

REALIZZAZIONE DELLE COPPIE INFERIORI

Le coppie cinematiche sono state definite nel capitolo 1 in base allo spostamento relativo fra i corpi da esse vincolati, indipendentemente dalla effettiva geometria delle parti (punti, linee, superfici) a contatto, dette *elementi coniugati della coppia*, e dalle condizioni di attrito e di lubrificazione. Nelle realizzazioni tecniche la forma degli elementi coniugati ha invece un grande interesse in quanto da essa dipendono il campo di impiego e le prestazioni della coppia. In funzione delle applicazioni le caratteristiche desiderate sono: elevata trasmissione di forze, bassi attriti, moderata usura.

Le 6 coppie inferiori possono essere realizzate con superfici teoricamente rigide, identiche e combacianti: il contatto di strisciamento fra tali superfici comporta rilevanti fenomeni di attrito, perciò è prassi industriale realizzare le coppie con superfici non combacianti per consentire di interporre fra i corpi o un lubrificante o elementi rotolanti. Come si è visto nei precedenti capitoli si distinguono quindi coppie:

- con contatto di strisciamento fra superfici asciutte o con lubrificazione limite;
- con contatto di strisciamento fra superfici con lubrificazione fluida;
- con contatto di rotolamento.

In conseguenza delle diverse modalità di accoppiamento la realizzazione della coppia può diventare assai complessa tanto che spesso la coppia è costruita in più parti separate che vengono poi adeguatamente montate.

Secondo la terminologia industriale corrente per le coppie prismatiche si chiama *guida* una coppia in cui uno dei corpi è fisso a telaio: in tal caso il corpo fisso è propriamente detto *guida*, mentre il corpo mobile è detto *pattino*. Se entrambi i corpi di una coppia prismatica sono mobili la coppia è detta *glifo*. La coppia rotoidale viene industrialmente denominata *cuscinetto* o *appoggio* o *supporto*, ma si usa il termine *cuscinetto* anche per indicare solo l'elemento esterno cavo della coppia, e il termine *perno* per indicarne l'elemento interno pieno. La coppia rotoidale è spesso costituita da due parti, una che impedisce il movimento ortogonalmente all'asse di rotazione (detta *cuscinetto radiale*), l'altra che impedisce il movimento lungo l'asse stesso (detta *cuscinetto assiale*). Se le due parti sono assemblate in modo da costituire un unico componente si parla di *cuscinetto combinato*.

La coppia elicoidale è industrialmente chiamata *vite*, ma si usa anche il termine *vite* per indicare solo l'elemento interno pieno della coppia, e il termine *madrevite* (e talvolta *dado*) per indicarne l'elemento esterno cavo. Le *viti di manovra* sono usate per trasformare moti di rotazione in moti di traslazione (o viceversa), le *viti di collegamento* servono per realizzare collegamenti fissi, ma smontabili, fra pezzi diversi.

5-1 Coppie con contatto di strisciamento fra superfici asciutte o con lubrificazione limite

In questo caso le superfici a contatto combaciano, a meno di una piccola differenza dovuta alle tolleranze di lavorazione. Le superfici asciutte si adottano quando si vogliono usare le elevate forze di attrito che si sviluppano per esempio nei contatti ceppi-tamburo dei freni o nel contatto vite-madrevite nelle viti di collegamento. Altresì viene adottato l'accoppiamento asciutto quando non si ritiene accettabile la presenza del lubrificante, per esempio nell'industria alimentare per le parti di macchina a contatto con il prodotto. In questi casi almeno una delle superfici è realizzata con materiale a basso attrito e bassa usura (ad esempio il teflon).

E' in generale utile evitare il contatto diretto fra superfici metalliche, almeno con la lubrificazione limite. Talvolta si usano cuscinetti *porosi* ottenuti per sinterizzazione e impregnati di olio lubrificante. Altre volte la lubrificazione è a grasso.

Note le caratteristiche geometriche e fisiche della coppia è possibile determinare il valore delle forze applicate in condizioni di regime, la pressione specifica e l'usura delle superfici.

La Fig. 5.1 mostra un esempio di realizzazione industriale di una coppia prismatica. Si tratta di un appoggio per la tavola di una macchina utensile in cui la guida è solidale al telaio della macchina

mentre il pattino è collegato alla slitta. L'accoppiamento è mantenuto dalla forza peso F della slitta.

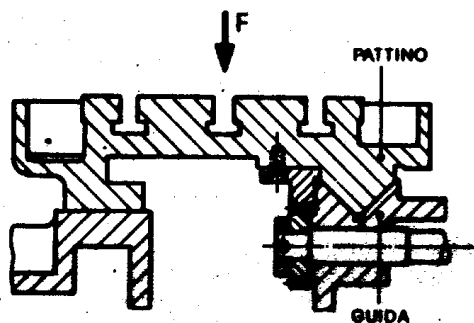


Fig. 5.1 Guida prismatica a lubrificazione limite

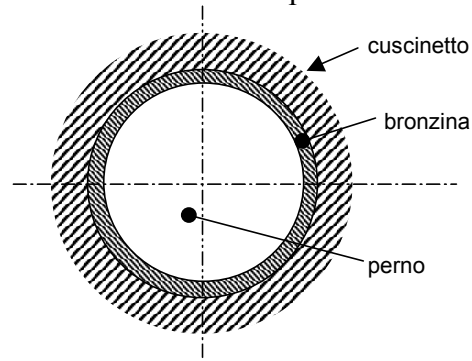


Fig. 5.2 Coppia rotoidale con bronzina

Le coppie possono essere realizzate interponendo fra i due elementi un terzo elemento di materiale diverso, in genere di materiale più tenero. Un esempio di applicazione è mostrato in Fig. 5.2 per la coppia rotoidale dove l'elemento intermedio è denominato *bronzina*. In questo modo l'usura delle parti è prevalentemente concentrata sul materiale interposto, in modo che, quando necessario, lo si può sostituire rapidamente e con costi contenuti. Un esempio simile è mostrato nel frantoio di Fig. 1.13 dove si vedono le coppie rotoidali con la farfalla realizzate con interposizione di intarsi facilmente sostituibili quando risultino usurati. Quando si voglia avere un buon rendimento della coppia si può adottare un materiale intermedio con basso fattore di attrito o un materiale poroso, in modo che possa rilasciare il lubrificante di cui viene imbevuto. Viceversa, il materiale intermedio può avere attrito elevato, come avviene nei freni. In questo caso fra ceppo e tamburo si interpone, fissandolo al ceppo, il materiale desiderato.

