

CUSCINETTO A SOSTENTAMENTO IDRODINAMICO

Soluzione per mandrini di rettificatrici

Il cuscinetto Mackensen, da molti anni usato sul mandrino delle rettificatrici tangenziali

Delta, presenta una serie di caratteristiche tecnologiche molto interessanti.

Scopriamole insieme.

di Giovanni Marchesi*

Il termine cuscinetto viene spesso utilizzato come sinonimo di cuscinetto volvente, in cui, cioè, la riduzione dei fenomeni legati all'attrito è dovuta all'interposizione tra le parti in movimento di sfere o di rulli. Si tratta di componenti meccanici molto comuni che, essendo disponibili in svariate soluzioni costruttive, sono presenti nella maggior parte delle macchine. Tuttavia esistono anche cuscinetti in cui il sostentamento e l'eliminazione dell'attrito radente sono ottenuti mediante l'interposizione tra le parti in movimento di un velo d'olio in grado di creare un meato portante, cioè uno strato di fluido lubrificante capace di sostenere i carichi applicati, interponendosi tra le parti in moto relativo ed evitando il contatto. In particolare è bene distinguere tra cuscinetti idrostatici, in cui il meato portante è prodotto dall'introduzione di olio in pressione, e cuscinetti idrodinamici, in cui il sostentamento, come vedremo, è dovuto all'effetto combinato di viscosità dell'olio, velocità relativa delle parti in movimento e geometria del sistema (effetto vi-

sco-cinetico-geometrico).

Al fine di rendere più familiari i cuscinetti a sostentamento idrodinamico, è giusto ricordare che nei motori a combustione interna, a benzina e diesel, l'albero a gomiti è supportato (perni di banco e di manovella) da cuscinetti idrodinamici, a cui ci si riferisce talvolta con il nome di bronzine, anche se non sono ormai più realizzati in bronzo ma con particolari leghe antifrizione. Inoltre i cuscinetti idrodinamici, oltre che nelle macchine utensili, trovano un importante impiego nei

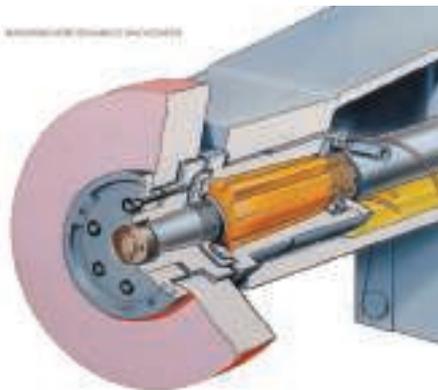
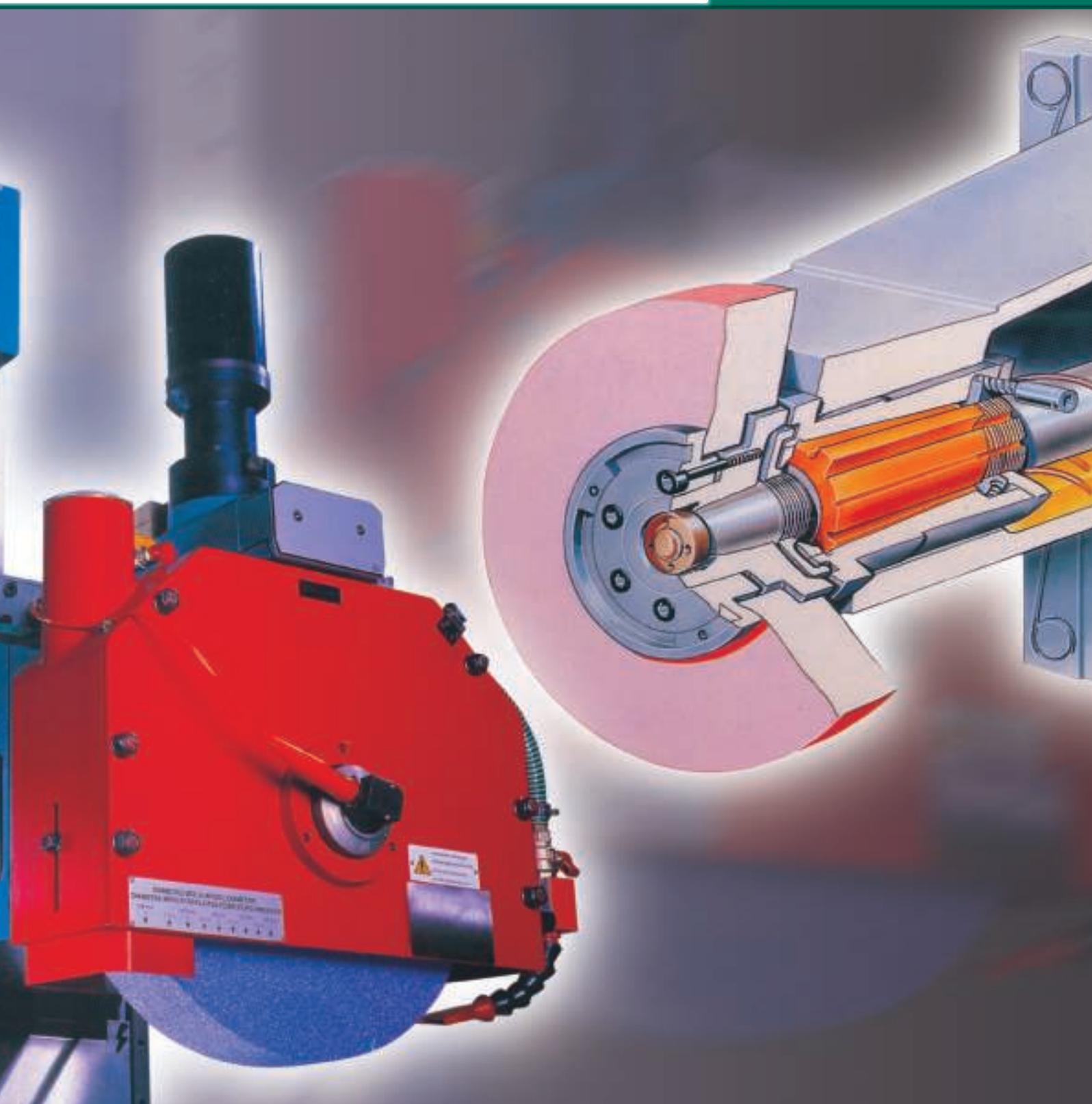


