

# 9 Attrito, lubrificazione, cuscinetti e guarnizioni

## 9.1 Attrito

Nel momento in cui un corpo viene spostato sulla propria superficie di appoggio con la forza  $F$ , in senso contrario a tale spostamento viene generata una forza di attrito  $F_R$  (fig. 1).

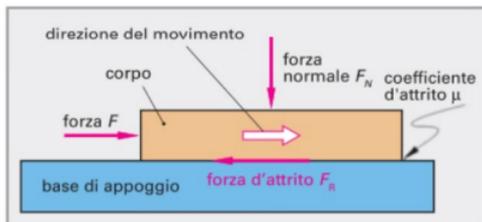


Figura 1: Azione della forza durante l'attrito

La forza di attrito  $F_R$  definisce la resistenza allo spostamento di un corpo sulla superficie di un altro.

La sua grandezza è determinata da:

- forza normale  $F_N$ ;
- stato di lavorazione delle superfici;
- accoppiamento dei materiali;
- tipo di attrito: statico, radente oppure a rotolamento (o volvente);
- condizioni di lubrificazione;
- temperatura.

**Forza normale  $F_N$ .** Agisce sempre perpendicolarmente alla superficie d'attrito. Il coefficiente d'attrito  $\mu$  (mu), determinato sperimentalmente, comprende le diverse grandezze d'influenza. È utilizzato come valore costante nella formula. Ne risulta:

$$\begin{aligned} \text{Forza di attrito} &= \\ \text{forza normale} \cdot \text{coefficiente di attrito} \\ F_R &= F_N \cdot \mu \end{aligned}$$

La forza di attrito  $F_R$  è proporzionale alla forza normale  $F_N$ . All'aumento della forza normale  $F_N$ , la forza di attrito  $F_R$  aumenta nella medesima proporzione.

### Tipi di attrito

**Attrito statico.** È la resistenza opposta da un corpo, quando è spostato sul suo supporto (fig. 1). In questo caso, la forza  $F$  è minore o uguale alla forza d'attrito  $F_R$ . Per spostare un corpo, è necessario superare l'attrito statico.

**Attrito radente.** È la resistenza opposta da un corpo in movimento che scorre sul suo supporto. La forza d'attrito  $F_R$  nell'attrito radente è minore rispetto all'attrito statico. Essa agisce, per esempio, tra il disco e le pastiglie del freno.

**Attrito al rotolamento (volvente).** È la resistenza opposta da un corpo in movimento che rotola sul suo supporto. L'attrito al rotolamento è significativamente più piccolo rispetto all'attrito radente. La grandezza della forza d'attrito  $F_R$  generata da un attrito a rotolamento è determinata dal materiale dei corpi coinvolti nel rotolamento e dalla forma della loro superficie di contatto. Per tale motivo, la resistenza al rotolamento di un cuscinetto a sfere (superficie di contatto puntiforme) è più piccola di quella di un cuscinetto a rulli (superficie di contatto lineare).

### Trasmissione di forza tramite attrito

Per permettere alle ruote di un autoveicolo di trasmettere le loro forze periferiche  $F_U$  (forze motrici e frenanti) e le loro forze di reazione laterali  $F_S$ , è necessario che tra gli pneumatici e il fondo stradale ci sia attrito statico (aderenza).

La forza trasmissibile è, quindi, dipendente dalla forza normale  $F_N$  (carico sulla ruota) e dal coefficiente d'attrito: ( $\mu_{\text{secco}} \sim 0,9 \dots 1$ ;  $\mu_{\text{ghiaccio}} \sim 0,1$ ).

Quando durante una frenata le ruote si bloccano, oppure quando slittano durante la partenza, tra gli pneumatici e il fondo stradale si crea un attrito radente. In questo caso, nessuna forza di reazione laterale può essere trasmessa alla strada e il veicolo non è più guidabile. Il cerchio d'attrito di Kamm (fig. 2) mostra queste condizioni limite. La forza risultante  $F_{\text{Res}}$  rappresenta la forza massima che lo pneumatico può trasmettere in presenza d'attrito statico. Essa può essere scomposta in due parti:

- una forza periferica, in frenata;
- una forza di reazione laterale, durante un tragitto in curva.

