

i n f a b b r i c a

di GIOVANNI MARCHESI

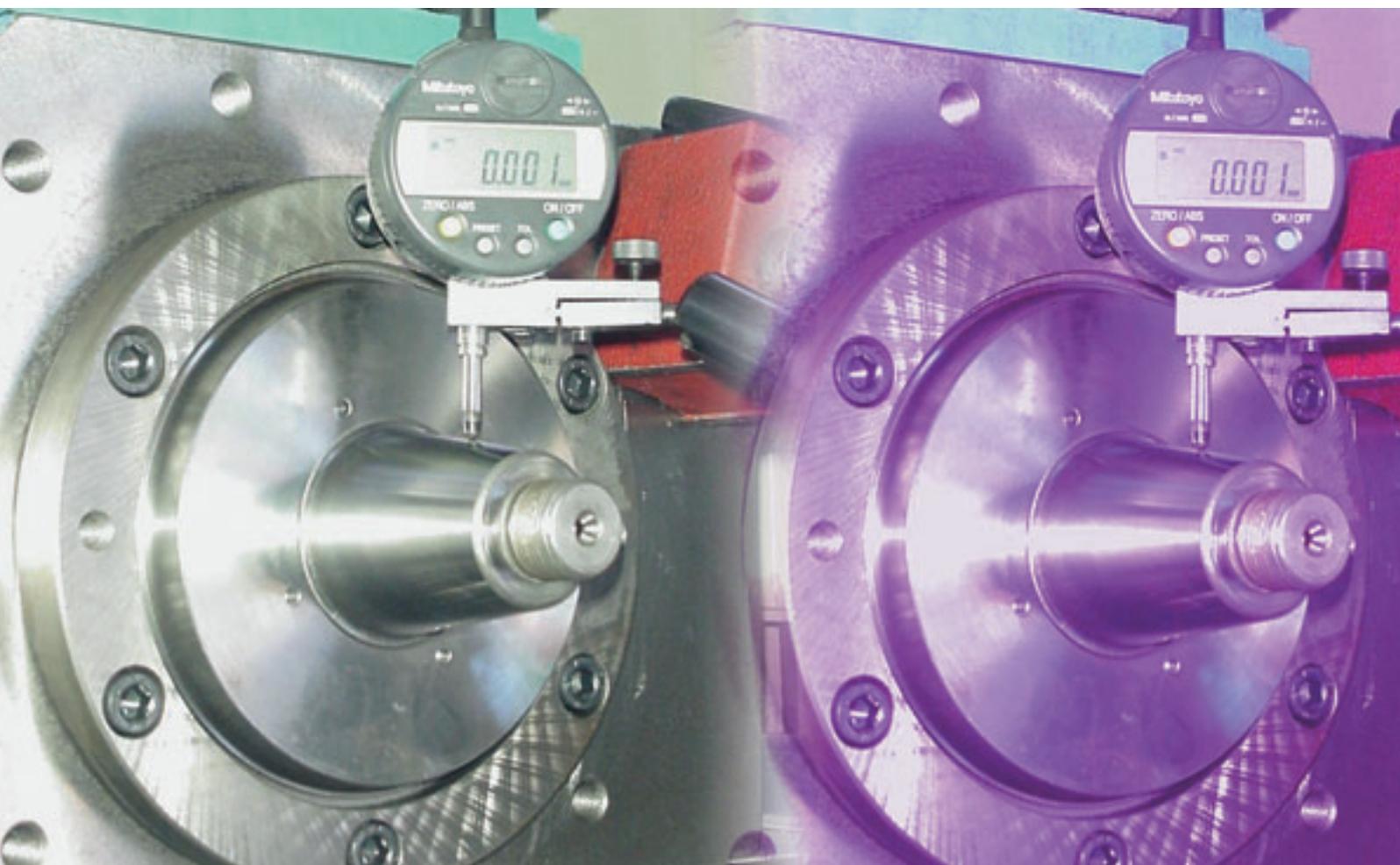
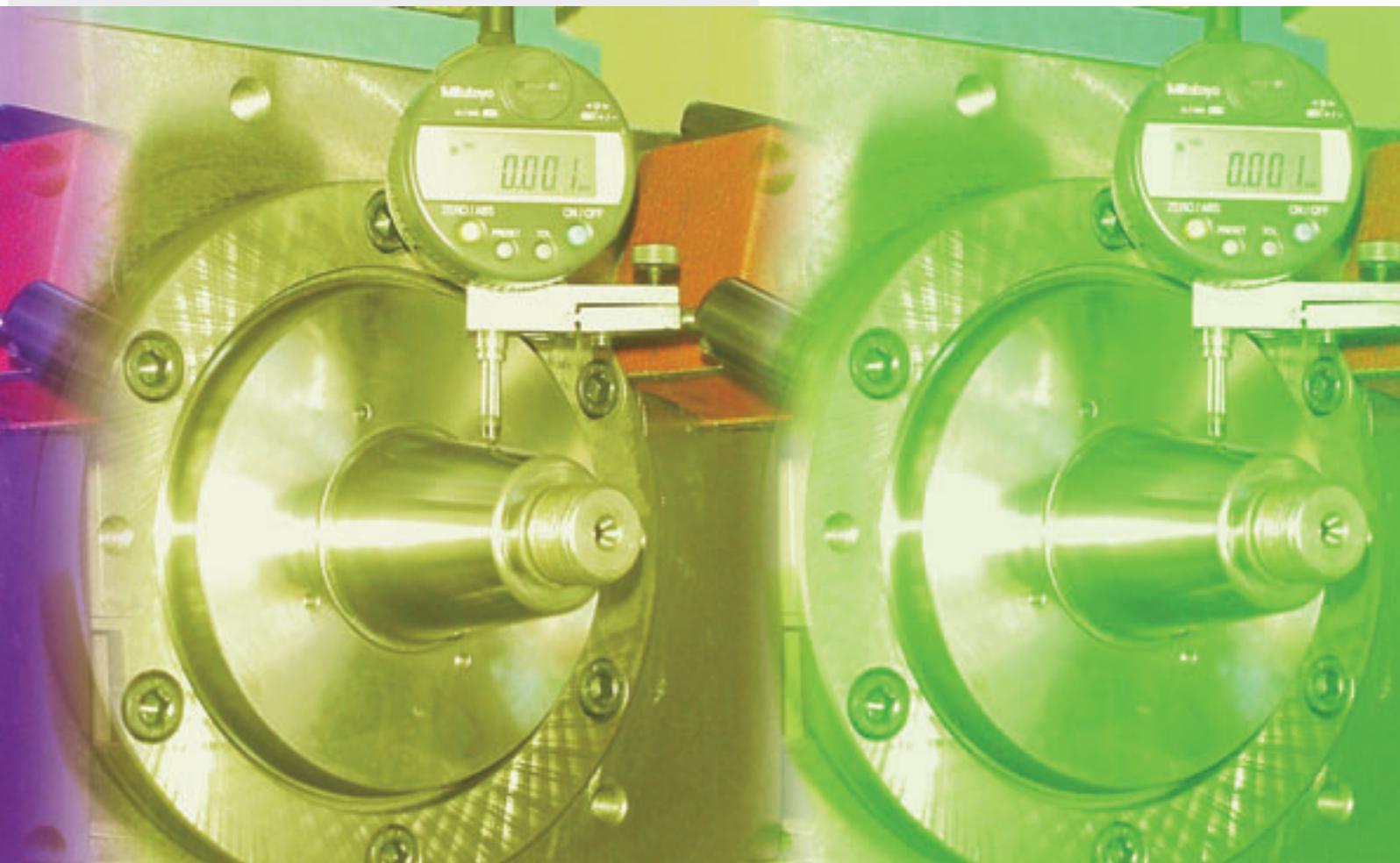


