

FORZE DI ATTRITO

a cura di Gianfranco Metelli

L'attrito è una forza che si esercita tra due corpi posti a contatto e che, in generale, si oppone al loro moto reciproco. Una forza di attrito è, per esempio, quella che l'asfalto esercita su un'automobile durante una frenata e che consente all'auto di fermarsi.

Per comprendere le modalità con cui agiscono le forze di attrito consideriamo le situazioni rappresentate nelle figure seguenti.

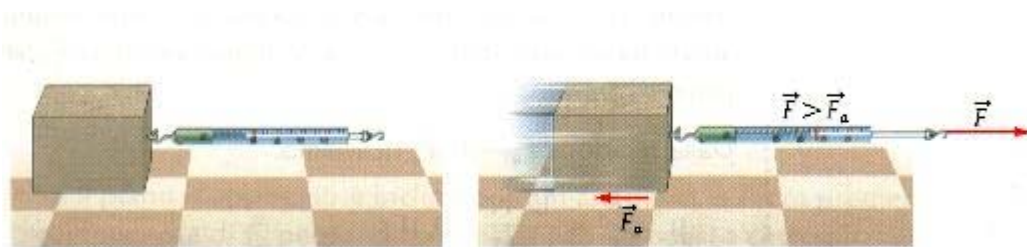


Entrambe le figure ritraggono un uomo che spinge una cassa.

Nel primo caso la cassa è appoggiata su una superficie ruvida come l'asfalto, nel secondo caso essa è appoggiata su una superficie più liscia, come quella di un pavimento appena lucidato. Assumendo che in entrambi i casi le soles delle scarpe dell'uomo aderiscano bene al terreno, è evidente che egli farà meno fatica per spostare la cassa sulla superficie più liscia.

È, inoltre, evidente che lo sforzo che dovrà esercitare dipenderà anche da quanto la cassa è pesante. La forza di attrito che agisce su un corpo dipende, pertanto, dalla natura delle superfici a contatto e dal peso del corpo.

Forza di attrito statico



Consideriamo la figura. Essa rappresenta un blocco di legno appoggiato su un piano orizzontale e al quale è agganciata l'estremità fissa di un dinamometro. Se tiriamo l'altra estremità del

dinamometro applicando una forza crescente, noteremo che il corpo inizierà a muoversi soltanto quando la forza applicata avrà raggiunto e superato un certo valore F_a .

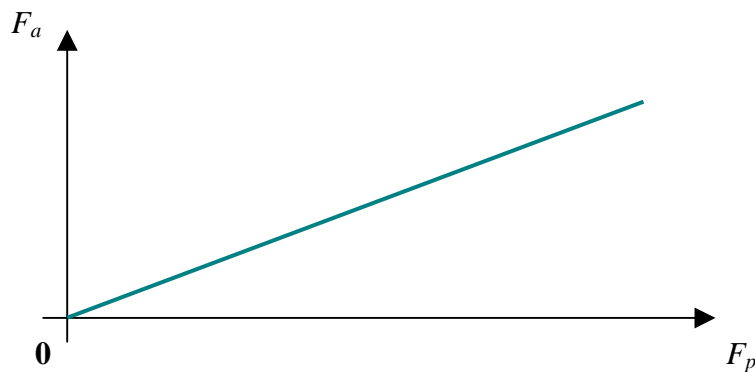
L'intensità della forza F_a misura la **forza di attrito statico** che il piano d'appoggio esercita sul corpo. In altri termini:

la **forza di attrito statico** che una superficie esercita su un corpo che si trova appoggiato su di essa è la minima forza che bisogna applicare al corpo perché esso si metta in moto.

Se sul primo blocco ne appoggiamo un'altro uguale, in modo da raddoppiare il peso del corpo su cui agisce l'attrito, troveremo che la forza di attrito statico raddoppia. In modo analogo, aggiungendo un terzo blocco, F_a risulterà il triplo e così via. Possiamo allora affermare che:

la **forza di attrito statico** che si esercita tra un piano di appoggio e un corpo posto su di esso è proporzionale al peso del corpo stesso.

Il grafico dell'intensità della forza di attrito statico F_a in funzione del valore del peso del corpo F_p , è, pertanto, una retta passante per l'origine degli assi.



