

# La viscosità dei lubrificanti

Un approfondimento sulla più importante proprietà dei lubrificanti. In particolare, le sue variazioni con la temperatura, la pressione e l'esercizio

Luca Sparta

La lubrificazione di componenti meccanici in moto relativo è una fase delicatissima del funzionamento di tutti i tipi di macchine. I progressi compiuti dalla ricerca delle grandi industrie produttrici di oli lubrificanti hanno consentito un considerevole miglioramento delle prestazioni e dell'affidabilità.

Intuitivamente la viscosità si può definire come la resistenza di un fluido a scorrere o deformarsi; è dunque una caratteristica ininfluente in condizioni statiche.

In componenti meccanici in moto relativo è indispensabile mantenere un film d'olio per controllare l'usura ed è proprio la viscosità che definisce l'attitudine del lubrificante a formare questo strato protettivo.

Una rigorosa definizione di viscosità è possibile a partire, ad esempio, dalla figura 1, nella quale sono schematizzati due lamierini paralleli, divisi da uno strato d'olio. Il lamierino in alto viene posto in movimento da una forza (F) e portato ad una velocità costante. Possiamo misurare l'area (A) e la velocità (V) della piastra in movimento, lo spessore del film d'olio fra le due piastre (X).

Le particelle aderenti alla faccia interna della piastrina in movimento si muovono con essa mentre quelle della piastrina inferiore stanno ferme. I diversi strati di fluido di spessore dx hanno velocità da zero a V. Lo sforzo applicato comporta perciò un gradiente di velocità, dv/dx. Se il fluido è molto viscoso il gradiente

sarà piccolo, viceversa se poco viscoso.

Newton affermò che la forza F necessaria per mantenere la piastra alla velocità V è proporzionale alla sua area A, al gradiente di velocità in direzione normale allo scorrimento e ad un certo coefficiente dipendente dal tipo di fluido e dalla temperatura. Questa relazione è espressa dall'equazione seguente:

$$F = \mu \cdot A \cdot (dv/dx) \quad [N]$$

che prende il nome di Legge di Newton.

Definiamo quindi la tensione tangenziale,  $\tau$ , come il rapporto fra la forza F e l'area A, e il gradiente di taglio (o di velocità), R, come il rapporto fra la velocità dv e lo spessore del film d'olio dx. Avremo quindi:

$$\tau = F/A = (dv/dx) \quad [N/m^2]$$

e

$$R = (dv/dx) \quad [m/s/m]$$

Le tensioni tangenziali,  $\tau$ , sono proporzionali al gradiente di velocità R

tramite un coefficiente che definiamo viscosità dinamica,  $\mu$ :

$$\mu = \tau/R \quad [Pa \cdot s]$$

Nel SI l'unità di misura è il Pascal per secondo (Pa s), anche se si trovano più usualmente i millipascal per secondo (mPa s).

Qui la tradizione utilizza un'altra unità di misura chiamata centipoise (cP), con 1 cP = 1 mPa s.

Con una distinzione basata sulla densità,  $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>), del lubrificante definiamo anche una viscosità cinematica,  $\nu$ :

$$\nu = \mu/\rho \quad [m^2/s]$$

Come si vede le dimensioni di  $\nu$  sono quelle di un'area diviso per un tempo. Non comparando la massa, si capisce come mai questa viscosità viene chiamata cinematica.

La cinematica è quel ramo della fisica che studia il moto dei corpi indipendentemente dalle cause (quindi le forze riferite alla massa) che l'hanno prodotto. La dinamica studia la relazione tra il moto dei corpi con le cause che lo provocano ammettendo

