



La riduzione di attrito tra superfici in movimento come le guide delle macchine utensili viene garantita dalla lubrificazione idrostatica con l'introduzione di lubrificante in pressione, sistema usato per macchine utensili di precisione come le rettificatrici.

MACCHINE UTENSILI

La lubrificazione idrostatica

di Giovanni Marchesi

Per lubrificazione si intende la riduzione dell'attrito tra superfici in moto relativo, per esempio le guide di una macchina utensile, mediante l'interposizione di una opportuna sostanza, detta lubrificante, che, in questa sede, sarà l'olio minerale. In particolare si parla di lubrificazione idrostatica nel caso in cui tra le superfici in moto relativo sia introdotto uno strato di lubrificante in pressione (meato), di norma dello spessore di alcuni centesimi di mm, che consente di tenerle separate anche a velocità nulla, creando un vero e proprio effetto portante. Inoltre è bene sottolineare che tale sistema, impiegato, per esempio, in macchine utensili di precisione come le rettificatrici e le alesatrici (v. figg. A e B), non deve essere confuso, né con i sistemi in cui la pressione di alimentazione serve solo ad assicurare la portata del lubrificante senza creare alcun effetto portante, come nel caso di macchine dotate di un impianto di lubrificazione temporizzato, né con la lubrificazione idrodinamica, poiché, in questo caso, il meato portante è generato dal moto relativo di due superfici disposte inclinate tra di loro (e non dall'introduzione di lubrificante in pressione), risultando nullo all'avviamento.

Da queste prime considerazioni è possibile evidenziare una proprietà rilevante dei sistemi idrostatici, poiché, essendo le superfici in moto relativo sempre



Fig. A - Rettificatrice a montante mobile Delta Maxi CNC 3000/1100 con sostentamento idrostatico su tutti gli assi macchina

sollevate per effetto del meato portante, non vi è mai strisciamento. Questo consente di ottenere posizionamenti estremamente precisi e stabili, cioè in assenza di fenomeni di avanzamento a scatti (stick-slip), di conservare nel tempo la geometria delle guide senza dovere eseguire registrazioni dei giochi per compensarne l'usura e di eliminare la necessità di trattamenti termici e di impiegare rivestimenti in materiale antifrizione per evitare il pericolo di grippature. Inoltre è importante sottolineare come, nel caso di guide idrostatiche, la forza di attrito presente, mancando gli strisciamenti, sia molto piccola, poiché dovuta alla sola laminazione dell'olio. In base alla legge di Newton (o di Petroff), come rappresentato in fig. 1, essa risulta proporzionale alla velocità, annullandosi allo spunto ($v = 0$). Proprietà

questa che trova evidenza sperimentale nella facilità con cui grandi tavole idrostatiche possono essere messe in movimento con la semplice pressione di un dito (v. fig. C), mentre tavole non idrostatiche, benché lubrificate e rivestite con materiale antifrizione, richiedono di vincere forze di attrito molto più grandi sia allo spunto (attrito di primo distacco) sia a regime. Bisogna poi aggiungere che il meato d'olio in pressione, oltre a consentire di ottenere, come vedremo più avanti, rigidità notevoli, possiede una elevata capacità di smorzamento, che risulta importante per eliminare le microvibrazioni che si innescano durante le lavorazioni meccaniche e per assorbire gli urti dovuti, per esempio, a sovraccarichi accidentali. Diversamente da quanto accade per guide a ricircolo di sfere o di rulli che, benché intrinsecamen-