Se indichiamo con il simbolo μ_s la costante di proporzionalità tra F_a e il peso F_p del corpo, possiamo scrivere:

$$F_a = \mu_s \cdot F_p$$

Il parametro adimensionale μ_s è chiamato **coefficiente di attrito statico**. Il valore del coefficiente di attrito è legato alla natura delle superfici di contatto dei due corpi e, in particolare, al loro grado di *scabrezza*.

In altri termini se osservassimo le superfici dei due corpi attraverso una lente d'ingrandimento.

vedremmo che esse non sono perfettamente lisce ma caratterizzate da una successione di creste e avvallamenti molto spigolosi che costituiscono dei vincoli di tipo meccanico al moto relativo dei corpi.

LA SCELTA DELLE GOMME IN FORMULA 1

È così importante la scelta delle gomme per vincere un Gran Premio di Formula 1?

Certamente uno dei tanti problemi che gli ingegneri delle varie scuderie devono affrontare e risolvere è quello di ridurre il più possibile l'attrito tra l'asfalto e i pneumatici tenendo però presente il fattore tempo meteorologico che può essere determinante durante una gara. Sono disponibili vari tipi di gomme caratterizzate da differenti sagomature del battistrada e dalla eventuale presenza di scolpiture.

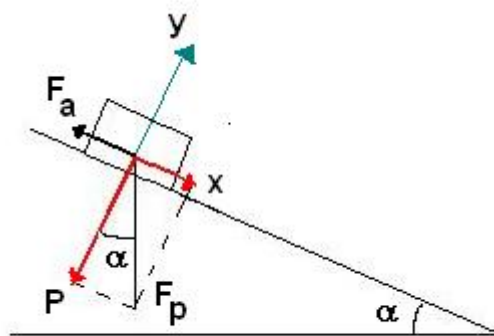
La massima aderenza al suolo e quindi la maggiore stabilità dell'autovettura, si ha se le gomme sono lisce, perché il contatto gomma-asfalto risulta più intimo. Perché allora non adottarle sempre? Il problema è *l'aquaplaning*, ossia lo slittamento sul bagnato. Il fenomeno avviene quando, a causa dell'acqua sulla pista, il coefficiente di attrito al suolo si riduce drasticamente. Ad alte velocità gli pneumatici non hanno il tempo di espellere l'acqua lateralmente ed essa si accumula contro la parte centrale della gomma e si intrappola sotto di essa. La gomma allora perde contatto con il suolo e scivola sull'acqua come fanno certi mezzi di navigazione veloci (*hovercraft*). Sul bagnato perciò uno pneumatico liscio diventa micidiale: ecco perché è indispensabile fornirlo di scolpiture che consentano lo scorrimento dell'acqua verso la periferia della gomma.

Le scolpiture però peggiorano l'aderenza sull'asciutto: questa è la ragione per cui, quando in gara cessa di piovere e l'asfalto si asciuga, i piloti sono costretti a rallentare.

Diventa allora indispensabile, per la sicurezza del pilota oltre che per il risultato della gara, avere gomme differenti per la pioggia e per l'asciutto e saper prevedere le condizioni meteo per provvedere alla loro tempestiva sostituzione.

CORPO APPOGGIATO SU UN PIANO INCLINATO

Nel caso generale, la forza di attrito dipende dalla forza premente P che il corpo applica al piano su cui appoggia. Tale forza risulta perpendicolare alle superfici di contatto tra piano e corpo ma non sempre coincide con il peso del corpo F_p . In particolare, se il piano d'appoggio non è orizzontale ma inclinato, la forza premente P è più piccola di F_p , in quanto rappresenta la sua componente F_y rispetto a un'asse y perpendicolare al piano.



Indicando con α l'angolo tra F_p e P (che coincide con l'angolo d'inclinazione del piano), sarà $P = F_y = F_p \cos \alpha$. Pertanto, l'intensità della forza di attrito statico che il piano esercita sul blocco si calcola con l'espressione:

$$F_a = \mu_s \cdot P = \mu_s \cdot F_p \cdot \cos \alpha$$

L'ATTRITO DINAMICO

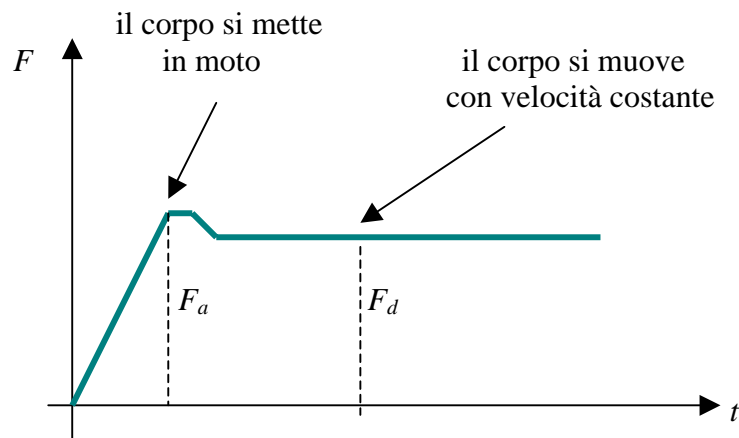
Per mettere in moto un corpo su una superficie piana bisogna applicare una forza che contrasti la forza di attrito statico con cui la superficie si oppone al moto del corpo. L'espressione di tale forza è:

$$F_a = \mu_s \cdot P$$

dove P rappresenta la forza premente, coincidente con la reazione vincolare R_v , del piano. Nel caso di superficie piana orizzontale, $P = F_p$, ovvero l'espressione diventa

$$F_a = \mu_s \cdot F_p$$

Quando un corpo appoggiato sul piano è in moto, il valore della forza di attrito diminuisce leggermente rispetto al valore F_a , come è evidenziato nel grafico.



Esso mostra l'andamento dell'intensità della forza F applicata a un corpo appoggiato su un piano orizzontale, in funzione del tempo t . Affinché il corpo possa cominciare a muoversi è necessario che la forza trainante F raggiunga il valore della forza di attrito statico F_a . Per mantenere il corpo in moto con velocità costante è invece sufficiente applicare una forza F_d , con un'intensità inferiore a quella di F_a .

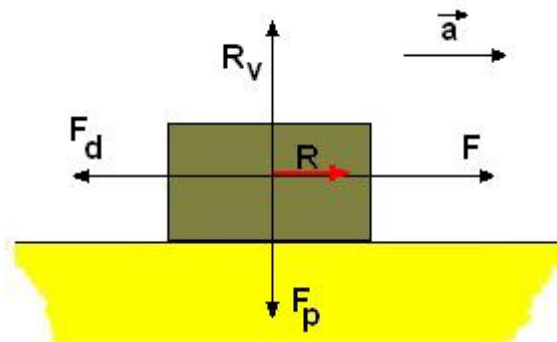
In questo caso la forza frenante che il piano esercita sul corpo ha un'intensità pari a F_d ed è chiamata **forza di attrito dinamico**. Se il moto si verifica su un piano orizzontale, anche la forza di attrito dinamico, come quella di attrito statico, risulta proporzionale al peso del corpo. L'analisi dei dati sperimentali mostra, infatti, che:

$$F_d = \mu_d \cdot F_p$$

dove μ_d rappresenta il **coefficiente di attrito dinamico** il cui valore è leggermente inferiore a quello di μ_s .

Moto di un corpo su un piano orizzontale

Consideriamo la situazione rappresentata in figura.



Un corpo di massa m si muove su un piano orizzontale ed è soggetto a una forza trainante F e alla forza di attrito dinamico F_d esercitata dal piano di appoggio, la cui intensità è pari a $F_d = \mu_d \cdot F_p$.

Sul corpo, oltre a F e a F_d , agiscono, lungo la direzione verticale, il peso F_p e la reazione vincolare del piano R_v , le quali, tuttavia, bilanciandosi reciprocamente, non hanno alcun effetto su moto del corpo. Per determinare l'accelerazione del corpo bisogna calcolare la risultante delle due forze F e F_d e applicare la II legge della dinamica. La risultante del sistema di forze ha modulo:

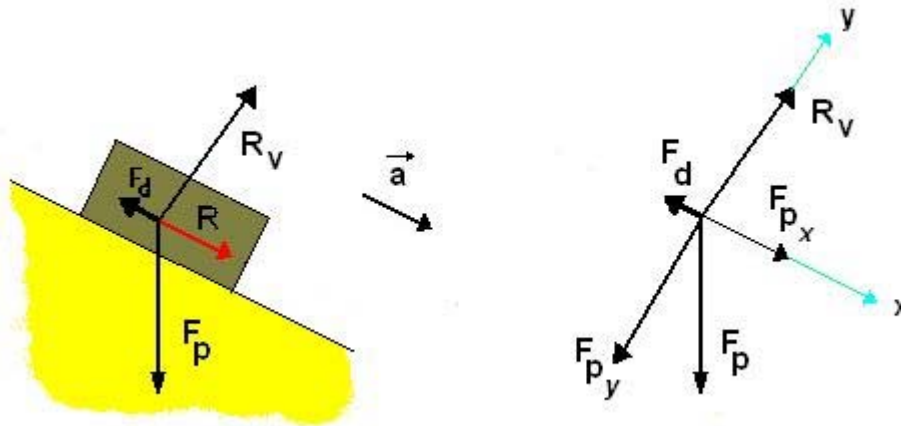
$$R = F - F_d = F - \mu_d \cdot F_p = F - \mu_d \cdot mg \quad ;$$

la sua direzione è la stessa di F_d e F ed è orientata nel verso di F essendo $F > F_d$. Per la II legge della dinamica l'accelerazione a del corpo ha la stessa direzione e lo stesso verso di R e modulo pari a:

$$a = \frac{R}{m} = \frac{F - \mu_d \cdot mg}{m}$$

Moto di un corpo su un piano inclinato

Consideriamo ora la situazione più complessa rappresentata in figura, in cui lo stesso corpo si muove lungo un piano inclinato.



Supponendo che il corpo sia già in movimento, le forze agenti sul corpo sono la forza peso F_p , la reazione vincolare del piano R_v , e la forza di attrito dinamico F_d . Poichè l'accelerazione a del corpo è diretta lungo il piano, deduciamo che anche la risultante R delle due forze F_p e R_v ha la stessa direzione.

Per determinare l'accelerazione del corpo è conveniente scomporre la forza peso lungo le due direzioni x e y indicate nella seconda parte della figura, di cui una parallela alla direzione di moto del corpo, l'altra perpendicolare a essa, e applicare la II legge della dinamica, separatamente, per il moto lungo x e per quello lungo y . Nella direzione x agiscono la componente F_{px} della forza peso e la forza di attrito dinamico F_d . Lungo tale direzione il corpo si muove con accelerazione a . La II legge della dinamica fornisce allora la relazione:

$$F_{px} - F_d = m \cdot a$$

da cui ricaviamo

$$a = \frac{F_{px} - F_d}{m}$$

Lungo la direzione y agiscono invece la componente F_{py} della forza peso e la reazione vincolare R_v . Lungo tale direzione il corpo è fermo, pertanto, applicando la II legge della dinamica, otteniamo:

$$R_v - F_{py} = 0 \quad \text{da cui} \quad R_v = F_{py}$$

Dalle due relazioni trovate per F_{px} e F_{py} deduciamo che la componente F_{px} della forza peso è quella che trascina il corpo verso il basso opponendosi alla forza di attrito e determinando la sua

accelerazione. La componente F_{py} , invece, non produce alcun effetto perché viene equilibrata dalla reazione vincolare R_v .

Per ricavare l'espressione di F_d occorre considerare che nel caso di moto di un corpo su un piano inclinato, è la componente F_{py} della forza peso a rappresentare la forza premente che definisce il valore F_d della forza di attrito dinamico.

Quindi

$$F_d = \mu_d \cdot F_{py}$$

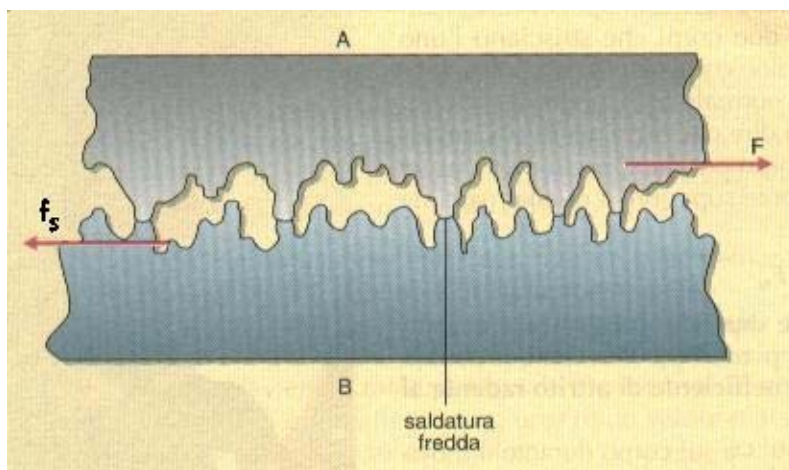
da cui, essendo $F_{py} = R_v$, si ottiene

