CAPITOLO

8

Attrito e reazioni vincolari

Un tavolo non è un oggetto passivo: regge il libro perché lo spinge verso l'alto, né più né meno di quanto serve.

OBIETTIVI

1. Riconoscere i vincoli e descrivere le forze che esercitano: la reazione normale di una superficie e la tensione di un filo.
2. Spiegare perché, su un piano orizzontale, la reazione normale è uguale al peso solo quando il corpo è in equilibrio e nessun'altra forza verticale agisce su di esso.
3. Distinguere l'attrito radente statico da quello dinamico e usare le relazioni $F_s \le \mu_s F_\perp$ e $F_d = \mu_d F_\perp$.
4. Calcolare la forza premente in situazioni semplici, anche con forze inclinate.
5. Descrivere a parole l'attrito volvente e l'attrito viscoso e riconoscere quando l'attrito è utile e quando è dannoso.
6. Progettare ed eseguire una misura del coefficiente di attrito statico.

INDICE DEL CAPITOLO

8.1 Vincoli e reazioni vincolari 2
8.2 Fili, funi e cerniere 5
8.3 L'attrito radente statico 7
8.4 L'attrito radente dinamico 11
8.5 Attrito volvente e attrito viscoso 16

Fisica 1 · Parte II · Vettori e forze · versione 1.0
Capitolo 8: Attrito e reazioni vincolari · pagine 199–222 del volume completo · estratto per lo studio

Appoggia lo zaino sul banco: resta lì, fermo. Eppure nel capitolo 7 abbiamo visto che la Terra lo tira verso il basso con una forza, il suo peso. Se nient'altro agisse sullo zaino, esso dovrebbe cadere attraverso il banco. Non succede perché il banco, a sua volta, spinge lo zaino verso l'alto. Prova ora a spingere lo zaino di lato con un dito, piano: non si sposta. Anche questa volta qualcosa si oppone alla tua spinta, e quel qualcosa nasce dal contatto fra lo zaino e il piano del banco.

In questo capitolo studieremo proprio queste forze «nascoste», che i corpi a contatto si scambiano: le **reazioni vincolari**, con cui pavimenti, tavoli, funi e cardini sostengono e trattengono i corpi, e l'**attrito**, che si oppone allo strisciamento di una superficie sull'altra. Sono forze diverse dal peso e dalla forza elastica, perché in generale non hanno un valore fisso: si adattano alla situazione, entro certi limiti. Capire come lo fanno è l'ultimo passo prima di affrontare, nella terza parte del libro, l'equilibrio dei corpi.

8.1 Vincoli e reazioni vincolari

8.1.1 Che cos'è un vincolo

Un treno non può uscire dai binari, una porta può soltanto ruotare attorno ai cardini, un quadro appeso al chiodo non può scendere, un libro appoggiato sul tavolo non può attraversarlo. In tutti questi casi c'è un corpo che limita i movimenti possibili di un altro. Un corpo o un dispositivo che impedisce a un altro corpo alcuni movimenti si chiama **vincolo**. Sono vincoli i piani di appoggio (pavimenti, tavoli, mensole), i fili e le funi, i cardini e i perni, le guide e i binari.

Un vincolo svolge il suo compito esercitando una forza sul corpo vincolato. Questa forza si chiama **reazione vincolare**. È una forza di contatto, nel senso del capitolo 7: c'è solo finché il corpo e il vincolo si toccano. Ha però una caratteristica che la distingue dal peso e dalla forza elastica: non si può calcolare con una formula che dipende solo dal vincolo. Il peso di un libro è sempre $m\,g$, qualunque cosa succeda intorno; la forza che il tavolo esercita sul libro, invece, assume di volta in volta il valore necessario a impedire il movimento vietato. Per conoscerla bisogna guardare tutte le altre forze che agiscono sul corpo.

8.1.2 La reazione normale di un piano

Quando un corpo è appoggiato su una superficie, il vincolo impedisce al corpo di penetrare nella superficie. Per farlo, la superficie spinge il corpo con una forza diretta perpendicolarmente a sé stessa e con verso uscente dalla superficie. Questa forza si chiama **reazione normale** o **forza normale**, e nelle figure la indicheremo con $\boldsymbol{N}$. L'aggettivo «normale» qui non significa «ordinario»: in geometria una retta normale a una superficie è una retta perpendicolare a essa.

Da dove viene questa spinta? Ogni superficie reale, anche la più rigida, si deforma un poco sotto un carico: il piano di un tavolo si incurva di una quantità invisibile, gli atomi dello strato superficiale vengono avvicinati fra loro e reagiscono respingendo quelli del corpo appoggiato. In questo senso un tavolo si comporta come una molla molto rigida: più lo si comprime, più spinge. Poiché la deformazione necessaria è minuscola, nei problemi tratteremo il piano come indeformabile e ci limiteremo a dire che esso esercita la forza normale che serve.

Un piano può anche esercitare una forza parallela alla superficie, cioè l'attrito, che studieremo dal paragrafo 8.3. Un piano che esercita soltanto la reazione normale, senza alcun attrito, si dice **piano liscio**: è un'idealizzazione, come il punto materiale del capitolo 1, che funziona bene per superfici molto levigate o lubrificate.

8.1.3 Perché il libro resta fermo

Torniamo al libro sul tavolo (figura 8.1a). Sul libro agiscono due forze: il peso $\boldsymbol{P}$, applicato nel baricentro G e diretto verso il basso, e la reazione normale $\boldsymbol{N}$ del tavolo, diretta verso l'alto. L'esperienza ci dice che un corpo fermo che resta fermo ha la forza risultante nulla: se la risultante non fosse zero, il corpo comincerebbe a muoversi nel verso della risultante. Questa condizione di *equilibrio*, che studieremo in modo sistematico nel capitolo 9, ci permette di trovare $\boldsymbol{N}$:

$$\boldsymbol{P} + \boldsymbol{N} = 0 \quad \Longrightarrow \quad N = P$$

La reazione normale ha quindi lo stesso modulo del peso, la stessa direzione e verso opposto. Un libro di 6,0 N riceve dal tavolo una spinta di 6,0 N verso l'alto; un vocabolario di 25 N ne riceve una di 25 N. Lo stesso tavolo esercita forze diverse su corpi diversi: è questo che intendevamo dicendo che la reazione vincolare «si adatta».

Ma la reazione normale non è sempre uguale al peso. Se premi il libro dall'alto con una mano, esercitando una forza $\boldsymbol{F}$ verticale di 4,0 N (figura 8.1b), le forze verso il basso diventano due e il tavolo, per mantenere il libro fermo, deve spingere di più: $N = P + F = 10$ N. Se invece tiri il libro verso l'alto con un filo che esercita una tensione di 2,0 N, senza sollevarlo (figura 8.1c), il tavolo deve spingere di meno: $N = P - T = 4{,}0$ N. Se il filo tirasse con 6,0 N, la reazione normale si annullerebbe: il libro starebbe per staccarsi dal tavolo. Un piano di appoggio può soltanto spingere, mai tirare; per questo N non può diventare negativa. Vedremo nel capitolo 9 un altro caso importante: su un piano inclinato la reazione normale è minore del peso, perché deve equilibrare solo una parte di esso.

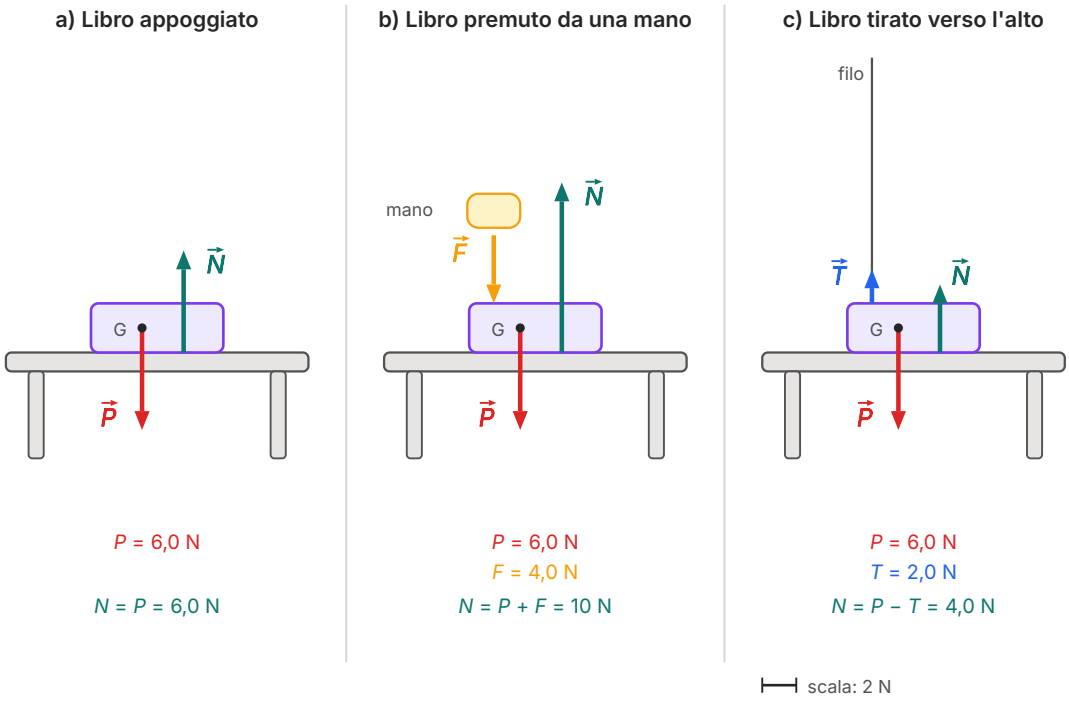


Figura 8.1 Reazione normale di un tavolo su un libro di peso 6,0 N, sempre fermo. a) Libro semplicemente appoggiato: $N = P$. b) Una mano preme il libro verso il basso con 4,0 N: il tavolo spinge di più. c) Un filo tira il libro verso l'alto con 2,0 N: il tavolo spinge di meno. Il peso è applicato nel baricentro G; la reazione normale, distribuita su tutta la base del libro, è disegnata spostata di lato per non sovrapporla al peso. Frecce in scala.