Quando la forza periferica raggiunge il suo massimo, per esempio, in caso di slittamento delle ruote, nessuna forza laterale potrà più essere trasmessa. Quando è la forza di reazione laterale a raggiungere il suo massimo, gli pneumatici non potranno trasmettere nessuna forza periferica.

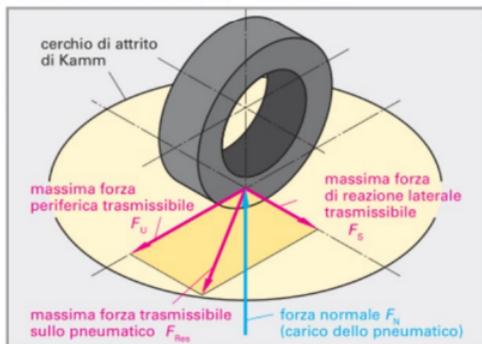


Figura 2: Cerchio di attrito di Kamm

### Tipi di costruzione dei cuscinetti radenti

**Cuscinetti monostrato.** Sono cuscinetti massicci costituiti da un solo materiale, per esempio leghe di rame-stagno. Sono utilizzati unicamente per le boccole (boccola del piede della biella, **fig. 1**).

**Cuscinetti a più strati (tab. 1).** Sono costituiti da due o più strati: guscio di sostegno, strato portante, strato antifrizione (**fig. 1**). Per migliorare la capacità di carico del cuscinetto, si deposita su un guscio di sostegno d'acciaio uno strato portante tramite laminatura o sinterizzazione. Le caratteristiche antifrizione del cuscinetto possono essere migliorate attraverso un sottile strato di scorrimento (10 - 30  $\mu\text{m}$ ) in leghe di piombo, stagno, alluminio o rame. Queste sono applicate mediante sinterizzazione, polverizzazione o galvanizzazione. Una barriera di nichel impedisce la diffusione di atomi di stagno dallo strato antifrizione allo strato portante. In questo modo sono preservate le caratteristiche dello strato antifrizione per l'intera durata di vita del cuscinetto.



Figura 1: Cuscinetto monostrato e cuscinetto a più strati

Tabella 1: Tipi di cuscinetti a più strati		
Cuscinetti a più strati	Struttura	Impiego
Cuscinetti galvanizzati a tre metalli	Guscio di sostegno: 1,5 mm d'acciaio Strato portante: 200 - 300 $\mu\text{m}$ di bronzo al piombo Strato di separazione: barriera di nichel 1 $\mu\text{m}$ Strato antifrizione: 12 - 20 $\mu\text{m}$ in lega PbSnCu	Cuscinetti di banco e cuscinetti di biella per motori a ciclo Otto sovralimentati
Cuscinetti placcati in alluminio	Guscio di sostegno: 1,5 mm d'acciaio Strato portante: 20 - 40 $\mu\text{m}$ in lega AlZn 4,5 SiCuPb Strato antifrizione: 200 - 400 $\mu\text{m}$ in lega AlSn 20	
Cuscinetti bonderizzati (procedimento chimico di fosfatazione)	Guscio di sostegno: 1,5 mm d'acciaio Strato di separazione: alluminio puro Strato antifrizione: 1 - 2 $\mu\text{m}$ di alluminio Strato di rodaggio: fosfato di zinco	
Cuscinetti polverizzati	Guscio di sostegno: 1,5 mm d'acciaio Strato portante: 200 - 300 $\mu\text{m}$ di piombo e bronzo Strato intermedio: 1 - 2 $\mu\text{m}$ in lega NiSn Strato antifrizione: 12 - 20 $\mu\text{m}$ in lega AlSn 20 polverizzata	
Cuscinetti radenti a ridotta manutenzione ( <b>fig. 2</b> )	Guscio di sostegno: 0,5 - 2 mm d'acciaio Strato portante: 0,2 - 0,35 mm di bronzo Strato antifrizione: 0,05 - 0,1 mm in polivinilidenefluoruro (PVDF), politetrafluoroetilene (PTFE) e piombo (Pb)	
Cuscinetti radenti senza manutenzione ( <b>fig. 2</b> )	Guscio di sostegno: 0,5 - 2 mm d'acciaio Strato portante: 0,2 - 0,35 mm in stagno bronzo al piombo Strato antifrizione: 0,01 - 0,03 mm in politetrafluoroetilene (PTFE) e piombo (Pb)	Cerniere delle portiere, alloggiamenti dei pedali, cuscinetti dei fusi dell'asse
		Tergicristallo, pompe d'iniezione, guide scorrevoli per il cambio

