



behindlens/Shutterstock

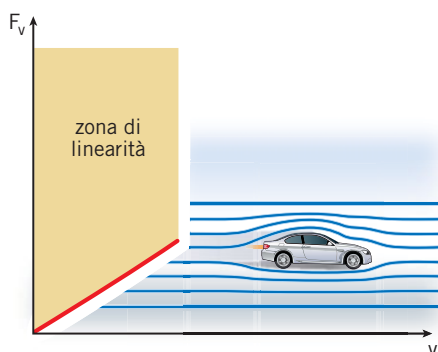
2. L'ATTRITO VISCOSO

Tutti gli automobilisti sanno per esperienza che è necessario più carburante per mantenere una velocità elevata che per mantenere una velocità più bassa; a velocità elevate aumentano le forze di attrito che il sistema deve bilanciare. Infatti, una macchina in movimento deve opporsi principalmente alla forza di **attrito viscoso**, cioè alla resistenza al moto che si sviluppa quando un corpo si muove in un fluido (in questo caso, l'aria).

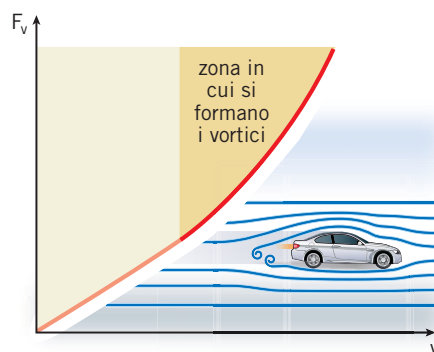
In generale, la forza di attrito viscoso dipende, oltre che dalla velocità, anche dal fluido in cui l'oggetto si muove, dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto in movimento che, se scelte con criteri aerodinamici, riducono la formazione di vortici nel fluido.

Per fissare le idee, consideriamo un'automobile che parte da ferma e inizia ad accelerare. Gli esperimenti mostrano che:

A fino a quando la sua velocità è abbastanza bassa, il moto dell'auto non genera vortici e la sua forza di attrito viscoso con l'aria cresce in modo *direttamente proporzionale* alla sua velocità.



B Però, quando nell'aria si formano vortici, l'attrito viscoso aumenta in modo direttamente proporzionale al *quadrato* della sua velocità. Così consumo di carburante e inquinamento aumentano rapidamente.



Consumo di
carburante

Un caso molto più semplice è quello di una sfera di raggio r che si muove con velocità v (non così elevata da generare vortici) in un fluido. In questa situazione, il modulo F_v della forza di attrito viscoso sulla sfera è dato dalla **legge di Stokes**:

$$F_v = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

Diagramma di annotazione della formula:

- attrito viscoso (N) → F_v
- coefficiente di viscosità (Pa·s) → η
- raggio (m) → r
- velocità (m/s) → v

La grandezza η che compare nella legge di Stokes si chiama **coefficiente di viscosità**. È una quantità che dipende dal tipo di fluido e dalla sua temperatura.

I valori dei coefficienti di viscosità per diversi fluidi sono dati nella tabella; essi sono espressi in pascal moltiplicato secondo (Pa·s), che è l'unità di misura del coefficiente di viscosità nel Sistema Internazionale.

COEFFICIENTI DI VISCOSITÀ	
Sostanza	Coefficienti di viscosità a 20 °C (Pa·s)
ammoniaca	$9,2 \times 10^{-6}$
metano	$10,2 \times 10^{-6}$
aria	$17,1 \times 10^{-6}$
acqua	$1,00 \times 10^{-3}$
mercurio	$1,55 \times 10^{-3}$
sangue (a 37 °C)	$4,0 \times 10^{-3}$
olio d'oliva	$8,4 \times 10^{-2}$
glicerina	1,50

ESERCIZI

1. LA CADUTA LIBERA

ESERCIZI NUMERICI

14 Dal terrazzo di una casa alta 57 m una palla è calciata verso l'alto con velocità iniziale di 43 km/h.

- Dopo quanti secondi il pallone raggiunge la massima altezza?
- Qual è la massima altezza rispetto al terreno raggiunta dal pallone?

► Dopo quanti secondi dal lancio il pallone toccherà il suolo?

Trascura l'effetto dell'aria.

