

## Capitolo 15

Le motrici termiche sono basate su un principio analogo a quelle idrauliche, infatti sono atte a convertire in lavoro meccanico la **quantità di calore** posseduta da un fluido (se è possibile di assoggettare tale quantità di calore a un dislivello termico); in **assenza del necessario dislivello termico** non è possibile produrre lavoro. Il **livello termico** del calore posseduto da una sostanza è costituito dalla temperatura alla quale essa si trova e se è possibile elaborare tale sostanza entro una macchina, in modo che allo scarico la sua temperatura risulti inferiore a quella iniziale, allora parte del calore posseduto si trasformerà in lavoro utile.

Non tutte le forme di energia naturale godono della stessa facilità di trasformazione; alcune si possono trasformare facilmente e quasi integralmente (**energie superiori**) in altre forme di energia, mentre per queste ultime il processo inverso è impossibile o avviene solo in minima parte (**energie inferiori**). Il calore appartiene a quest'ultima categoria. Si usa dire che ogni processo di trasformazione si realizza a spese di una certa quantità di energia iniziale che viene **degradata** a un livello inferiore, il che ne pregiudica l'ulteriore utilizzazione. Nel caso del calore, la quantità di energia degradata è notevole e costituisce una sensibile perdita, caratteristica essenziale di tutte le macchine termiche.

Vi sono due temperature invariabili e determinate:

- la **temperatura dell'acqua distillata in fase di solidificazione** (*ghiaccio fondente*) valutata alla pressione atmosferica media, che viene assunta come limite inferiore;
- la **temperatura dell'acqua distillata in fase di ebollizione**, alla pressione atmosferica media, che viene assunta come limite superiore.

A tali temperature si assegnano valori convenzionali e il relativo intervallo è suddiviso in tratti uguali, la cui ampiezza varia con la scala proposta (figura A).

Nei calcoli relativi alle macchine termiche si impiega la **scala assoluta** o **scala Kelvin** o **scala termodinamica**. (simbolo  $T$  e unità di misura  $K$ ).

La quantità di calore  $Q$  (o  $q$  se riferita all'unità di

massa) viene misurata attraverso i **calorimetri** (unità di misura nel Sistema Internazionale: Joule). Non tutti i corpi si riscaldano in ugual misura quando viene loro somministrata una stessa quantità di calore  $Q$ , poiché ogni sostanza ha una diversa **capacità termica**. A parità di massa, la capacità termica dipende dalla natura del corpo; la grandezza che ne condiziona l'assorbimento del calore a esso somministrato è detta **calore specifico** o **massico**  $c$  di un corpo (**quantità di calore** che occorre somministrare alla sua **unità di massa** per **elevare la temperatura di  $1^\circ\text{C}$**  e si misura in  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ). Se vogliamo innalzare di  $1^\circ\text{C}$  la temperatura di  $1\text{ kg}$  di un determinato corpo, la quantità di calore necessario è:  $q = c$ , ma se la temperatura deve essere elevata dal valore iniziale  $T_1$  al valore finale  $T_2$ , occorre una quantità di calore  $q' = c \cdot (T_2 - T_1)$  e se il corpo ha una massa di  $m\text{ kg}$  occorrerà una quantità di calore:

$$Q' = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (15.3)$$

$Q$  è sempre espresso in joule,  $q$  in  $\text{J}/\text{kg}$  e le temperature in Kelvin.

Nei riguardi del calore specifico occorre tener presente che, per una determinata sostanza, esso non ha un valore costante, ma cresce all'aumentare della temperatura con legge lineare:  $c = a + b \cdot t$ . Nei calcoli si fa quindi riferimento a un calore specifico medio nell'intervallo di temperatura considerato:

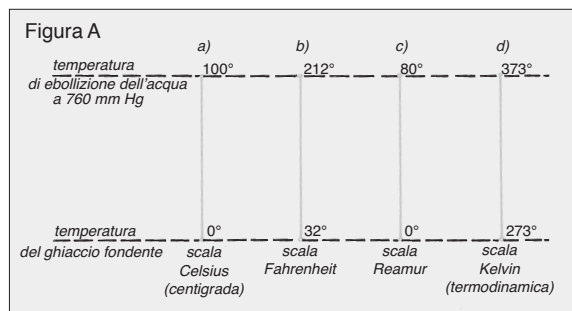
$$c_m = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)} \quad (15.4)$$

Nel caso di gas o di vapori (*aeriformi*) occorre definire due diversi calori specifici: **calore specifico a pressione costante**  $c_p$ : quantità di calore che si deve somministrare all'unità di massa di un gas, per elevare la sua temperatura di  $1^\circ\text{C}$ , mantenendo costante la pressione; analogamente per il **calore specifico a volume costante**  $c_v$  e risulta  $c_p > c_v$ .

Ogni sostanza può assumere (in teoria) uno qualsiasi dei tre stati fisici; al variare della temperatura e della pressione, la sostanza può subire un **cambiamento di stato fisico**. In particolare:

- il passaggio dallo stato solido a quello liquido viene definito **fusione**, mentre il processo inverso si chiama **solidificazione**;
- il passaggio dallo stato liquido a quello aeriforme si definisce **vaporizzazione** o **ebollizione** e il processo inverso viene denominato **liquefazione** o **condensazione**.

Alcune sostanze hanno valori di temperatura e di pressione (**temperature e pressioni critiche**) al di sopra dei quali è impossibile ottenere il cambiamento di stato fisico. Alcuni gas (elio, idrogeno, ecc.) hanno temperature critiche talmente basse da essere denominati **gas permanenti**.