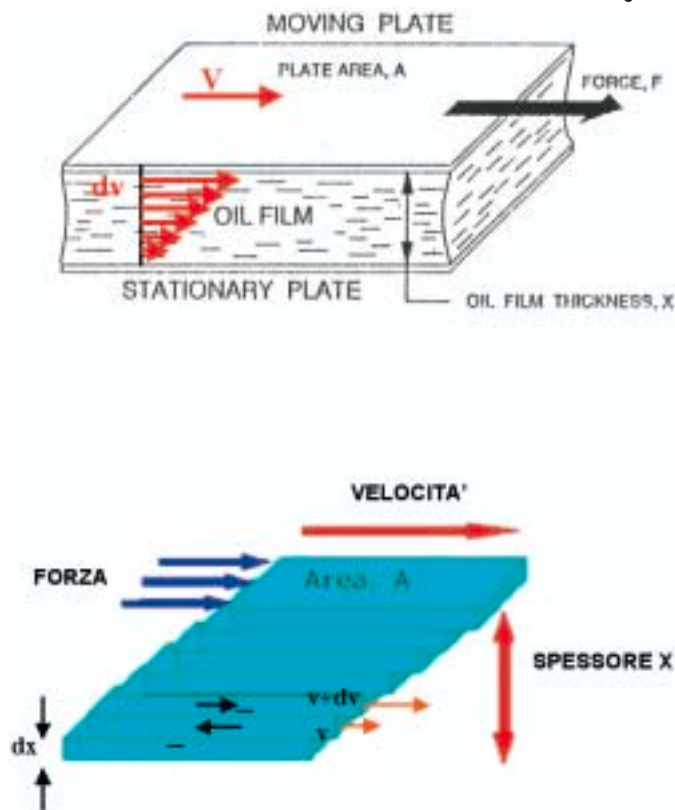


Figura 1, le grandezze in gioco nella definizione della viscosità.

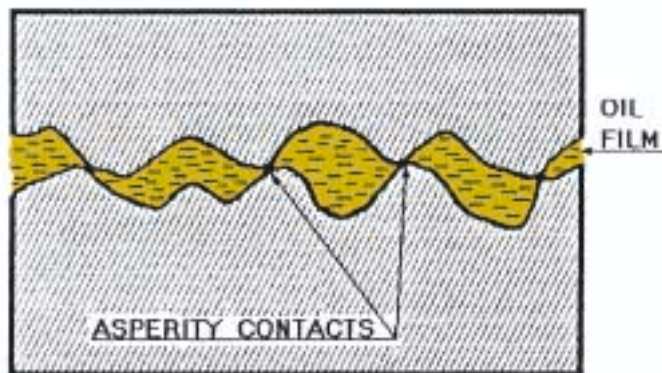
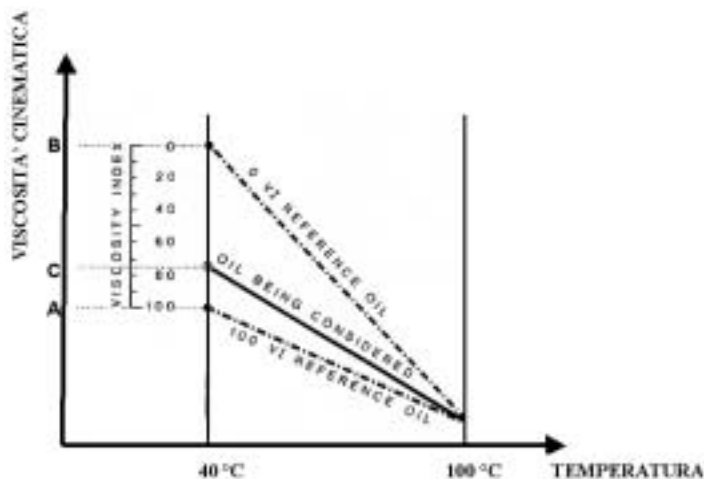


Figura 2, il film di lubrificante deve inserirsi tra le microasperità delle superfici in moto relativo.



**Figura 3, in questo grafico si vede come determina graficamente l'Indice di Viscosità di un olio che abbia la stessa viscosità cinematica degli oli di riferimento a 100 °C  $VI = ((B-C)/(B-A)) \times 100$ .**

massa, forza e inerzia; per questo,  $\mu$  è detta viscosità dinamica.

Nel Sistema Internazionale la sua unità di misura è il metro quadro per secondo ( $m^2/s$ ) anche se la tradizione riporta i centiStokes (cSt), con  $1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/s$ .

Per caratterizzare un olio si usa spesso la viscosità cinematica,  $\nu$ , perché essa è facilmente determinabile con l'uso di un viscosimetro a tubo capillare.

I viscosimetri Engler, Redwood, e Saybolt misurano il tempo di efflusso di un dato volume di olio che per gravità attraversa un foro calibrato e determinano sulle omonime scale la viscosità cinematica.