[1,2 s; 64 m; 4,8 s]

15 Sulla Luna un pallone lanciato verticalmente verso l'alto ritorna nel punto di partenza in 4,0 s. L'accelerazione di gravità sulla Luna è $1,6 \text{ m/s}^2$. Calcola:

- la velocità iniziale del pallone;
- la velocità dopo 2,0 s dal lancio.

[3,2 m/s; 0,0 m/s]

16 PROBLEMA SVOLTO

★★★

Calcolo della reazione vincolare

Giorgio ha una forza-peso di 647 N e si trova all'interno di un ascensore che sale con un'accelerazione di $0,2 \text{ m/s}^2$.

- Calcola la forza che il pavimento dell'ascensore esercita su Giorgio.
- Calcola l'accelerazione che la stessa forza del pavimento provocherebbe sulla Luna ($g_L = 1,6 \text{ m/s}^2$).

DATI E INCOGNITE

	GRANDEZZE	SIMBOLI	VALORI	COMMENTI
DATI	Accelerazione	a	$0,2 \text{ m/s}^2$	Dell'ascensore, verso l'alto
	Forza-peso	F_p	647 N	Di Giorgio
INCOGNITE	Forza	F	?	Del pavimento, verso l'alto
	Accelerazione	a_L	?	Sulla Luna

RAGIONAMENTO

- Dalla forza-peso di Giorgio ricaviamo la sua massa.
- Su Giorgio sono applicate due forze: la forza-peso e la forza (reazione vincolare) del pavimento. In base al secondo principio della dinamica, la loro somma determina l'accelerazione di Giorgio.
- Dal secondo principio della dinamica ricaviamo l'equazione che ci porta a determinare la forza esercitata dal pavimento.
- Applicando nuovamente il secondo principio della dinamica, sostituendo la forza-peso terrestre con quella lunare, ricaviamo l'accelerazione di Giorgio sulla Luna.

RISOLUZIONE

La massa di Giorgio è $m = \frac{F_p}{g}$:

$$m = \frac{F_p}{g} = \frac{(647 \text{ N})}{(9,8 \text{ m/s}^2)} = 66 \text{ kg}.$$

Applichiamo il secondo principio della dinamica $F - F_p = ma$:

$$F = F_p + ma = (647 \text{ N}) + (66 \text{ kg}) \times (0,2 \text{ m/s}^2) = 6,6 \times 10^2 \text{ N}.$$

Applichiamo nuovamente il secondo principio della dinamica $F - F_{p,L} = ma_L$ sulla Luna:

$$a_L = \frac{F - F_{p,L}}{m} = \frac{(660 \text{ N}) - (66 \text{ kg}) \times (1,6 \text{ m/s}^2)}{(66 \text{ kg})} = 8,4 \text{ m/s}^2.$$

CONTROLLO DEL RISULTATO

La stessa forza del pavimento, applicata a una persona sulla Luna, produce un'accelerazione maggiore di quella prodotta sulla Terra; questo a causa della minore accelerazione di gravità sulla Luna, pari a circa 1/6 di quella terrestre.

- 17** ★★★ Per saltare in alto, un atleta di 64 kg preme sul suolo con una forza di 750 N.

- Calcola l'accelerazione dell'atleta al momento dello stacco dal suolo.
- Di quanto aumenta in percentuale l'accelerazione quando lo stesso salto viene fatto sulla Luna?

[1,9 m/s²; circa 430%]

2. L'ATTRITO VISCOSO

DOMANDE SUI CONCETTI

- 20** Disegna in modo qualitativo il grafico velocità-tempo di una pallina di plastica in caduta libera, senza trascurare l'attrito dell'aria.

- 21** Un oggetto è in caduta all'interno di un liquido a velocità costante.

- La forza di attrito viscoso ha intensità uguale a quella della forza-peso?

ESERCIZI NUMERICI

- 22** ★★★ Stai giocando a baseball con alcuni amici vicino a un lago e un lancio potente spedisce la palla in acqua. La palla ha un diametro di 7,0 cm e si muove nell'ac-

qua alla velocità costante di 2,0 cm/s senza generare vortici.

- Quanto vale la forza di attrito viscoso esercitata dall'acqua?

