

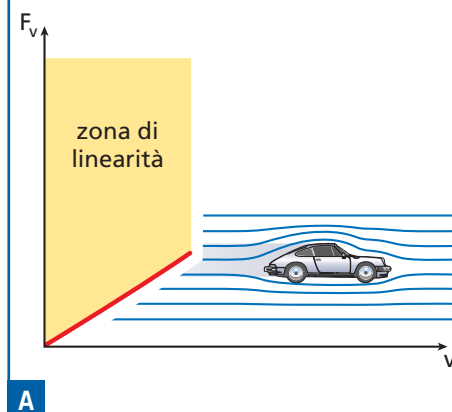
L'ATTRITO VISCOSO

Tutti gli automobilisti sanno per esperienza che, per mantenere costante la velocità dell'automobile all'aumentare della velocità, occorre una maggiore quantità di carburante, poiché aumentano anche le forze di attrito che il motore deve controbilanciare.

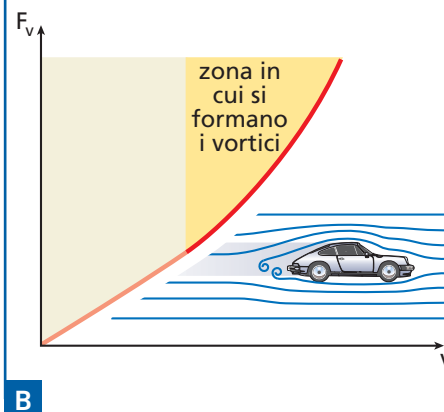
In generale, la forza di attrito viscoso dipende, oltre che dalla velocità, anche dal fluido in cui l'oggetto si muove, dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto in movimento che, se scelte con criteri aerodinamici, riducono la formazione di vortici nel fluido.

Consideriamo un'automobile che parte da ferma e inizia ad accelerare. Gli esperimenti mostrano che:

► finché la sua velocità è abbastanza bassa, il flusso dell'aria attorno alla carrozzeria è *laminare* (cioè senza vortici) e la forza di attrito viscoso tra l'automobile e l'aria cresce un modo *direttamente proporzionale* alla sua velocità.



► Però, non appena cominciano a formarsi vortici nell'aria il flusso non è più laminare e l'attrito viscoso inizia ad aumentare in modo più rapido, e cioè direttamente proporzionale al *quadrato* della sua velocità.



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**:

$$F_v = 6\pi\eta r v \quad (1)$$

attrito viscoso (N) ————— raggio (m)
 coefficiente di viscosità (Pa · s) ————— velocità (m/s)

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** seguente; essi sono espressi in pascal moltiplicato secondo (Pa · s), che è l'unità di misura del coefficiente di viscosità nel Sistema Internazionale.

Diversa viscosità

I valori della tabella mostrano che il mercurio è mille volte meno viscoso della glicerina.

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

La caduta nell'aria

Un **paracadutista** che si lancia da un aereo non si muove di moto uniformemente accelerato. Infatti, su di esso non agisce soltanto la forza-peso \vec{F}_p (rivolta verso il basso), ma anche la forza di attrito \vec{F}_v con l'aria (che si oppone al moto di caduta e, quindi, è rivolta verso l'alto). Il moto del paracadutista è determinato dalla risultante di queste *due* forze.

La forza di attrito con l'aria aumenta man mano che la velocità del paracadutista cresce, fino a che raggiunge la stessa intensità della forza-peso. Da questo istante in poi le due forze sono uguali e opposte, e quindi la loro risultante è uguale a zero:

$$\vec{F}_{\text{tot}} = \vec{F}_p + \vec{F}_v = 0.$$

Per il principio di inerzia, il paracadutista scende allora a velocità costante, chiamata **velocità limite**.

Un oggetto che cade nell'atmosfera accelera fino a giungere alla **velocità limite**, che rimane poi costante fino alla fine del moto.

Per una massa di 100 kg attaccata a un paracadute di 10 m di diametro la velocità limite è circa 3 m/s, cioè poco più di 10 km/h. Raggiunta questa velocità, la forza di attrito è $F_v = 9,8 \times 10^3$ N e cancella la forza-peso.

Velocità limite per una sfera

Possiamo calcolare la velocità limite per una sfera di massa m e raggio r che cade in un fluido con coefficiente di viscosità η . Visto che i due vettori \vec{F}_v e \vec{F}_p hanno versi opposti (**figura 1**), l'intensità di \vec{F}_{tot} è data dalla *differenza* tra i valori di \vec{F}_p e \vec{F}_v :

$$F_{\text{tot}} = F_p - F_v. \quad (2)$$



Associazione Nazionale Paracadutisti d'Italia

Quesito

Cosa accadrebbe a un oggetto scagliato verso il basso, da una grande altezza, con una velocità maggiore di quella limite?

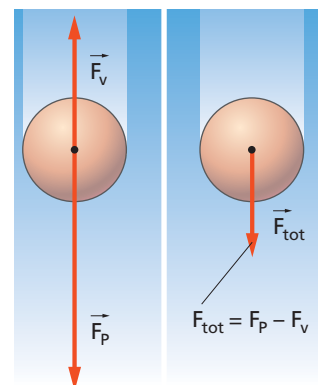


Figura 1 Il modulo della forza totale sulla sfera è la differenza dei moduli delle singole forze che agiscono su di essa.

Quando le due forze si compensano, si ottiene

$$F_p - F_v = 0 \quad \Rightarrow \quad F_v = F_p.$$

Supponendo che il flusso sia laminare e che, quindi, la velocità limite della sfera non sia troppo elevata, in questa uguaglianza possiamo sostituire le espressioni $F_v = 6\pi\eta r v$ (legge di Stokes) e $F_p = mg$ (forza-peso) in modo da ottenere

$$6\pi\eta r v = mg,$$

da cui possiamo isolare il valore della velocità limite di caduta

$$v = \frac{mg}{6\pi\eta r} \quad (3)$$

ESERCIZI

DOMANDE SUI CONCETTI

1 Test. La forza di attrito viscoso su un oggetto che si muove a velocità v è:

★★★

- A** sempre direttamente proporzionale a v .
- B** sempre direttamente a proporzionale a v^2 .
- C** direttamente proporzionale a v soltanto per v abbastanza piccola.
- D** direttamente proporzionale a v soltanto per v abbastanza grande.

2 Una pallina con un raggio di 0,50 mm è fatta di polistirolo espanso (densità: 35 kg/m³).

★★★

- ▶ Calcola la velocità limite di caduta di questa pallina in aria. [1,1 m/s]

3 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'acqua 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]

4 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.
- ▶ Di che fluido potrebbe trattarsi, basandoti sulla tabella delle densità?

[8,4 × 10⁻² Pa · s]

5 Una sferetta di mercurio, di raggio 9,9 × 10⁻⁵ m, cade in un fluido con coefficiente di viscosità pari a 9,2 × 10⁻⁶ Pa · s. La densità del mercurio è 1,36 × 10⁴ kg/m³.

★★★

- ▶ Calcola la velocità limite della sferetta.

[31,8 m/s]