5-2 Coppie con lubrificazione fluida idrodinamica

E' possibile mantenere le superfici della coppia separate da una pellicola (*film*) di fluido lubrificante quando la forza risultante delle pressioni nel fluido riesce ad equilibrare le forze agenti sui corpi della coppia. Il lubrificante può essere messo in pressione o per effetto idrodinamico o per effetto idrostatico.

Si possono realizzare sia coppie prismatiche sia coppie rotoidali con lubrificazione idrodinamica. Nelle realizzazioni tecniche della coppia prismatica un elemento dell'accoppiamento è piano; l'altro elemento può essere piano o di altra forma e avere orientamento fisso o variabile. La forma può essere:

- piana (a pattino fisso, Fig. 5.3-a; a pattino orientabile, Fig. 5.3-b);
- a gradino (Fig. 5.3-c);
- composta (Fig. 5.3-d e 5.3-e);
- curva (Fig. 5.3-f);

Le soluzioni delle figure d, e si prestano al moto alternativo (bidirezionale), dato che presentano meati convergenti (che quindi consentono di sviluppare portanza) in entrambe le direzioni di moto (il pattino, nelle soluzioni b, f, in cui è oscillante, si inclina automaticamente in modo da formare sempre meato convergente e quindi anche queste soluzioni possono consentire movimento bidirezionale). La soluzione di Fig. 5.3-e tiene conto che nel moto alternativo la velocità diventa molto piccola fino ad annullarsi quando il moto si inverte: in questi istanti il fluido non ha portanza e i corpi della coppia possono venire a contatto. Il tratto intermedio di parete piana consente che il contatto avvenga senza pressioni eccessive e permette di avere lubrificazione limite. Le soluzioni più complesse (Fig. 5.3-b, e, f) sono più costose, più pesanti e hanno maggiore inerzia).

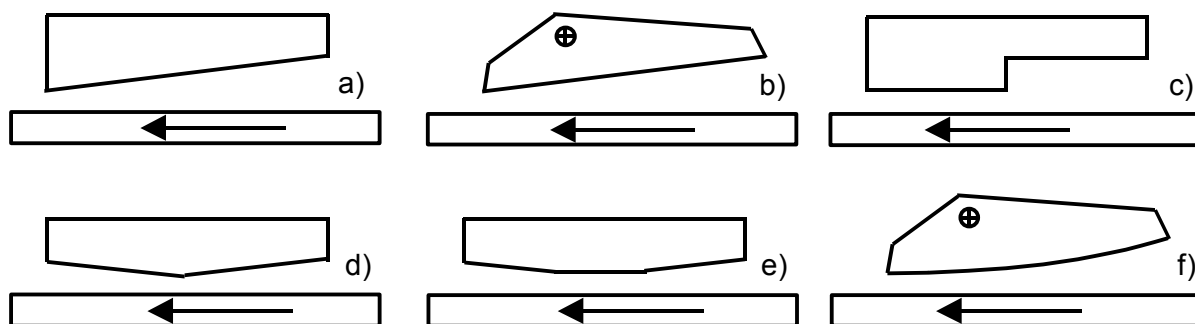


Fig. 5.3 Soluzioni per coppie prismatiche a lubrificazione idrodinamica

Come si è visto nel capitolo 4, il meato si forma "naturalmente" nella coppia rotoidale per effetto dell'eccentricità del perno sotto carico. Si può migliorar la stabilità della coppia inserendo un certo numero di pattini oscillanti (analoghi a quello schematizzato in Fig. 5.3-f) lungo la superficie cilindrica laterale del cuscinetto. La Fig. 5.4-a mostra un esempio di cuscinetto radiale a pattini oscillanti. E' anche possibile realizzare supporti assiali (reggispinta), Fig. 5.4-b, in grado di sviluppare elevate portanze in direzione parallela all'asse di rotazione, ricavando "scalini" fissi o mobili sulla superficie della base del cuscinetto in modo da realizzare un certo numero di meati convergenti il cui effetto idrodinamico globale realizza la portanza desiderata.

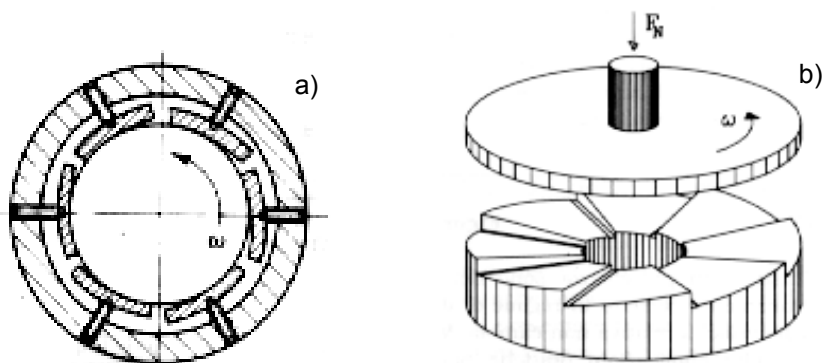


Fig. 5.4 Supporti radiale a pattini orientabili e assiale (reggispinta) a pattini fissi

Fra le varie applicazioni dei cuscinetti a lubrificazione idrodinamica si cita il sostegno di gruppi verticali e orizzontali di turboalternatori (Fig. 5.5-5.9); si tratta di sistemi a velocità di regime costante e unidirezionale, per i quali la lubrificazione idrodinamica ha caratteristiche ottime.