[1,3 × 10⁻⁵ N]

- 23** ★★★ Una sfera di diametro 10 cm si muove in un fluido alla velocità costante di 4,3 m/s. La forza di attrito viscoso esercitata dal fluido sulla sfera vale 0,34 N.

- Calcola il coefficiente di viscosità del fluido.
- Sai dire da quale fluido potrebbe trattarsi, basandoti sulla tabella delle viscosità?

[8,4 × 10⁻² Pa · s]

- 24** ★★★ Una pallina di polistirolo espanso ha una massa di 1,8 × 10⁻⁸ kg e un raggio di 0,5 mm.

- Calcola la velocità limite di caduta nell'aria.

[1 m/s]

- 25** ★★★ Una pallina si muove all'interno di un mezzo viscoso.

- Aumentiamo il raggio del 10% e diminuiamo la viscosità del mezzo del 10%, lasciando invariata la velocità limite: di quanto varia la forza di attrito viscoso?

[1% in meno]

26 PROBLEMA SVOLTO

Velocità limite di una sfera di alluminio

Una sfera di alluminio, di raggio 1,5 cm, cade in acqua e dopo un breve tratto, scende verticalmente a velocità costante. La densità dell'alluminio è $d_{Al} = 2960 \text{ kg/m}^3$.

- Quali sono le forze che subisce la sfera? Qualcuna di esse è trascurabile?
- Calcola la velocità costante della sfera assumendo che non si formino vortici. Ritieni che l'assunzione sia corretta?

DATI E INCOGNITE

	GRANDEZZE	SIMBOLI	VALORI	COMMENTI
DATI	Raggio	r	0,015 m	Della sfera
	Densità	d_{Al}	2960 kg/m ³	Dell'alluminio
	Densità	d_{H_2O}	1000 kg/m ³	Dell'acqua
	Coefficiente di viscosità	η	0,001 Pa · s	Dell'acqua

INCOGNITE	Spinta di Archimede	F_A	?	Verso l'alto
	Forza di attrito viscoso	F	?	Verso l'alto
	Forza-peso	F_p	?	Verso il basso

RAGIONAMENTO

- Le forze in gioco sono tre: la forza-peso, diretta verso il basso, la spinta di Archimede, diretta verso l'alto, e la forza di attrito viscoso, diretta anch'essa verso l'alto.
- La forza-peso è direttamente proporzionale alla densità dell'alluminio, mentre la spinta di Archimede è direttamente proporzionale alla densità dell'acqua; poiché la densità dell'acqua è circa un terzo di quella dell'alluminio, la spinta di Archimede è circa un terzo della forza-peso e quindi non è trascurabile.
- Calcoliamo la spinta di Archimede e la forza-peso; poiché la somma delle tre forze è nulla, possiamo calcolare l'intensità della forza di attrito viscoso.
- Dalla legge di Stokes calcoliamo la velocità della sfera.

RISOLUZIONE

La forza-peso si ottiene moltiplicando la densità d_{Al} e il volume della sfera per g :

$$F_p = d_{Al} \frac{4}{3} \pi r^3 g = \frac{4}{3} \pi (2960 \text{ kg/m}^3) \times (0,015 \text{ m})^3 \times (9,8 \text{ m/s}^2) = 0,41 \text{ N}.$$

La spinta di Archimede si ottiene moltiplicando la densità d_{H_2O} e il volume della sfera per g :

$$F_A = d_{H_2O} \frac{4}{3} \pi r^3 g = \frac{4}{3} \pi (1000 \text{ kg/m}^3) \times (0,015 \text{ m})^3 \times (9,8 \text{ m/s}^2) = 0,14 \text{ N}.$$

La forza di attrito viscoso è uguale alla differenza tra la forza-peso e la spinta di Archimede $F = F_p - F_A$:

$$F = F_p - F_A = (0,41 \text{ N}) - (0,14 \text{ N}) = 0,27 \text{ N}.$$

Dalla legge di Stokes ricaviamo la velocità della sfera $v = \frac{F}{6\pi r \eta}$:

$$v = \frac{(0,27 \text{ N})}{6\pi (0,015 \text{ m}) \times (0,001 \text{ Pa} \cdot \text{s})} = 9,6 \times 10^2 \text{ m/s}.$$

CONTROLLO DEL RISULTATO

La velocità della sfera è molto grande e sicuramente si formerebbero vortici, quindi la velocità costante della sfera sarà in realtà sensibilmente minore. Occorre considerare sempre attentamente le assunzioni che si fanno nel risolvere un problema: ipotesi non giustificate possono portare a risultati errati.