La misura della viscosità dinamica viene fatta nella realtà con uno strumento concettualmente simile allo schema di figura 1, ma con le piastre di sezione circolare, in pratica due cilindri coassiali. Al di là di ciò, appare ovvio che la viscosità dinamica risulta indipendente dalla densità del fluido.

Quindi due fluidi con densità diverse possono avere la stessa viscosità dinamica.

La viscosità dinamica è quindi misurata mettendo in gioco una certa forza  $F$ , mentre la viscosità cinematica mette in gioco solo la forza di gravità.

Un liquido con elevata densità scorre nel viscosimetro a gravità più velocemente di quanto faccia uno con minore densità ma con pari viscosità dinamica.

Per esempio, in un flusso che avviene per gravità da una cisterna attraverso una stretta curva, le forze che agiscono sul sistema sono proporzionali alla densità, per cui in questi casi è da controllare la viscosità cinematica.

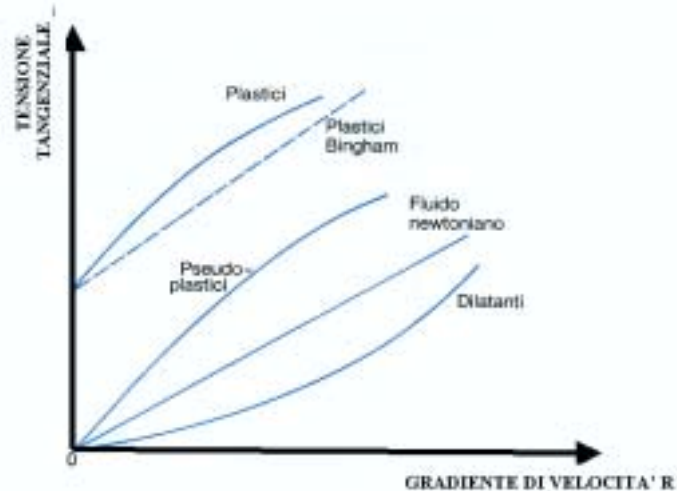
La misura della viscosità dinamica calcola la proprietà di un fluido a resistere ad alti gradienti di taglio, o, in generale, di elevate forze.

La viscosità cinematica misura una caratteristica di un fluido che scorre derivante dall'effetto della sola forza di gravità sulla massa, quindi in condizioni di piccole forze.

Il fatto che l'unica forza attiva nella misura della viscosità cinematica sia la gravità (quindi, piccola), è una distinzione molto importante per chi invece è interessato al fatto che il fluido garantisca la lubrificazione con elevati gradienti di taglio

Per esempio, ad un olio idraulico che alla data temperatura di 100 °C presenta una viscosità cinematica di 136 cSt ed una densità di 0,88 g/l, corrisponderà una viscosità dinamica di 119,68 cP.

Per avere un riferimento è utile sapere



**Figura 4, sollecitati, i fluidi possono comportarsi in maniera molto diversa fra loro. Quelli che seguono la Legge di Newton della viscosità vengono detti newtoniani, diversamente non newtoniani.**

**Un fluido newtoniano mostra una relazione lineare tra le tensioni tangenziali e il gradiente di taglio.**

re che l'acqua a temperatura ambiente che esce dai nostri rubinetti presenta un viscosità cinematica di circa un centiStokes.

La viscosità cinematica di un tipico lubrificante per motori d'auto è compresa fra 5 e 6 cSt alla temperatura d'esercizio di 280 °F. La viscosità dinamica dello stesso olio a -25 °C (-13 °F) sarà invece compresa fra 3000 e 3500 cP.

Abbiamo accennato all'importanza che ha nella lubrificazione la viscosità. Per esempio, nei cuscinetti l'olio assolve a tre funzioni primarie: impedisce il contatto diretto fra superfici, minimizza l'attrito fra le stesse e rimuove il calore.

I cuscinetti a strisciamento ci consentono di comprendere ottimamente il ruolo della viscosità nella lubrificazione. Infatti quando la viscosità è relativamente alta il carico del cuscinetto è supportato completamente dal film d'olio. Non risulta esserci un contatto diretto metallo-metallo e l'attrito è relativamente modesto. Ad una viscosità intermedia il carico del cuscinetto è supportato solo parzialmente dal film d'olio ed il resto dal contatto metallo-metallo ma l'attrito resta comunque basso. Invece, quando la viscosità è bassa, il carico è

sopportato prevalentemente dal contatto diretto e l'attrito è relativamente alto. Quindi, in questo caso, ovviamente diventano cruciali le caratteristiche "antiwear" del lubrificante molto di più che nel caso in cui la viscosità fosse abbastanza elevata da reggere tutto il carico.

