella coscienza dello studente la capacità di correlare, interpretare ed applicare i principi fisici di base, acquisiti nel biennio, ai campi propri delle applicazioni di Ingegneria.

In questo senso si è mosso il prof. Mauro Felli, nel testo che ho il piacere di presentare, e la sua scelta mi sembra tanto più importante e meritoria, ove si consideri l'attuale momento "politico" che vede in discussione il riordino delle Facoltà di Ingegneria. Riordino che ha visto e vede sovente - forse per mancata chiarezza di comunicazione tra i docenti - incompreso e mortificato il ruolo della Fisica Tecnica. In questo contesto il volume del prof. Felli, come lui stesso dichiara, assume il valore di puntigliosa e documentata difesa del significato e del valore dell'insegnamento della materia.

C'è da domandarsi qual'è il momento più felice per un docente di affrontare la stesura di un libro di testo. Al finire della carriera, quando, raccogliendo le proprie esperienze scientifiche e didattiche, si può tentare di offrire agli studenti, attraverso un'esperienza vissuta, una visione mediata, globale, interpretativa della materia insegnata. Oppure, quando ancor giovane, il docente ritiene di aver raggiunto l'autorevolezza del mandato che gli viene riconosciuto e affidato dall'insegnamento. La stesura diventa provocatoria, faticosa - perché sottrae tempo ed impegno per la ricerca - ed anche apparentemente ambiziosa. In realtà, nasconde l'umiltà di chi accetta una forse facile critica, nella speranza di un confronto costruttivo che serva alla stesura di un testo definitivo. E' questa la strada seguita dal prof. Felli, che, di formazione romana, ha voluto cimentarsi in questa prova nella sua nuova sede perugina. Il testo si articola sulla base degli argomenti tradizionalmente svolti nei corsi di Fisica Tecnica della Facoltà di Ingegneria di Roma, con alcuni approfondimenti che normalmente dovrebbero essere domandati a corsi applicativi, corsi spesso non accesi e comunque non sempre facenti parte di un percorso di studi seguito.

Per quanto riguarda la prima parte, quella relativa alla Termodinamica, che viene data alle stampe come primo volume della collana, si possono sottoporre all'attenzione del lettore gli approfondimenti che l'Autore ha riservato ai capitoli riguardanti le equazioni di stato, le macchine ad assorbimento, le basi della psicrometria, il moto dei fluidi. Utile ed aggiornata la bibliografia riportata a corredo di ogni capitolo. Didatticamente corretta appare, poi, la costante preoccupazione di far seguire, alle trattazioni teoriche, esempi applicativi con tabelle e diagrammi presi a prestito dalla pratica professionale.

Termino con i voti augurali di rito per il successo del testo e per le nuove prove che attendono l'Autore. L'augurio è che in un futuro più o meno prossimo, il testo possa essere classificato non soltanto nell'ambito didattico, ma in quello più vasto dello "stato dell'arte" della Fisica Tecnica.

Gino Moncada Lo Giudice di Monforte

Roma, dicembre 1989

Nota dell'Autore alla prima edizione

Nel rinnovato ordinamento delle Facoltà di Ingegneria, alcune variazioni introdotte destano perplessità; fra queste, il ridimensionamento, per non dire la mortificazione, del ruolo destinato alla Fisica Tecnica. A mio parere, invece, lo studio di tale Disciplina è indispensabile per tutti gli allievi delle scuole di Ingegneria, se si vuole conservare intero il significato culturale di questa laurea. Perché indispensabile? Indispensabile per i contenuti degli argomenti affrontati, molti dei quali non sono più ripresi, successivamente, nei differenti corsi di laurea; ma, soprattutto, indispensabile per il metodo, attraverso il quale gli allievi vengono guidati nel passaggio, non facile, che porta dal mondo rigoroso e positivo delle Scienze verso la realtà assai più incerta delle applicazioni professionali.

Questi appunti sono tratti dalle lezioni da me tenute per dieci anni nell'Università di Roma e da due nell'Università di Perugia; nello scrivere ho avuto per principale obiettivo la chiarezza: se qualche cosa non è chiara, non me ne vogliono i lettori, si vede che non era tanto chiara nemmeno a chi scriveva.