ERRORE FREQUENTE

«Il libro preme sul tavolo e il tavolo, per reazione, spinge il libro con una forza uguale: quindi $N = P$.» Questo ragionamento è sbagliato, anche se la conclusione, in questo caso particolare, è giusta.

È un fatto sperimentale che, quando due corpi si toccano, ciascuno spinge l'altro: il libro preme sul tavolo e il tavolo spinge il libro. Ma queste due forze agiscono su *corpi diversi* (una sul tavolo, l'altra sul libro) e non c'entrano con il peso, che è la forza con cui la *Terra* attira il libro. Il motivo per cui $N = P$ è un altro: **il libro è in equilibrio**, quindi le forze che agiscono *sul libro* hanno risultante nulla. La prova è che, se premi il libro con la mano o lo tiri con un filo, N cambia mentre P resta lo stesso. La legge che lega le forze che due corpi si scambiano la studierai il prossimo anno.

ESEMPIO SVOLTO

Una valigia tirata verso l'alto

Problema. Una valigia di massa 5,0 kg è appoggiata sul pavimento. Calcola la reazione normale del pavimento: a) quando la valigia è semplicemente appoggiata; b) quando qualcuno la tira verso l'alto per la maniglia con una forza verticale di 20 N, senza riuscire a sollevarla; c) quando un bambino ci si appoggia sopra con una forza verticale di 15 N.

Soluzione. Il peso è $P = m\,g = 5{,}0\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 49\ \text{N}$. Scegliamo come positivo il verso verso l'alto; in tutti e tre i casi la valigia è ferma, quindi la somma delle forze verticali è zero.

a) $N - P = 0$, da cui $N = 49$ N.
b) $N + 20\ \text{N} - P = 0$, da cui $N = 49\ \text{N} - 20\ \text{N} = 29$ N.
c) $N - 15\ \text{N} - P = 0$, da cui $N = 49\ \text{N} + 15\ \text{N} = 64$ N.

Controllo. Il peso è sempre 49 N; cambia solo la reazione del pavimento, che compensa le altre forze verticali. Nel caso b), se la forza verso l'alto superasse 49 N, N dovrebbe diventare negativa, cosa impossibile: la valigia si solleverebbe.

8.2 Fili, funi e cerniere

8.2.1 La tensione

Un lampadario appeso al soffitto, un secchio calato in un pozzo, un'auto rimorchiata: in tutti questi casi il vincolo è un filo, una fune o una catena. Un filo teso esercita sul corpo a cui è attaccato una forza diretta lungo il filo stesso, con verso che va dal corpo verso il filo. Questa forza si chiama **tensione** e si indica con $\boldsymbol{T}$. Un filo, a differenza di un'asta rigida, può soltanto *tirare*: provare a spingere un corpo con una corda è inutile, perché la corda si affloscia.

Anche la tensione è una reazione vincolare, e anche lei si adatta. Se appendiamo una lampada di peso 25 N a un filo e la lampada è ferma (figura 8.2a), sulla lampada agiscono solo il peso e la tensione; l'equilibrio richiede che le due forze abbiano risultante nulla, quindi $T = P = 25$ N. Se allo stesso filo appendiamo un oggetto di 40 N, la tensione diventa 40 N. Naturalmente ogni filo reale ha un carico di rottura: se la tensione richiesta lo supera, il filo si spezza.

8.2.2 Il filo ideale

Nei problemi useremo un modello semplificato, il **filo ideale**: un filo **inestensibile** (non si allunga sotto sforzo) e di **massa trascurabile** rispetto ai corpi che collega. Queste due idealizzazioni hanno una conseguenza molto comoda: in un filo ideale teso la tensione ha lo stesso valore in tutti i punti. Il filo si limita a «trasmettere» la forza da un estremo all'altro. Se inserissimo un dinamometro in un punto qualsiasi del filo che regge la lampada, leggeremmo sempre 25 N.

Il modello funziona bene quando il filo pesa molto meno del corpo appeso e si allunga pochissimo: una cordicella che regge un secchio d'acqua, un cavo d'acciaio che regge una cabina. Funziona male per una catena pesante appesa per un estremo, la cui tensione è più grande in alto, dove deve reggere anche il peso di tutta la catena sottostante.

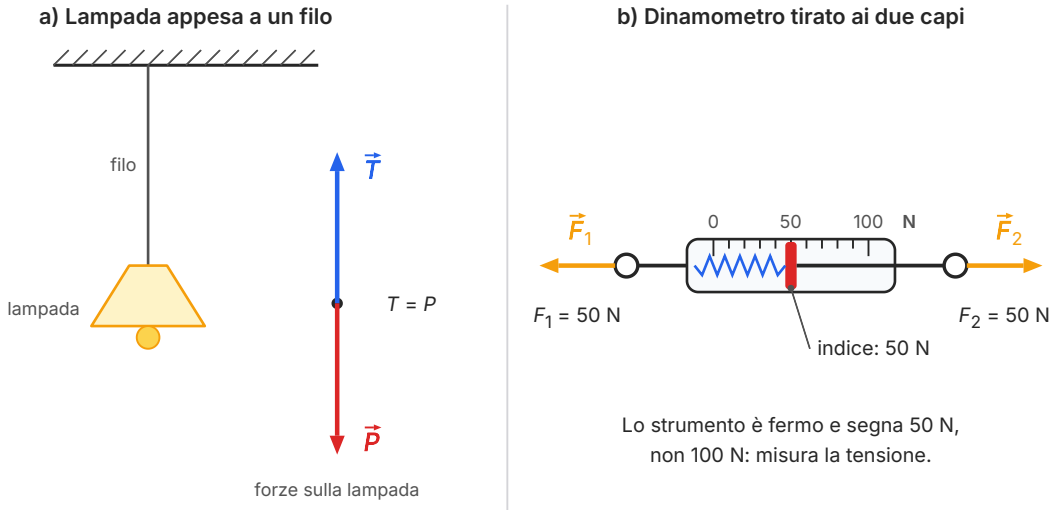


Figura 8.2 a) Sulla lampada ferma agiscono il peso e la tensione del filo, uguali in modulo (a destra le due forze sono disegnate applicate a un punto). b) Un dinamometro tirato ai due estremi con 50 N ciascuno segna 50 N: misura la tensione, non la somma delle due forze.

ERRORE FREQUENTE

Due ragazzi tirano le estremità di un dinamometro, ciascuno con una forza di 50 N, in versi opposti (figura 8.2b). Quanto segna lo strumento? Molti rispondono 100 N, sommando le due forze, oppure 0 N, perché le forze «si annullano». La risposta giusta è 50 N.

Pensa al dinamometro appeso al soffitto con un corpo di 50 N attaccato al gancio: segna 50 N, e il soffitto tira l'altro estremo con 50 N verso l'alto. Il dinamometro non sa se dall'altra parte c'è un soffitto o la mano di un ragazzo: in entrambi i casi è tirato con 50 N a ciascun estremo e misura la *tensione*, cioè la forza applicata a un suo capo. La risultante delle forze sul dinamometro, invece, è davvero zero: per questo resta fermo. Nel tiro alla fune, se le due squadre tirano con 300 N ciascuna e la fune è ferma, la tensione è 300 N, non 600 N.

8.2.3 Cerniere e altri vincoli

Una porta è vincolata al telaio dai cardini; l'asta di una bilancia ruota attorno a un perno; le forbici ruotano attorno a una vite. Un vincolo di questo tipo, che fissa un punto di un corpo lasciandolo libero di ruotare attorno a esso, si chiama **cerniera**. La reazione di una cerniera è più complicata da descrivere di quella di un piano o di un filo, perché può avere qualsiasi direzio-

ne: dipende da tutte le altre forze che agiscono sul corpo. Ce ne occuperemo nel capitolo 10, quando studieremo i corpi che possono ruotare.

La tabella 8.1 riassume le caratteristiche dei vincoli che abbiamo incontrato.

Tabella 8.1 I vincoli più comuni e le loro reazioni.

Vincolo	Che cosa impedisce	Reazione vincolare	Direzione e verso
piano liscio	di attraversare la superficie	forza normale $\boldsymbol{N}$	perpendicolare al piano, uscente da esso; può solo spingere
piano scabro	di attraversare la superficie e, entro un limite, di strisciare	forza normale e forza d'attrito	normale: come sopra; attrito: parallelo al piano
filo ideale	di allontanarsi dal punto di sospensione più della lunghezza del filo	tensione $\boldsymbol{T}$	lungo il filo, dal corpo verso il filo; può solo tirare
cerniera	al punto vincolato di spostarsi	forza del perno	qualsiasi, dipende dalle altre forze (capitolo 10)

DA RICORDARE

Peso e forza elastica hanno un valore dato da una legge: $P = m\,g$, $F = k\,\Delta x$. Le reazioni vincolari no: la reazione normale e la tensione assumono il valore necessario a impedire il movimento vietato dal vincolo. Per trovarle si scrive la condizione di equilibrio del corpo, cioè che la risultante di *tutte* le forze che agiscono su di esso è zero. Un piano può solo spingere, un filo può solo tirare.