Nel caso in cui le condizioni operative non consentono la formazione di un film d'olio per sopportare il carico, il lubrificante ha la funzione di ridurre l'attrito.

Infatti è risaputo che due superfici a contatto in moto relativo, anche se sembrano perfettamente lisce, in realtà presentano delle asperità microscopiche (figura 2). Le teste di queste microasperità tendono a saldarsi reciprocamente (e poi a rompersi quando vengono a contatto); per cui producono un'elevata forza resistente. La presenza del lubrificante inibisce queste microsaldature e, se questo contiene certi additivi, formerà anche uno strato protettivo sulla superficie metallica. L'effetto della viscosità del lubrificante è, in questo caso, quello di ammortizzare lo sfregamento fra le rugosità superficiali riducendo gli stress superficiali.

Nei cuscinetti a sfere e nei denti delle ruote di ingranaggi il meccanismo

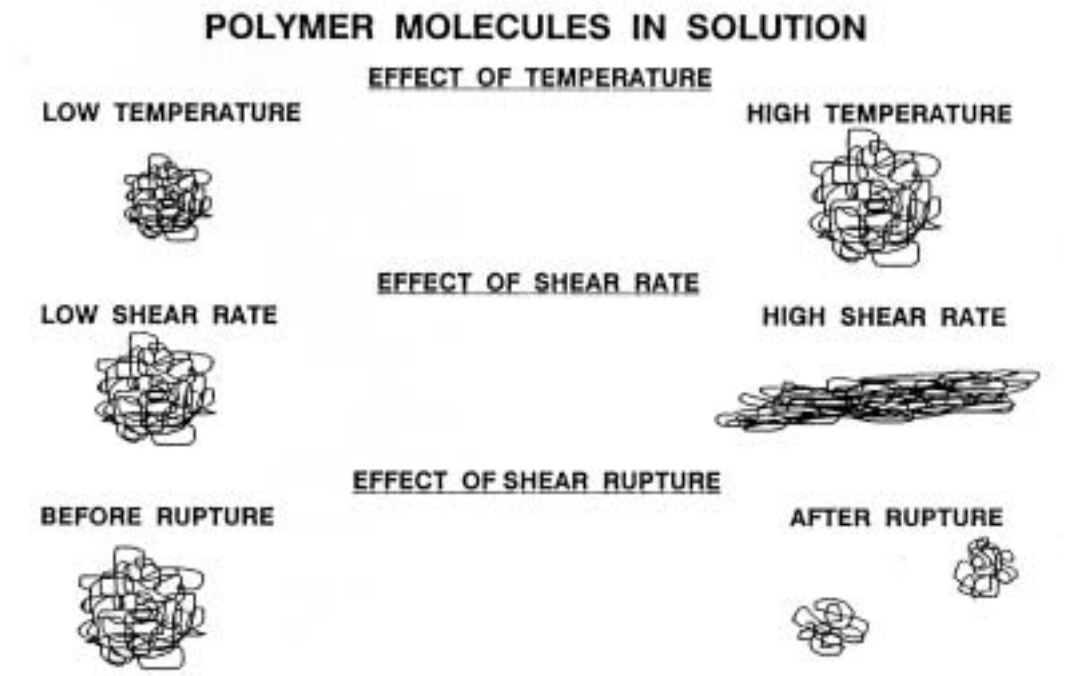
per cui avviene la lubrificazione viene detto elastoidrodinamico. Infatti, in questi componenti il contatto avviene solo lungo una linea di pressione (a causa della scarsa deformazione del metallo il carico si distribuisce su una piccola area) e man mano che questa linea si sposta, tra superfici a contatto è intrappolato un sottile film d'olio. In queste zone di contatto la pressione ha un maggiore effetto dello spessore del film d'olio. Qui la pressione raggiunge molte centinaia di migliaia di Pascal, provocando un aumento delle caratteristiche viscosive del lubrificante, per cui la viscosità dell'olio risulta essere abbastanza elevata da lasciare che le parti in movimento reciproco non si tocchino.