Fig. 1

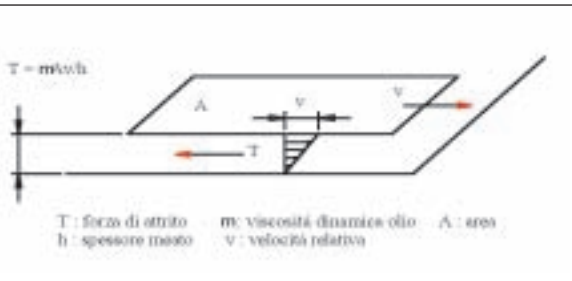


Fig. 2

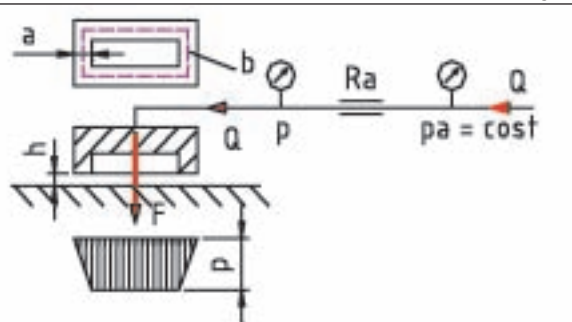


Fig. B - Rettificatrice a montante mobile Delta Mini 12 con sostentamento idrostatico su tutti gli assi macchina

te dotate di elevata rigidezza e di bassi coefficienti di attrito, hanno una limitata capacità smorzante e possono essere danneggiate irreparabilmente da urti che ne deformino le piste di rotolamento e gli elementi volventi.

Dopo avere fatto queste considerazioni preliminari, si possono analizzare i principi di funzionamento di una guida idrostatica nel caso più comune in cui essa risulti alimentata a pressione costante e sia regolata da una resistenza idraulica viscosa di tipo capillare, cioè costituita da un tubicino avente diametro molto piccolo rispetto alla lunghezza (in genere 1÷2 mm).

In particolare riduciamo, per semplicità espositiva, la guida a un unico pattino rettangolare con una tasca (detta anche pozzetto o camera di alimentazione) e ipotizziamo che esso sia soggetto a un carico verticale centrato \$F\$ (v. fig. 2). Tale impostazione non è affatto riduttiva, poiché permette di dedurre proprietà che si possono facilmente estendere a casi più complessi quali le guide di una macchina utensile, guide che si potranno in genere ridurre a una serie di pattini opportunamente caricati (v. fig. D).

A monte del pattino poniamo la resistenza capillare \$R_a\$, alimentata con una pressione \$p_a = \text{cost}\$ e una portata d'olio \$Q\$. Il

passaggio attraverso la resistenza \$R_a\$, cioè il tubo capillare di lunghezza \$l\$ e diametro \$d\$, dell'olio, caratterizzato da una viscosità dinamica \$\mu\$, produce una variazione di pressione \$\Delta p\$, che, in base alla formula di Poiseuille (o di Hagen), valida nell'ipotesi di moto laminare, è data da

$$\Delta p = p_a - p = \frac{128}{\pi} \mu \frac{1}{d^4} Q = R_a Q, \quad (a)$$

$$\text{con } R_a = \frac{128}{\pi} \mu \frac{1}{d^4}$$

L'olio a pressione \$p\$ (\$p < p_a\$) riempie la tasca e fuoriesce dal meato di spessore \$h\$, passando al valore della pressione esterna (atmosferica), ricordando che stiamo lavorando in termini di pressioni relative, si ha

$$p = 12\mu \frac{a}{bh^3} Q = RQ, \quad (b)$$

ovviamente \$Q\$ è la stessa, data l'incompressibilità dell'olio (equazione di continuità), ed è possibile dimostrare che il valore \$R\$ della resistenza idraulica del pattino, cioè del meato interfacciale, è dato con sufficiente approssimazione dalla formula

$$R = 12\mu \frac{a}{bh^3}, \quad (b)$$

valida nel caso di moto laminare, dove

\$a\$ è la larghezza (uniforme) del labbro del pattino e \$b\$ (fronte d'uscita) il perimetro del rettangolo tratteggiato in fig. 2, cioè del rettangolo mediano di area efficace \$A_e\$ [v. (d)]. Dalle equazioni (a) e (b) si ricava

$$p = p_a \frac{1}{1 + R_a / R} = p_a \frac{1}{1 + \xi h^3}, \quad (c)$$

$$\text{avendo posto } \xi = \frac{32}{3\pi} \frac{lb}{ad^4}$$

Si osserva, inoltre, che il concetto di resistenza idraulica è del tutto analogo a quello di resistenza elettrica (per esempio \$R_a\$ ed \$R\$ sono in serie), sostituendo alla variazione di pressione \$p\$ la caduta di tensione \$V\$ e alla portata \$Q\$ l'intensità della corrente elettrica \$I\$.