Il gruppo ad asse verticale di Fig. 5.5 è sospeso in alto: in 2 è posto un cuscinetto *combinato* che ha funzione di coppia rotoidale, con funzione sia assiale (per sostenere tutto il peso del gruppo e le spinte verticali), sia radiale (per sostenere parte delle spinte orizzontali). In 3 è posto un cuscinetto radiale per sostenere la parte restante delle spinte orizzontali. Lo schema statico è dunque quello di una trave incernierata in alto (in 2) e semplicemente appoggiata in basso (in 3). Il disegno del cuscinetto combinato è riportato in Fig. 5.6 e Fig. 5.7. In Fig. 5.7 si vede, a sinistra, lo schema per il sostentamento assiale (a pattini oscillanti); a destra si vede lo schema per il sostentamento radiale (ancora a pattini oscillanti). In entrambi i casi i singoli pattini inclinati sono liberi di oscillare secondo lo schema di Fig. 5.3-b o di Fig. 5.3-f. La posizione dei pattini può essere modificata agendo su pistoni idraulici che fungono da supporto al pattino.

Il gruppo ad asse orizzontale di Fig. 5.8 ha in A un cuscinetto combinato (per sostenere parte del peso del gruppo, tutte le spinte assiali e parte delle spinte radiali) e in B un cuscinetto radiale (per sostenere parte del peso del gruppo e parte delle spinte radiali). Lo schema statico è dunque quello di una trave incernierata a sinistra (in A) e semplicemente appoggiata a destra (in B). A differenza del caso del gruppo verticale questa realizzazione non prevede pattini oscillanti.