È molto importante scegliere adeguatamente la viscosità del lubrificante perché se troppo bassa implica elevata usura dei componenti e frequenti riparazioni; se troppo alta, elevata dissipazione di energia. Ovviamente è molto peggio la seconda possibilità e, comunque, è ottima cosa attenersi alle indicazioni della Casa.

### IMPORTANZA DELLA VISCOSITÀ NELLA LUBRIFICAZIONE

La viscosità è molto importante anche in relazione alla distribuzione del lubrificante all'interno di una macchina, poiché il serbatoio dell'olio potrebbe essere lontano dalle parti da lubrificare. In generale bisogna accuratamente progettare il sistema di lubrificazione tenendo conto dell'influenza della temperatura e delle perdite di carico lungo i tubi. Inoltre il lubrificante deve essere abbastanza viscoso per essere aspirato dalla pompa e inviato velocemente dove serve anche alle basse temperature.

In certi meccanismi, come per esempio i cambi, dove gli ingranaggi lavorano immersi parzialmente nell'olio, il lubrificante deve essere abbastanza viscoso per formare una pellicola sulle superfici altrimenti le ruo-



**Figura 5, comportamento al taglio e l'influenza della temperatura per le molecole polimeriche costituenti gli additivi "VI improver".**

te dentate solcherebbero il bagno d'olio all'avviamento, scavando un canale senza più consentire al lubrificante di toccare le parti in movimento.

Inoltre non è da sottovalutare la velocità del flusso di lubrificante attraverso i tubi di adduzione in quanto nel caso il moto divenisse turbolento aumenterebbero notevolmente le perdite di carico.

È interessante notare che nel caso di basse velocità di scorrimento, dove è possibile considerare il flusso come laminare, la perdita di carico è proporzionale alla viscosità.

Nel caso invece di alte velocità di scorrimento, quando il flusso diviene turbolento, diventa molto più importante considerare la scabrezza delle superfici interne dei condotti.

Per fluidi newtoniani, conoscendo il numero di Reynolds

$$N_{Re} = D V / \nu$$

è possibile caratterizzare il moto del fluido; basta conoscere il diametro del condotto, la velocità del flusso e la viscosità cinematica. Se  $N_{Re}$  è minore di 2000, il flusso è laminare; se

oltre 4000, turbolento. Fra i due estremi non si può caratterizzare bene il flusso.

### VARIAZIONI DELLA VISCOSITÀ CON LA TEMPERATURA E LA PRESSIONE

Qualitativamente tutti sanno che la viscosità di un fluido aumenta se la temperatura diminuisce.

La sensibilità della viscosità del lubrificante alla temperatura è un importante parametro, per cui viene indicata a due temperature standard cioè 40 °C e 100 °C. La viscosità varia rapidamente con la temperatura e la velocità di incremento aumenta con l'aumento della viscosità.

Per caratterizzare l'influenza della temperatura sulla viscosità cinematica di un olio si ricorre all'indice di viscosità (VI). Un alto VI indica un relativo piccolo cambiamento della viscosità con la temperatura; un suo basso valore indica invece una forte variazione. Tale indice fa riferimento a due oli normalizzati (vedi figura 3) al primo dei quali è assegnato un VI pari a zero (che corrisponde ad una notevole variazione di viscosità con la temperatura), mentre al secondo,

che sente poco la variazione di temperatura, è assegnato un Indice di Viscosità pari a 100.

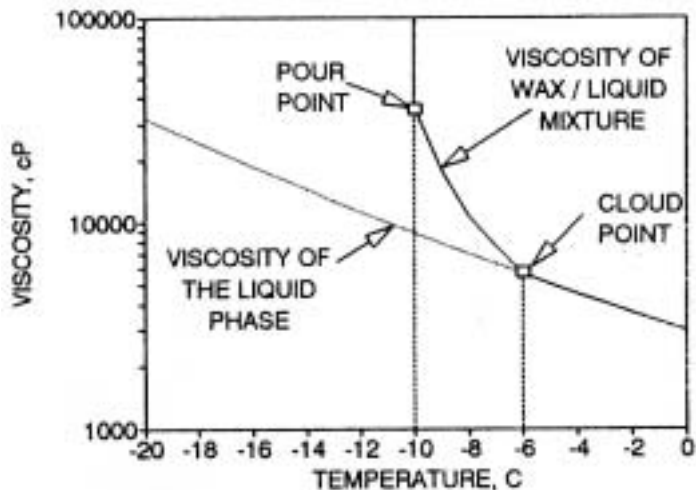
Nel corso degli anni con le moderne tecniche di raffinazione e con nuovi additivi si è riusciti a formulare oli con caratteristiche di viscosità migliori, nei confronti della temperatura, tanto da superare gli oli di riferimento. Alcune sostanze presenti negli oli lubrificanti tendono a fare aumentare tale indice (paraffine) mentre altre a farlo diminuire (molecole nafteniche ed aromatiche).

