

Simboli

SIMBOLI (SYMBOLS)

	Titolo (Title)	Unità
A	Ampiezza (<i>Amplitude</i>)	m
	Area (<i>Area</i>)	m ²
a	Accelerazione (<i>Acceleration</i>)	m/s ²
A/F	Rapporto aria/combustibile (<i>Air/fuel ratio</i>)	–
b_{mep} (p_{me})*	Pressione media effettiva (<i>Brake mean effective pressure</i>)	MPa
$bsfc$	Consumo specifico di combustibile (<i>Brake specific fuel consumption</i>)	g/MJ, g/kWh
c	Velocità assoluta (<i>Absolute velocity</i>)	m/s
	Velocità del suono (<i>Acoustic velocity</i>)	m/s
COP	Coefficiente di prestazione (<i>Coefficient of performance</i>)	–
c_p	Capacità termica massica a pressione costante (<i>Constant-pressure specific heat</i>)	kJ/(kg·K)
c_v	Capacità termica massica a volume costante (<i>Constant-volume specific heat</i>)	kJ/(kg·K)
D, d	Diametro (<i>Diameter</i>)	m
D	Alesaggio (<i>Bore</i>)	m
D_s	Diametro specifico (<i>Specific diameter</i>)	–
E	Modulo di Young (<i>Young's modulus</i>)	kN/mm ²
E, e	Energia, energia massica (<i>Energy, specific energy</i>)	kJ, kJ/kg
F	Forza (<i>Force</i>)	N
f	Fattore di attrito (<i>Friction factor</i>)	–
	Frequenza (<i>Frequency</i>)	Hz = 1/s
G	Modulo di elasticità tangenziale (<i>Shear modulus</i>)	kN/mm ²
g	Accelerazione di gravità (<i>Gravitational acceleration</i>)	m/s ²
H	Carico idraulico totale (<i>Total fluid head</i>)	m
H, h	Entalpia, entalpia massica (<i>Enthalpy, specific enthalpy</i>)	kJ, kJ/kg
h	Altezza (<i>Height</i>)	mm
	Coefficiente di convezione (<i>Convection heat transfer coefficient</i>)	W/(m ² ·K)
	Prevalenza (<i>Fluid head</i>)	m
HHV	Potere calorifico superiore (<i>Higher heating value</i>)	MJ/kg
I	Intensità di corrente (<i>Current intensity</i>)	A
	Momento di inerzia di un'area (<i>Moment of inertia of an area</i>)	mm ⁴
	Momento di inerzia di una massa (<i>Moment of inertia of a mass</i>)	kg·mm ²
J_O (I_p)*	Momento polare di inerzia rispetto a O (<i>Polar moment of inertia with respect to O</i>)	mm ⁴
k	Coefficiente di resistenza localizzata (<i>Minor head loss coefficient</i>)	–
	Conduttività termica (<i>Thermal conductivity</i>)	W/(m·K)