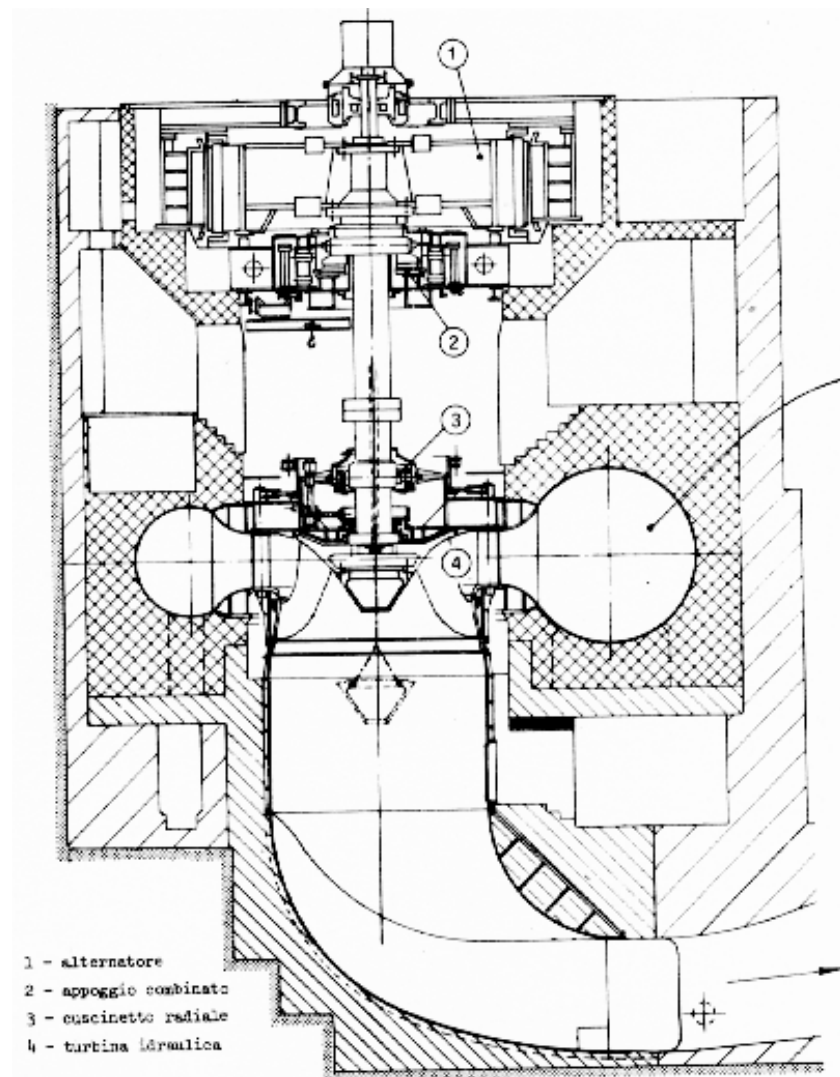


Fig. 5.5 Gruppo turboalternatore (idraulico) ad asse verticale

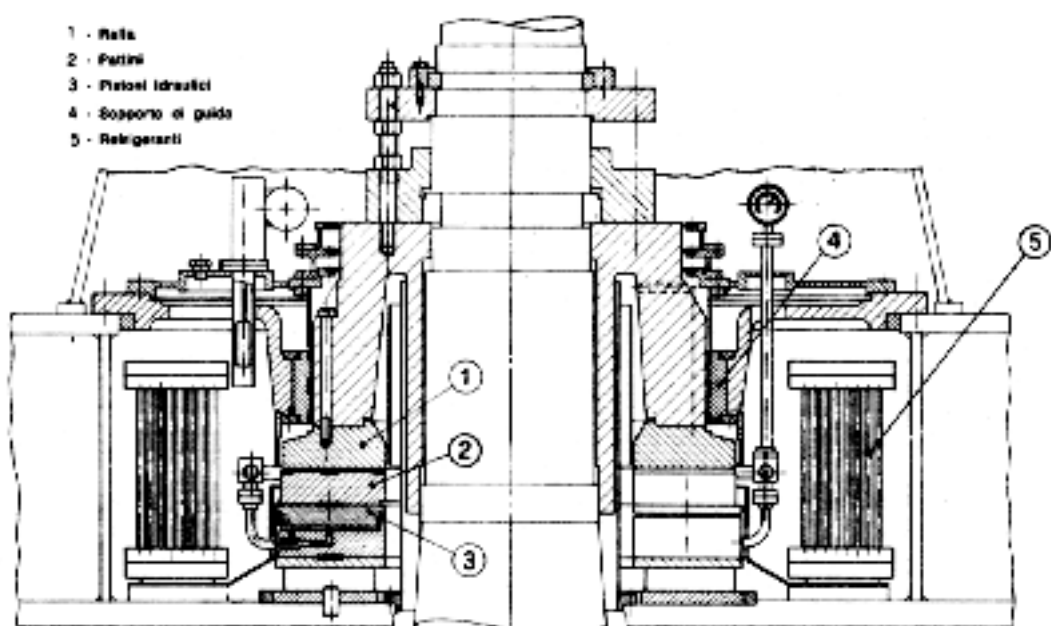


Fig. 5.6 Particolare del cuscinetto combinato

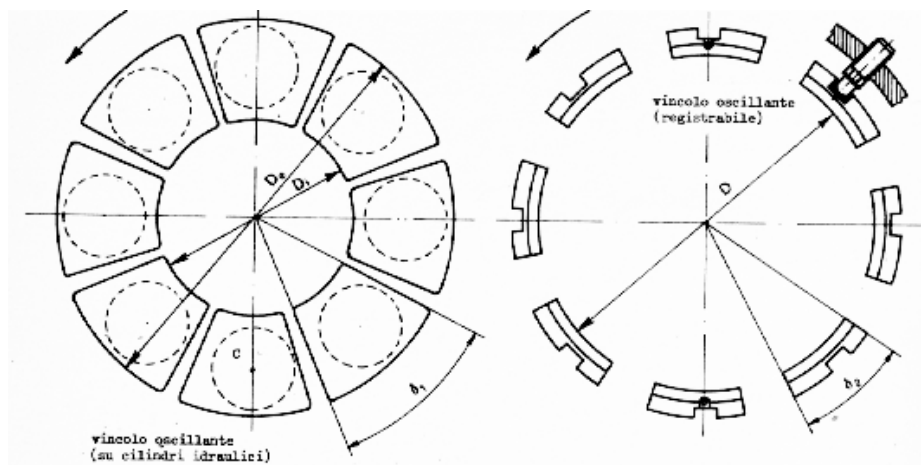


Fig. 5.7 Particolare del cuscinetto combinato: assiale e radiale

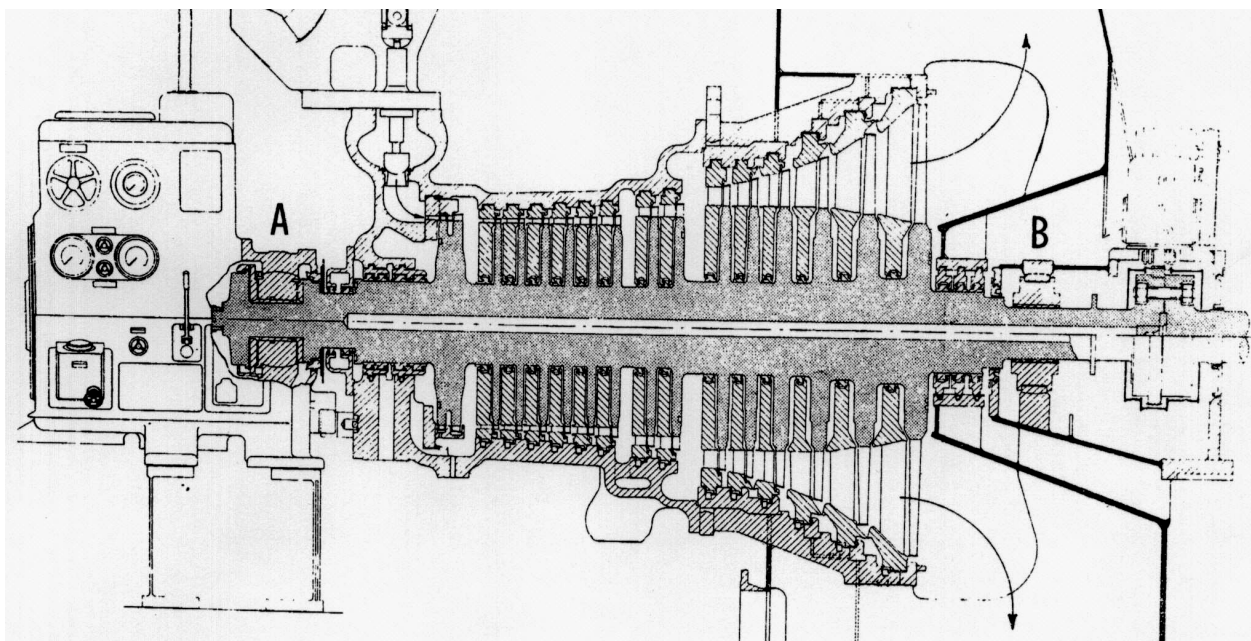


Fig. 5.8 Gruppo turboalternatore (a vapore) ad asse orizzontale

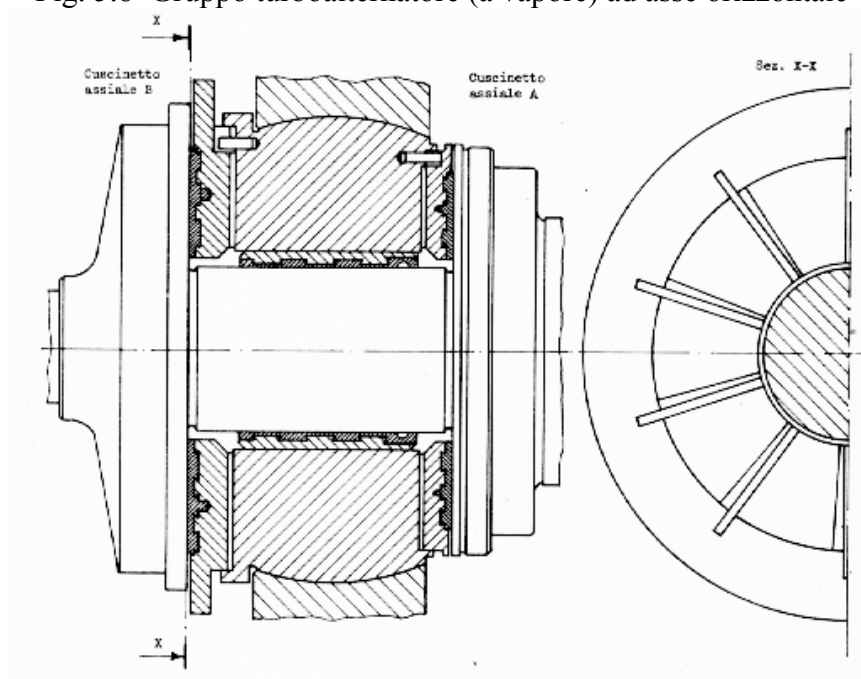


Fig. 5.9 Particolare del cuscinetto combinato in A

5-3 Coppie volventi

L'applicazione di gran lunga più diffusa delle coppie volventi riguarda la realizzazione delle coppie rotoidali (radiali, assiali e combinate), mentre sono meno frequenti le realizzazioni delle coppie prismatica ed elicoidale. Il componente meccanico che realizza la coppia, chiamato *cuscinetto volvente* o *a rotolamento*, è costituito da più parti preassemblate e viene inserito fra i corpi che devono essere vincolate rototidalmente che molto spesso sono il perno di un albero e un foro praticato nel corpo da accoppiare con l'albero.

I cuscinetti volventi possono essere caratterizzati da diverse proprietà:

- forma degli elementi rotolanti: sfere (*cuscinetti a sfere*), rulli (*cuscinetti a rulli*), rullini (*cuscinetti a rullini*);
- direzione della retta che passa per i punti di contatto fra elementi rotolanti e piste: perpendicolare all'asse di rotazione (*cuscinetti radiali*), parallela all'asse di rotazione (*cuscinetti assiali*), diversa dalle precedenti (*cuscinetti obliqui*);