**Polverizzazione.** Questo procedimento consiste nell'applicare lo strato antifrizione tramite polverizzazione catodica di particelle fini che si comportano come un elettrodo (metallo bianco AlSn20 Cu).

I vantaggi della polverizzazione sono:

- applicazione omogenea dello strato antifrizione;
- elevata capacità portante del cuscinetto.

I **cuscinetti radenti con poca manutenzione (fig. 2)** permettono intervalli di lubrificazione più lunghi poiché presentano buone proprietà di funzionamento a secco.



Figura 2: Cuscinetti radenti con poca manutenzione e senza manutenzione

I **cuscinetti radenti senza manutenzione (fig. 2)** sono concepiti per il funzionamento a secco e non hanno bisogno di lubrificazione. Dei fluidi a contatto con i punti d'appoggio, per esempio l'olio, la benzina e l'acqua, migliorano l'eliminazione del calore e prolungano la durata di vita del cuscinetto.

- I vantaggi dei cuscinetti radenti sono:
- costo di fabbricazione più vantaggioso;
  - struttura più semplice.

**Cuscinetti a rotolamento (volventi).** Sono costituiti, nella forma più semplice, da: due anelli di scorrimento (uno esterno e uno interno), elementi rotanti e una gabbia di contenimento degli elementi rotanti stessi. Gli elementi rotanti girano sulle apposite piste esistenti nei due anelli. In questo modo, l'attrito radente è sostituito da un attrito di rotolamento che risulta notevolmente inferiore. La gabbia mantiene gli elementi rotanti a una corretta distanza di separazione. Non necessitano di manutenzione. A seconda della conformazione degli elementi rotanti, si differenziano in **cuscinetti a sfere e a rulli (fig. 1)**.

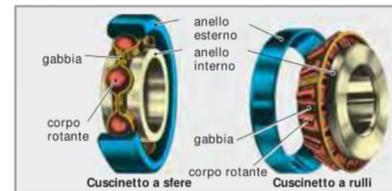


Figura 1: Cuscinetti a rotolamento (volventi)

**Cuscinetti a sfere.** Sono adatti per i regimi molto elevati (cuscinetto a sfere a gola profonda fino a 100.000 1/min). Il carico massimo che il cuscinetto può sostenere è quindi ridotto, dato che la pressione del cuscinetto è trasmessa ad una piccola superficie di contatto (contatto puntiforme) (**fig. 3**).

**Cuscinetti a rulli.** Si differenziano tra loro per la forma dei rulli. Ci sono cuscinetti a rulli cilindrici, cuscinetti ad aghi, cuscinetti a rulli conici, cuscinetti a rulli a botte (**fig. 2**)

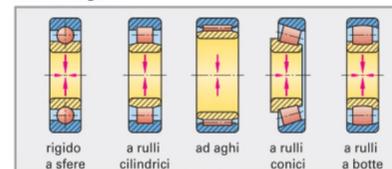


Figura 2: Tipi di cuscinetti distinti secondo la forma dei corpi rotanti

Essi non trasmettono la pressione su un unico punto, bensì su una linea (**fig. 3**), in modo che il carico massimo sostenuto sia maggiore rispetto a quello dei cuscinetti a sfere. Aumentano però, durante l'utilizzo, l'attrito e il riscaldamento del cuscinetto.