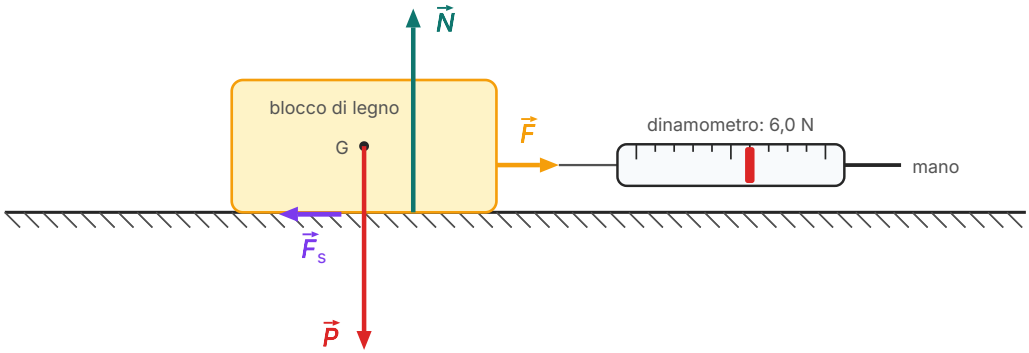
8.3 L'attrito radente statico

8.3.1 Un esperimento con un dinamometro

Mettiamo un blocco di legno di massa 2,0 kg su un tavolo orizzontale e agganciamolo a un dinamometro, che tiriamo orizzontalmente, aumentando la forza poco alla volta (figura 8.3). Finché il dinamometro segna 1 N, 2 N, 5 N, 8 N... il blocco resta fermo. A un certo punto, quando la forza raggiunge circa 9,8 N, il blocco «si stacca» bruscamente e comincia a scivolare.

Ragioniamo come nel paragrafo 8.1. Finché il blocco resta fermo, la risultante delle forze che agiscono su di esso è zero. In verticale il peso è equilibrato dalla reazione normale. In orizzontale, però, c'è la forza $\boldsymbol{F}$ del dinamometro: deve esserci un'altra forza orizzontale, uguale e opposta, che la equilibra. È la forza che il tavolo esercita sul blocco parallelamente alla superficie di contatto, e si chiama **forza d'attrito**. Quando le due superfici a contatto sono ferme l'una rispetto all'altra, si parla di **attrito radente statico**, e la forza si indica con $\boldsymbol{F}_s$. L'aggettivo «raden-

te» ricorda che si tratta dell'attrito fra superfici che strisciano, o tendono a strisciare, l'una sull'altra.



Valori: $P = N = 19{,}6$ N; $F = F_s = 6{,}0$ N (frecce in scala).

Figura 8.3 Un blocco di legno di massa 2,0 kg, tirato orizzontalmente con un dinamometro che segna 6,0 N, resta fermo: l'attrito statico $\boldsymbol{F}_s$, parallelo alla superficie di contatto, equilibra la forza applicata $\boldsymbol{F}$, e la reazione normale $\boldsymbol{N}$ equilibra il peso $\boldsymbol{P}$ ($\boldsymbol{N}$ è disegnata spostata di lato).

L'esperimento mostra due proprietà dell'attrito statico.

- Ha sempre verso opposto a quello in cui il corpo tenderebbe a muoversi, e un valore che **si adatta** alla forza applicata: se il dinamometro segna 3,0 N, l'attrito vale 3,0 N; se segna 6,0 N, l'attrito vale 6,0 N. Se non tiri affatto, l'attrito statico è zero. In questo senso l'attrito statico è anch'esso una reazione vincolare.
- Ha un **valore massimo**, che indicheremo con $F_{s,max}$. Quando la forza applicata lo supera, l'attrito non riesce più a equilibrarla e il blocco si mette in moto. Nel nostro esperimento $F_{s,max} \approx 9{,}8$ N.

8.3.2 La forza premente

Da che cosa dipende il valore massimo dell'attrito statico? Ripetiamo l'esperimento mettendo sul blocco un secondo blocco identico, poi un terzo. Troviamo che $F_{s,max}$ raddoppia e poi triplica. Se poi, anziché caricarlo, premiamo il blocco contro il tavolo con la mano, $F_{s,max}$ aumenta di nuovo. Ciò che conta, dunque, è quanto il blocco è premuto contro la superficie.

Si chiama **forza premente**, e si indica con $F_\perp$, il modulo della forza con cui un corpo è premuto perpendicolarmente contro la superficie su cui poggia. Come abbiamo osservato nel paragrafo 8.1, il corpo che preme e la superficie che lo sostiene si spingono a vicenda; l'esperienza mostra che queste due spinte hanno lo stesso modulo (la legge generale la studierai il prossimo anno). Per questo la forza premente ha lo stesso modulo della reazione normale: $F_\perp = N$. Nel caso più semplice, un corpo appoggiato su un piano orizzontale senza altre forze verticali, la

forza premente è uguale al peso: $F_\perp = P = m\,g$. Ma, come abbiamo visto con la valigia, basta una spinta o una trazione verticale perché le due grandezze siano diverse; ne vedremo un esempio importante nel paragrafo 8.4.

8.3.3 La legge dell'attrito statico

Le misure mostrano che, per una data coppia di superfici, il valore massimo dell'attrito statico è direttamente proporzionale alla forza premente. Chiamiamo **coefficiente di attrito statico**, e indichiamo con μ_s (si legge «mi esse»), la costante di proporzionalità. L'attrito statico può assumere qualsiasi valore compreso fra zero e questo massimo:

$$F_s \le F_{s,\max} = \mu_s F_\perp$$

Nel nostro esperimento il blocco di 2,0 kg ha $F_\perp = 2{,}0\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 19{,}6\ \text{N}$ e si stacca a 9,8 N: dunque $\mu_s = 9{,}8\ \text{N} / 19{,}6\ \text{N} = 0{,}50$. Poiché è il rapporto fra due forze, il coefficiente di attrito è un **numero puro**, senza unità di misura. Non dipende dal corpo nel suo insieme ma dalla **coppia di superfici** a contatto: dal loro materiale, da quanto sono levigate, dalla presenza di acqua, olio, polvere. Per questo le tabelle ne danno solo valori indicativi (tabella 8.2).

Tabella 8.2 Coefficienti di attrito per alcune coppie di superfici. Valori indicativi: dipendono dallo stato delle superfici e possono variare molto da un caso all'altro.

Superfici a contatto	μ_s	μ_d
gomma su asfalto asciutto	0,6–1,0	0,5–0,8
gomma su asfalto bagnato	0,3–0,6	0,25–0,5
legno su legno	0,25–0,5	0,2–0,4
acciaio su acciaio, asciutto	circa 0,7	circa 0,6
acciaio su acciaio, lubrificato	circa 0,1	circa 0,05
vetro su vetro	circa 0,9	circa 0,4
teflon su teflon	circa 0,04	circa 0,04
pattino d'acciaio su ghiaccio	circa 0,03	circa 0,01
articolazione umana (cartilagine con liquido sinoviale)	circa 0,01	circa 0,003

ERRORE FREQUENTE

Scrivere $F_s = \mu_s F_\perp$ per qualsiasi corpo fermo è un errore comune. Il prodotto $\mu_s F_\perp$ è il valore *massimo* dell'attrito statico, raggiunto solo quando il corpo è sul punto di mettersi in moto (situazione di *distacco imminente*). Un armadio che nessuno spinge ha attrito statico zero, non $\mu_s F_\perp$: se fosse altrimenti, l'attrito lo farebbe partire da solo! Per un corpo fermo, l'attrito statico si trova dall'equilibrio, come ogni reazione vincolare; la legge serve solo a controllare che non superi il suo massimo.

8.3.4 L'area di contatto non conta (quasi)

Un risultato sorprendente è che l'attrito radente dipende pochissimo dall'area della superficie di contatto. Un mattone appoggiato sulla faccia più grande o su quella più piccola richiede, per essere messo in moto, quasi la stessa forza. Per capire perché, bisogna guardare le superfici «al microscopio».

Anche una superficie che al tatto sembra liscia è, a scala microscopica, piena di rilievi e avvallamenti (figura 8.4). Quando due corpi si appoggiano l'uno sull'altro, si toccano soltanto nei punti in cui le sporgenze dell'uno incontrano quelle dell'altro: l'area di contatto reale è una piccola frazione dell'area apparente. In quei punti i materiali si deformano, si incastrano e in parte aderiscono, e queste piccole «saldature» devono essere spezzate o scavalcate perché le superfici scivolino. Se il corpo è premuto di più, le sporgenze si schiacciano e l'area di contatto reale cresce, in proporzione alla forza premente: ecco perché l'attrito è proporzionale a $F_\perp$. Se invece, a parità di peso, si allarga l'area apparente, il peso si distribuisce su più sporgenze ma ciascuna è premuta di meno, e l'area di contatto reale resta circa la stessa: ecco perché l'area apparente conta poco.