- possibilità di disallineamento fra gli assi dell'anello interno e di quello esterno: se presente il cuscinetto è detto *orientabile*, altrimenti è detto *rigido*.

I cuscinetti radiali a sfere sono di solito costituiti da 4 sottoinsiemi principali (Fig. 5.10): un *anello interno* grossomodo cilindrico sulla cui superficie laterale esterna è ricavata una pista; un *anello esterno*, di dimensioni tali da contenere ampiamente il primo, sulla cui superficie laterale interna è ricavata una pista; un certo numero di sfere, di raggio tale da poter essere alloggiate nelle piste fra i due anelli; una gabbia per distanziare fra loro le sfere e trattenerle nella posizione circonferenziale prevista. I cuscinetti assiali a sfere sono costituiti in modo simile, ma con anelli uguali e piste ricavate nelle rispettive basi.

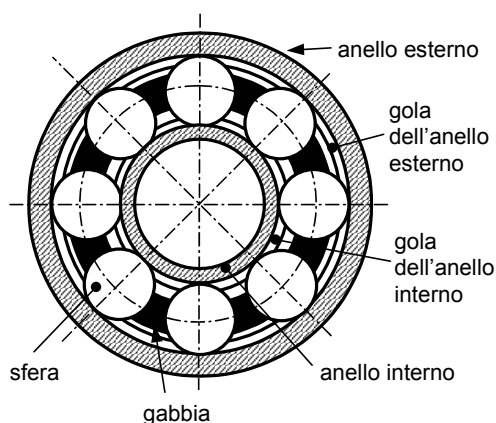


Fig. 5.10 Elementi di un cuscinetto a sfere

Gli altri tipi di cuscinetti volventi (a rulli, a rullini, etc.) sono costituiti in modo simile, cambiando la forma degli elementi rotolanti e quella corrispondente delle piste.

I cuscinetti volventi trovano applicazione in ogni tipo di macchina e possono essere prodotti in una gamma di dimensioni che a partire da sistemi miniaturizzati non ha in pratica un limite superiore. Due applicazioni di cuscinetti a sfere sono riportate in Fig. 5.11. La prima mostra i cuscinetti di banco di un motore a combustione interna a due tempi, la seconda i cuscinetti di appoggio della ruota motrice di un veicolo a trazione anteriore.

Fig 1.42 - Motore a c.i. a due tempi, ad un solo cilindro, raffreddato ad aria (per ciclomotori)