$$F_d = \mu_d \cdot R_v$$

MECCANISMI ALL'ORIGINE DELL'ATTRITO

Per spiegare l'esistenza della forza di attrito radente, e soprattutto le sue proprietà, è necessario un particolare approfondimento; per questo va presa in esame la **struttura fine** delle superfici a contatto dei due corpi tra loro striscianti.

Consideriamo la figura, nella quale sono rappresentati due corpi **A** e **B** di acciaio, il primo dei quali preme sul secondo con il suo peso F_p .



L'attrito di contatto è dovuto a ponti strutturali che si instaurano tra le microscopiche sporgenze delle superfici dei due corpi che interfacciano: tali sporgenze subiscono infatti una saldatura fredda.

Anche se le superfici di contatto tra i due corpi sono molto ben levigate, date le microscopiche rugosità, le "zone" di effettivo contatto sono in numero limitato ed offrono inizialmente un'area s di contatto molto piccola (meno di un decimillesimo dell'area reale S delle superfici che

interfacciano). Il peso F_p di A trasmette pertanto sulla piccola area s una pressione $P = F_p/s$ molto grande.

Tale carico, su ciascuna zona di effettivo contatto, può produrre locali deformazioni plastiche che favoriscono delle saldature fredde fra le asperità a contatto e generano quindi tra queste dei “ponti” strutturali.

Va detto però che, al tempo stesso, le deformazioni plastiche prodotte aumentano l’area di contatto, facendola diventare s' (con $s' > s$); di conseguenza fanno ridurre il carico, stabilizzando così i ponti in precedenza formati.

Risulta ora più comprensibile il motivo per cui un corpo pesante offra una resistenza al distacco. Per mettere in moto il corpo, la forza F ad esso applicata deve infatti essere in grado di rompere i ponti generati per saldatura fredda, la cui resistenza complessiva è riassunta dal valore massimo F_a della forza di attrito statico.

Il processo microstrutturale appena descritto spiega la dipendenza dell’attrito radente dalla pressione applicata, e quindi dalla componente normale della forza esercitata da un corpo sull’altro.

Spiega anche il fatto che la forza di attrito radente non dipende dall’area S delle superfici che interfacciano. Per meglio capirlo, consideriamo ad esempio un mattone di peso p ; su qualunque delle tre diverse facce lo si appoggi, il peso p porterà sempre la iniziale area di effettivo contatto, qualunque sia il suo valore s , al medesimo valore finale (non dipendente da s ma da p) e precisamente al valore s per il quale il carico viene ricondotto in zona di assestamento del materiale.

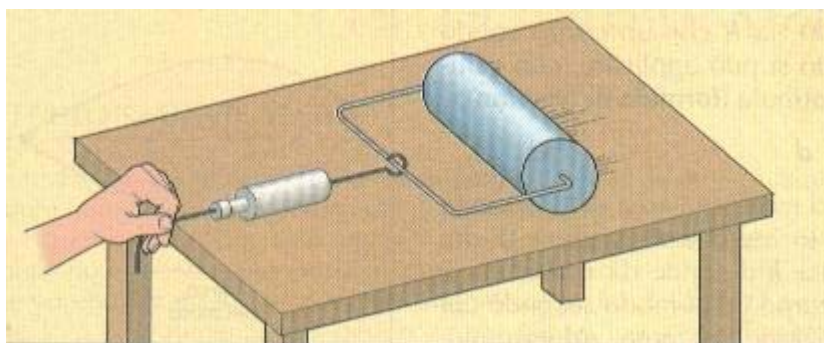
Osserviamo inoltre che nel caso di attrito dinamico sono minori le opportunità di formare ponti stabili e, di conseguenza, più alta è la presenza ad ogni istante di zone fratturate. A questa situazione è attribuibile la causa di una forza di attrito dinamico minore di quella di attrito statico.