Questo modello spiega bene le leggi dell'attrito in molte situazioni comuni, ma è appunto un modello: per superfici molto levigate e pulite, per materiali morbidi come la gomma o per superfici bagnate le cose sono più complicate, e la legge $F_{s,\max} = \mu_s F_\perp$ diventa solo un'approssimazione. Le leggi dell'attrito sono infatti leggi *empiriche*: riassumono i risultati delle misure senza derivare da un principio generale, e valgono entro un dominio limitato, come abbiamo detto nel capitolo 1 per ogni legge fisica.

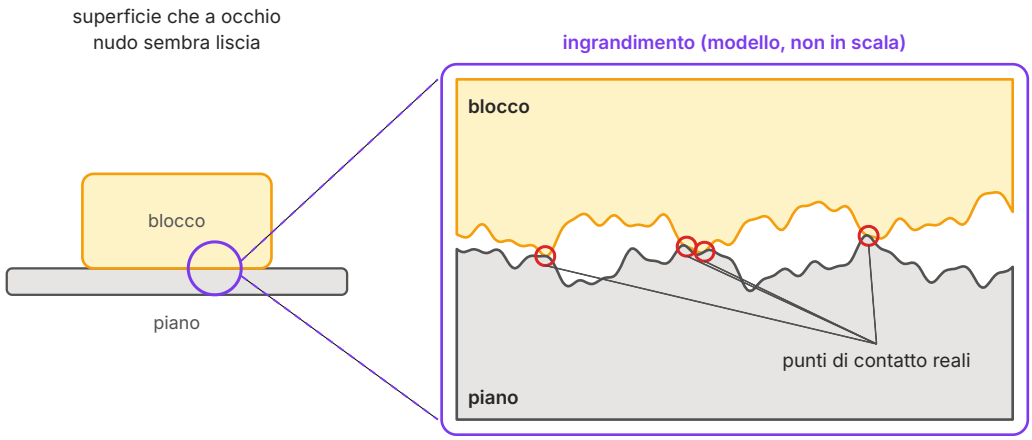


Figura 8.4 Modello microscopico del contatto fra due superfici. Anche superfici che sembrano lisce sono irregolari: si toccano solo in pochi punti (cerchietti), e l'area di contatto reale è una piccola parte di quella apparente. Il disegno è schematico e non in scala.

APPROFONDIMENTO

Da Leonardo a Coulomb

Le prime osservazioni sistematiche sull'attrito che conosciamo si trovano nei quaderni di Leonardo da Vinci, che studiò lo strisciamento di blocchi su piani e annotò che la resistenza dipende dal peso del blocco e non dall'estensione della superficie di appoggio. Quei manoscritti, però, rimasero a lungo inediti e non influirono sugli studi successivi.

Le stesse regole furono riscoperte alla fine del Seicento dal fisico francese Guillaume Amontons, che le presentò all'Accademia delle Scienze di Parigi suscitando lo stupore di molti colleghi, convinti che una superficie più grande dovesse «attaccarsi» di più. Alla fine del Settecento Charles-Augustin de Coulomb, lo stesso scienziato che darà il nome all'unità di carica elettrica, ripeté gli esperimenti con grande cura e distinse chiaramente l'attrito di primo distacco (statico) da quello durante lo strisciamento (dinamico). Per questo le leggi dell'attrito radente sono spesso chiamate *leggi di Amontons-Coulomb*.

8.4 L'attrito radente dinamico

8.4.1 Quando il corpo scivola

Torniamo al blocco dell'esperimento. Dopo il distacco, mentre il blocco striscia sul tavolo, il tavolo continua a esercitare una forza parallela alla superficie, opposta al verso in cui il blocco scivola rispetto al tavolo. È l'**attrito radente dinamico**, che indichiamo con $\boldsymbol{F}_{\mathrm{d}}$. Le misure mo-

strano che anche il suo modulo è proporzionale alla forza premente, con un'altra costante, il **coefficiente di attrito dinamico** μ_d:

$$F_d = \mu_d F_\perp$$

Questa volta c'è un segno di uguale: finché il corpo scivola, l'attrito dinamico ha questo valore, qualunque sia la forza applicata. Con buona approssimazione non dipende né dall'area di contatto né, per le velocità comuni, dalla velocità di strisciamento. Come μ_s, anche μ_d è un numero puro e dipende dalla coppia di superfici.

Per quasi tutte le coppie di superfici **μ_d è minore di μ_s** (tabella 8.2). Lo sa chiunque abbia spostato un armadio: per smuoverlo bisogna spingere con forza, ma una volta partito si riesce a farlo scivolare con una spinta minore. Nel nostro blocco di 2,0 kg si misura un attrito dinamico di circa 6,9 N, da cui $\mu_d = 6{,}9\ \text{N} / 19{,}6\ \text{N} \approx 0{,}35$.

Che cosa succede al blocco se la forza applicata è maggiore dell'attrito dinamico? La risultante delle forze non è più nulla e il blocco, invece di scivolare sempre con la stessa velocità, accelera. Come si muove un corpo soggetto a una risultante diversa da zero lo studierai il prossimo anno; per ora ci basta sapere quanto vale l'attrito.

8.4.2 Il grafico dell'attrito

Il grafico della figura 8.5 riassume tutto ciò che abbiamo detto sull'attrito radente. Sull'asse orizzontale c'è la forza F applicata dal dinamometro, su quello verticale il modulo della forza d'attrito. Finché il blocco è fermo l'attrito statico è uguale alla forza applicata, e il grafico è un tratto di retta per l'origine con pendenza 1 ($F_s = F$). Il tratto termina al valore massimo $\mu_s F_\perp$. Superato il distacco l'attrito scende bruscamente al valore $\mu_d F_\perp$ e rimane costante: il grafico diventa un segmento orizzontale.

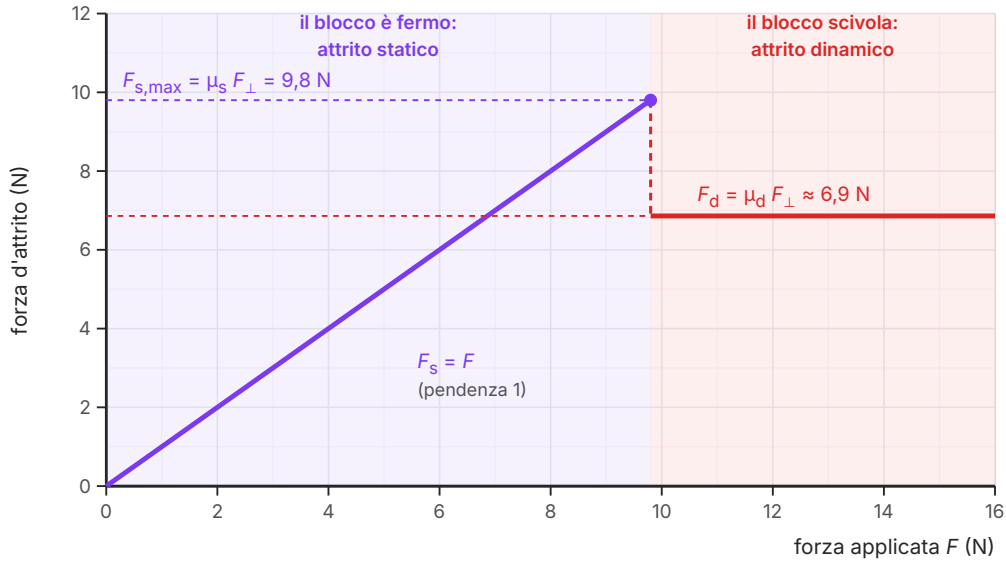


Figura 8.5 Modulo della forza d'attrito su un blocco di massa 2,0 kg ($F_\perp$ = 19,6 N, μ_s = 0,50, μ_d = 0,35) in funzione della forza orizzontale applicata, che cresce lentamente. Finché il blocco è fermo l'attrito statico è uguale alla forza applicata; al distacco (9,8 N) l'attrito scende al valore costante dell'attrito dinamico.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere i coefficienti dal grafico

Problema. Il grafico della figura 8.5 è stato ottenuto con un blocco di massa 2,0 kg su un piano orizzontale, tirato orizzontalmente. a) Ricava dal grafico μ_s e μ_d. b) Quanto vale l'attrito quando la forza applicata è 4,0 N? c) Che cosa cambierebbe nel grafico se il blocco avesse massa 4,0 kg?

Soluzione. a) La forza premente è il peso: $F_\perp$ = 2,0 kg × 9,8 N/kg = 19,6 N. Dal grafico il massimo dell'attrito statico è 9,8 N e l'attrito dinamico è circa 6,9 N. Quindi

$$\mu_s = \frac{9{,}8\ \text{N}}{19{,}6\ \text{N}} = 0{,}50 \qquad \mu_d = \frac{6{,}9\ \text{N}}{19{,}6\ \text{N}} \approx 0{,}35$$

b) Con 4,0 N il blocco è nella zona dell'attrito statico (4,0 N < 9,8 N): resta fermo e l'attrito vale 4,0 N, opposto alla forza applicata. *Non* vale 9,8 N.

c) I coefficienti dipendono solo dalle superfici, quindi non cambiano. La forza premente raddoppia (39,2 N), e con essa raddoppiano entrambi i valori limite: il tratto inclinato arriverebbe fino a 19,6 N e il tratto orizzontale sarebbe a circa 13,7 N. La pendenza del tratto inclinato resta 1.