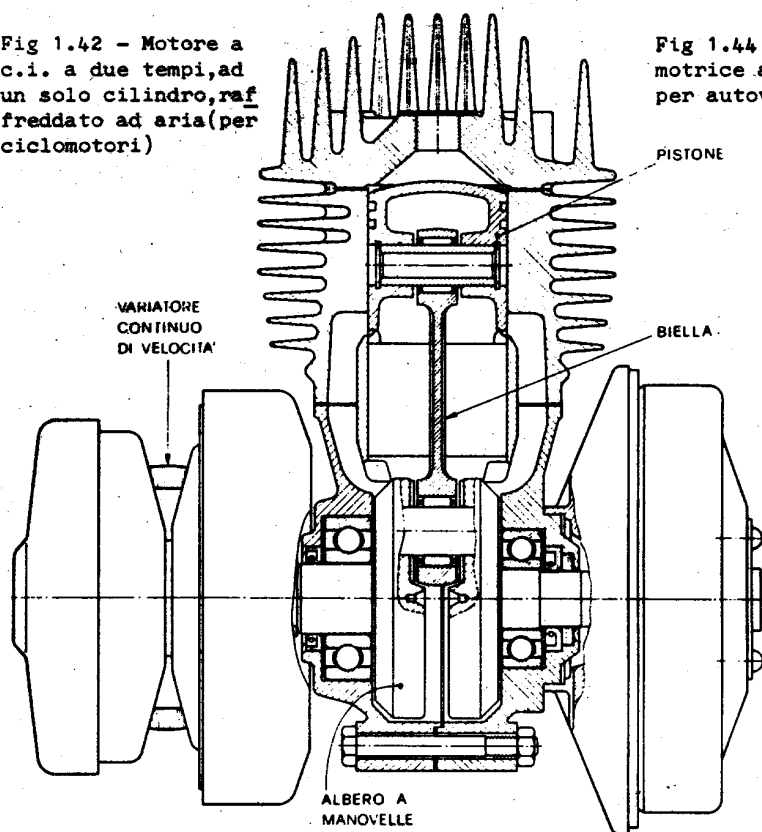


Fig 1.44 - Ruota motrice anteriore per autoveicolo

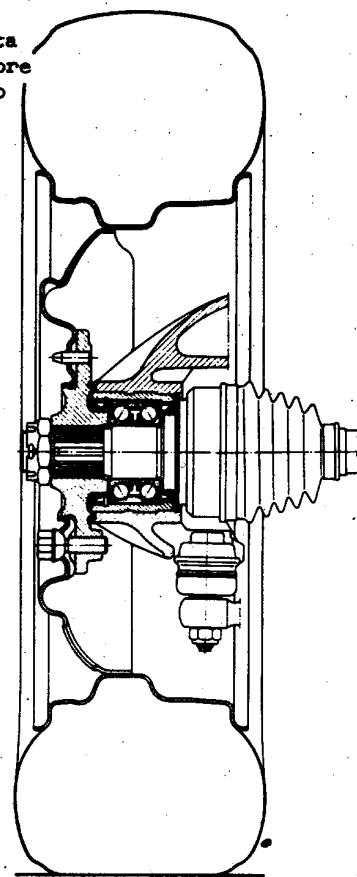
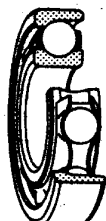
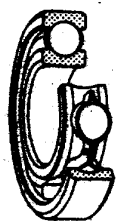
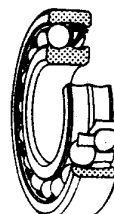


Fig. 5.11 Applicazioni di cuscinetti volventi

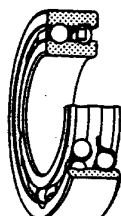
La Fig. 5.12 mostra diverse tipologie di cuscinetti *radiali*. La Fig. 5.13 riporta il disegno in sezione di alcuni cuscinetti: i primi cinque di tipo *radiale*, gli ultimi due di tipo *assiale*.



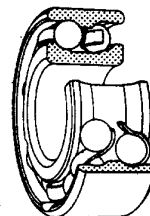
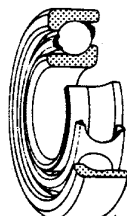
Cuscinetti rigidi a sfere ad una corona



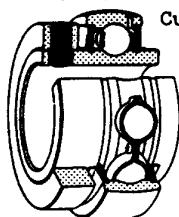
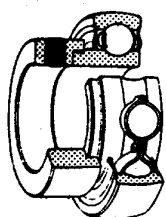
Cuscinetti orientabili a sfere, con foro cilindrico



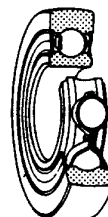
Cuscinetti rigidi a sfere a due corone



Cuscinetti obliqui a sfere

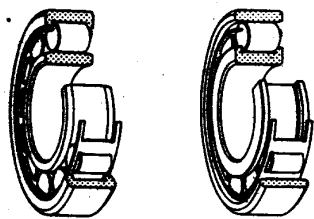


Cuscinetti Y

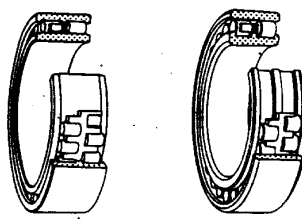


Rotelle

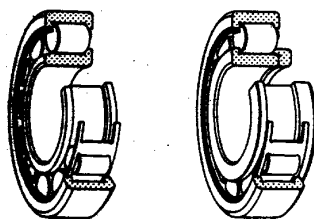
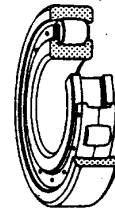
Cuscinetti a rulli cilindrici, ad una corona



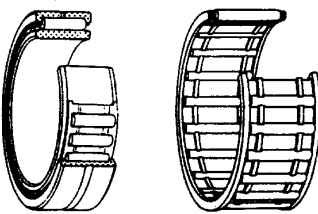
Cuscinetti a rulli cilindrici, a due corone



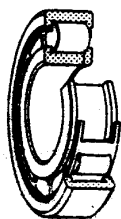
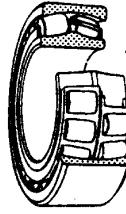
Cuscinetti orientabili a rulli, ad una corona



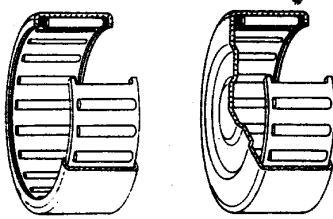
Cuscinetti a rullini



a due corone



Gusci a rullini

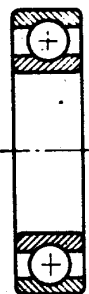


Cuscinetti a rulli conici



Fig. 5.12 Cuscinetti volventi

radiale rigido a sfere



rad.rig. a sfere a due corone



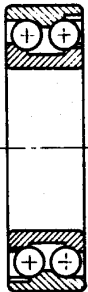
radiale orientabile a sfere



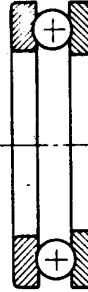
obliquo a sfere



obliquo a due corone di sfere



assiale a sfere



assiale obliquo a sfere

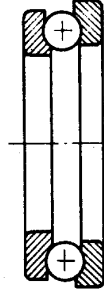


Fig. 5.13 Cuscinetti a sfere sezionati

I diversi tipi di cuscinetti volventi si prestano a diversa applicazioni: la tabella seguente confronta, indicativamente, le attitudini di diversi tipi di cuscinetti.

