Capitolo 10

# Attrito

## 10.1 Che cos'è l'attrito

1. L'attrito tra un corpo $A$ e un corpo $B$ è un'interazione di contatto tra i due: precisamente, il termine «attrito» indica la resistenza che al moto di $A$ rispetto a $B$ – e di $B$ rispetto ad $A$ – viene opposta da parte di forze con cui i due corpi interagiscono nella zona di contatto. Quando le forze di attrito contrastano lo scivolamento di una superficie sull'altra (il che, come risulterà chiaro, può verificarsi *anche quando uno dei due corpi rotola sull'altro*) si parla di «attrito radente»: **attrito radente statico** se le due superfici a contatto sono immobili l'una rispetto all'altra, **attrito radente dinamico** (o «cinetico») se il moto di scivolamento è già in atto. Quando invece le forze d'attrito contrastano un moto di rotolamento si parla di **attrito volvente**.

2. Un esempio di *attrito radente statico* si ha nel caso di un libro appoggiato su un tavolo: grazie all'attrito, può accadere che il libro resti in equilibrio anche se il piano d'appoggio è inclinato rispetto all'orizzontale. Attrito radente statico è anche ciò che ci permette di camminare senza scivolare ad ogni passo e di afferrare gli oggetti senza che ci scivolino tra le dita, ciò che rende possibile l'uso di nodi, chiodi e viti, ciò che permette a una sfera o a un cilindro di scendere lungo un piano inclinato ruotando senza strisciare[1], ciò che permette a un veicolo di cambiare velocità o direzione di marcia.

*Attrito radente dinamico* è ad esempio ciò che frena la corsa di un oggetto che scivola – soggetto solo al peso e alla reazione del vincolo – lungo un piano orizzontale: in assenza di attrito il moto proseguirebbe indefinitamente con velocità costante, non essendoci forza parallelamente alla velocità.

*Attrito volvente* è ad esempio ciò che frena il moto di puro rotolamento di una sfera – soggetta solo al peso e alla reazione del vincolo – lungo un piano orizzontale: se non ci fosse attrito volvente, il moto proseguirebbe con velocità costante.

---

[1] Pro memoria: in caso di *puro rotolamento* di una sfera o di un cilindro su una superficie $S$, i punti della sfera o del cilindro a contatto con $S$ hanno la stessa velocità dei punti di $S$ (se $S$ è immobile, velocità zero). Ciò significa che la velocità del centro della sfera (o dell'asse del cilindro) rispetto a $S$ è $v = \omega R$ ($\omega$ è la velocità di rotazione, $R$ il raggio della sfera o del cilindro).

## 10.2 Attrito radente

1. Grazie all'attrito radente, l'equilibrio di un blocco appoggiato su un piano orizzontale è, entro limiti, possibile anche se sul blocco agisce (come in fig.1) una forza che tende a metterlo in moto. L'attrito consiste, in questo specifico caso, in un sistema di forze complessivamente equivalenti a una forza orizzontale (nel disegno, la forza $\vec{A}_0$) che agisce sul blocco ostacolandone il movimento.

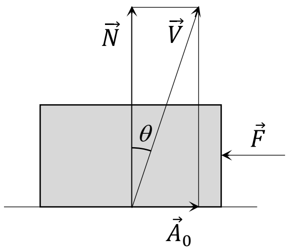

Fig. 1

Come si vede, la forza d'attrito radente è il *componente tangenziale della forza di contatto* $\vec{V}$ (forza che in molti casi chiameremo *reazione del vincolo*): vale a dire, la forza d'attrito radente è ciò che si ottiene proiettando ortogonalmente la forza di contatto $\vec{V}$ sul piano tangente (alle due superfici a contatto). Se $\theta$ è l'angolo tra la forza di contatto e la perpendicolare alla superficie di contatto, il valore della forza d'attrito è $A_0 = V \operatorname{sen}\theta$.

2. Se un blocco $K$ è posto su un piano inclinato e scivola verso il basso, la forza d'attrito radente (dinamico) è diretta parallelamente al piano verso l'alto, se $K$ scivola verso l'alto la forza d'attrito radente è diretta parallelamente al piano verso il basso.