Al prof. Gino Moncada Lo Giudice vanno i miei più sinceri ringraziamenti per l'affettuosa cura con la quale ha seguito questo mio lavoro.

Mauro Felli

Perugia, 24 agosto 1989

Nota dell'Autore alla seconda edizione

Il testo è stato rielaborato per renderlo più aderente al programma effettivamente svolto nelle lezioni di Fisica Tecnica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia, dove insegno ormai da undici anni: soprattutto la parte relativa alle applicazioni ha subito alcune modifiche e integrazioni.

In particolare, i Capitoli 1,2,3,4,6 sono revisionati con il rifacimento di alcune parti e disegni; il cap. 5 è decisamente semplificato. I cap. 7,8,9,10 invece, contenenti le applicazioni alle macchine ed impianti, sono parzialmente rielaborati anche nei contenuti, per adeguarli all'evoluzione tecnica degli ultimi dieci anni ed anche per renderli più aderenti al programma del corso di Fisica Tecnica. La trattazione dell'Energia Solare è completamente ristrutturata, integrata e trasferita al secondo volume, anch'esso in corso di stampa.

Il volume è arricchito con una serie di indici ed elenchi aventi lo scopo di facilitare la consultazione. E' inoltre introdotta una parte intitolata "*Riservato agli Studenti: notizie utili*", nella quale sono riportate numerose informazioni sul corso e sull'esame, ma anche sugli altri esami del Raggruppamento e su argomenti diversi, che forse lo Studente potrà apprezzare.

Ringrazio affettuosamente tutti coloro i quali mi hanno aiutato, con competenza e dedizione, alla rielaborazione, correzione e stesura definitiva del testo, e cioè: *Francesco Asdrubali, Roberto Baruffa, Cinzia Buratti, Leandro Lunghi, Stefania Primieri.*

Mauro Felli

Perugia, 16 dicembre 1998

LEZIONI DI FISICA TECNICA

Volume primo: Termodinamica, Macchine, Impianti

INDICE SINTETICO

Termodinamica, Macchine, Impianti

Capitolo Primo: <i>Fondamenti di Termodinamica</i>	pag. 1
Capitolo Secondo: <i>Proprietà della Materia</i>	pag. 49
Capitolo Terzo: <i>Sistemi Termodinamici Aperti</i>	pag. 99
Capitolo Quarto: <i>Moto dei Fluidi</i>	pag. 135
Capitolo Quinto: <i>Complementi di Termodinamica</i>	pag. 189
Capitolo Sesto: <i>La Combustione</i>	pag. 231
Capitolo Settimo: <i>Motori a Combustione Interna</i>	pag. 265
Capitolo Ottavo: <i>Macchine a Vapore</i>	pag. 317
Capitolo Nono: <i>Macchine Frigorifere</i>	pag. 371
Capitolo Decimo: <i>Condizionamento dell'Aria</i>	pag. 451
Indice dei contenuti	pag. 523
Elenco delle figure	pag. 531
Elenco delle tabelle	pag. 543
Indice analitico dei soggetti	pag. 545
Registro degli Scienziati e Tecnici menzionati nel testo	pag. 559
Elenco generale dei simboli	pag. 561
Bibliografia generale, ordine alfabetico	pag. 569
Bibliografia generale, ordine cronologico	pag. 577
Figure a colori	pag. 585

Capitolo 1

FONDAMENTI DI TERMODINAMICA

1.1 I Principi della Termodinamica.

La Termodinamica è una parte della Fisica che si occupa dello studio delle proprietà dei corpi e dei fenomeni che implicano uno scambio di calore, di lavoro o di altre forme di energia; esamina le possibilità di trasformazione dell'energia da una specie ad un'altra (termica, meccanica, chimica, elettrica) ed è basata su quattro Principi fondamentali:

- *Principio Zero*, che riguarda il concetto di equilibrio termico.
- *Primo Principio*, che riguarda il carattere conservativo dell'energia.
- *Secondo Principio*, che riguarda la differenza qualitativa fra le varie forme di energia e lo studio dei fenomeni reali.
- *Terzo Principio*, che riguarda le proprietà della materia nelle vicinanze dello zero assoluto.