TIPO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
radiale a sfere	+	+	+	-	+++	+	+++	+++	-
radiale a sfere (2 corone)	+	+	+	+	+	+	+	++	--
radiale orientabile a sfere	+	-	-	--	++	-	++	++	+++
radiale obliquo a sfere	+	+	++	-	++	+	++	++	-
radiale a rulli cilindrici	++	--	--	--	+++	++	++	++	-
radiale a rulli conici	++	++	+++	--	+	++	+	+	-
assiale a sfere	--	+	--	--	+	+	-	+	--
assiale a rulli cilindrici	--	++	--	--	-	++	-	-	--

Legenda: 1) carico radiale; 2) carico assiale; 3) carico combinato; 4) momento sopportato; 5) velocità; 6) rigidità; 7) silenziosità; 8) basso attrito; 9) compensazioni errori di allineamento

Gli elementi per la scelta e il calcolo dei cuscinetti volventi esistenti in commercio sono presentati nei cataloghi dei costruttori.

Meno frequenti della coppia rotoidale, comunque possibili da ottenere in svariate soluzioni alternative, sono le realizzazioni volventi di coppie prismatiche ed elicoidali: alcuni esempi sono riportati in Fig. 5.14 e in Fig. 5.15.

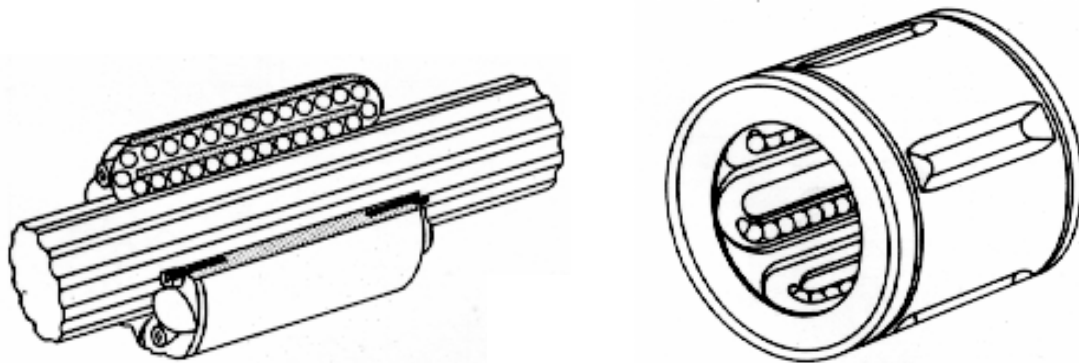


Fig. 5.14 Esempi di coppie prismatiche volventi

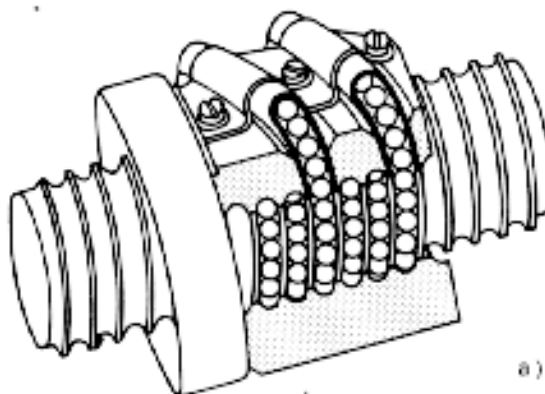


Fig. 5.15 Esempio di coppia elicoidale volvente

5-4 Confronto fra le caratteristiche delle coppie

Dato che le funzioni tipiche delle coppie inferiori possono essere ottenute con costruzioni assai differenti è utile confrontare qualitativamente le prestazioni delle varie soluzioni. Il confronto viene presentato nella successiva tabella per la coppia rotoidale, la più diffusa nelle applicazioni. Le caratteristiche riportate in tabella forniscono indicazioni anche per le realizzazioni delle coppie prismatica ed elicoidale.

Progetto. Il progetto di coppie a lubrificazione limite è abbastanza semplice: occorre scegliere i materiali, limitare le pressioni specifiche e il riscaldamento. Il progetto delle coppie a lubrificazione fluida richiede il disegno dei cuscinetti (non sempre circolari) la scelta del lubrificante e il dimensionamento del sistema di ricircolo dell'olio, più complesso nel caso idrostatico. Il progetto di coppie a rotolamento è facilitato dall'esperienza dei produttori che mettono a disposizione manuali con tabelle e formule per la scelta e il montaggio dei cuscinetti.

Impianto di lubrificazione. Nel caso di coppie a lubrificazione fluida occorre disporre di sistemi più o meno complicati di alimentazione, raccolta, filtraggio e raffreddamento dell'olio. Nel caso idrodinamico si parla di *lubrificazione forzata* quando nel circuito è presente una pompa che garantisce una certa portata di olio (per esempio la *portata di rimbocco* che compensa la fuoriuscita assiale dell'olio dal cuscinetto a cui si è accennato nel capitolo 5). La pompa comunque non fornisce

la pressione nel meato per creare la portanza. Se la lubrificazione è idrostatica il circuito di alimentazione è più complesso e costoso dato che deve creare e mantenere nei pozzetti la pressione necessaria per vincere il carico esterno, produrre le adeguate resistenze idrauliche e disporre di eventuali sistemi di regolazione.

	Lubrificazione. limite	Lubrificazione fluida idrocinamica	Lubrificazione fluida idrostatica	A rotolamento a sfere	A rotolamento a rulli
Progetto	normale	normale	complesso	semplice	semplice
Impianto di lubrificazione	molto semplice	complesso	molto complesso e costoso	spesso semplice	spesso semplice
Finitura delle superfici	media	elevata	modesta	elevata	elevata
Protezione contro polveri, trucioli, ...	media	modesta	modesta	elevata	elevata
Montaggio	semplice	semplice	semplice	accurato	molto accurato
Precisione di allineamento	media	modesta	modesta	media	elevata
Costo di fabbricazione e installazione	modesto	medio	elevato	modesto	modesto
Costo di manutenzione	modesto	medio	elevato	medio	medio
Durata (vita)	modesta	elevata	molto elevata	media	media
Consumo di potenza in esercizio	medio	modesto	elevato	modesto	modesto
Capacità di carico	modesta	media	media	media	elevata
Rigidità		variabile	elevata	media	elevata
Capacità di sopportare sovraccarichi e vibrazioni	modesta	elevata	molto elevata	modesta	modesta
Fattore di attrito	0.05-0.1	0.001-0.005	0.001-0.005	0.001-0.003	0.001-0.003
Microstrisciamento (stick slip)	elevato	assente	assente	assente	assente
Usura	elevata	modesta	assente	media	media