$k (\rho)^*$	Raggio di inerzia (<i>Radius of gyration</i>)	mm
k_f	Coefficiente di resistenza di attrito (<i>Loss coefficient due to friction</i>)	–
l	Lunghezza (<i>Length</i>)	m
LHV	Potere calorifico inferior (<i>Lower heating value</i>)	MJ/kg
M	Massa molare (<i>Molar mass</i>)	kg/kmol
	Momento (<i>Moment</i>)	N·m
	Numero di Mach (<i>Mach number</i>)	–
m	Massa (<i>Mass</i>)	kg
\dot{m}	Portata in massa (<i>Mass flow rate</i>)	kg/s
n	Esponente della politropica (<i>Polytropic exponent</i>)	–
	Numero di moli (<i>Amount of substance</i>)	mol
	Velocità di rotazione (<i>Rotational speed</i>)	giri/s
$NPSH$	Altezza netta positiva di aspirazione (<i>Net positive suction head</i>)	m
P	Potenza (<i>Power</i>)	kW
p	Pressione (<i>Pressure</i>)	kPa
Q, q	Calore, calore massico (<i>Heat transfer, heat transfer per unit mass</i>)	kJ, kJ/kg
\dot{Q}	Calore scambiato nell'unità di tempo (<i>Rate of heat transfer</i>)	kW
\dot{q}''	Flusso di calore areico (<i>Rate of heat transfer per unit area</i>)	kW/m ²
R	Costante caratteristica di un dato gas (<i>Specific gas constant</i>)	kJ/(kg·K)
	Grado di reazione (<i>Degree of reaction</i>)	–
	Resistenza elettrica (<i>Electrical resistance</i>)	Ω
	Resistenza termica (<i>Thermal resistance</i>)	K/W
\bar{R}	Costante universale dei gas (<i>Universal gas constant</i>)	kJ/(kmol·K)
r	Raggio (<i>Radius</i>)	mm
Re	Numero di Reynolds (<i>Reynolds number</i>)	–
S	Momento statico (<i>First moment of area</i>)	mm ³
S, s	Entropia, entropia massica (<i>Entropy, specific entropy</i>)	kJ/K, kJ/(kg·K)
$s (C)^*$	Corsa del pistone (<i>Piston stroke</i>)	mm
T	Periodo (<i>Period</i>)	s
	Temperatura (<i>Temperature</i>)	K, °C
t	Tempo (<i>Time</i>)	s
U	Coefficiente globale di scambio (<i>Overall heat transfer coefficient</i>)	W/(m ² ·K)
U, u	Energia interna, energia interna massica (<i>Internal energy, specific internal energy</i>)	kJ, kJ/kg
u	Velocità tangenziale o periferica (<i>Peripheral or tangential velocity</i>)	m/s
V, v	Volume, volume massico (<i>Volume, specific volume</i>)	m ³ , m ³ /kg
V	Cilindrata di una macchina volumetrica (<i>Cylinder volume</i>)	m ³
V	Tensione (<i>Voltage</i>)	V
\dot{V}	Portata in volume (<i>Volumetric flow rate</i>)	m ³ /s
v^{**}	Velocità (<i>Velocity</i>)	m/s
W	Carico (<i>Weight</i>)	N
	Umidità specifica (<i>Humidity ratio</i>) [gram water vapor per kilogram dry air]	g _w /kg _{da}
W, w	Lavoro, lavoro massico (<i>Work, work per unit mass</i>)	kJ, kJ/kg

w	Velocità relativa (<i>Relative velocity</i>)	m/s
\dot{W}, \dot{w}	Potenza meccanica, lavoro massico nell'unità di tempo (<i>Rate of energy transfer as work, rate of energy transfer as work per unit mass</i>)	kW, kW/kg
x	Frazione molare (<i>Amount of substance mole fraction</i>)	kmol/kmol
	Titolo della miscela liquido-vapore (<i>Quality</i>)	–
$Z (W)^*$	Modulo di resistenza (<i>Section modulus</i>)	mm ³

* Letteratura italiana

** Nell'Unità 31 è stato usato il simbolo v per indicare la velocità

LETTERE GRECHE (*GREEK LETTERS*)

	Titolo (Title)	Unità
α (alfa)	Accelerazione angolare (<i>Angular acceleration</i>)	rad/s ²
α (alfa), β (beta), γ (gamma), θ (theta)	Angoli (<i>Angles</i>)	rad, °
β (beta)	Rapporto manometrico di compressione (<i>Pressure ratio</i>)	–
γ (gamma)	Rapporto delle capacità termiche (<i>Ratio of specific heats</i>)	–
	Deformazione tangenziale (<i>Shear strain</i>)	–
ε (epsilon)	Deformazione (<i>Strain</i>)	–
	Rapporto volumetrico di compressione (<i>Compression ratio</i>)	–
	Rugosità (<i>Roughness</i>)	μm
η (eta)	Rendimento (<i>Efficiency</i>)	–
ϕ (fi)	Umidità relativa (<i>Relative humidity</i>)	–
λ (lambda)	Rapporto relativo aria/combustibile (<i>Relative air/fuel ratio</i>)	–
μ (mi)	Viscosità dinamica (<i>Dynamic viscosity</i>)	(N·s)/m ²
ν (ni)	Rapporto di Poisson (<i>Poisson ratio</i>)	–
	Viscosità cinematica (<i>Kinematic viscosity</i>)	m ² /s
Π (Pi)	Parametri adimensionali nelle turbomacchine (<i>Dimensionless parameters for turbomachinery</i>)	–
ρ (ro)	Massa volumica (<i>Mass density</i>)	kg/m ³
σ (sigma)	Sforzo normale (<i>Stress</i>)	N/mm ²
τ (tau)	Sforzo di taglio (<i>Shear stress</i>)	N/mm ²
ω (omega)	Velocità angolare (<i>Angular velocity</i>)	rad/s
ω_s	Velocità specifica (<i>Specific speed</i>)	–