In questo corso di Fisica Tecnica sono esaminate principalmente questioni riguardanti l'energia meccanica e l'energia termica; è illustrato il Principio Zero e sono discussi il Primo e il Secondo Principio, con particolare attenzione ad aspetti applicativi concernenti lo studio di macchine termiche e frigorifere e di impianti di condizionamento dell'aria.

Lo studio della Termodinamica può essere affrontato facendo ricorso a due differenti metodologie; la prima, che prende il nome di Termodinamica Statistica, esamina i corpi dal punto di vista microscopico, formula ipotesi sulla struttura intima della materia e cerca di risalire allo studio delle proprietà macroscopiche dei corpi per mezzo di strumenti matematici basati soprattutto sul calcolo delle probabilità; la seconda, che prende il nome di Termodinamica Classica, osserva i fenomeni naturali da un punto di vista macroscopico, basato su alcune leggi generali che derivano da osservazioni sperimentali. Questa seconda metodologia è

particolarmente adatta alla analisi delle applicazioni ingegneristiche ed è pertanto seguita nel presente testo.

1.2 Sistemi e Grandezze Termodinamiche.

Nella Termodinamica Classica l'intero Universo è convenzionalmente suddiviso in due parti, *sistema* e *mezzo*: la parte di Universo oggetto dello studio è chiamata *sistema*; tutto il resto prende il nome di *mezzo* o *ambiente*. La Termodinamica si occupa delle interazioni tra sistema e mezzo e dell'evoluzione subita dal sistema a seguito di queste interazioni. Il sistema ha dimensioni finite; la sua forma, dimensioni e volume possono mutare nel tempo, pur mantenendo il sistema la propria identità.

Ai fenomeni d'interazione fra sistema e mezzo prendono parte, in linea di principio, tutti gli elementi, sia del sistema che del mezzo; è evidente, tuttavia, che gli elementi più vicini al confine partecipano in modo più attivo. Si definisce *superficie limite* la superficie di separazione fra sistema e mezzo; attraverso la superficie limite si può avere scambio di calore Q , di lavoro L e di massa M .

Se un sistema scambia massa con l'esterno si dice *aperto*; se non scambia massa si dice *chiuso*. Se non avviene scambio di calore, il sistema è *adiabatico*, mentre se non ci sono scambi di lavoro può chiamarsi *adinamico*. Se un sistema non scambia né calore, né lavoro, né massa, si dice *isolato*. Si tenga conto che l'essere un sistema chiuso o aperto non influenza la configurazione geometrica della superficie limite, che può essere fissa o mobile, sia nei sistemi chiusi che nei sistemi aperti. Ad esempio, nel sistema costituito dal cilindro di una macchina alternativa, quando il pistone si muove e le valvole sono chiuse, la superficie limite muta la propria configurazione, ma il sistema resta chiuso.

Si definisce *stato termodinamico* del sistema l'insieme delle proprietà che caratterizzano il sistema stesso. Per descrivere lo stato termodinamico è necessaria la conoscenza di grandezze dette appunto *di stato*. Queste possono essere *intensive* od *estensive*: una grandezza si dice *inten-*

siva se il suo valore è indipendente dalla massa considerata. La pressione P , la temperatura T ed il volume specifico v sono grandezze intensive. Una grandezza di stato si dice *estensiva* se il suo valore per l'intero sistema è uguale alla somma dei valori che competono alle singole parti componenti del sistema. Sono grandezze estensive la massa M ed il volume V . Se di una grandezza estensiva si considera il suo valore specifico, cioè riferito alla unità di massa, questa diventa di solito una grandezza intensiva: ad esempio il volume V è una grandezza estensiva, il volume specifico $v = V/M$ è una grandezza intensiva; ciò tuttavia non è sempre vero: a tale proposito è opportuno tenere presenti le precisazioni effettuate nel paragrafo 2.3.