- 27** ★★★ Una sferetta di mercurio, di raggio $9,9 \times 10^{-5} \text{ m}$, cade in un fluido con coefficiente di viscosità pari a $9,2 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ che ha densità pari a quella dell'acqua. La densità del mercurio è $1,36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$.

► Calcola la velocità limite della sferetta.

[29 m/s]

- 28** ★★★ In un mezzo viscoso, con coefficiente di viscosità $\eta = 6,2 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, si muove verticalmente verso il basso una sferetta di ferro (densità $d_{Fe} = 7,87 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$). Il moto della sferetta forma vortici se la velocità è superiore a 3,5 m/s.

► Calcola il massimo raggio della sferetta affinché non si formino vortici.

[3,8 m]

4. IL MOTO DEI PROIETTILI

ESERCIZI NUMERICI

- 45** ★★★ Una teleferica percorre un tratto orizzontale con velocità di 3,5 m/s rispetto al suolo a un'altezza di 22 m. A un certo punto, un oggetto cade dalla teleferica.

- A quale distanza rispetto alla verticale di caduta l'oggetto colpirà il suolo?
- Se la teleferica prosegue con la stessa velocità e alla stessa altezza dal suolo, dove si trova quando l'oggetto colpisce il suolo?

[7,4 m]

- 46** ★★ Usa un foglio di calcolo per ricavare alcuni punti del grafico della traiettoria di un proiettile, con tre diversi valori della velocità di lancio orizzontale: 1,2 m/s, 2,4 m/s, 3,6 m/s. Rappresentali nel piano cartesiano.

PROBLEMI GENERALI

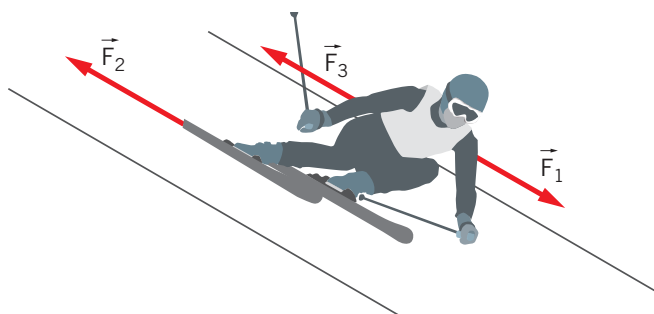
- 11** ★★ Il 14 ottobre 2012 l'austriaco Felix Baumgartner si è lanciato da un'altezza di circa 38 000 m dal suolo. A quell'altezza l'aria dell'atmosfera è ancora presente, seppur più rarefatta. Il coefficiente di viscosità dell'aria varia a seconda dell'altezza e delle condizioni climatiche, ma si può assumere un valore medio di $18 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Nei primi istanti di caduta l'accelerazione di gravità era pari a $9,68 \text{ m/s}^2$.

- Il paracadute è stato aperto dopo 4 min e 19 s dal lancio; prima di aprirlo, Baumgartner ha raggiunto la velocità di 1357,64 km/h. L'attrito dell'aria è stato trascurabile in questo intervallo di tempo?

[No]

GIOCHI DI ANACLETO

- 10** In figura uno sciatore scende lungo un pendio. Sullo sciatore agiscono le tre forze \vec{F}_1 , \vec{F}_2 e \vec{F}_3 : nella situazione raffigurata \vec{F}_1 ha modulo uguale a \vec{F}_2 , mentre si è osservato che l'intensità di \vec{F}_3 si riduce quando lo sciatore si abbassa piegando le ginocchia.



Considera le seguenti affermazioni:

1. F_1 aumenta se il pendio si fa più ripido.
2. F_2 ha modulo uguale a F_1 anche se il pendio si fa più ripido.
3. F_3 si annulla se la velocità dello sciatore è costante.

Delle affermazioni fatte

- a. è corretta solo la 1.
- b. sono corrette tutte tre.
- c. sono corrette solamente la 1 e la 3.
- d. sono corrette solamente la 2 e la 3.

(Tratto dai *Giochi di Anacleto*, anno 1998)