Consideriamo una sostanza che alla temperatura e alla pressione ambiente si trovi allo stato liquido e procediamo a un graduale riscaldamento somministrando calore con continuità e mantenendo costante il valore della pressione:

- inizialmente la temperatura del liquido aumenta proporzionalmente al calore somministrato;
- raggiunta la **temperatura di vaporizzazione** o di **ebollizione** inizia il fenomeno dell'ebollizione che avviene in modo tumultuoso interessando tutta la massa liquida; si formano dappertutto delle bollicine di *vapore* che, in virtù del loro minor peso specifico, risalgono alla superficie, creando dei movimenti vorticosi, poi l'abbandonano trascinando con se particelle di liquido;
- **la fase di ebollizione dura un certo tempo, durante il quale** diminuisce gradualmente il volume del liquido, aumenta quello del vapore, compatibilmente con lo spazio disponibile, e **la temperatura si mantiene costante malgrado continui la somministrazione di calore dall'esterno**;
- terminata l'ebollizione, tutto il liquido è divenuto vapore e nell'istante finale, la temperatura è sempre uguale al valore riscontrato all'inizio della trasformazione;
- proseguendo nel riscaldamento, la temperatura riprende ad aumentare proporzionalmente al calore somministrato e il fluido viene comunemente definito **vapore surriscaldato**; il suo comportamento si avvicina a quello dei gas reali tanto più quanto maggiore è la differenza fra la sua temperatura e quella di ebollizione. Si usa perciò differenziare gli aeriformi in due grandi categorie:
  - **vapore** quando la sua temperatura è prossima a quella di ebollizione;
  - **gas** quando la sua temperatura differisce sostanzialmente da quella di ebollizione.

Effettuando la stessa esperienza sotto una pressione diversa ma costante, sia somministrando che sottraendo calore, possiamo dedurre che:

- la temperatura di ebollizione dipende esclusivamente dalla natura della sostanza e dalla pressione di esercizio;
- per una determinata sostanza, la temperatura di ebollizione dipende solo dalla pressione e cresce con essa;
- durante tutto lo svolgimento del processo di ebollizione, la temperatura si mantiene costante;
- a parità di pressione la temperatura di ebollizione e quella di condensazione coincidono;
- la quantità di calore che si deve somministrare per vaporizzare completamente una certa quantità di sostanza è uguale a quella che si deve sottrarre per ottenere la condensazione del vapore prodotto.

Secondo il **postulato di Clausius**, il calore passa spon-

**taneamente dai corpi a temperatura più alta a quelli a temperatura più bassa.** Quindi, il trasferimento di calore avverrà da un fluido a temperatura maggiore ad uno a temperatura inferiore.

Tale trasferimento può avvenire in tre modi:

- **per conduzione:** da una molecola a un'altra posta a contatto con la prima, senza che avvenga movimento reciproco;
- **per convezione:** cioè per *trasporto* da parte di molecole che, nel loro movimento, cedono il calore ad altre molecole;
- **per irraggiamento** attraverso onde elettromagnetiche.

Consideriamo due fluidi in movimento, separati da una parete piana di superficie  $A$  e spessore  $s$ , che scambiano calore e supponiamo che le loro temperature si mantengano costanti nel tempo (figura B). La trasmissione di calore dal fluido (1) al (2) avviene (principio di Clausius) se  $t_1 > t'_1 > t'_2 > t_2$ . I vari trasferimenti di calore sono:

- dal fluido più caldo (1) alla parete:

$$Q = A \cdot \theta \cdot h' \cdot (t_1 - t'_1) \quad (15.6)$$

dove  $\theta$  è il tempo e  $h'$  è il coefficiente di adduzione o di conduttività esterna che dipende dalla natura della parete, dallo stato della sua superficie, dalla natura del fluido e dal suo grado di agitazione;

- tra le pareti di spessore  $s$ :

$$Q = A \cdot \frac{\lambda}{s} \cdot (t'_1 - t'_2) \quad (15.7)$$

dove  $\lambda$  è il **coefficiente di conducibilità termica interna**;

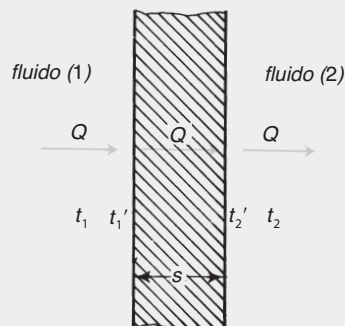
- dalla parete al fluido (2) più freddo:

$$Q = A \cdot \theta \cdot h'' \cdot (t'_2 - t_2) \quad (15.8)$$

$h'' \neq h'$  (fluidi di natura, stato di agitazione e caratteristiche di conducibilità termica diversi).

L'ipotesi della costanza delle temperature  $t_1$  e  $t_2$  comporta la necessità di un continuo rinnovo dei due fluidi; se ciò accade, la trasmissione di calore avviene in regime permanente e le quantità di calore espresse dalle (15.6), (15.7) e (15.8) sono uguali. Il flusso ter-

Figura B



mico complessivo è:

$$\frac{Q}{\theta} := \Phi = A \cdot K \cdot (t_1 - t_2) \quad (15.10)$$

dove  $K$  è il **coefficiente di trasmissione totale** e dipende dalla natura dei due fluidi, dal loro stato di agitazione, dallo spessore della parete, dal suo grado di pulizia e dalla natura del materiale che la costituisce.

Nello studio dei generatori di vapore le temperature non sono costanti in ogni punto delle masse fluide ma variano con continuità decrescendo, per il fluido

che cede calore, dall'entrata all'uscita e crescendo per il fluido che lo riceve. Perciò si fa riferimento alla differenza di temperatura media logaritmica:

$$\Delta t_{ml} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \left( \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \right)}$$

$$\frac{Q}{\theta} = \Phi = A \cdot K \cdot \Delta t_{ml} \quad (15.12)$$