Si supponga che sia pari ad n il numero di grandezze di stato caratteristiche di un sistema e siano denominate $x_1, x_2 \dots x_n$; non essendo tali grandezze in generale indipendenti, sia possibile individuare un numero m di relazioni fra di esse:

$$\begin{aligned}
 F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 \dots\dots\dots & \\
 \dots\dots\dots & \\
 F_m(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Queste relazioni prendono il nome di *equazioni di stato* del sistema; in base alle (1.1), il numero di grandezze indipendenti che si possono assegnare in modo arbitrario per individuare lo stato termodinamico del sistema è pari a:

$$g = (n - m) \tag{1.2}$$

Se, per individuare lo stato termodinamico di un sistema, è necessaria e sufficiente l'assegnazione di *due* grandezze di stato, si dice che il sistema è un *fluido*. Nel caso di un fluido, pertanto, se si considerano tre grandezze di stato, ad esempio pressione, temperatura e volume specifico, essendo solo due quelle assegnabili indipendentemente, esiste sicuramente fra di loro una relazione del tipo:

$$F(P, v, T) = 0 \quad (1.3)$$

La relazione (1.3) prende il nome di *equazione di stato del fluido*.

1.3 Equilibrio, trasformazioni.

Se in un sistema tutte le grandezze di stato hanno valore costante nel tempo, si dice che il sistema è in *equilibrio termodinamico*; esistono peraltro diversi tipi di equilibrio, come appresso specificato.

Equilibrio stabile. Si supponga che al sistema sia applicata una perturbazione, anche di notevole entità, che lo sposti dalle condizioni di equilibrio. Se, alla scomparsa della perturbazione, il sistema ritorna nello stato di equilibrio originario, l'equilibrio si dice stabile.

Equilibrio instabile. Si supponga che al sistema sia applicata una perturbazione, anche di modesta entità, che lo sposti dalle condizioni di equilibrio. Se, alla scomparsa della perturbazione, il sistema non ritorna più nello stato di equilibrio originario, l'equilibrio si dice instabile.

Equilibrio metastabile. Si supponga che al sistema siano applicate, in tempi diversi, due perturbazioni, la prima di modesta entità e la seconda di notevole entità. Se, alla scomparsa della perturbazione di modesta entità, il sistema ritorna nello stato di equilibrio originario ed, invece, alla scomparsa della perturbazione di notevole entità, non ritorna più nello stato di equilibrio originario, l'equilibrio si dice metastabile.

Equilibrio indifferente. Si supponga che al sistema sia applicata una perturbazione di qualsiasi entità che lo sposti dalle condizioni di equilibrio. Se, alla scomparsa della perturbazione, il sistema si trova automaticamente in un nuovo stato di equilibrio, di volta in volta diverso, a seconda della durata e dell'entità della perturbazione, l'equilibrio si dice indifferente.

Nel seguito, a meno di indicazioni contrarie, alla dizione *equilibrio termodinamico* si attribuirà senz'altro il significato di *equilibrio termodinamico stabile*; ad esso corrisponde il manifestarsi contemporaneo di diversi tipi di equilibrio: *termico*, il quale implica eguaglianza di *tempe-*

ratura fra sistema e mezzo; *meccanico*, il quale implica eguaglianza di *pressione*; *di fase e chimico*, il quale implica eguaglianza di *potenziale chimico*; *elettrico*, il quale implica eguaglianza di *potenziale elettrico*. Il contemporaneo verificarsi di tutti questi equilibri corrisponde alla condizione di equilibrio termodinamico del sistema.

Se il sistema non è in equilibrio termodinamico, le grandezze di stato che lo caratterizzano variano nel tempo e si dice che il sistema percorre una *trasformazione*. La natura della trasformazione è individuata da un particolare legame fra le grandezze di stato, che prende il nome di *equazione della trasformazione*; si ricordano alcune trasformazioni fondamentali e le relative equazioni:

- a pressione costante, *isobare*: $dP = 0$;
- a volume specifico costante, *isometriche*: $dv = 0$;
- a temperatura costante, *isoterme*: $dT = 0$;
- senza scambio di calore con l'esterno, *adiabatiche*: $dQ = 0$;
- senza scambio di lavoro con l'esterno, *adinamiche*: $dL = 0$.