8.4.3 Forze inclinate: quando la forza premente non è il peso

Chi trascina una slitta lo fa di solito con una fune inclinata verso l'alto; chi spinge un tagliaerba o un carrello lo fa con un manico inclinato verso il basso. Le due situazioni sono meno simili di quanto sembri, perché la forza applicata ha anche una componente verticale, che cambia la forza premente.

Consideriamo una slitta di massa 20 kg (P = 196 N) su neve orizzontale e una forza di 60 N inclinata di 30° rispetto all'orizzontale (figura 8.6). Con gli strumenti del capitolo 6 scomponiamo la forza:

$$F_x = F\cos 30° = 60\ \text{N} \times 0{,}866 \approx 52\ \text{N} \qquad F_y = F\,\text{sen}\,30° = 60\ \text{N} \times 0{,}500 = 30\ \text{N}$$

Se la fune tira verso l'alto (figura 8.6a), la componente verticale «alleggerisce» la slitta: in verticale la slitta è in equilibrio, quindi $N + F_y = P$ e la forza premente vale $F_\perp = N$ = 196 N − 30 N = 166 N. Se invece il manico spinge verso il basso (figura 8.6b), la componente verticale si aggiunge al peso: $F_\perp$ = 196 N + 30 N = 226 N. Poiché l'attrito massimo è proporzionale alla forza premente, nel primo caso è circa il 73% del secondo (166/226 ≈ 0,73). A parità di forza, tirare verso l'alto conviene: per questo le slitte e i carrelli pesanti si trainano anziché spingerli.

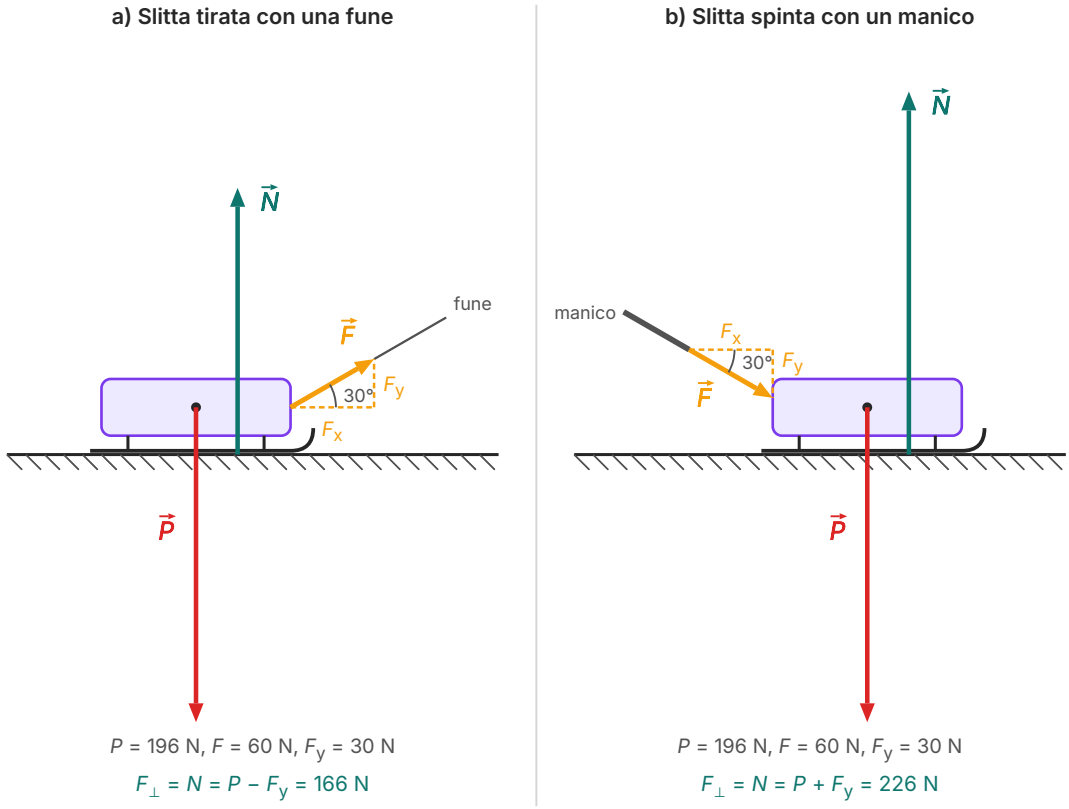


Figura 8.6 Slitta di massa 20 kg (P = 196 N) su un piano orizzontale, con una forza $\vec{F}$ di 60 N inclinata di 30°. a) Tirata verso l'alto con una fune, la slitta preme meno sulla neve. b) Spinta verso il basso con un manico, preme di più. Le componenti $F_x \approx 52$ N e $F_y = 30$ N sono tratteggiate; $\vec{N}$ è disegnata spostata di lato. Frecce in scala.

ESEMPIO SVOLTO

Spostare una cassa

Problema. Una cassa di massa 30 kg è ferma su un pavimento orizzontale. I coefficienti di attrito fra cassa e pavimento sono $\mu_s = 0{,}40$ e $\mu_d = 0{,}30$. a) Quale forza orizzontale minima serve per smuovere la cassa? b) Quanto vale l'attrito se la si spinge orizzontalmente con 100 N? c) E se la si spinge con 150 N?

Soluzione. Il pavimento è orizzontale e le forze applicate sono orizzontali, quindi la forza premente è il peso: $F_\perp = 30\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 294\ \text{N}$.

a) La cassa parte quando la spinta supera il massimo dell'attrito statico: $F_{s,\max} = \mu_s F_\perp = 0{,}40 \times 294\ \text{N} \approx 118\ \text{N}$, cioè $1{,}2 \times 10^2$ N con due cifre significative.

b) 100 N è meno di 118 N: la cassa resta ferma. L'attrito statico equilibra la spinta: $F_s = 100$ N, con verso opposto alla spinta.

c) 150 N supera 118 N: la cassa si mette in moto e l'attrito diventa dinamico: $F_d = \mu_d F_\perp = 0{,}30 \times 294\ \text{N} \approx 88\ \text{N}$. Le forze orizzontali non si equilibrano più (150 N contro 88 N) e la cassa accelera.

Controllo. I due coefficienti sono numeri puri, quindi i risultati sono forze in newton; l'attrito dinamico (88 N) è minore del massimo statico (118 N), come atteso.

IN SINTESI

Reazione normale di un piano orizzontale su un corpo fermo, con sole forze verticali: $N = P$ + (spinte verso il basso) − (trazioni verso l'alto). Si ricava dall'equilibrio, non è un dato.

Tensione di un filo ideale che regge un corpo fermo: $T = P$; in un filo ideale è uguale in ogni punto.

Forza premente: $F_\perp = N$; vale $m\,g$ solo su un piano orizzontale senza altre forze verticali.

Attrito statico: $F_s \le \mu_s F_\perp$ — il corpo resta fermo finché la forza che tende a muoverlo non supera $\mu_s F_\perp$; prima di allora l'attrito è uguale e opposto a quella forza.

Attrito dinamico: $F_d = \mu_d F_\perp$ — durante lo strisciamento l'attrito ha questo valore fisso, opposto allo scivolamento; di solito $\mu_d < \mu_s$. I coefficienti sono numeri puri e dipendono dalla coppia di superfici.

8.5 Attrito volvente e attrito viscoso

8.5.1 L'attrito volvente

La ruota è una delle invenzioni più antiche dell'umanità, e il motivo è proprio l'attrito. Una cassa pesante trascinata sul pavimento richiede una grande forza; la stessa cassa caricata su un

carrello con le ruote si sposta con una spinta molto più piccola (figura 8.7). Quando un corpo *rotola* su una superficie invece di strisciare, la resistenza che incontra si chiama **attrito volvente**.

L'attrito volvente nasce dal fatto che né la ruota né il terreno sono perfettamente rigidi. La ruota si schiaccia un poco nella zona di contatto, e anche il terreno cede, formando un piccolissimo «avvallamento» da cui la ruota deve continuamente risalire mentre avanza. Per questo l'attrito volvente è grande per una ruota sgonfia o su un terreno morbido, come la sabbia, ed è piccolissimo per una ruota d'acciaio su un binario d'acciaio. In condizioni normali l'attrito volvente è molto più piccolo di quello radente, spesso decine di volte. Su questa differenza si basano, oltre alle ruote, i *cuscinetti a sfere*, che sostituiscono lo strisciamento di un perno nel suo alloggiamento con il rotolamento di tante piccole sfere.

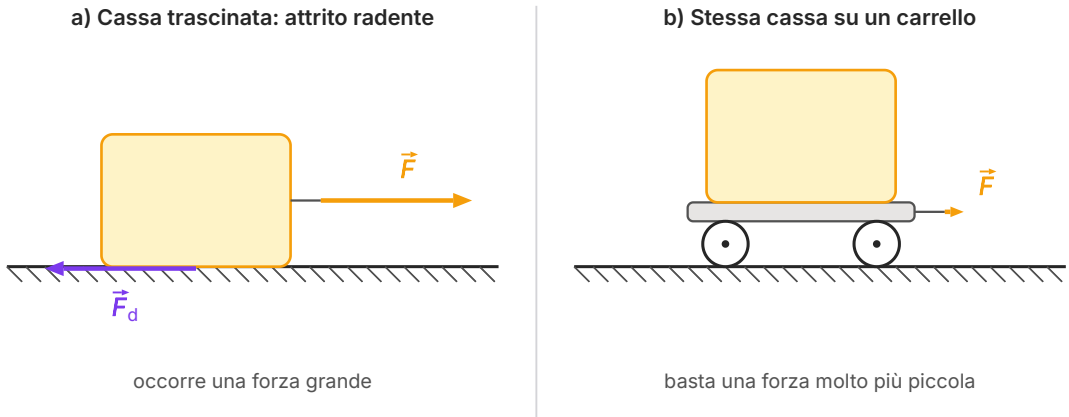


Figura 8.7 a) Una cassa trascinata sul pavimento incontra l'attrito radente. b) La stessa cassa su un carrello con le ruote incontra solo l'attrito volvente, molto più piccolo: basta una forza molto minore per spostarla.