Se invece il blocco è immobile, la forza d'attrito radente (statico) su $K$ è diretta nel senso che occorre per impedire a $K$ di entrare in movimento, e quindi *in senso opposto al componente tangenziale del risultante delle altre forze* (le cosiddette «forze attive»). Per esempio, se $K$, in equilibrio sul piano inclinato, è soggetto solo al peso e alla reazione del vincolo, la forza d'attrito su $K$ è diretta nel senso dalla salita perché il componente tangenziale del peso è diretto nel senso della discesa. Se però su $K$ è anche applicata una forza che tende a far risalire il blocco, e se (come in fig. 2) la proiezione di tale forza sul piano inclinato è più grande della analoga proiezione della forza peso, la forza di attrito su $K$ è diretta verso il basso.

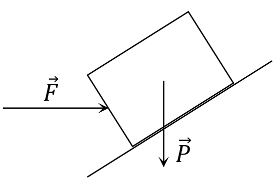

Fig. 2

3. Ma l'attrito radente si manifesta *anche in caso di rotolamento*. Si consideri ad esempio un'automobile alla partenza. Se non ci fosse attrito, le ruote motrici (quelle collegate al motore) girerebbero a vuoto, mentre le altre ruote (le ruote d'appoggio) resterebbero immobili. La forza d'attrito radente statico costringe i punti della ruota a contatto col terreno ad avere, come il terreno, velocità zero: perciò le ruote motrici possono girare solo a condizione di rotolare in avanti, e le ruote d'appoggio possono avanzare solo se ruotano. La forza d'attrito agisce *in avanti* sulle ruote motrici, impedendo che striscino sul terreno; *all'indietro* invece sulle ruote d'appoggio, costringendole a girare. Si noti, per inciso, che la forza che spinge in avanti la macchina non proviene direttamente dal motore,

ma dal terreno: tant'è che se non c'è attrito sulle ruote motrici la macchina non si muove[2].

4. Si consideri poi (fig. 3) una sfera rigida che rotola per effetto del peso (e in assenza di attrito volvente) prima in discesa, poi in direzione orizzontale, poi in salita. Se la sfera parte da ferma, in assenza di attrito radente procederebbe lungo l'intero percorso di moto traslatorio, scivolando senza ruotare[3].

Fig. 3

Se invece c'è attrito, e ce n'è abbastanza, la sfera rotola senza strisciare, ruotando con velocità angolare via via più grande in discesa, costante sul piano orizzontale e via via più piccola in salita. *Le variazioni della velocità angolare sono prodotte dalla forza d'attrito radente statico*, la quale agisce parallelamente alla superficie d'appoggio in direzione *contraria* alla velocità del centro della sfera lungo la discesa, nella *stessa* direzione in salita, mentre *non agisce affatto* nel tratto orizzontale intermedio. Dunque, mentre nel tratto in salita l'attrito radente *contrasta* il moto di rotolamento (rallentando la velocità $\omega = v/R$ di rotazione), nel tratto in discesa l'attrito radente *produce* il rotolamento, e nel tratto orizzontale non si manifesta.

Si osservi anche che nel tratto in salita la forza d'attrito radente statico $\vec{A}_0$ rende meno rapido il rallentamento del centro $C$ della sfera (se $\varphi$ è l'angolo tra il piano inclinato e il piano orizzontale ed $m$ è la massa della sfera, la velocità di $C$ è $v = v_0 + at$, con $a = -g \operatorname{sen}\varphi + A_0/m$). In presenza di attrito radente la sfera arriva quindi più in alto[4] che in assenza di attrito (quando la sfera salirebbe senza variazioni della velocità angolare, e quindi scivolando sul piano d'appoggio).