Foto collaudo di una linea mandrino Delta

Utilizzato sulle rettificatrici tangenziali Delta, il cuscinetto Mackensen, per le sue peculiari caratteristiche, consente finiture superficiali accurate, con bassissime rugosità, assorbendo eventuali urti accidentali che danneggerebbero irrimediabilmente mandrini realizzati con cuscinetti a sfere o a rulli. Inoltre, la presenza di meati d'olio portanti assai stabili elimina, anche in fase di avviamento, i fenomeni di usura, permettendo al mandrino stesso una vita estremamente lunga

Lunga vita al mandrino



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 evitandone 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 visco-cinetico-geometrico).

A SOSTENTAMENTO IDRODINAMICO

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

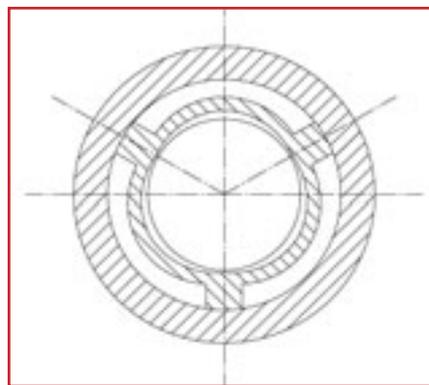


Figura 2 - Sezione del cuscinetto Mackensen, fuori scala per accentuare i tre lobi a 120°

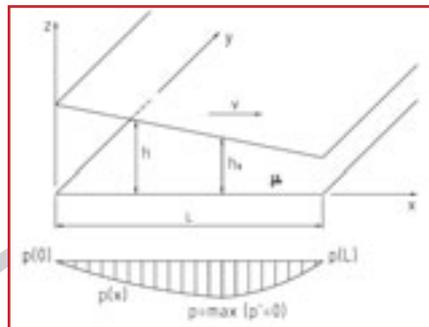


Figura 3 - Meato idrodinamico dovuto alla viscosità dell'olio, al moto relativo delle due superfici e alla geometria del sistema