In generale l'equazione della trasformazione è un legame del tipo:

$$G(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \tag{1.4}$$

Pertanto, se è assegnata la natura della trasformazione, la (1.4) va ad aggiungersi alle equazioni di stato (1.1) ed il numero di grandezze di stato assegnabili indipendentemente nel corso della trasformazione diventa, in base alla (1.2), $g = (n - m - 1)$; nel caso particolare di un fluido si ha $g = 1$.

Se, attraverso una successione di trasformazioni, un sistema termodinamico perviene di nuovo nello stato iniziale, si dice che il sistema ha percorso un *ciclo chiuso di trasformazioni*, o semplicemente un *ciclo*. I cicli chiusi sono estremamente importanti, come si vedrà, in gran parte dei processi associati a trasformazioni energetiche. Si sottolinea infine il fatto che la Termodinamica teorica, nella maggioranza dei casi, prescinde dal tempo: si preoccupa cioè di analizzare la natura delle trasformazioni sotto diversi aspetti, ma non di stabilire con quale velocità queste trasformazioni vengano percorse. Nella Termodinamica applicata all'ingegneria, invece, la menzionata velocità assume un rilievo significativo.

1.4 Sistemi omogenei ed eterogenei. Regola delle fasi.

I sistemi termodinamici possono essere omogenei oppure eterogenei. In un sistema omogeneo, se in equilibrio termodinamico, tutte le grandezze di stato hanno il medesimo valore in ogni punto. In un sistema eterogeneo, al contrario, anche se in condizioni di equilibrio termodinamico, le funzioni di stato intensive esprimono una proprietà locale.

Un sistema omogeneo è caratterizzato dalla presenza di una sola fase, intendendo con *fase* qualsiasi porzione di materia dotata di proprietà chimico - fisiche costanti. A sua volta, una fase può essere semplice o complessa, a seconda che sia costituita da una sola o da più specie chimiche. L'aria atmosferica ed i gas di combustione sono esempi tipici di fasi complesse.

Un sistema eterogeneo è costituito da più fasi; lo stato termodinamico di un sistema eterogeneo è caratterizzato dall'insieme degli stati termodinamici delle singole fasi. E' opportuno ricordare, a tale proposito, una legge generale della Chimica - Fisica, denominata *regola delle fasi*, dovuta a Gibbs, che si enuncia:

- il numero di variabili intensive assegnabili indipendentemente ad un sistema termodinamico in equilibrio è dato dal numero dei componenti che lo costituiscono, meno il numero delle fasi presenti, più due:

$$i = n - f + 2 \quad (1.5)$$

Il numero i viene anche denominato *varianza* del sistema.

1.5 Piano di Clapeyron: isoterme di un gas perfetto.

Una rappresentazione grafica efficace degli stati termodinamici di un sistema è costituita dal *Piano di Clapeyron*, avente la pressione in ordinate e il volume specifico in ascisse. Il piano di Clapeyron può pensarsi come uno dei piani coordinati dello spazio a tre dimensioni P-v-T, nel quale un fluido è rappresentato dalla superficie di equazione $F(P, v, T)=0$.

Se si assegnano valori prefissati $T_1, T_2 \dots T_i \dots T_n$ alla temperatura, a questi valori corrispondono, sulla superficie del fluido, le linee rappresentative delle isoterme, proiettabili sul piano coordinato P-v. L'insieme di queste operazioni equivale a disegnare sul piano P-v un certo numero di linee aventi equazione:

$$F(P, v, T_i) = 0 \quad (1.6)$$

Nel caso di un gas perfetto è possibile attribuire a queste funzioni una forma analitica molto semplice: essendo infatti l'equazione di stato dei gas perfetti, come noto, la seguente:

$$Pv = RT \quad (1.7)$$

ciascuna isoterma avrà equazione:

$$Pv = RT_i \quad (1.8)$$

Dalla (1.8) risulta che, nel piano di Clapeyron, le isoterme di un gas perfetto sono rappresentate da un fascio di iperboli equilateri (vedi fig. 1.1). Nel caso di un fluido reale la rappresentazione delle isoterme è notevolmente più complessa, come sarà discusso successivamente.