5. Si consideri infine una palla da biliardo, e si supponga che venga colpita esattamente a metà della sua altezza (con stecca in posizione orizzontale). In assenza di attrito, la bilia si muoverebbe dopo l'urto di moto traslatorio, scivolando senza ruotare. L'attrito radente dinamico contrasta invece lo strisciamento sulla superficie d'appoggio, cosicché il moto traslatorio iniziale si trasforma rapidamente in moto di rotolamento. Quando la velocità $v_C$ del centro della sfera è diminuita e la

---

[2] Naturalmente, anche in assenza di motore la macchina non parte... La spinta che il terreno esercita in avanti sulle ruote motrici è uguale alla spinta che le ruote motrici esercitano all'indietro sul terreno (ed è qui che interviene il motore).

[3] Il momento complessivo delle forze rispetto al centro di massa sarebbe zero (vedere al capitolo *Dinamica rotazionale*)

[4] La distanza percorsa lungo la salita (affrontata con velocità $v$) è $d = v^2/2a$. Alla stessa conclusione si può arrivare considerando che in assenza di attrito il lavoro resistente del peso deve annullare solo l'energia cinetica traslazionale (legata alla velocità del centro di massa), mentre in presenza di attrito tale lavoro deve annullare anche l'energia cinetica associata alla rotazione attorno al centro di massa. Nel caso di una sfera omogenea (che rotola senza strisciare), l'energia cinetica rotazionale è il 40% di quella traslazionale: corrispondentemente, nel caso di rotolamento senza scivolamento il lavoro gravitazionale dovrà essere del 40% superiore, e quindi l'altezza raggiunta risulterà a sua volta del 40% superiore.

velocità $\omega$ di rotazione è aumentata fino a che sono realizzate le condizioni ($v_C = \omega R$) del puro rotolamento, la forza d'attrito radente è azzerata e agisce sulla bilia solo l'attrito volvente.

6. Il fenomeno dell'attrito radente è molto complesso[5]: tuttavia può essere descritto, in modo sufficientemente accurato per la maggior parte delle applicazioni, in termini di poche, semplici regole dettate dall'esperienza.

(*a*) La forza di attrito radente statico $\vec{A}_0$ tra due superfici assegnate può variare da zero fino a un ben determinato valore massimo: tale valore massimo risulta direttamente proporzionale al valore della «forza premente», cioè della forza con cui i due corpi a contatto interagiscono nella direzione della normale alla superficie di contatto, premendo l'uno sull'altro. In fig. 1 (pag. 287) la forza con cui il piano d'appoggio «preme» sul blocco è $\vec{N}$: possiamo allora scrivere

[A] $\quad A_0 = V \operatorname{sen}\theta \leq A_{0/\max} = \mu_0 N = \mu_0 V \cos\theta.$

(*b*) La costante di proporzionalità $\mu_0$ (**coefficiente di attrito radente statico**) dipende esclusivamente dalla natura chimico-fisica delle superfici a contatto (tipo di materiale, stato delle superfici): non, quindi, dal fatto che l'area di contatto sia più o meno estesa. Così, ad esempio, per un mattone appoggiato su un piano la forza d'attrito radente è la stessa qualunque sia la faccia del mattone a contatto col piano, essendo anche la forza premente in ogni caso la stessa.

(*c*) La forza di attrito radente dinamico tra due corpi è *indipendente dalla velocità* con cui un corpo striscia sull'altro[6], ed è direttamente proporzionale alla forza premente:

[B] $\quad A = V \operatorname{sen}\theta = \mu N = \mu V \cos\theta.$

(*d*) La costante di proporzionalità $\mu$ (**coefficiente di attrito radente dinamico**) dipende solo dalla natura chimico-fisica delle superfici a contatto (non dall'estensione dell'area di contatto). Il suo valore risulta di solito alquanto più piccolo di quello del coefficiente statico $\mu_0$ (cfr. tabella 1).

---

[5] L'attrito è un fenomeno *statistico*. La forza d'attrito è l'effetto macroscopico, complessivo, di una moltitudine di eventi microscopici: essenzialmente, la formazione di vere e proprie «saldature» tra le due superfici a contatto, per effetto dell'attrazione elettromagnetica tra le molecole dei due corpi nei punti di contatto (le superfici non combaciano mai perfettamente, l'effettiva zona di contatto è molto più piccola di quanto non appaia alla scala macroscopica, *e resta approssimativamente costante – per un dato valore della forza premente – al variare dell'area di contatto apparente*). Il moto di scivolamento di una superficie sull'altra implica la rottura di tali saldature microscopiche, e il loro continuo riformarsi nella nuova zona di contatto. L'attrito volvente è invece dovuto prevalentemente al fatto che le superfici a contatto si deformano assorbendo energia e riscaldandosi.