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 supporti delle turbine e dei cilindri ausiliari delle gabbie di laminazione, mentre noti esempi di cuscinetti a sostentamento idrodinamico sono offerti dai cuscinetti assiali Michell e Kingsbury, o da quello radiale Filmatic, nei quali il carico è sostenuto da pattini orientabili. In particolare, i cuscinetti Filmatic, così 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 (Figura 1), diversamente dal Filmatic, non è dotato di pattini orientabili, ma è costituito da una boccola liscia, in genere di bronzo speciale, avente all'esterno tre nervature leggermente coniche, disposte a 120°. Tale boccola (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° (Figura 2) che, come vedremo, ne caratterizzano il funzionamento 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.

PRINCIPI DI LUBRIFICAZIONE

Prima di esaminare in dettaglio le caratteristiche principali del cuscinetto Mackensen, è necessario cercare di

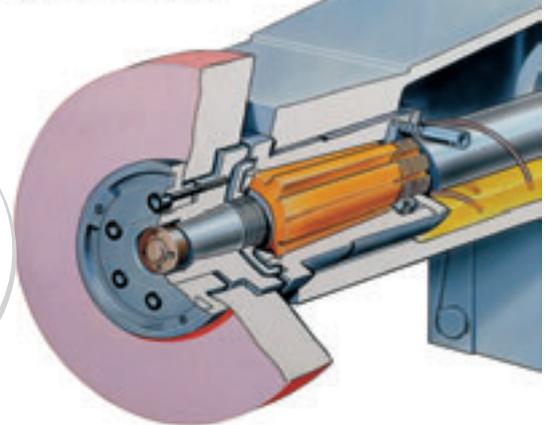


Figura 1 - Spaccato di un cuscinetto Mackensen utilizzato su una rettificatrice tangenziale Delta

comprendere i principi alla base della lubrificazione idrodinamica, per poi ricondurli a un accoppiamento 'albero cuscinetto'. Iniziamo con il considerare due superfici (Figura 3) in moto relativo, con velocità v , tra le quali sia interposto un fluido lubrificante - per esempio olio minerale - di viscosità dinamica μ , 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



Tutte le rettificatrici Delta montano di serie il mandrino idrodinamico Mackensen

punto in cui $p' = 0$ e $p = \max$. Detto h_0 lo spessore del meato d'olio in tale punto, si ha per la (a),

$$Q = \frac{uh_0}{2},$$

da cui si ricava, eguagliandola alla (a),

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

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

$$Px_P = \int_0^L px dx.$$

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:

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

PROBLEMA E SOLUZIONE

Dopo avere brevemente richiamato i concetti fondamentali della lubrificazione idrodinamica, consideriamo ora il sistema di figura 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 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 Figura 4 reagisce a un carico esterno disponendosi eccentrico, ed è quindi evidente che, per poterlo utilizzare sul mandrino di una macchina utensile, dovremo 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.

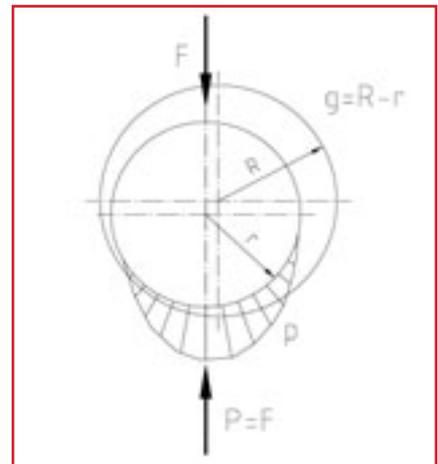


Figura 4 - Cuscinetto idrodinamico cilindrico di raggio R in cui ruota un albero di raggio r con un gioco $g = R - r$ ($R > r$)