È evidente che \$p\$ non dipende da \$\mu\$ (\$\mu\$, in realtà, è funzione della temperatura dell'olio, ma è corretto ritenere che la temperatura sia costante nel pattino), mentre dipende da \$p_a\$, dalla geometria della resistenza capillare (\$l\$, \$d\$) e del pattino (\$a\$, \$b\$), da \$h\$; in particolare la curva \$p = p(h)\$ ha l'andamento a campana rappresentato in fig. 3.

Assumendo per la pressione \$p\$ nel pattino la distribuzione rappresentata in fig. 2, cioè che la pressione sia costante al-

Fig. C - Tavola idrostatica di una rettificatrice Delta Maxi 1500/750. Con attrito pressoché nullo è sufficiente la pressione di un dito per spostare carichi anche molto elevati



Fig. D - Testa di una rettificatrice Delta Maxi al montaggio. Particolare delle guide idrostatiche e dell'impianto di alimentazione a resistenze capillari

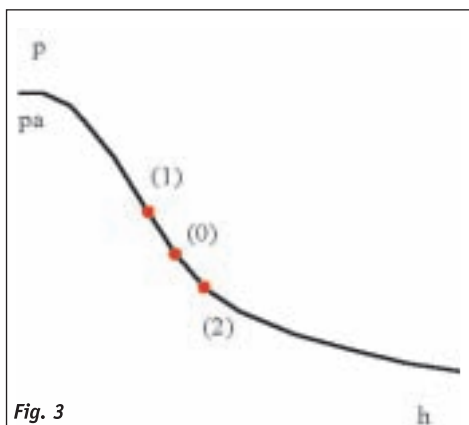
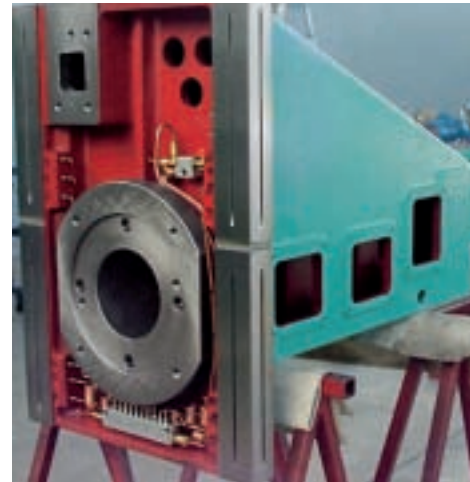


Fig. 3

l'interno della tasca (la profondità della tasca è 50÷100 volte h e si può ritenere che l'olio sia fermo e ubbidisca alla legge di Pascal) e che vari linearmente lungo il labbro, si può scrivere, con sufficiente approssimazione, la seguente equazione di equilibrio delle forze in gioco

$$F = pA_e \quad (d)$$

cioè, stabilita la geometria del pattino (area efficace A_e), p dipende solo dal carico F.