[6] Regola di prima approssimazione, da utilizzare con cautela.

*Coefficienti d'attrito radente statico e dinamico*

| MATERIALI | $\mu_0$ | $\mu$ |
|---|---|---|
| acciaio su acciaio | 0,75 | 0,50 |
| acciaio su ghiaccio | 0,03 | 0,015 |
| vetro su vetro | 0,94 | 0,40 |
| gomma su asfalto asciutto | 1,0 | 0,80 |
| gomma su asfalto bagnato | 0,30 | 0,25 |

Tabella 1

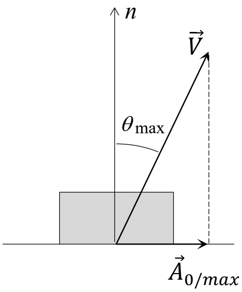

Fig. 4

7. La relazione [A] significa che nel caso di attrito radente statico la reazione del vincolo non può risultare inclinata a piacere sulla normale (alla superficie di contatto): il massimo valore dell'angolo è $\theta_{\max} = \text{arctg}\,\mu_0$ (fig. 4). Ne consegue che la possibilità della reazione di un vincolo rigido di salvare per attrito l'equilibrio di un corpo neutralizzando l'azione di una forza $\vec{F}$ è legata *non al valore, ma alla direzione* di tale forza: se l'angolo tra la normale (alla superficie di contatto) e la retta d'azione di $\vec{F}$ è più grande di $\theta_{\max}$, la reazione del vincolo non è in grado di salvare l'equilibrio.

8. Analogamente, dalla [B] discende che in caso di attrito radente dinamico è $\text{tg}\,\theta = \mu$. Dunque, quando un corpo scivola su di un altro la forza di contatto ha *una ben precisa inclinazione* sulla normale alla superficie di contatto [7].

## 10.3 Il lavoro dell'attrito radente

1. Si supponga che un blocco $K$ di massa $m$ venga lanciato con velocità $v_0$ lungo un piano orizzontale in presenza di attrito, e si supponga di voler calcolare la distanza $x$ percorsa dal blocco prima di arrestarsi per effetto dell'attrito, fatta l'ipotesi che le uniche forze applicate al blocco siano il peso e la forza $\vec{A}$ d'attrito (che supponiamo nota). Dato che l'unica forza che compie lavoro (un lavoro resistente) è la forza d'attrito, è spontaneo scrivere subito (teorema dell'energia cinetica)

$$\frac{mv_0^2}{2} = Ax$$

[7] Si osservi in particolare che, se un corpo $K$ scivola lungo un piano, la reazione $\vec{V}$ del vincolo può neutralizzare una forza $\vec{F}$ applicata a $K$ (e il moto di $K$ può conseguentemente risultare rettilineo e uniforme) solo quando la forza $\vec{F}$ e la reazione $\vec{V}$ hanno la stessa retta d'azione, il che richiede che $\vec{F}$ formi con la normale al piano un angolo di tangente $\mu$.

dove con $x$ è indicato lo spostamento incognito del blocco. In effetti, il valore che in tal modo si ottiene per $x$ è corretto. Ma è importante rendersi conto che la grandezza $Ax$ non rappresenta affatto il valore (assoluto) del lavoro della forza d'attrito, che sarà invece necessariamente minore. Ciò risulta evidente se si considera che, a causa dell'attrito, il blocco si riscalda, e che tale effetto di riscaldamento sta ad indicare la comparsa, nel blocco, di una certa quantità di energia termica (l'energia cinetica associata al moto interno di vibrazione delle molecole): l'energia cinetica originariamente associata al moto macroscopico del blocco non è stata dunque completamente azzerata, una parte di essa si ritrova all'interno del blocco come energia cinetica del moto di vibrazione delle molecole. Esempio numerico: energia cinetica originaria del blocco 100 J, energia termica sviluppata nel blocco durante la fase di rallentamento fino all'arresto 20 J, lavoro della forza d'attrito – 80 J.