Finitura delle superfici. Le superfici costituiscono un fattore meno critico nel caso di lubrificazione idrostatica, in quanto la lubrificazione è sempre garantita. Nel caso di lubrificazione idrocinamica occorre tener conto che la irregolarità delle superfici deve essere inferiore all'altezza minima di meato. Inoltre durante l'avviamento e l'arresto della macchina si ha lubrificazione limite e occorre rivestire una delle due superfici (in genere il cuscinetto) di materiale *antifrizione* con buone caratteristiche antiusura, anticorrosione e di conducibilità termica.

Protezione contro polveri, trucioli, ... Le coppie a rotolamento devono essere protette contro la penetrazione di sostanze estranee (polvere, trucioli, particelle di usura, etc.) e adeguatamente lubrificate se si vuol garantire una durata significativa del componente. Le coppie a lubrificazione fluida sono meno sensibili alla presenza di impurità, a patto di filtrare l'olio.

Montaggio e precisione di allineamento. Il montaggio delle coppie a rotolamento deve essere effettuato in locali non polverosi, non si devono urtare gli elementi rotolanti, devono essere usati adeguati strumenti per il montaggio e il forzamento. La precisione di allineamento è importante nelle coppie dove non può esserci movimento significativo oltre a quello macroscopico, per evitare la formazione di stati di tensione anche in assenza di carico.

Costo di fabbricazione, installazione e manutenzione. Il costo di fabbricazione e installazione è relativamente modesto per coppie a rotolamento, medio per quelle a lubrificazione idrocinamica, elevato per la lubrificazione idrostatica. In questo caso anche il costo di manutenzione è più elevato data la complessità del sistema di alimentazione. Però, quando la coppia a rotolamento va fuori uso occorre sostituirla integralmente, mentre in quella lubrificata basta sostituire il metallo antifrizione.

Durata. La durata delle coppie dipende dalle scelte di progetto, dalla bontà del montaggio, dal tipo di carico, dalla adeguata lubrificazione. I produttori forniscono istruzioni per la scelta delle coppie a rotolamento in funzione della durata desiderata. In generale le coppie a rotolamento sono specialmente indicate per macchine che funzionano a velocità molto variabili e con frequenti arresti e avviamenti (per esempio negli autoveicoli). Quelle a lubrificazione idrodinamica sono molto adatte per macchine che lavorano per lunghi periodi in condizioni di regime (per esempio le turbine a vapore per produzione di energia). Le coppie a lubrificazione idrodinamica sono specialmente applicate nelle macchine utensili e possono avere durata pressoché illimitata.

Consumo di potenza in esercizio. E' sempre molto basso per le coppie a rotolamento. Per le coppie a lubrificazione idrodinamica è basso, ma aumenta con la velocità di rotazione e con la viscosità dell'olio, come mostrano le relazioni (4.5) e (4.6). Cresce quando, durante le fasi di avviamento e arresto, il regime passa da idrodinamico a limite. Se si attua la lubrificazione forzata occorre tener conto della potenza necessaria ad azionare il relativo impianto. La potenza richiesta è elevata nella lubrificazione idrostatica per effetto della presenza del sistema di alimentazione dell'olio in pressione.

Capacità di carico e rigidità. La capacità di carico delle coppie con lubrificazione limite è condizionata dalla necessità di evitare riscaldamenti locali eccessivi e di contenere l'usura delle parti a contatto. La capacità di carico delle coppie a lubrificazione idrodinamica è molto bassa quando la coppia è ferma e cresce con la velocità di rotazione. La capacità di carico delle coppie a lubrificazione idrostatica è praticamente indipendente dalla velocità di rotazione ed è elevata anche a coppia ferma. Le coppie possono funzionare con carico elevato anche a velocità molto alte. Le coppie a rotolamento hanno buona capacità di carico che diventa elevata per quelle a rulli, anche a coppia ferma. In generale la capacità di carico diminuisce all'aumentare della velocità.

Rigidità. la rigidità rappresenta il rapporto fra le deformazioni del cuscinetto (per esempio lo spostamento dell'asse di rotazione) e il carico applicato. Nelle coppie a lubrificazione idrodinamica è elevata in presenza di alte velocità e di alti carichi. Nelle idrostatiche è sempre elevata ed è uno degli elementi a favore dell'adozione di queste. Con le coppie a rotolamento può essere elevata, specie con quelle a rulli, se si precarica la coppia, riducendone però la durata.

Comportamento dinamico (capacità di sopportare sovraccarichi e vibrazioni). Il comportamento delle coppie in conseguenza di fenomeni dinamici è molto migliore nel caso di coppie con lubrificazione fluida rispetto a quelle a rotolamento. Accelerazioni in rapidi transitori urti (di entità non eccessiva) e vibrazioni vengono ben sopportati e smorzati nei contatti mediati dall'olio, mentre sono pericolosi in presenza degli elementi (solidi) rotolanti (sfere e rulli).

Fattore di attrito. Ad eccezione delle coppie a lubrificazione limite, i fattori di attrito sono bassi per tutti i tipi di coppie considerati e dello stesso ordine di grandezza.

Usura. L'usura è modesta per le coppie a lubrificazione idrodinamica (a meno di frequenti avviamenti e arresti, per cui la coppia passa a lubrificazione limite) ed è praticamente assente (anche per frequenti avviamenti e arresti) per la coppia a lubrificazione idrostatica. L'usura delle coppie a rotolamento è più elevata ed è uno dei parametri base (definito in termini di *durata*) per il calcolo e la scelta del cuscinetto a rotolamento per una data applicazione.