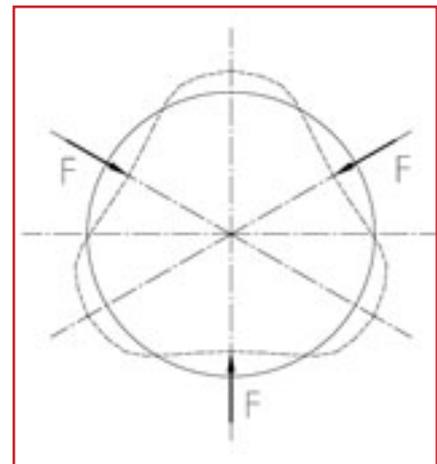


Figura 5 - Schematizzazione della bronza per il calcolo della deformata

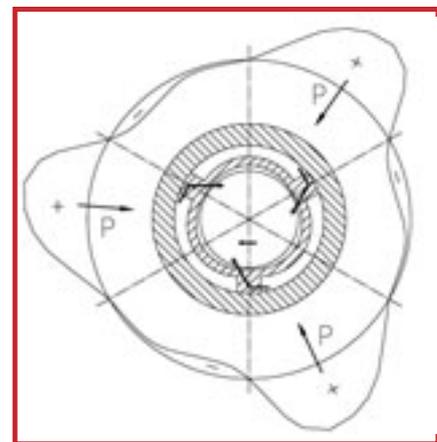


Figura 6 - Distribuzioni delle pressioni senza carico

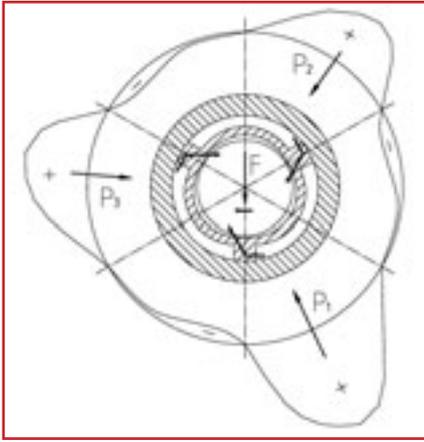
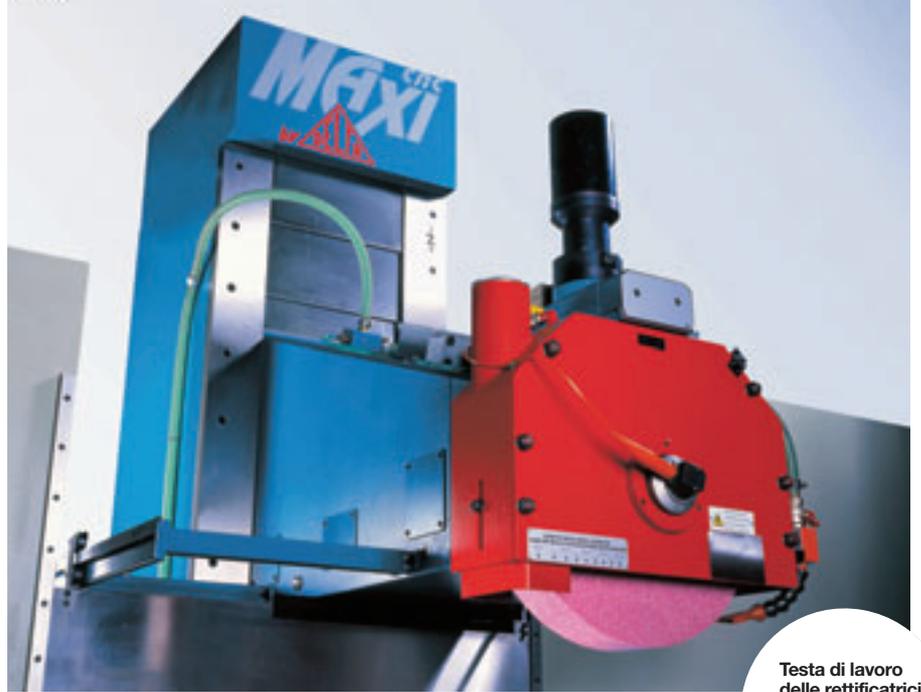


Figura 7 – Distribuzione delle pressioni con carico

Torniamo ora al cuscinetto Mackensen di Figura 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 (Figura 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 bronzina a un anello di sezione uniforme (Figura 5) soggetto a tre forze concentrate in corrispondenza delle tre nervature, ottenendo un struttura iperstatica staticamente determinata che può essere studiata con i metodi tipici della scienza delle costruzioni. Senza entrare nel dettaglio di tale 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 Figura 6, dove a un tratto di meato di spessore decrescente nel senso del moto corrisponde una distribuzione di pressione positiva, mentre a un tratto di meato di spessore crescente nel senso del moto corrisponde una distribuzione di



Testa di lavoro
delle rettificatrici
tangenziali CNC
Maxi Delta

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 geometricamente 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 (Figura 6), il tratto di meato in cui si genera una leggera depressione funziona da pompa, aspirando l'olio che, laminato nel cuscinetto, crea, pressurizzandosi, un meato portante che determina l'effetto autocentrante descritto. Nel caso in cui vi sia un carico applicato sul mandrino (Figura 7), dovuto per esempio alla forza di taglio (F) della mola di una rettificatrice, il suo spostamento porterà a una ridistribuzione 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.

QUALITÀ NEL TEMPO

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. 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, 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.

Giovanni Marchesi è responsabile della progettazione meccanica in Delta S.p.A.