Introduzione alla meccanica

I. Che cosa tratta la meccanica

La **meccanica** è la scienza che descrive le condizioni di quiete oppure di moto di corpi soggetti all'azione di forze. Essa viene suddivisa in tre parti:

- *meccanica dei corpi rigidi*,
- *meccanica dei corpi deformabili*,
- *meccanica dei fluidi*.

La *meccanica dei corpi rigidi*, che affronta con i metodi propri della matematica i principi fisici generali che caratterizzano la quiete oppure il moto del corpo rigido, viene chiamata *meccanica razionale* ed è suddivisa in due branche principali: la *statica*, che studia l'equilibrio dei corpi, e la *dinamica*, che studia i movimenti dei corpi e le forze che accompagnano oppure causano questi movimenti. Per renderne più agevole lo studio, la trattazione della dinamica viene preceduta da un'altra branca della meccanica razionale, chiamata *cinematica*, basata solo su considerazioni di spazio e di tempo. Una volta definiti i principi fisici generali, lo studio della meccanica del corpo rigido può venire applicato in modo specifico alle macchine e allora prende il nome di *meccanica delle macchine*.

Nella trattazione della meccanica dei corpi rigidi si fa l'ipotesi che i corpi siano perfettamente rigidi. Tuttavia, le strutture e le macchine non sono mai assolutamente rigide: esse quindi si deformano sotto l'azione dei carichi. Ma queste deformazioni sono di solito piccole e non influenzano in modo apprezzabile le condizioni di equilibrio oppure di moto della struttura considerata. Le deformazioni diventano invece importanti quando viene considerata la resistenza a rottura della struttura e vengono allora studiate nell'ambito della *resistenza dei materiali*, scienza che fa parte della *meccanica dei corpi deformabili*.

La *meccanica dei fluidi* prende in considerazione lo studio dei *fluidi incomprimibili*, come l'acqua, oppure dei *fluidi comprimibili*, come un gas o un vapore. Lo studio della meccanica dei fluidi richiede, a sua volta, la conoscenza di tre discipline legate, in modo particolare, all'*energia termica*:

- la *termodinamica*: scienza che abbraccia lo studio delle trasformazioni dell'energia e la relazione tra le varie proprietà di una sostanza, conseguenza oppure causa di queste stesse trasformazioni;
- la *fluidodinamica*: scienza che tratta il trasporto di energia e la resistenza al movimento, associata con lo scorrimento dei fluidi;
- la *trasmissione del calore*: scienza che descrive la trasmissione di una specifica forma di energia, risultante dall'esistenza di una differenza di temperatura.

Nell'applicazione della meccanica dei fluidi alle macchine si fa distinzione tra le macchine che trattano fluidi incomprimibili, chiamate *macchine idrauliche*, e quelle che trattano fluidi comprimibili, chiamate *macchine termiche*, in quanto la compressione e l'espansione di un gas sono accompagnate da variazione di temperatura.