2. Si presenta naturalmente un interrogativo: come mai il lavoro della forza d'attrito è inferiore al prodotto forza per spostamento? Evidentemente, questo è uno di quei casi in cui la schematizzazione del corpo 'rigido' non funziona: le forze che, per attrito, sono applicate al blocco, agiscono su zone superficiali il cui moto risulta bruscamente ostacolato con effetti di deformazione locale: le forze d'attrito agiscono cioè su punti il cui moto, rallentato rispetto a quello complessivo del blocco, dà luogo in definitiva a spostamenti inferiori. Potremmo schematizzare la situazione dicendo che la forza d'attrito lavora su una distanza $x_a$ inferiore allo spostamento $x$ subìto dal blocco nel suo insieme.

3. Un discorso analogo può essere fatto per la superficie piana $S$ su cui il blocco scivola. Su $S$ agisce una forza d'attrito uguale e contraria a quella che agisce sul blocco: lo spostamento macroscopico di $S$ è zero, ma il lavoro della forza d'attrito ad essa applicata non può essere zero, deve essere un lavoro *positivo* che renda ragione dell'effetto di riscaldamento subìto da $S$. In effetti, le forze d'attrito agiscono su punti di $S$ che subiscono spostamenti microscopici nella direzione stessa delle forze.

4. Osservazione importante: considerazioni di termodinamica portano a concludere che *il lavoro complessivo delle forze d'attrito tra due superfici a contatto è sempre zero*: perciò il lavoro delle forze d'attrito non modifica l'energia cinetica complessiva delle particelle del sistema, semplicemente la trasferisce dal moto macroscopico d'assieme al moto disordinato di agitazione termica. Ciò vale anche per il caso di una massa fluida che scorre lungo una parete solida, e trova ulteriore giustificazione nel fatto che ciò che chiamiamo «attrito» è in realtà l'effetto globale, macroscopico di un grande numero di interazioni elementari tra particelle che prima entrano l'una nella sfera d'azione dell'altra e poi ne escono, con un lavoro complessivo uguale a zero[8].

[8] Sul lavoro delle forze d'attrito radente si veda eventualmente anche il capitolo 69 («Quanto lavora l'attrito») in G. Tonzig, *100 errori di fisica*.

## 10.4 Attrito volvente

1. Spingere una bicicletta a ruote frenate sarebbe decisamente più faticoso che spingerla a ruote libere: questo suggerisce l'idea corrente che la resistenza offerta dall'attrito volvente al moto di rotolamento sia di gran lunga inferiore – a parità ovviamente di materiali a contatto e di forza premente tra le due superfici – alla forza con cui l'attrito radente riesce a contrastare il moto di strisciamento. In realtà, mentre l'attrito radente contrasta il moto di strisciamento con una forza, l'attrito volvente contrasta il moto di rotolamento col momento di una forza: e non ha molto senso confrontare due grandezze - una forza e un momento di forza - dimensionalmente diverse. Quello che possiamo senz'altro dire è che far rotolare una ruota *applicando ad essa una forza motrice all'altezza del perno* (caso della ruota anteriore di una bicicletta, o delle ruote di puro appoggio di un qualsiasi veicolo, ad esempio quelle di un'automobile col cambio in folle) è in genere molto meno impegnativo che trascinare la ruota in assenza di rotolamento.

2. La resistenza che l'attrito volvente oppone al moto di rotolamento è essenzialmente dovuta al fatto che le due superfici a contatto si deformano - nella zona di contatto - in modo non perfettamente elastico: per cui *non ci sarebbe attrito volvente nel caso ideale di corpi rigidi*, e non ci sarebbe attrito volvente nel caso ideale di corpi perfettamente elastici.