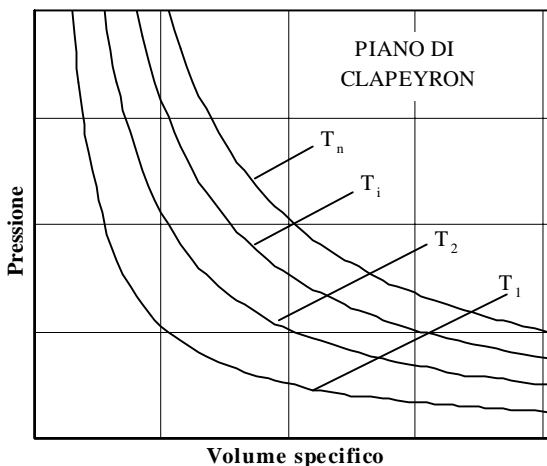


Fig. 1.1: isoterme di un gas perfetto sul piano di Clapeyron.

$$(T_1 < T_2 < T_i < T_n)$$

1.6 Piano di Clapeyron: lavoro di un sistema chiuso.

Si consideri un pistone che si muove in un cilindro chiuso contenente un fluido; durante gli intervalli di tempo nei quali le valvole sono chiuse, il fluido contenuto nel cilindro costituisce un sistema termodinamico chiuso. Infatti la superficie limite, pur variando istante per istante la propria configurazione, non viene attraversata da materia.

Il pistone è collegato ad una biella, capace di trasmettere una forza F all'albero. Sia S l'area della superficie del pistone e P la pressione all'interno del cilindro, supposta uniforme; si consideri un asse x orientato secondo la direzione di scorrimento del pistone, come indicato in fig. 1.2. Il lavoro che la forza F compie, per uno spostamento infinitesimo dx del pistone, è dato da:

$$dL = F_x dx \quad (1.9)$$

essendo F_x la componente della forza F lungo la direzione dello spostamento del pistone. Inoltre, avendo supposto uniforme la pressione P , si ha, in base al Terzo Principio della Meccanica:

$$F_x = PS \quad (1.10)$$

e quindi:

$$dL = PSdx = PdV \quad (1.11)$$

dove dV è la variazione infinitesima di volume. Se poi ci si riferisce all'unità di massa, si ottiene:

$$dL = Pdv \quad (1.12)$$

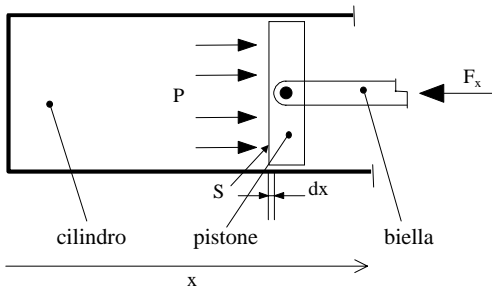


Fig. 1.2: lavoro scambiato da un sistema chiuso.

F_x = componente della forza esterna lungo x ; P = pressione all'interno del cilindro; S = area della superficie del pistone.