Concludiamo con un altro esempio: le colle (che prima di essere usate richiedono un’accurata pulizia delle due superfici da attaccare insieme) non fanno altro che migliorare, a livello microscopico, il contatto fra le due superfici riempiendo i vuoti fra le protuberanze.

ATTRITO VOLVENTE

La forza di **attrito volvente** è quella che si manifesta alla interfaccia (superficie di contatto) fra un corpo solido rotondo che rotola su un altro solido, cambiando ad ogni istante la superficie di contatto.

In figura è illustrato il caso di un cilindro che rotola su un tavolo.



Si verifica sperimentalmente che la forza di attrito volvente è inversamente proporzionale al raggio del corpo che rotola e che è anch'essa direttamente proporzionale alla forza che preme ortogonalmente sulla superficie del corpo sul quale avviene il rotolamento.

Si sperimenta inoltre che nel caso dell'attrito volvente, l'attrito statico di distacco è pressoché uguale a quello dinamico.

Chiamando F_N la componente normale alla superficie di contatto della forza premente ed indicando con r il raggio del corpo che rotola e con f_v la massima forza di attrito al distacco (che è poi uguale alla forza di attrito che si manifesta durante il moto), possiamo allora scrivere:

$$f_v = \mu_v \frac{F_N}{r}$$

dove μ_v è una costante (**coefficiente di attrito volvente**) che dipende dalla natura e dallo stato delle superfici a contatto e ha le dimensioni di una lunghezza.

Per avviare e mantenere il moto del corpo che rotola occorre quindi applicargli costantemente una forza, all'inizio superiore anche se di poco, alla forza di attrito volvente f_v .

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DI VALORI DI COEFFICIENTE DI ATTRITO

In tale paragrafo viene illustrato un semplice esperimento che evidenzia che l'attrito volvente è molto minore dell'attrito radente.

Per questo motivo, per ridurre l'attrito, tutti i mezzi di locomozione fanno uso di ruote.

Attrito radente statico

In **Figura a** è illustrato un dispositivo mediante il quale è possibile determinare sperimentalmente il valore numerico di un coefficiente di attrito radente statico μ_s .

Sul piano inclinato della figura è appoggiato un corpo C di massa m . Inizialmente l'inclinazione α del piano è piccola, per cui la forza di attrito statico relativa alla superficie di contatto corpo-piano riesce ad equilibrare la componente tangente al piano della forza peso $F_p=mg$. Ruotando lentamente la vite V si può aumentare la pendenza del piano fino a raggiungere l'angolo α in corrispondenza del quale il corpo C inizia a scivolare.

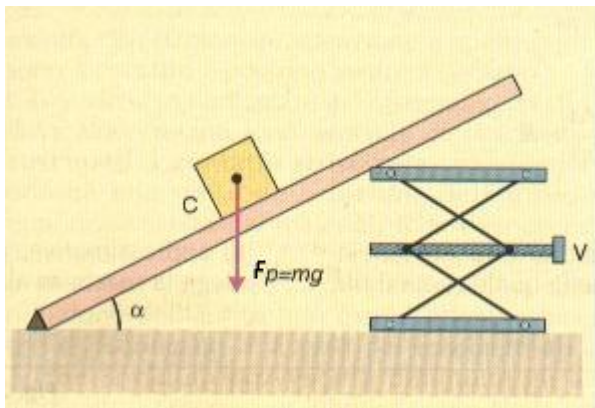


figura a

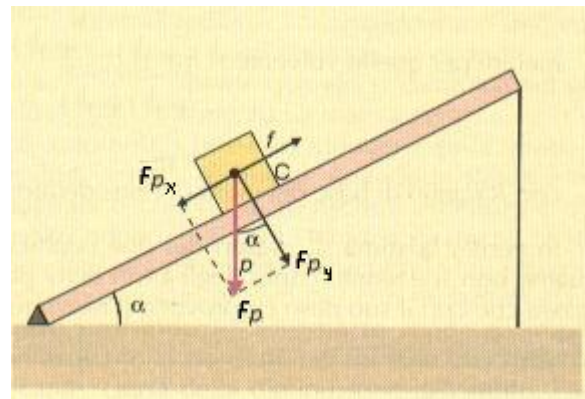


figura b

Ora, in corrispondenza di un'inclinazione α (**Figura b**) si ha:

$$F_{px} \text{ (componente di } p \text{ lungo il piano)} = mg \sin \alpha$$

$$F_{py} \text{ (componente di } p \text{ normale al piano)} = mg \cos \alpha.$$

Come sappiamo, quando il corpo C inizia a scivolare in corrispondenza dell'inclinazione α , la forza di attrito statico f ha raggiunto il suo valore massimo $\mu_s \cdot F_{py}$, valore oltre il quale non può più aumentare per equilibrare una forza F_{px} di maggior valore.