Fig. 1 - Rettificatrice tangenziale Delta: spaccato del cuscinetto Mackensen.



supporti delle turbine e dei cilindri ausiliari delle gabbie di laminazione, mentre noti esempi di cuscinetti a sostentamento idrodinamico sono offerti dai cuscinetti assiali Mitchell e Kingsbury, o da quello radiale Filmatic, nei quali il carico è sostenuto da pattini orientabili. In particolare i cuscinetti Filmatic, co-



sì come quelli di tipo Mackensen, sono usati, per le loro peculiari caratteristiche di precisione e silenziosità di rotazione, sui mandrini delle rettificatrici per piani, per esterni e senza centri, permettendo di ottenere finiture superficiali e tolleranze dimensionali e geometriche molto ristrette.

Il cuscinetto Mackensen, da molti anni usato sul mandrino delle rettificatrici tangenziali Delta (fig. 1), diversamente dal Filmatic, non è dotato di pattini orientabili, ma è costituito da una boccia liscia, in genere di bronzo speciale, avente all'esterno tre nervature leggermente coniche disposte a 120°. Ta-

le boccia (o bronzina) viene montata in una bussola, di norma di ghisa, dotata della stessa conicità, in modo che, spostando assialmente la bronzina mediante il filetto di cui è dotata, essa si deforma creando tre superfici (o lobi) a 120° (fig. 2) che, come vedremo, ne caratterizzano il funzionamento

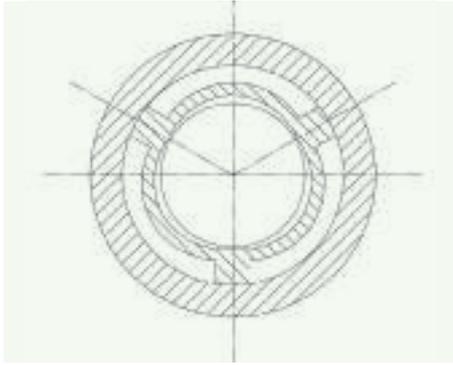


Fig. 2 - Sezione cuscinetto Mackensen (fuori scala per accentuare i tre lobi a 120°).