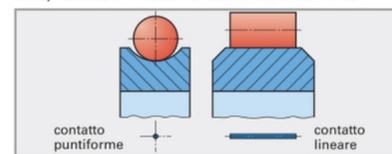


Figura 3: Forme di contatto nei cuscinetti volventi

**Disposizione dei cuscinetti.** Per un albero guidato da più cuscinetti, le forze assiali devono essere sostenute da un solo cuscinetto, definito cuscinetto fisso, il quale non deve in alcun modo essere soggetto a uno spostamento sul proprio asse. Le tolleranze di fabbricazione e la differenza di dilatazione lineare dovuta al calore devono essere compensate su ulteriori cuscinetti, definiti **cuscinetti liberi**, con lo scopo di impedire una tensione degli elementi rotanti sugli anelli di scorrimento. Nel cuscinetto fisso l'anello esterno e quello interno devono essere accoppiati in modo fisso (ossia con tolleranza di interferenza), rispettivamente alla sede della cassa e a quella dell'albero. Nel cuscinetto libero solo un anello può essere accoppiato in modo fisso, in quanto uno dei due deve poter spostarsi assialmente (**fig. 4**).

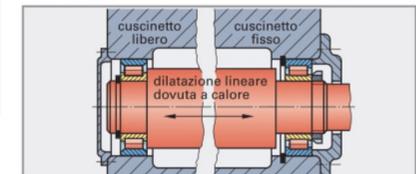


Figura 4: Disposizione dei cuscinetti

**Cuscinetti montati a coppie opposte.** Durante il montaggio, il gioco assiale può essere regolato in base alle esigenze contingenti: con gioco, senza gioco o con precario. Il gioco richiesto è ottenuto mediante lo spostamento dell'anello interno nella configurazione a O o dell'anello esterno in caso di configurazione a X. L'uso di cuscinetti a sfere a piste inclinate o di cuscinetti a rulli conici riduce il gioco radiale (**fig. 5**). Sia nella configurazione ad O sia per quella a X, il montaggio a coppie opposte è applicato in modalità fissa: questi cuscinetti non sono in grado di compensare eventuali differenze di dilatazione lineare dovute a calore, per cui sono adatti solo per alberi corti.

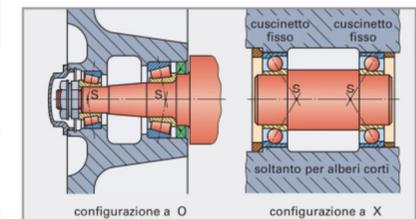


Figura 5: Cuscinetti montati a coppie opposte

### DOMANDE DI RIPASSO

- 1 Come possono essere suddivisi i cuscinetti a rotolamento?
- 2 Quali compiti devono assolvere i cuscinetti fissi e quelli liberi?

## 9.4 Guarnizioni

Le guarnizioni sono elementi di chiusura a tenuta stagna applicate a superfici di separazione fisse oppure mobili di macchinari, apparecchiature, tubazioni e serbatoi.

### Caratteristiche

- Isolare ambienti (volumi) di differente pressione (camera di scoppio da canalizzazioni dell'olio).
- Separare volumi di differenti materiali di utilizzo (canalizzazioni di olio e di liquido di raffreddamento).
- Riparare volumi da penetrazione di corpi estranei (polvere nei cuscinetti a rotolamento).
- Riparare macchinari e impianti dalla perdita di liquidi di esercizio o lubrificanti (pompe benzina).

### Guarnizioni statiche

La chiusura a tenuta stagna di superfici fisse è possibile grazie a guarnizioni metalliche, guarnizioni morbide e mastici. I materiali della guarnizione devono adattarsi tramite compressione alle irregolarità della superficie da isolare. Inoltre, devono ripartire in maniera omogenea le forze di compressione esercitate dai dispositivi di serraggio (viti e bulloni).