essendo v il volume specifico. La (1.12) vale per un sistema termodinamico chiuso; in seguito si verificherà che, per un sistema aperto, l'espressione di dL è diversa. Per una trasformazione finita AB il lavoro scambiato dall'unità di massa del fluido vale pertanto:

$$L_{AB} = \int_A^B P dv \quad (1.13)$$

Nel piano di Clapeyron il lavoro scambiato con l'esterno da un sistema chiuso è dunque misurato dall'area sottesa dalla linea che rappresenta la trasformazione, come indicato in fig. 1.3; al variare del percorso seguito per andare dallo stato A allo stato B, varia anche l'entità del lavoro assorbito o ceduto dal sistema: *il lavoro non è una grandezza di stato*. Nel caso particolare di un ciclo chiuso, il lavoro scambiato dal sistema con l'esterno è misurato dall'area racchiusa all'interno del ciclo. *Se la trasformazione avviene con aumento di volume specifico, il lavoro è positivo (lavoro ceduto dal sistema all'esterno)*. Se avviene con diminuzione di volume specifico, il lavoro è negativo. Il segno è convenzionale e deriva dall'aver considerato un asse delle x orientato positivamente nel verso dei volumi crescenti del cilindro.

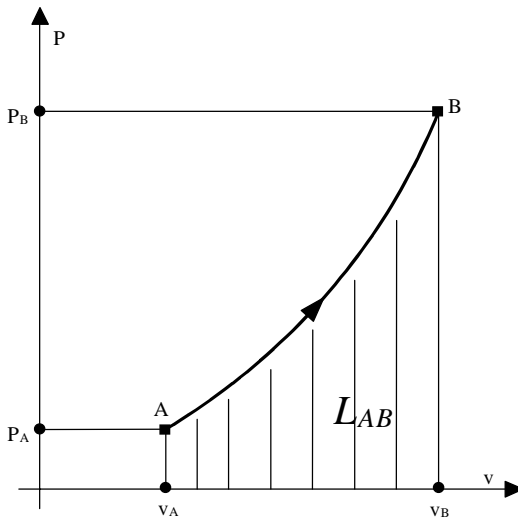


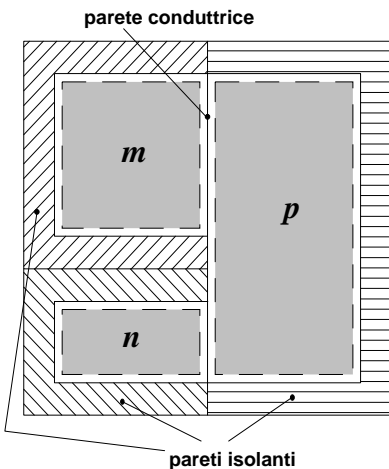
Fig. 1.3: lavoro scambiato da un sistema chiuso: rappresentazione grafica sul piano di Clapeyron.

1.7 L'equilibrio termico. Principio Zero della Termodinamica.

Si considerino due sistemi termodinamici m ed n , delimitati da pareti adiabatiche ed inizialmente in due stati qualsivoglia M_1 ed N_1 (vedi fig. 1.4). I due sistemi sono messi in contatto termico con un terzo sistema p , per mezzo di una parete capace di trasmettere il calore, mentre le rimanenti pareti conservano il carattere di adiabaticità. Si osserva sperimentalmente che i due sistemi m ed n evolvono dagli stati iniziali M_1 ed N_1 verso due stati finali M_2 ed N_2 . Durante l'evoluzione si trasmette calore attraverso la parete di separazione; raggiunte le condizioni M_2 ed N_2 , la trasmissione si arresta: si dice che i due sistemi sono in *equilibrio termico*. Ciò premesso, si può enunciare il Principio Zero della Termodinamica, derivante dalle osservazioni sperimentali descritte:

se due sistemi termodinamici m ed n sono in equilibrio termico con un terzo sistema p , essi sono anche in equilibrio termico fra di loro.

Per estensione, può affermarsi che tutti i sistemi pensabili ed in equilibrio termico con il sistema p , sono in equilibrio termico fra di loro. Questo non significa che gli stati termodinamici dei sistemi menzionati siano identici, ma soltanto che fra tutti questi sistemi, comunque accoppiati, non avviene trasferimento di calore; quando ciò succede, *si dice che i sistemi presentano uno stesso valore della temperatura.*



Il Principio Zero consente dunque l'introduzione del concetto di temperatura; ogni tecnica di misura della temperatura è basata sull'applicazione di questo Principio.

Fig. 1.4: *dispositivo sperimentale per l'illustrazione del Principio Zero della Termodinamica.*