II. Fondamenti della meccanica elementare

Benché lo studio della meccanica risalga fino ad Aristotele (384-322 a.C.) e ad Archimede (287-212 a.C.), è solo dopo le osservazioni di Galileo (1564-1642), premesse per ricavare le leggi del moto di un corpo indipendentemente dalla sua natura, che Newton (1642-1727)¹, con le definizioni di massa e di forza, riesce a formulare i principi fondamentali della meccanica. Da allora² questi principi caratterizzano la **meccanica elementare** o *meccanica newtoniana*¹ che ancora oggi, sia pure con i limiti enunciati da Einstein nella teoria della relatività (1905)³, rimane la base per le applicazioni della tecnica.

I *quattro concetti* fondamentali della meccanica, frutto dell'intuizione e dell'esperienza dell'uomo, sono quelli di *spazio, tempo, massa e forza*:

- Il concetto di *spazio* è associato alla posizione del punto P; questa posizione può essere definita da tre lunghezze, le *coordinate* di P, misurate a partire da un dato punto di riferimento, l'*origine*, lungo tre direzioni prefissate⁴.
- Per definire un evento non basta individuare la posizione del punto P nello spazio; occorre anche assegnare il *tempo* in cui quel dato evento si verifica.
- Per caratterizzare e confrontare i corpi viene usato il concetto di *massa*; sulla base di alcuni esperimenti fondamentali, si può, ad esempio, affermare che due corpi di ugual massa vengono attratti dalla terra nello stesso modo oppure che essi offrono la stessa resistenza a una variazione del moto di traslazione.
- La *forza* è legata all'azione di un corpo su un altro corpo; essa può venire esercitata da un contatto effettivo oppure a distanza come nel caso della forza di gravità o di forze magnetiche. Una forza è caratterizzata dal suo *punto di applicazione*, dalla sua *intensità* (è la grandezza della forza) e dalla sua *direzione*: un ente così definito costituisce un *vettore*.

Mentre i concetti di spazio, tempo e massa sono, nella meccanica newtoniana, concetti indipendenti l'uno dall'altro³, il concetto di forza dipende dai primi tre: uno dei principi fondamentali della meccanica newtoniana stabilisce che la forza risultante che agisce su un corpo è legata alla massa del corpo e al modo in cui la sua velocità varia con il tempo.

I quattro concetti di spazio, tempo, massa e forza consentono di studiare le condizioni di equilibrio oppure di movimento delle particelle o dei corpi rigidi. Per *particella* si intende una quantità molto piccola di materia, talmente piccola da poter essere considerata coincidente con un punto dello spazio. Per *corpo rigido* si intende invece la combinazione di un gran numero di particelle che occupano posizioni fisse le une rispetto alle altre. La mecca-

1 - Pronunciare Newton e meccanica newtoniana rispettivamente "niuton" e meccanica "niutoniana".

2 - I principi di Newton sono stati successivamente esposti in forma modificata da d'Alembert (1717-1783), Lagrange (1736-1813) e Hamilton (1805-1865).

3 - Nella meccanica newtoniana, lo spazio, il tempo e la massa sono concetti assoluti nel senso che ciascuno è indipendente dall'altro; in particolare per Newton "il tempo assoluto, vero e matematico, di per sé e per sua natura, scorre in modo regolare senza rapporti con alcunché di esterno". Ma ciò non è più vero nella *meccanica relativistica* di Einstein (1879-1955), dove il tempo di un evento dipende dalla sua posizione e dove la massa di un corpo varia con la sua velocità. La teoria della relatività si basa su due fatti: il principio di relatività e la costanza della velocità della luce (299.792,5 km/s). Il principio di relatività, formulato per la prima volta da Galileo, è stato aggiornato da Einstein: esso afferma che tutte le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi non sottoposti ad accelerazioni.

4 - Nel piano sono sufficienti due sole coordinate per definire la posizione del punto P.

nica delle particelle è il presupposto indispensabile per affrontare lo studio più complesso della meccanica dei corpi rigidi; i risultati ottenuti nello studio delle particelle possono venire inoltre direttamente spesi in molti problemi che si incontrano nelle applicazioni.