3. Un corpo si comporterebbe in modo perfettamente elastico se esistesse una corrispondenza biunivoca tra forza applicata e deformazione prodotta: azzerando la forza risulterebbe allora rigorosamente azzerata anche la deformazione, e le variazioni di configurazione si verificherebbero senza alcun effetto concomitante di riscaldamento, e quindi di dispersione energetica. Per alcuni materiali (ferro, acciaio) tutto questo si verifica piuttosto bene fino a che le forze applicate – e le deformazioni prodotte – si mantengono piccole, e precisamente inferiori al *limite di snervamento*. Se tale limite è superato, la deformazione non è più reversibile: il semplice azzeramento della forza applicata non porta più all'azzeramento della deformazione; a uno stesso valore della deformazione possono corrispondere infiniti valori diversi della forza, a seconda di quanto in precedenza si è già verificato in fatto di deformazioni. In generale, *la forza esercitata è, a parità di deformazione, più grande in fase di aumento che in fase di diminuzione della deformazione* (e lo stesso vale chiaramente per la forza, uguale e contraria, proveniente dal corpo deformato). Questa mancanza di elasticità, o *anelasticità*, è evidente nel caso di materiali come la plastilina, o come la cera, o come il piombo, o come uno strato di sabbia, per i quali nessuna forza è richiesta per mantenere la deformazione, una volta prodotta.

4. Per un corpo che rotola, la non perfetta elasticità dei materiali ha come conseguenza che la distribuzione delle pressioni sulle superfici a contatto non è più simmetrica: *davanti c'è più pressione che dietro*: davanti al piano teorico di simmetria (il piano $\gamma$ della fig. 5, dove si suppone che il rotolamento avvenga verso destra) c'è, a parità di distanza, una pressione maggiore che dietro. In fig. 5 si suppone che la deformazione riguardi essenzialmente il piano d'appoggio, ma il discorso potrebbe essere adattato anche al caso inverso (pneumatico su cemento), così come al caso di superfici a contatto entrambe deformate.

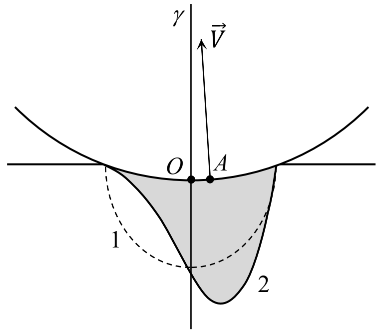


Fig. 5 – *La linea 1 mostra la distribuzione delle pressioni sulle superfici a contatto nel caso ideale di deformazione elastica. La linea 2 mostra la distribuzione effettiva delle pressioni (rotolamento verso destra).*

È chiaro dalla figura che l'effetto delle forze di pressione (le forze che la superficie d'appoggio esercita a 90° sulla superficie del corpo che rotola) è non solo quello di fare equilibrio al peso, ma anche quello di fare contrasto al moto di rotolamento: rispetto all'asse d'istantanea rotazione della ruota (rappresentato in fig.5, dove si ipotizza un moto di puro rotolamento, dal punto $O$) le forze di pressione (rappresentate in figura dalla forza risultante $\vec{V}$ ) hanno infatti complessivamente un momento diverso da zero.

5. Mettiamoci allora nella situazione ideale della fig.5: ruota perfettamente rigida su superficie deformabile (modello a livello domestico, bottiglia cilindrica su tovaglia). Supponiamo che, a partire da una situazione di quiete nella quale agiscono sulla ruota solo il peso $\vec{P}$ e la reazione $\vec{V} = -\vec{P}$ del terreno (verticale e passante per l'asse della ruota per la simmetria della curva delle pressioni, linea 1 della fig. 5), venga fatta agire sulla ruota tramite il perno (punto $C$ in fig.6), in completa assenza di attrito fra ruota e perno, una forza $\vec{F}$ orizzontale di valore inferiore a $\mu_0 P$, massimo valore possibile per la forza di attrito radente statico. La ruota non potrà dunque scivolare, e per effetto del momento $FR$ di $\vec{F}$ rispetto all'asse di istantanea rotazione $O$ tenderà a entrare in rotazione: ma la rotazione verrà subito contrastata (e, se $\vec{F}$ non è troppo grande, impedita) dal nuovo risultante $\vec{V} \neq \vec{P}$ delle forze di pressione (linea 2 in fig.5) e dal conseguente controverso momento di forza $\vec{\tau}$.