idrodinamico. In particolare lo spostamento assiale della boccola all'interno della bussola è dovuto a un sistema vite senza fine ruota elicoidale che agisce sul filetto della bronzina, consentendo una regolazione micrometrica del gioco. Prima di esaminare in dettaglio le caratteristiche principali del cuscinetto Mackensen, è necessario cercare di comprendere i principi alla base della lubrificazione idrodinamica, per poi ricondurli a un accoppiamento albero cuscinetto. Iniziamo con il considerare due superfici (fig. 3) in moto relativo con velocità v , tra le quali sia interposto un fluido lubrificante (per esempio olio minerale) di viscosità dinamica μ ,

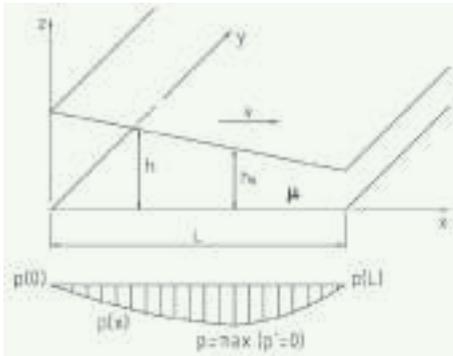


Fig. 3 - Meato idrodinamico.

separate da una distanza h variabile lungo l'asse delle x . In tali condizioni la teoria elementare della lubrificazione idrodinamica ci permette di dimostrare che si crea un meato portante, capace, cioè, di equilibrare un carico esterno. Meato che è dovuto alla viscosità dell'olio, al moto relativo delle due superfici e alla geometria del sistema, cioè al già citato effetto visco-cinetico-geometrico. In particolare l'effetto portante è creato dal moto relativo nella direzione in cui

h decresce ed è dovuto al flusso del fluido viscoso che consta di un contributo lineare (o di trascinamento) e di uno parabolico (o di regresso). Nell'ipotesi che le due superfici siano indefinite nella direzione delle y , la portata Q per unità di larghezza del meato, somma di un contributo lineare e di uno parabolico, è data da:

$$Q = \frac{vh}{2} - p' \frac{h^3}{12\mu} \quad (a)$$

dove

$$p' = \frac{dp}{dx}$$

è il gradiente di pressione nella direzione del moto relativo. L'equazione di continuità ci permette di scrivere che $Q = \text{cost}$ da cui deriva che, poiché il contributo lineare decresce nella direzione del moto (h è decrescente in tale direzione), il gradiente di pressione p' deve cambiare segno e, quindi, deve esistere un punto in cui $p' = 0$ e $p = \text{max}$. Detto h_0 lo spessore del meato d'olio in tale punto, si ha per la (a),

$$Q = \frac{vh_0}{2}$$

da cui si ricava, eguagliandola alla (a),

$$p' = 6\mu v \frac{h - h_0}{h^3} \quad (b)$$

che possiamo a ragione definire come l'equazione fondamentale della lubrificazione idrodinamica, poiché ne compendia tutte le caratteristiche peculiari. In particolar modo il gradiente di pressione p' dipende dalla viscosità dell'olio μ , dalla velocità relativa delle parti in movimento v e dalla geometria del meato h , cioè da un effetto che si può correttamente definire visco-cinetico-geometrico. Inoltre, noto $p' = p'(x)$, si determina l'andamento della pressione $p = p(x)$ e la forza di sostentamento P per unità di larghezza del meato, nonché il punto xP di applicazione di P , come

$$p = \int_0^x p' dx \quad (c)$$

$$P = \int_0^L p dx$$

$$e \quad P x_p = \int_0^L p x dx$$

Tuttavia, per eseguire tali calcoli bisogna conoscere $h = h(x)$, cioè la geometria del sistema, e il valore di h_0 che, essendo μ e v costanti rispetto alla x , si ottiene imponendo nella (c) che

$p(0) = p(L) = 0$, il che equivale a dire che la pressione (relativa) all'esterno del meato è quella atmosferica, ottenendo

$$h_0 = \int_0^L \frac{dx}{h^2} / \int_0^L \frac{dx}{h^3}$$

Dopo avere brevemente richiamato i concetti fondamentali della lubrificazione idrodinamica, consideriamo ora il sistema di fig. 4, costituito da un cuscinetto cilindrico di raggio R in cui ruota un albero di raggio r con un gioco $g = R - r$ ($R > r$).