Per comprendere il funzionamento di un pattino idrostatico, supponiamo di lavorare con un carico F a cui corrisponde, nel diagramma di fig. 3, il punto (0), se il carico aumenta al valore $F + \Delta F$, p aumenta per la (d), mentre h in base alla (c) diminuisce, essendo p_a ed ξ costanti, inoltre R aumenta e $Q = p_a/(R_a + R)$ diminuisce, essendo p_a e R_a costanti, cioè il pattino passa a lavorare nel punto (1). Analogamente si può ragionare nel caso in cui il carico si riduca a $F - \Delta F$, verificando che il pattino si porta a lavorare nel punto (2). In altre parole il sistema descritto è in grado di adattarsi alle variazioni del carico applicato, grazie alla resistenza capillare a monte del pattino, ed è intuitivo che si debba dimensionare il sistema in modo che

il pattino lavori in un tratto sufficientemente ripido della curva $p = p(h)$, in modo che a grandi valori di ΔF , cioè di Δp , corrispondano variazioni di meato Δh contenute. In altre parole il comportamento del sistema è riconducibile alla rigidità media K_m , data da

$$K_m = \frac{\Delta F}{\Delta h}$$

o, più precisamente, alla rigidità puntuale K, definita come

$$K = \frac{dF}{dh} = -A_e \frac{dp}{dh}$$

dove il segno di valore assoluto è dovuto al fatto che $p = p(h)$ è decrescente, mentre si vuole un valore di K positivo, derivando e raccogliendo a fattore comune in maniera opportuna si può arrivare a scrivere che

$$K = \frac{3P}{a} A_e (1 - p/p_a) = -\frac{3F}{h} (1 - p/p_a) \quad (e)$$

Dalla (e) si deduce immediatamente che la rigidità K cresce all'aumentare del carico F e al ridursi dello spessore del meato h, inoltre essa cresce con la pressione di alimentazione p_a fino al valore limite $K_{lim} = 3F/h$ per $p_a \rightarrow \infty$. Ovviamente questi parametri dovranno essere scelti in base a considerazioni progettuali e tecnologiche: F è legato alle forze in gioco e



Fig. E - Slitta portamontante di una rettificatrice Delta Maxi al montaggio. Particolare delle guide precaricate dell'asse trasversale

Fig. H - Particolare dell'impianto di alimentazione a resistenze capillari della tavola di una rettificatrice Delta Mini 12 al montaggio

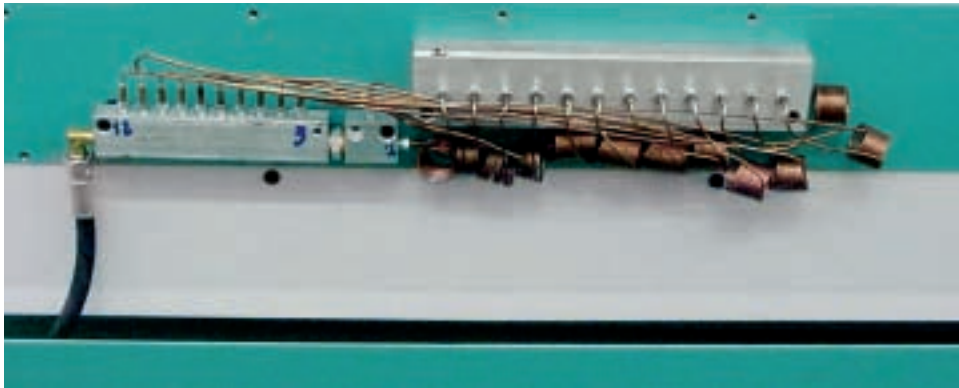


Fig. G - Basamento longitudinale Delta Maxi 1500/750. Tutte le guide sia piane che a "v" sono inglobate nelle fusioni e rettificate con cura e/o raschiettate per ottimizzare l'accoppiamento delle superfici