I sei principi su cui si basa la meccanica elementare sono ricavati dall'esperienza⁵:

- *La legge del parallelogramma per la somma delle forze*, scoperta da Leonardo da Vinci (1452-1519): due forze che agiscono su una particella possono venire sostituite da una sola forza, la loro *risultante*, ottenuta tracciando la diagonale del parallelogramma avente lati uguali alle forze date.
- *Il postulato di trasmissibilità*: la condizione di equilibrio oppure di movimento di un corpo rigido rimarrà inalterata se una forza che agisce in un dato punto di un corpo rigido viene sostituita da una forza della stessa intensità e con la stessa direzione, ma applicata in un punto diverso, purché le due forze abbiano la stessa retta d'azione.
- *I tre principi della dinamica o leggi di Newton*⁶:
 - *Primo principio*: se la forza risultante che agisce su una particella è nulla, la particella rimarrà in quiete se originariamente era in quiete oppure si sposterà con velocità costante lungo una linea retta se originariamente era in movimento.
 - *Secondo principio*: se la forza risultante che agisce su una particella non è nulla, la particella si sposterà con un'accelerazione proporzionale all'intensità della risultante e nella direzione di questa forza risultante⁷.
 - *Terzo principio*: le forze di azione e reazione tra corpi a contatto hanno la stessa intensità, la stessa retta d'azione e verso opposto.
- *La legge di gravità di Newton*: due particelle si attraggono tra loro con due forze uguali e opposte; la grandezza della forza di attrazione risulta direttamente proporzionale al prodotto delle masse delle due particelle e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

5 - I principi della meccanica elementare vengono chiamati in modo diverso nelle varie letterature tecniche. Così quella che è la regola (o anche il metodo) del parallelogramma per la letteratura italiana, diviene la legge del parallelogramma nella letteratura di lingua inglese; il principio di trasmissibilità per la letteratura di lingua inglese diviene un postulato per la letteratura italiana, intendendosi per postulato una verità fondamentale che viene ammessa senza dimostrazione; le tre leggi fondamentali di Newton per la letteratura di lingua inglese divengono i tre principi della dinamica nella letteratura italiana. A parte la differenza di denominazione (principio, legge o postulato), si vuole qui sottolineare che in generale questi principi vengono proposti sulla base dell'evidenza sperimentale in quanto non possono essere provati oppure derivati matematicamente. Alcuni potrebbero essere derivati, ma allora occorrerebbe far ricorso a concetti che verranno introdotti più avanti nel corso. Ad esempio, il postulato di trasmissibilità, che viene introdotto nei primi capitoli della statica, potrebbe essere derivato dallo studio della dinamica dei corpi rigidi, ma questo studio richiede l'introduzione di tutte le tre leggi di Newton e di altri concetti ancora.

6 - Galileo ha scoperto le prime due leggi della dinamica, ma Newton ne ha dato la formulazione definitiva. Queste leggi vengono perciò ricordate nella letteratura internazionale come leggi di Newton.

7 - Il secondo principio di Newton verrà ripreso nella definizione del newton, che è l'unità di misura delle forze.