**Guarnizioni metalliche.** La chiusura ermetica si ottiene attraverso un'elevata precisione d'adattamento, un'ottima qualità di superficie (ridotta rugosità) e una forte compressione sulle superfici da ermetizzare (fig. 1).

**Guarnizioni morbide.** A causa della pressione superficiale, il materiale della guarnizione si deforma in modo tale da adattarsi alle superfici da rendere stagne (fig. 1), come nelle guarnizioni dei coperchi delle valvole.

**Mastici.** Sotto l'effetto delle forze di compressione, essi si deformano per diventare un elemento di guarnizione corrispondente ad una guarnizione morbida. Le irregolarità e le rugosità sono, quindi, riempite da materiale liquido e pastoso (fig. 2). I mastici possono essere utilizzati anche in combinazione a guarnizioni morbide o metalliche (fig. 2). Ci sono mastici che induriscono e altri che sono permanentemente elastici.

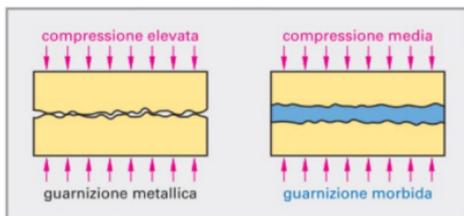


Figura 1: Guarnizioni metalliche e guarnizioni morbide

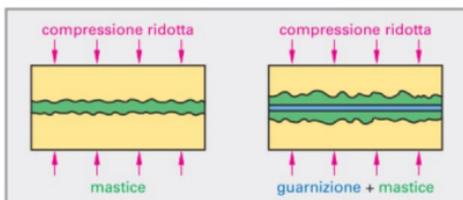


Figura 2: Mastice e guarnizione

**Profilati di tenuta.** L'effetto di chiusura ermetica è realizzato attraverso la deformazione del materiale elastico di guarnizione. Il profilo deformato genera la pressione di compressione necessaria per la chiusura ermetica della superficie da isolare, per esempio, nelle guarnizioni di gomma a sezione circolare (fig. 3) e nelle guarnizioni di gomma a sezione rettangolare (guarnizioni di gomma sul pistoncino della pinza di un freno a disco).

**Soffietti.** Hanno il compito di proteggere i punti d'appoggio dallo sporco e contengono spesso il grasso per la lubrificazione degli snodi (fig. 3).

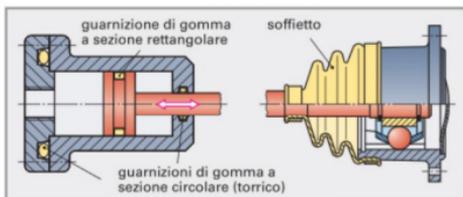


Figura 3: Profilati di tenuta e soffietto

### Guarnizioni dinamiche

Il materiale di guarnizione deve garantire la tenuta stagna di superfici in movimento.

**Guarnizioni radiali per alberi con molla.** Sono adatte per la tenuta stagna d'elementi in rotazione. L'albero è reso a tenuta stagna attraverso la compressione del labbro di tenuta sulla superficie dell'albero stesso. Questo è possibile grazie a una molla e a un leggero sovradimensionamento della guarnizione (interferenza) sull'involucro esterno. Quando l'albero ruota, per effetto della lubrificazione idrodinamica, sul labbro di tenuta si crea un gioco di tenuta di circa  $1 \mu\text{m}$ . Attraverso tale gioco, s'introduce una piccolissima quantità di olio che lubrifica il labbro di tenuta (fig. 4).

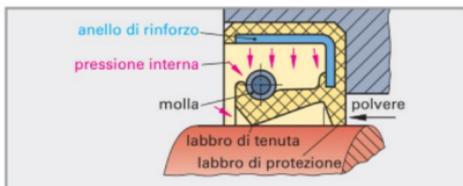


Figura 4: Anello di tenuta radiale con molla