8.5.2 L'attrito viscoso

Un corpo che si muove dentro un fluido, cioè in un liquido o in un gas, incontra una resistenza che si chiama **attrito viscoso**. Lo senti quando cammini con l'acqua alle ginocchia, quando metti la mano fuori dal finestrino di un'auto in corsa, quando un cucchiaio affonda lentamente nel miele. L'attrito viscoso dovuto all'aria si chiama comunemente **resistenza dell'aria**.

L'attrito viscoso è molto diverso da quello radente:

- è nullo quando il corpo è fermo rispetto al fluido, e **cresce con la velocità**: a velocità basse cresce all'incirca in proporzione alla velocità, a velocità più elevate cresce più rapidamente;
- dipende dalla **forma** e dalle **dimensioni** del corpo: le forme affusolate (dette aerodinamiche o idrodinamiche), come quelle di un pesce, di un'auto da corsa o di un aereo, sono studiate per ridurlo; un paracadute aperto è progettato per aumentarlo;

- dipende dal **fluido**: nell'acqua è molto più grande che nell'aria, nel miele più grande che nell'acqua.

È l'attrito viscoso dell'aria che fa cadere una piuma molto più lentamente di un sasso. Nel capitolo 16 vedremo che, se l'aria non ci fosse, i due oggetti cadrebbero nello stesso modo.

COLLEGAMENTI

Attrito: nemico o alleato?

Nella vita quotidiana l'attrito è spesso considerato un fastidio, ma senza di esso non potremmo fare quasi nulla. Quando camminiamo, il piede tende a scivolare all'indietro sul pavimento, e l'attrito statico che il pavimento esercita sulla suola è diretto in avanti: è questa forza che ci permette di avanzare. Su una lastra di ghiaccio, dove μ_s è piccolissimo, si scivola. Grazie all'attrito i chiodi restano piantati nel legno, i nodi non si sciolgono, i freni funzionano. Su asfalto bagnato il coefficiente di attrito degli pneumatici si riduce (tabella 8.2) e lo spazio di frenata si allunga: per questo il battistrada è scolpito, così da allontanare l'acqua dalla zona di contatto.

D'altra parte, l'attrito consuma le parti meccaniche che strisciano fra loro e le riscalda: lo verifichi strofinando con forza le mani. Nei motori si usano olî lubrificanti, che separano le superfici metalliche con un sottile strato di liquido e sostituiscono l'attrito radente con un attrito viscoso molto più piccolo. Il nostro corpo usa la stessa soluzione: nelle articolazioni le cartilagini sono bagnate dal liquido sinoviale, e il coefficiente di attrito è fra i più bassi che si conoscano (tabella 8.2). Una sostanza che riduce l'attrito fra due superfici si chiama **lubrificante**.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: misurare il coefficiente di attrito statico

Materiali. Un blocco di legno con un gancio (circa 200 g), tre masse da 200 g, un dinamometro con portata 5 N e sensibilità 0,05 N, una bilancia, un'asse di legno lunga almeno 60 cm, un righello o un metro.

Procedura (metodo del dinamometro). 1) Misura con la bilancia la massa del blocco. 2) Appoggia il blocco sull'asse orizzontale, aggancia il dinamometro e tira orizzontalmente, aumentando la forza lentamente e senza strappi; annota la lettura nell'istante in cui il blocco si stacca. 3) Ripeti la misura cinque volte e calcola il valore medio. 4) Aggiungi una massa sopra il blocco e ripeti; continua fino a tre masse aggiunte. 5) Per ogni carico calcola $F_\perp = m\,g$ e il rapporto $F_{s,max}/F_\perp$.

Tabella 8.3 Dati tipici di una misura (valori medi di cinque prove).

Massa totale (kg)	$F_\perp$ (N)	$F_{s,max}$ (N)	$F_{s,max} / F_\perp$
0,200	1,96	0,82	0,42
0,400	3,92	1,66	0,42
0,600	5,88	2,44	0,41
0,800	7,84	3,30	0,42

Che cosa concludere. Il rapporto è costante entro le incertezze: $F_{s,max}$ è direttamente proporzionale a $F_\perp$. Riportando i dati in un grafico ($F_\perp$ sull'asse x, $F_{s,max}$ sull'asse y) si ottiene una retta per l'origine, la cui pendenza è $\mu_s \approx 0{,}42$. Se tiri il blocco in modo che scorra lentamente e con velocità costante, il dinamometro misura invece l'attrito dinamico, e troverai valori più piccoli: che sia così lo capirai bene il prossimo anno.

Una verifica con il piano inclinato. Appoggia il blocco sull'asse e solleva lentamente un estremo, finché il blocco comincia a scivolare. Misura l'altezza h dell'estremo sollevato e la distanza orizzontale b fra i due estremi. Nel capitolo 9 dimostreremo che al distacco vale $\mu_s = h/b$; per esempio, con $b = 40{,}0$ cm e $h = 16{,}8$ cm si ottiene 0,420, in accordo con il metodo del dinamometro.

Sicurezza. Non sollevare l'asse oltre un'inclinazione moderata e tieni le mani lontane dalla traiettoria del blocco e delle masse.

Per la relazione. Presenta i due metodi uno dopo l'altro, ciascuno con la sua tabella e il suo risultato con l'incertezza (per il dinamometro: valore medio e semidispersione massima delle cinque prove). Nelle conclusioni confronta i due valori di μ_s: se non sono compatibili, cerca una causa concreta, per esempio una zona dell'asse più liscia o una trazione non del tutto orizzontale.

Con il peso, la forza elastica, le reazioni vincolari e l'attrito abbiamo ora tutti i «personaggi» che servono per studiare l'equilibrio. Nel prossimo capitolo li metteremo insieme per capire quando un corpo resta fermo: appeso a più fili, appoggiato su un piano inclinato, trattenuto dall'attrito.

SINTESI

- Un vincolo limita i movimenti di un corpo esercitando su di esso una forza, la reazione vincolare, che si adatta alle altre forze applicate.
- Un piano esercita una reazione normale $\boldsymbol{N}$, perpendicolare alla superficie e diretta verso l'esterno; un piano può solo spingere.
- Per un corpo fermo su un piano orizzontale, senza altre forze verticali, $N = P$ perché il corpo è in equilibrio, non «per azione e reazione»; spinte o trazioni verticali cambiano N.
- Un filo teso esercita una tensione diretta lungo il filo; un filo può solo tirare. In un filo ideale (inestensibile, di massa trascurabile) la tensione è la stessa in tutti i punti.
- La cerniera fissa un punto di un corpo e gli permette di ruotare; la sua reazione può avere qualsiasi direzione.
- La forza premente $F_\perp$ è la forza con cui il corpo preme perpendicolarmente sulla superficie; è uguale a N e coincide con il peso solo in un caso particolare.
- L'attrito radente statico è uguale e opposto alla forza che tende a muovere il corpo, fino al valore massimo $\mu_s F_\perp$.
- L'attrito radente dinamico vale $\mu_d F_\perp$, è opposto allo strisciamento e di solito è minore del massimo statico.
- I coefficienti di attrito sono numeri puri, dipendono dalla coppia di superfici e, in prima approssimazione, non dall'area di contatto apparente.
- L'attrito volvente, che si oppone al rotolamento, è di solito molto più piccolo di quello radente; l'attrito viscoso, nei fluidi, cresce con la velocità e dipende dalla forma del corpo.
- L'attrito è indispensabile per camminare, frenare e tenere insieme gli oggetti, ma consuma e riscalda le parti in movimento; i lubrificanti lo riducono.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● La reazione vincolare di un piano liscio su un corpo appoggiato è:

   A. parallela al piano
   B. sempre uguale al peso del corpo
   C. perpendicolare al piano e uscente da esso
   D. diretta sempre verso il basso

2. ● Un libro di peso 6,0 N è fermo su un tavolo orizzontale e nessun'altra forza agisce su di esso. La reazione normale del tavolo è:

   A. 6,0 N verso l'alto
   B. 6,0 N verso il basso
   C. 12 N verso l'alto
   D. zero, perché il libro è fermo

3. ● Un filo ideale è:

   A. elastico e di massa trascurabile
   B. inestensibile e di massa trascurabile
   C. rigido, e quindi capace anche di spingere
   D. inestensibile e molto pesante

4. ●● Una cassa ferma sul pavimento è spinta orizzontalmente con una forza di 40 N e non si muove. Il prodotto $\mu_s F_\perp$ vale 90 N. L'attrito statico sulla cassa vale:

   A. 90 N
   B. 130 N
   C. 50 N
   D. 40 N

5. ● Il coefficiente di attrito dinamico si misura in:

   A. newton
   B. newton al chilogrammo
   C. nessuna unità: è un numero puro
   D. newton al metro

6. ●● Un blocco scivola su un piano orizzontale. Se si raddoppia la sua massa, a parità di superfici, l'attrito dinamico:

   A. raddoppia
   B. si dimezza
   C. resta lo stesso
   D. quadruplica

7. ● Rispetto all'attrito radente fra le stesse superfici, l'attrito volvente è di solito:

   A. molto più grande
   B. molto più piccolo
   C. uguale
   D. nullo

8. ●● Due ragazzi tirano le estremità di un dinamometro in versi opposti, ciascuno con una forza di 80 N; il dinamometro è fermo. Lo strumento segna:

   A. 0 N
   B. 80 N
   C. 160 N
   D. 40 N

9. ●● Una slitta su un piano orizzontale è tirata con una fune inclinata verso l'alto. La forza premente della slitta sulla neve, rispetto al peso, è:

   A. maggiore
   B. uguale
   C. dipendente dalla velocità della slitta
   D. minore

Vero o falso

10. ● La reazione normale di un tavolo orizzontale su un libro fermo è sempre uguale al peso del libro. V / F

11. ● L'attrito radente statico su un corpo fermo è sempre uguale a $\mu_s F_\perp$. V / F

12. ● Per la maggior parte delle coppie di superfici il coefficiente di attrito dinamico è minore di quello statico. V / F

13. ●● Appoggiando un mattone sulla faccia di area doppia, la forza necessaria per smuoverlo raddoppia. V / F

14. ●● Una fune può tirare un corpo, ma non spingerlo. V / F

Applicare

15. ● Una lampada di massa 1,5 kg pende ferma da un filo ideale. Calcola la tensione del filo.

16. ● Un vaso di massa 3,0 kg è appoggiato su un davanzale orizzontale. Quanto vale la reazione normale del davanzale?

17. ● Una cassa di massa 50 kg è appoggiata su un pavimento orizzontale; il coefficiente di attrito statico è 0,45. Calcola la forza orizzontale minima necessaria per smuoverla.

18. ● Un blocco scivola su un piano orizzontale; la forza premente è 80 N e l'attrito dinamico è 24 N. Calcola μ_d.

19. ●● Completa. Un libro di peso 8,0 N è fermo su un tavolo orizzontale. Se lo premi dall'alto con una forza verticale di 5,0 N, la reazione normale del tavolo vale _____ N; se invece lo tiri verso l'alto con un filo che esercita una tensione di 3,0 N, la reazione normale vale _____ N.

20. ●● Osserva il grafico della figura 8.5. Quanto vale la forza d'attrito quando la forza applicata è 5,0 N? E quando è 12 N? In quale dei due casi il blocco si muove?

21. ●● Un gruppo di studenti misura il massimo dell'attrito statico per un blocco caricato con masse diverse e ottiene i dati della tabella. Stabilisci che tipo di relazione lega le due grandezze, ricava μ_s e prevedi $F_{s,max}$ per $F_\perp = 10{,}0$ N.

$F_\perp$ (N)	2,0	4,0	6,0	8,0
$F_{s,max}$ (N)	1,2	2,4	3,7	4,8

22. ●● Una slitta di massa 12 kg è tirata su un piano orizzontale con una forza di 40 N, inclinata di 30° sopra l'orizzontale. Calcola la forza premente della slitta sul terreno.

Problemi

23. ●● Un armadio di massa 80 kg è fermo sul pavimento; $\mu_s = 0{,}35$ e $\mu_d = 0{,}25$. a) Quale forza orizzontale minima serve per smuoverlo? b) Quanto vale l'attrito mentre l'armadio scivola? c) Se lo spingi orizzontalmente con 250 N, l'armadio parte? Quanto vale l'attrito in questo caso?

24. ●●● Tieni fermo un libro di massa 1,2 kg premendolo contro una parete verticale con una forza orizzontale $\boldsymbol{F}$. Il coefficiente di attrito statico fra libro e parete è 0,40. a) Qual è la forza premente del libro sulla parete? b) Quale forza d'attrito serve per impedire al libro di scivolare verso il basso? c) Qual è il valore minimo di F?

25. ●● Un blocco di massa 0,90 kg è appoggiato su un tavolo orizzontale e tirato orizzontalmente con un dinamometro. Il blocco si stacca quando lo strumento segna 3,5 N; mentre scivola lentamente e in modo regolare, il dinamometro segna 2,6 N. Calcola μ_s e μ_d.

26. ●● Un'automobile di massa 1200 kg frena su una strada orizzontale. Considera come forza premente totale degli pneumatici sull'asfalto il peso dell'auto. a) Calcola la massima forza d'attrito statico su asfalto asciutto ($\mu_s = 0{,}80$) e su asfalto bagnato ($\mu_s = 0{,}40$). b) Di quanto si riduce in percentuale passando dall'asciutto al bagnato? c) Perché i sistemi antibloccaggio (ABS) cercano di non far bloccare le ruote durante una frenata?

27. ●●● Un blocco A di massa 2,0 kg è appoggiato sopra un blocco B di massa 3,0 kg, che poggia su un pavimento orizzontale. a) Calcola la forza premente di A su B. b) Calcola la forza premente di B sul pavimento. c) Il coefficiente di attrito statico fra B e il pavimento è 0,30: quale forza orizzontale minima, applicata a B, mette in moto la coppia di blocchi?

28. ●● Un'asse di legno è sollevata lentamente da un lato; una scatola appoggiata su di essa comincia a scivolare quando l'estremo sollevato si trova a un'altezza $h = 21$ cm, con una distanza orizzontale fra gli estremi $b = 60$ cm. a) Usando la relazione $\mu_s = h/b$, che dimostreremo nel capitolo 9, calcola il coefficiente di attrito statico. b) Riporta l'asse in orizzontale e appoggiaci un blocco dello stesso materiale della scatola, di massa 0,50 kg: quale forza orizzontale minima serve per smuoverlo?

29. ●●● Una slitta con un bambino, di massa complessiva 15 kg, è ferma sulla neve orizzontale; μ_s = 0,30. Un adulto applica una forza di 50 N inclinata di 30° rispetto all'orizzontale. a) Se tira con una fune inclinata verso l'alto, la slitta parte? b) Se invece spinge con un manico inclinato verso il basso, sempre con 50 N a 30°, la slitta parte? Giustifica le risposte con i calcoli.

Ragionare e argomentare

30. ● Spiega perché è più facile camminare su un pavimento asciutto che su un pavimento appena lavato. Che verso ha la forza d'attrito che il pavimento esercita sulla suola mentre fai un passo?

31. ●● Trova l'errore. Un compagno scrive: «Il libro è fermo sul tavolo; per il principio di azione e reazione il tavolo lo spinge verso l'alto con una forza uguale al peso, quindi la reazione normale è sempre uguale al peso». Che cosa c'è di sbagliato? Fai un esempio in cui $N \neq P$.

32. ●●● Progetta un esperimento per verificare che il massimo dell'attrito statico non dipende, in prima approssimazione, dall'area di contatto. Usa un parallelepipedo di legno con facce di area diversa e un dinamometro. Indica le grandezze che misuri, quelle che tieni fisse (variabili controllate) e il risultato che ti aspetti.

33. ●●● Stima l'ordine di grandezza della forza orizzontale necessaria per trascinare sul pavimento un banco di scuola vuoto. Indica i valori che ipotizzi per la massa del banco e per il coefficiente di attrito statico, e giustificali.

PER APPROFONDIRE

- [HEW] P.G. Hewitt, *Conceptual Physics*: i capitoli sulle forze trattano la forza normale e l'attrito con molti esempi quotidiani e pochissime formule.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: il capitolo sulle caratteristiche delle forze discute l'attrito e i limiti delle sue leggi empiriche.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle forze e l'attrito, con esercizi sull'attrito statico e dinamico.

Glossario del capitolo

Attrito radente dinamico
Attrito fra due superfici che strisciano l'una sull'altra; vale $\mu_d F_\perp$ ed è opposto allo strisciamento.

Attrito radente statico
Attrito fra due superfici ferme l'una rispetto all'altra; equilibra la forza applicata fino al valore massimo $\mu_s F_\perp$.

Attrito viscoso
Resistenza che un fluido oppone al moto di un corpo al suo interno; è nulla da fermo, cresce con la velocità e dipende dalla forma del corpo.

Attrito volvente
Resistenza al rotolamento di un corpo su una superficie, dovuta alle piccole deformazioni della ruota e del terreno; di solito molto minore dell'attrito radente.

Cerniera
Vincolo che fissa un punto di un corpo lasciandolo libero di ruotare attorno a esso, come i cardini di una porta.

Coefficiente di attrito dinamico
Numero puro μ_d tale che l'attrito dinamico vale $\mu_d F_\perp$; di solito è minore del coefficiente statico.

Coefficiente di attrito statico
Numero puro μ_s, che dipende dalla coppia di superfici, tale che il massimo dell'attrito statico vale $\mu_s F_\perp$.

Filo ideale
Modello di filo inestensibile e di massa trascurabile; la tensione ha lo stesso valore in tutti i suoi punti.

Forza d'attrito
Forza parallela alla superficie di contatto che si oppone allo strisciamento, o alla tendenza a strisciare, fra due corpi.

Forza premente
Modulo della forza con cui un corpo è premuto perpendicolarmente contro una superficie ($F_\perp$); è uguale alla reazione normale e coincide con il peso solo su un piano orizzontale senza altre forze verticali.

Lubrificante
Sostanza, come un olio, che separa due superfici e riduce l'attrito fra di esse.

Piano liscio
Piano ideale che esercita solo la reazione normale, senza attrito.