III. Fondamenti delle scienze termiche

La **termodinamica** riguarda lo studio dell'energia associata con una data quantità di materia (sistema termodinamico) oppure con un volume chiaramente delimitato nello spazio (volume di controllo). La base della termodinamica è sempre l'osservazione sperimentale, riassunta in alcuni principi. Il *primo principio* stabilisce la conservazione dell'energia: la somma algebrica di calore e di lavoro, le due forme dell'energia che attraversano il contorno del sistema termodinamico, deve essere uguale al cambiamento netto di energia immagazzinata, o posseduta, all'interno del sistema. Per poter valutare l'energia immagazzinata, occorre allora conoscere il comportamento di quella data sostanza e le relazioni che intercorrono tra determinate proprietà della sostanza. Alcuni cambiamenti delle proprietà procedono soltanto secondo un dato verso: il verso naturale della trasformazione è fornito dal *secondo principio* della termodinamica. Se un oggetto viene lasciato scivolare con velocità uniforme lungo un piano inclinato, la diminuzione nell'energia potenziale (l'energia legata alla quota che l'oggetto ha nel campo gravitazionale terrestre) è dissipata dall'attrito tra l'oggetto e il piano. Anche nell'ipotesi che l'energia dovuta all'attrito venga in qualche modo immagazzinata nell'oggetto oppure nel piano, non vi è alcuna possibilità di reimpiegare quell'energia per far ritornare l'oggetto al livello che inizialmente possedeva sul piano inclinato. Esiste perciò un verso naturale per questo tipo di trasformazione e il secondo principio afferma che il verso opposto è impossibile. In modo più significativo, il secondo principio afferma che il lavoro può venire completamente e continuamente convertito in calore, ma che la trasformazione opposta è impossibile. Ogni volta che in un sistema si vuole realizzare la conversione continua di calore in lavoro, soltanto una parte del calore fornito al sistema può essere convertita in lavoro; la parte rimanente viene rigettata: esiste perciò un limite teorico, indipendente dalle proprietà della sostanza oppure dal tipo di trasformazione o di macchina impiegata, alla frazione di calore fornito che può essere convertito in lavoro. Il secondo principio misura anche lo scostamento di una trasformazione reale da quella ideale, definita quale trasformazione reversibile, permettendo così di confrontare tra loro le varie trasformazioni reali e di scegliere quella che raggiunge il rendimento più elevato.

Una volta individuata la sorgente di energia, questa va utilmente impiegata trasportandola da una posizione a un'altra, come avviene, ad esempio, per l'acqua calda oppure l'aria calda che, fornita da una caldaia che in un sotterraneo brucia del gasolio, viene fatta circolare con una determinata spesa di energia (l'energia elettrica che aziona la pompa oppure il ventilatore) fino ai diversi piani di un edificio. Occorre allora individuare le forze che si oppongono al moto del fluido e poterne calcolare intensità e direzione in modo da poter progettare la struttura del circuito che convoglia il fluido e rendere minima l'energia richiesta per poter trasportare il fluido tra i diversi livelli dell'edificio. La **fluidodinamica** studia il *tipo di flusso* (laminare o turbolento) con cui si muove il fluido, le sue *proprietà di trasporto* (viscosità, conduttività ecc.) e quelle *proprietà del fluido* che sono indipendenti dal movimento ma che lo distinguono dagli altri fluidi (come densità, tensione di vapore, velocità del suono ecc.).

Se un pacchetto di piselli surgelati viene posto in un recipiente contenente dell'acqua, la temperatura del pacchetto sale mentre quella dell'acqua diminuisce progressivamente finché le due temperature, quella dei piselli e quella dell'acqua, divengono uguali. La **trasmissione del calore** è il trasferimento di energia che avviene come conseguenza della

sola differenza di temperatura, così come avviene tra due sostanze inizialmente a temperature diverse, e non viene svolto alcun lavoro sulle o dalle sostanze. La trasmissione del calore può avvenire secondo tre diversi modi: conduzione, convezione e irraggiamento. La legge di Fourier consente di calcolare la *conduzione*, trasferimento di energia che avviene attraverso una sostanza, rappresentata da un solido o da un fluido, provocato da un gradiente (variazione lungo una data direzione) di temperatura all'interno della sostanza. La cosiddetta legge di Newton consente di calcolare la *convezione*, trasferimento di energia tra il fluido e la superficie di un solido, nella direzione perpendicolare all'interfaccia superficie-fluido, in funzione dell'area superficiale del corpo e della differenza di temperatura. L'*irraggiamento* è il trasferimento di energia per mezzo di onde elettromagnetiche; tutti i corpi che si trovano a una temperatura maggiore dello zero assoluto irradiano energia. L'energia può venire trasferita per irraggiamento tra un gas e una superficie solida oppure tra due o più superfici. L'irraggiamento emesso da una superficie ideale, chiamata corpo nero, è, per la legge di Stefan-Boltzmann, funzione della quarta potenza della temperatura della superficie.