In corrispondenza dell'angolo α , al quale si verifica il distacco di C dalla sua posizione di equilibrio, si ha pertanto:

$$f = F_{px} = mg \operatorname{sen} \alpha$$

ma anche

$$f = \mu_s \cdot F_{py} = \mu_s \cdot mg \cos \alpha$$

Uguagliando le due espressioni di f si ottiene

$$\mu_s \cdot mg \cos \alpha = mg \operatorname{sen} \alpha$$

e quindi

$$\mu_s = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$$

Dalla misurazione dell'ampiezza dell'angolo α , si può così risalire al valore del coefficiente μ_s .

Confronto tra attrito radente e attrito volvente

Nei due disegni della **Figura c** è mostrata una apparecchiatura mediante la quale si possono confrontare fra loro le forze di attrito radente e di attrito volvente che un piano esercita su un corpo (di massa m e di forma cilindrica), quando questo venga sollecitato a muoversi per strisciamento o per rotolamento.

Detta F_{p1} la forza capace di mettere in moto per strisciamento la massa m (peso della massa M_1) e detta F_{p2} quella capace di mettere in moto m per rotolamento (peso della massa M_2), l'esperimento evidenzia che F_{p1} è notevolmente maggiore di F_{p2} .

Ciò significa che la forza di attrito radente f_r che agisce su m è notevolmente maggiore della forza di attrito volvente f_v .

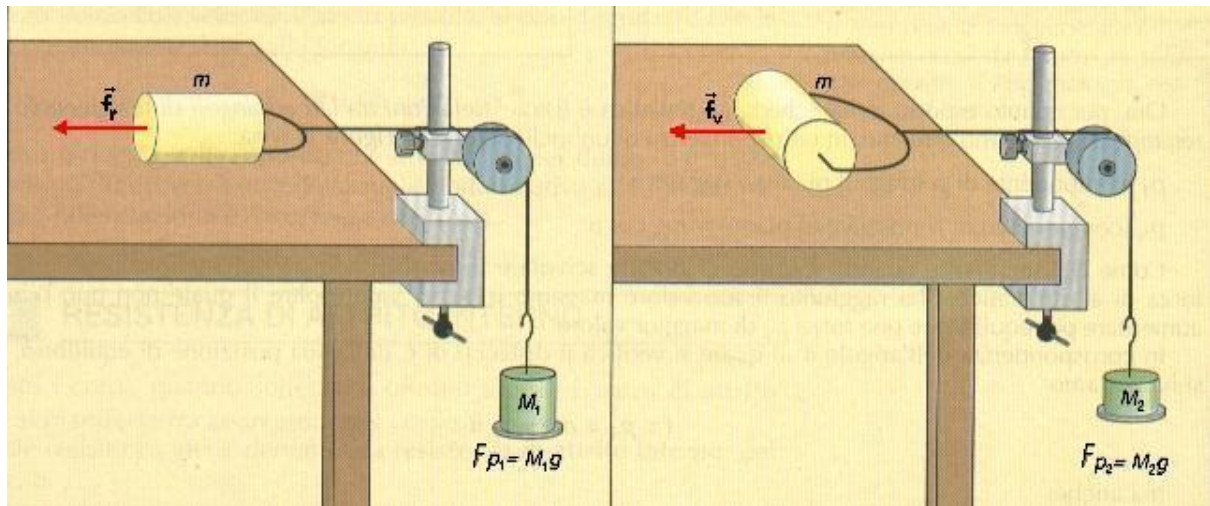


figura c

L'esperimento consente anche di dare una valutazione approssimata dei due coefficienti di attrito radente e volvente al distacco.