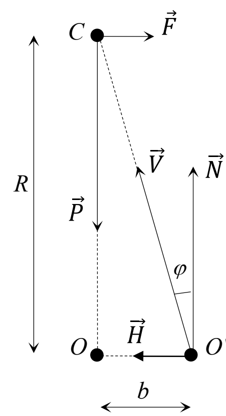


Fig. 6

Se $\vec{N} = -\vec{P}$ è il componente verticale di $\vec{V}$, sarà

[A] $\quad \tau = Nb = Pb$

dove $b$ (fig.6) rappresenta la distanza da $O$ (lo ‘scostamento’ da $O$) del punto d’applicazione $O'$ della forza $\vec{V}$. Al crescere del valore di $\vec{F}$, aumenta anche il valore di $\vec{\tau}$ perché aumenta la dissimmetria nella curva delle pressioni e dunque aumenta lo scostamento $b$: aumenta di conseguenza l’angolo $\varphi$ formato da $\vec{V}$ con la verticale, aumenta il componente orizzontale $\vec{H}$ di $\vec{V}$, diminuisce di conseguenza la forza $\vec{A}_0$ di attrito radente statico (deve essere infatti $A_0 + H = F$ [9]). Si noti che la retta d’azione del risultante $\vec{V}$ delle forze di pressione, tutte dirette in questo specifico caso (raggio delle superfici di contatto uguale a raggio della ruota) verso l’asse della ruota $C$, passa a sua volta necessariamente per $C$. Per ruota meno rigida e/o terreno meno cedevole, le superfici di contatto dovrebbero essere rappresentate in fig.5 con archi di circonferenza di raggio $R'$ *maggiore* del raggio $R$ (e via via tendente a infinito al diminuire della rigidezza della ruota e all’aumentare di quella del terreno).[10]

6. Al crescere di $\vec{F}$, c’è chiaramente, per una data coppia di materiali a contatto e per dati valori di $P$ e di $R$, un limite all’aumento di $b$ (e quindi del momento di contrasto $\tau$), oltre il quale il rotolamento ha inizio:

[B] $\quad \tau_{\max} = b_{\max} P$

o anche, per il fatto che $\tau_{\max} = F_{\max} R$,

[C] $\quad F_{\max} = \tau_{\max}/R = b_{\max} P/R = \mu_V P$

dove il numero $\mu_V = b_{\max}/R$ rappresenta il **coefficiente di attrito volvente.**

Per la [C], potremo chiaramente anche scrivere la [B] nella forma

[B'] $\quad \tau_{\max} = \mu_V PR.$

7. L’esperienza mostra che, per una data coppia di materiali a contatto, il coefficiente d’attrito volvente cresce al crescere del carico $P$ (ovvio, dato che al crescere di $P$ aumenta nel rapporto $\mu_V = b_{\max}/R$ lo scostamento $b_{\max}$) e diminuisce, a pari valore di $P$, al crescere del raggio $R$ della ruota (cresce allora anche $b_{\max}$ ma meno rapidamente di $R$): in altre

VALORI ORIENTATIVI PER $\mu_V$

| | |
|---|---|
| legno su legno | 0,015 |
| acciaio su acciaio | 0,0005 |
| sfere d’acciaio (cuscinetti a sfera) | 0,0015 |
| ruote di vettura su strada | 0,02 |

Tabella 2

9 Essendo all’equilibrio è $FR = bP$, con $b < R$, dovrà anche essere $F < P$.

10 Nel caso $R' > R$ le forze di pressione passerebbero dunque per un punto posto al di sopra di $C$: la forza $\vec{V}$ avrebbe, al crescere di $R'$, una direzione via via più prossima alla verticale, il suo componente orizzontale $\vec{H}$ avrebbe un valore via via più piccolo, la forza d’attrito radente statico di conseguenza un valore via via più grande, tendente a $F$ per $R'$ tendente a infinito (superfici di contatto piane).