L'applicazione di un carico F fa sì che l'albero si disponga eccentricamente rispetto al cuscinetto, in modo che la nuova configurazione geometrica assunta generi un meato d'olio con una distribuzione di pressioni tale da equilibrare

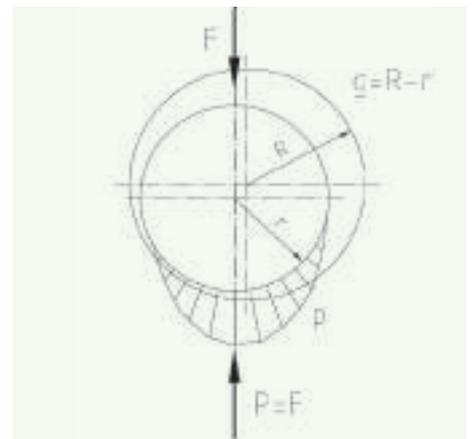


Fig. 4 - Cuscinetto idrodinamico cilindrico.

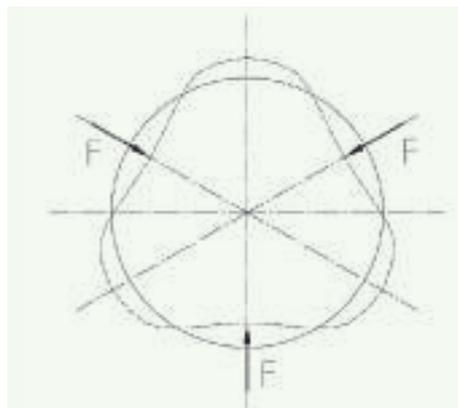
il carico F applicato. Senza scendere nei dettagli, ma tenendo presente quanto premesso, è facile comprendere che la disposizione eccentrica dell'albero e la sua rotazione creano un meato capace di equilibrare il carico esterno, mediante quello che abbiamo definito effetto visco-cinetico-geometrico.

Il cuscinetto idrodinamico di fig. 4 reagisce a un carico esterno disponendosi eccentrico ed è, quindi, evidente che, per poterlo utilizzare sul mandrino di una macchina utensile, dovremmo contenere tale spostamento, cioè conferirgli una rigidità adeguata.

La necessità di risolvere tale problema in modo efficiente ha condotto allo sviluppo di cuscinetti idrodinamici a superfici multiple, come il Mackensen, o a pattini orientabili, come il Filmatic, che, ripartendo il carico applicato su più superfici o su più pattini, permettono di ottenere elevate rigidità associate a una notevole precisione di rotazione.

Torniamo ora al cuscinetto Mackensen (fig. 1) da cui eravamo partiti e ricordiamo che, spostando assialmente la bronzina nella bussola, si generano per deformazione elastica tre superfici di laminazione dell'olio disposte a 120° e costituenti tre lobi (fig. 2).

Il calcolo della deformata della bronzina e, quindi, dello spessore del meato d'olio può essere fatto ricorrendo al metodo degli elementi finiti oppure riducendo la



■ Fig. 5 - Schematizzazione della bronzina per il calcolo della deformata.

bronzina a un anello di sezione uniforme (fig. 5) soggetto a tre forze concentrate in corrispondenza delle tre nervature e ottenendo un struttura iperstatica staticamente determinata che può essere studiata con i metodi tipici della scienza delle costruzioni.

Senza entrare nel dettaglio di ta-



■ Mini 12 (tutte le rettificatrici Delta montano di serie il mandrino idrodinamico Mackensen)

le calcolo, che non è indispensabile per le considerazioni di tipo qualitativo che faremo, avremo, intuitivamente, un meato d'olio con andamento variabile tra un valore minimo in corrispondenza delle nervature e uno massimo in posizione mediana tra due nervature successive, ottenendo quelle condizioni di geometria indispensabili per la lubrificazione idrodinamica.

La rotazione del mandrino determina la distribuzione di pressioni rappresentata in fig. 6, dove a un tratto di meato di spessore decrescente nel senso del moto corrisponde una distribuzione di pressione positiva mentre ad un tratto di meato di spessore crescente nel senso del moto corrisponde una distribuzione di pressione negativa.