Per il coefficiente di attrito radente si ha:

$$\mu_r = \frac{M_1}{m}$$

mentre per quello volvente si ha:

$$\mu_v = \frac{M_2}{m} r$$

con r raggio di base del cilindro considerato.

In verità, la stima dei valori dei due coefficienti di attrito così ottenuti è piuttosto approssimativa, in quanto non si è tenuto conto degli attriti della puleggia sulla quale ruota il filo che collega la massa m alla massa che con il suo peso ne provoca il movimento.

DANNI E VANTAGGI DELL'ATTRITO

Nel movimento di organi o di parti di macchinari fra di loro a contatto, la presenza di attrito è certamente dannosa. Sia perché l'attrito è una forza passiva che si oppone alla forza motrice e quindi fonte di dissipazione di energia (mediante trasformazione di energia meccanica in calore), sia perché esso produce usura delle parti striscianti, riducendo la vita dei macchinari.

Nella meccanica applicata si cerca di diminuire il più possibile l'attrito, progettando con cura la struttura, le dimensioni, i materiali delle parti in movimento, con particolare attenzione a quelle parti che sono a contatto o possono venire a contatto.

Ciò avviene in particolare in corrispondenza di zone dove alberi rotanti sono sostenuti da cuscinetti. Nei **cuscinetti a contatto strisciante**, ad esempio, si ottiene una sensibile riduzione dell'attrito con opportune scelte dei materiali (che devono essere differenti tra loro) delle parti che entrano in contatto, o mediante l'impiego di rivestimenti. Una drastica riduzione dell'attrito può essere ottenuta facendo uso di lubrificanti. E' il caso dei **cuscinetti ad olio**.

Anche la natura provvede a diminuire gli attriti mediante il processo di lubrificazione. Nella nostra bocca, ad esempio, gli alimenti, prima di essere ingenti, vengono lubrificati dalla saliva che si aggiunge durante la masticazione, in modo da poter passare con minor attrito nel l'apparato digerente. Tutti quegli organi del nostro corpo che devono compiere dei movimenti per esercitare la loro funzione (cuore, polmoni, intestini, ecc.) sono rivestiti di mucose che minimizzano le forze di frizione; i coefficienti di attrito fra i tendini e le loro guaine e tra le varie articolazioni ossee sono resi bassissimi da opportuni lubrificanti prodotti dal nostro corpo.

Nella meccanica si cerca anche di diminuire l'attrito trasformando, ove consentito, l'attrito radente in attrito volvente. I **cuscinetti a sfera** sono un esempio di realizzazione di tale tipo di trasformazione. Nei cuscinetti a sfera, infatti, il movimento di un organo viene trasmesso ad un altro organo tramite la rotazione di piccole sfere interposte tra i due, evitando così lo strisciamento di un organo sull'altro.



In molti altri casi, invece, l'attrito è provvidenziale, se non addirittura indispensabile.

L'attrito, ad esempio, ci permette di camminare: se non ci fosse, quando un piede viene sollevato per essere portato avanti, l'altro piede scivolerebbe all'indietro e noi cadremmo immediatamente per terra (basti pensare, ad esempio, a come si scivola facilmente quando si cammina sul ghiaccio

o su un pavimento lucidato a cera).

Le automobili possono muoversi sulla strada solo quando c'è attrito. Infatti, quando la strada è molto bagnata o coperta di nevischio, e l'attrito è quindi molto ridotto, le ruote slittano, o girano su se stesse, non facendo procedere il veicolo, In tali situazioni è opportuno usare pneumatici con un battistrada piuttosto profondo; a tal proposito si veda ciò che è stato riportato nei paragrafi precedenti.

Tutti i veicoli possono rallentare e fermarsi grazie alle forze di attrito esercitate tramite i loro freni. I chiodi e le viti tengono unite le parti di un oggetto grazie al grande attrito che si sviluppa contro le fibre dei materiali.

Le forze di attrito rivestono un ruolo importante anche nella resistenza di molti materiali compositi. Si pensi ad esempio al caso dell'elevatissimo attrito che si genera tra le fibre di vetro e le resine nelle quali queste vengono immerse. Ciò concorre ad aumentare la resistenza agli sforzi del materiale.

I fenomeni di attrito hanno assunto oggi una tale importanza in ambito tecnologico e in ingegneria da costituire una intera disciplina, la **tribologia**, che studia appunto i processi di attrito e di usura.