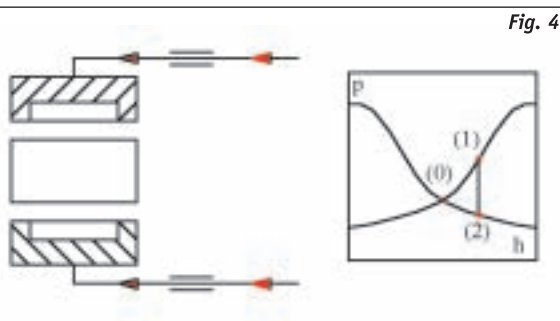
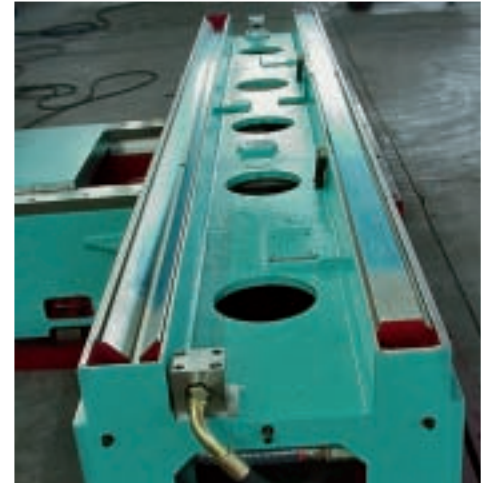


fig. E), considerando, per esempio, il caso di due pattini uguali e contrapposti (v. fig. 4). In particolare si può osservare che

$$K = \frac{6p}{h} A_e (1 - p/p_a),$$

cioè il valore di K raddoppia rispetto a quello precedente, e che, se (0) è il punto di progetto, l'applicazione di un carico esterno porta un pattino a lavorare nel punto (1) e l'altro nel punto (2) per bilanciare la forza applicata.

Si può, quindi, affermare che sistemi di tale genere consentono di ottenere una elevata rigidità (il valore di K può essere aumentato agendo su vari parametri di progetto e precaricando), associata a una notevole capacità di carico (o portanza), intesa come carico massimo sopportabile con valori di meato tali da garantire ancora il sostentamento idrostatico: proprietà che sono fondamentali per le guide di una macchina utensile (v. fig. F).

In conclusione di queste brevi considerazioni sulle guide idrostatiche, è possibile riassumerne in modo sintetico le caratteristiche più importanti:

- basso valore del coefficiente di attrito (nullo allo spunto);
- eliminazione dei problemi legati allo strisciamento delle guide (usura, grippaggio, etc.);

alla capacità di carico della macchina, h dipende dalle caratteristiche delle guide (rugosità, precisione cedimenti etc.) e p_a dalla pompa usata.

Detto $\beta = p/p_a$, si ottiene

$$K = \frac{3p_a}{h} A_e \beta (1 - \beta), \quad (f)$$

da cui è facile dimostrare che $K = K(\beta)$ ha un massimo per $\beta = 1/2$, cioè, in base alla (c), per $R = R_a$. Si può, quindi, comprendere facilmente che β sia un importante parametro di progetto, anche se, in pratica, considerazioni d'altro genere (geometria del sistema, portata d'olio richiesta, energia assorbita, etc.) possono portare alla scelta di valori più piccoli di 1/2 o a ricercare differenti criteri di ottimizzazione del pattino.

Ragionamenti analoghi possono essere fatti anche per un sistema precaricato (v.

- capacità smorzante e di sopportare sovraccarichi;
- rigidità;
- capacità di carico.

Proprietà che consentono a una macchina utensile di mantenere nel tempo le proprie prestazioni in termini di precisione e affidabilità, evitando quello scadimento che accompagna l'usura delle guide e che non sempre è possibile compensare con una operazione di registrazione dei giochi e della geometria.

L'intera gamma di rettificatrici tangenziali Delta è caratterizzata dal sostentamento idrostatico su tutti gli assi-macchina: tutte le guide sia piane che a "v" sono inglobate nelle fusioni e rettificate con cura e/o raschiettate per ottimizzare l'accoppiamento delle superfici (v. fig. G).

La lubrificazione idrostatica determina la completa eliminazione degli attriti radenti consentendo il massimo sfruttamento della potenza installata e consentendo nel contempo movimenti estremamente regolari in totale assenza di fenomeni di usura o di andamento a scatti anche a bassissime velocità, prerogative molto apprezzabili in una rettificatrice per superfici piane. ■

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