In particolare è bene dire che la pressione può scendere al di sotto del valore zero (pressione atmosferica) di non più di $0,2 \div 0,3$ bar e il contributo del tratto a pressione negativa è del tutto trascurabile nel calcolo della risultante P delle pressioni di ogni singolo lobo. Si ottiene così un sistema (staticamente determinato) in cui le risultanti P delle pressioni nei tre meati si equilibrano mutuamente con l'effetto di mantenere il mandrino geometricamen-

te centrato. Bisogna, inoltre, sottolineare che il cuscinetto si comporta come una vera e propria macchina idraulica, poiché, posizionando i fori di aspirazione in modo opportuno (fig. 6), il tratto di meato in cui si genera una leggera depressione funziona da pompa, aspirando l'olio che, laminato nel cuscinetto, crea, pressu-

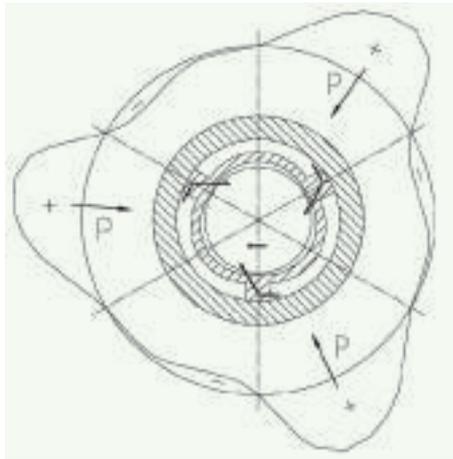


■ Collaudo di una linea mandrino Delta

rizzandosi, un meato portante che determina l'effetto autocentrante descritto.

Nel caso in cui vi sia un carico applicato sul mandrino (fig. 7), dovuto per esempio alla forza di taglio (F) della mola di una rettificatrice, il suo spostamento porterà a una redistribuzione delle pressioni nei tre lobi, le cui forze di reazione risultanti (P_1 , P_2 , P_3), non più uguali in tale caso, andranno a contrastare il cedimento del mandrino, determinando la rigidità che è tipica di questo cuscinetto.

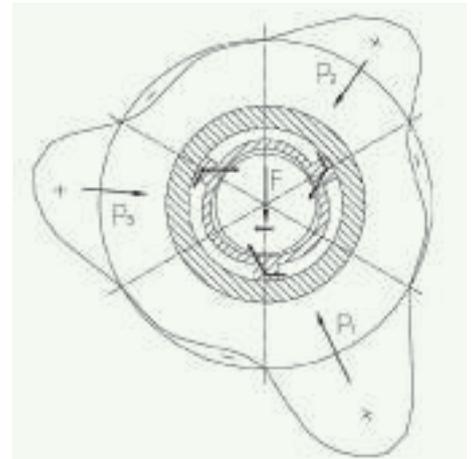
In conclusione di queste brevi note è bene aggiungere che un cuscinetto di tipo Mackensen, grazie ai tre meati portanti, ha una notevole capacità di smorzamento, che consente di eliminare le microvibrazioni che si creano durante le lavorazioni di rettifica, permettendo l'ottenimento di finiture superficiali molto accurate con bassissime rugosità e di assorbire eventuali urti accidentali, che danneggerebbero irrimediabilmente mandrini realizzati con cuscinetti a sfere o a rulli.



■ Fig. 6 - Distribuzione pressioni (senza carico).

Inoltre la presenza di meati d'olio portanti assai stabili consente di eliminare, anche in fase di avviamento, i fenomeni di usura con tutti i problemi di decadimento delle prestazioni a essi collegati, permettendo al mandrino stesso una vita estremamente lunga.

Si può, quindi, affermare che il cuscinetto Mackensen consente,



■ Fig. 7 - Distribuzione pressioni (con carico).

senza nessuna particolare manutenzione, di realizzare un mandrino la cui vita utile va oltre quella della rettificatrice su cui è montato, mantenendo pressoché inalterate nel tempo le proprie prestazioni. ■

*Il Dr. Ing. Giovanni Marchesi è
Responsabile Progettazione
Meccanica Delta Spa