Reazione normale
Forza che una superficie esercita su un corpo appoggiato, perpendicolare alla superficie e diretta verso l'esterno; detta anche forza normale e indicata con N.

Reazione vincolare
Forza che un vincolo esercita sul corpo vincolato; il suo valore si adatta alle altre forze applicate e si ricava dalla condizione di equilibrio.

Resistenza dell'aria
Attrito viscoso esercitato dall'aria sui corpi in movimento.

Tensione
Forza esercitata da un filo teso sul corpo a cui è attaccato, diretta lungo il filo; un filo può solo tirare.

Vincolo
Corpo o dispositivo che impedisce a un altro corpo alcuni movimenti, come un piano d'appoggio, un filo, una cerniera o un binario.

Soluzioni

1. C. Un piano liscio esercita solo la reazione normale, perpendicolare alla superficie e diretta verso l'esterno.

2. A. Il libro è in equilibrio: $N = P = 6{,}0$ N, verso l'alto.

3. B. Inestensibile e di massa trascurabile; un filo può solo tirare.

4. D. La cassa è ferma: l'attrito statico equilibra la spinta, 40 N; 90 N è solo il valore massimo possibile.

5. C. È il rapporto fra due forze ($F_d/F_\perp$), quindi un numero puro.

6. A. Su un piano orizzontale $F_\perp = m\,g$ raddoppia, e $F_d = \mu_d\,F_\perp$ raddoppia con essa.

7. B. L'attrito volvente è di solito molto più piccolo (spesso decine di volte) di quello radente.

8. B. Il dinamometro misura la tensione, cioè la forza applicata a un capo: 80 N.

9. D. La componente verticale della forza, verso l'alto, riduce la forza premente: $F_\perp = P - F_y$.

10. F. È uguale al peso solo se nessun'altra forza verticale agisce sul libro; premendolo o tirandolo verso l'alto, N cambia.

11. F. $F_s \le \mu_s\,F_\perp$: l'uguaglianza vale solo al distacco imminente; altrimenti l'attrito è uguale alla forza applicata.

12. V. È ciò che si osserva per quasi tutte le coppie di superfici (tabella 8.2): smuovere un corpo è più faticoso che tenerlo in movimento.

13. F. In prima approssimazione l'attrito radente non dipende dall'area di contatto apparente, ma solo da $F_\perp$ e dalle superfici.

14. V. Se si prova a spingere, il filo si affloscia: la tensione può solo tirare.

15. $T = P = m\,g = 1{,}5$ kg × 9,8 N/kg = 14,7 N ≈ 15 N.

16. $N = P = 3{,}0$ kg × 9,8 N/kg = 29,4 N ≈ 29 N, verso l'alto.

17. $F_\perp = P = 50$ kg × 9,8 N/kg = 490 N; $F_{s,max} = 0{,}45 \times 490$ N ≈ 220 N = $2{,}2 \times 10^2$ N. Serve una forza appena superiore.

18. $\mu_d = F_d/F_\perp = 24$ N / 80 N = 0,30.

19. 13 N ($N = 8{,}0$ N + 5,0 N); 5,0 N ($N = 8{,}0$ N − 3,0 N).

20. Con 5,0 N il blocco è fermo (5,0 N < 9,8 N) e l'attrito statico vale 5,0 N. Con 12 N il blocco scivola e l'attrito è quello dinamico, circa 6,9 N. Il blocco si muove solo nel secondo caso.

21. I rapporti $F_{s,max}/F_\perp$ valgono 0,60; 0,60; 0,62; 0,60: sono costanti entro le incertezze, quindi la relazione è di proporzionalità diretta (retta per l'origine) e $\mu_s \approx 0{,}60$. Previsione: $F_{s,max} = 0{,}60 \times 10{,}0$ N = 6,0 N.

22. $P = 12$ kg × 9,8 N/kg = 117,6 N; $F_y = 40$ N × sen 30° = 20 N verso l'alto; $F_\perp = P - F_y = 97{,}6$ N ≈ 98 N.

23. $F_\perp = 80$ kg × 9,8 N/kg = 784 N. a) $F_{s,max} = 0{,}35 \times 784$ N ≈ 274 N ≈ $2{,}7 \times 10^2$ N. b) $F_d = 0{,}25 \times 784$ N = 196 N ≈ $2{,}0 \times 10^2$ N. c) 250 N < 274 N: l'armadio non parte; l'attrito statico vale 250 N, opposto alla spinta.

24. a) In orizzontale il libro è in equilibrio: la parete lo spinge con $N = F$, quindi $F_\perp = F$ (non il peso!). b) In verticale l'attrito statico, diretto verso l'alto, deve equilibrare il peso: $F_s = m\,g = 1{,}2$ kg × 9,8 N/kg = 11,76 N ≈ 12 N. c) Serve $F_s \le \mu_s\,F$, cioè $F \ge 11{,}76$ N / 0,40 = 29,4 N ≈ 29 N.

25. $F_\perp = 0{,}90$ kg × 9,8 N/kg = 8,82 N. $\mu_s = 3{,}5$ N / 8,82 N ≈ 0,40; $\mu_d = 2{,}6$ N / 8,82 N ≈ 0,29 (durante lo scivolamento regolare il dinamometro misura l'attrito dinamico).

26. $P = 1200$ kg × 9,8 N/kg = 11 760 N. a) Asciutto: 0,80 × 11 760 N ≈ $9{,}4 \times 10^3$ N; bagnato: 0,40 × 11 760 N ≈ $4{,}7 \times 10^3$ N. b) Si dimezza: riduzione del 50%. c) Finché la ruota rotola, la parte dello pneumatico a contatto con l'asfalto non striscia, quindi agisce l'at-

trito statico, il cui massimo è maggiore dell'attrito dinamico che agirebbe con le ruote bloccate e striscianti ($\mu_s > \mu_d$); inoltre una ruota che rotola permette ancora di sterzare.

27. a) A è fermo su B e su di esso agiscono solo il peso e la reazione di B: $F_\perp = m_A\, g = 2{,}0\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 19{,}6\ \text{N} \approx 20\ \text{N}$. b) Il pavimento regge entrambi i blocchi: $F_\perp = (2{,}0 + 3{,}0)\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 49\ \text{N}$. c) $F_{s,max} = 0{,}30 \times 49\ \text{N} = 14{,}7\ \text{N} \approx 15\ \text{N}$: serve una forza appena superiore a 15 N.

28. a) $\mu_s = h/b = 21\ \text{cm} / 60\ \text{cm} = 0{,}35$. b) $F_\perp = 0{,}50\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 4{,}9\ \text{N}$; $F_{s,max} = 0{,}35 \times 4{,}9\ \text{N} \approx 1{,}7\ \text{N}$.

29. $P = 15\ \text{kg} \times 9{,}8\ \text{N/kg} = 147\ \text{N}$; $F_x = 50\ \text{N} \times \cos 30° \approx 43{,}3\ \text{N}$; $F_y = 50\ \text{N} \times \text{sen}\ 30° = 25\ \text{N}$. a) $F_\perp = 147\ \text{N} - 25\ \text{N} = 122\ \text{N}$; $F_{s,max} = 0{,}30 \times 122\ \text{N} \approx 36{,}6\ \text{N}$; poiché $F_x \approx 43\ \text{N} > 37\ \text{N}$, la slitta parte. b) $F_\perp = 147\ \text{N} + 25\ \text{N} = 172\ \text{N}$; $F_{s,max} = 0{,}30 \times 172\ \text{N} \approx 51{,}6\ \text{N}$; poiché $43\ \text{N} < 52\ \text{N}$, la slitta resta ferma. Con la stessa forza, tirare verso l'alto funziona e spingere verso il basso no.

30. Traccia: per avanzare il piede spinge il pavimento all'indietro e tende a scivolare all'indietro; l'attrito statico sulla suola è diretto in avanti ed è la forza che permette di camminare. Sul pavimento bagnato il velo d'acqua riduce μ_s, quindi l'attrito massimo è più piccolo e il piede scivola appena la spinta all'indietro lo supera.

31. L'errore è attribuire l'uguaglianza $N = P$ all'«azione e reazione»: peso e reazione normale agiscono entrambi sul libro, e sono uguali e opposti solo perché il libro è in equilibrio e non ci sono altre forze verticali. Esempio: se premi il libro dall'alto con 4,0 N, $N = P + 4{,}0\ \text{N}$; su un piano inclinato $N < P$.

32. Traccia: si misura con il dinamometro, tirando orizzontalmente, la forza di distacco del parallelepipedo appoggiato successivamente su facce di area diversa (ripetendo ogni misura più volte e facendo la media). Variabile indipendente: area della faccia di appoggio; variabile dipendente: $F_{s,max}$; variabili controllate: massa del blocco (quindi $F_\perp$), materiale e stato delle superfici (stessa asse, pulita e asciutta; le facce del blocco devono essere lavorate allo stesso modo), modo di tirare (orizzontale, lento). Risultato atteso: valori di $F_{s,max}$ uguali entro le incertezze.

33. Traccia: un banco vuoto ha massa di circa 10 kg (fra 5 e 15 kg), quindi $P \approx 100\ \text{N}$; per piedini di metallo o gomma sulle piastrelle $\mu_s \approx 0{,}3$–$0{,}5$. La forza è dunque di qualche decina di newton (circa 30–50 N): ordine di grandezza 10^1–10^2 N, a seconda dei valori scelti (40 N, per esempio, arrotonda a 10^2 N secondo la convenzione del capitolo 3).