Nei lubrificanti moderni sono stati introdotti i cosiddetti additivi detti "Viscosity Index Improvers" o semplicemente VI Improvers che approfondiremo nel paragrafo dedicato.

Questo miglioramento della caratteristica viscosa è stato voluto dall'industria poiché il mercato richiedeva che motori e cambi potessero funzionare sia ad alte che a basse temperature senza problemi.

### PRESSIONE

La viscosità di un fluido aumenta se la pressione cresce. L'effetto è però più piccolo rispetto all'influenza della temperatura, sempre che non si



**Figura 6, effetto della cristallizzazione delle paraffine sulla viscosità di un olio vicino al suo punto di scorrimento (pour point) che corrisponde alla temperatura a cui l'olio inizia a solidificare.**

stia parlando di lubrificazione di parti con elevate pressioni, come ad esempio cuscinetti a strisciamento e ruote dentate. La relazione viscosità-pressione dipende dalla concentrazione di paraffine, molecole nafteniche e composti aromatici ma non può essere generalizzata così accuratamente come nel caso della temperatura. Per cui si conducono esperimenti per descriverne il rapporto.

## FLUIDI NON NEWTONIANI

Un fluido si dice newtoniano se la tensione tangenziale,  $\tau$ , è proporzionale al gradiente di taglio. In questo modo la viscosità dinamica, che è il loro rapporto, è costante (vedi figura 4). In un fluido non-newtoniano gli sforzi tangenziali non cambiano in proporzione diretta con il gradiente di velocità, per cui la viscosità dipende dal gradiente a cui è misurata. La viscosità di alcuni fluidi non-newtoniani è anche tempo-dipendente: infatti la viscosità cambia man mano che il fluido scorre.

Si può caratterizzare il comportamento dei fluidi non-newtoniani con complessi modelli matematici che relazionano gli sforzi tangenziali con i gradienti di velocità ed eventualmente con il tempo. Ci sono sostanzialmente tre tipi di fluidi non-newtonia-

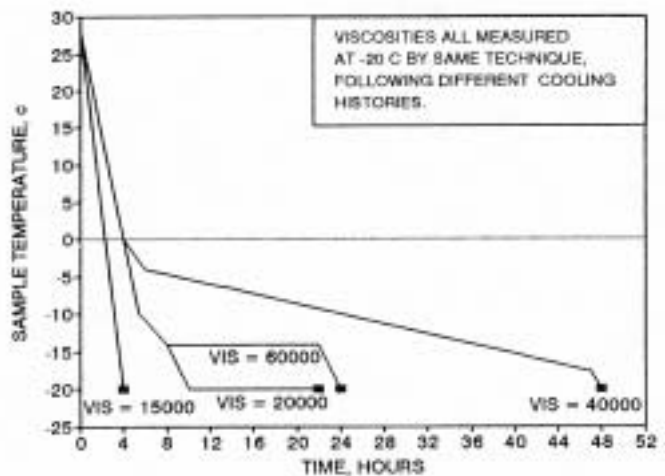
ni: grassi, oli con VI migliorato ed oli a basse temperature (vicine al loro punto di scorrimento).

## GRASSI

Il flusso dei grassi è estremamente complicato e questo si deve essenzialmente al comportamento delle fibre di sapone che sono il maggiore costituente dei grassi. Queste fibre influenzano il flusso del grasso in quanto sono orientate in tutte le direzioni, massimizzando la resistenza allo scorrimento fino a quando inizia a scorrere nei condotti. Dopo di che esse si allineano nella direzione del flusso opponendo la minima resistenza. E' per questo motivo che si dice che la viscosità è tempo-dipendente. Inoltre i grassi si comportano da solidi quando il livello delle tensioni tangenziali è basso, poiché le fibre di sapone risultano particolarmente attratte e oppongono resistenza allo scorrere fino a quando tali tensioni non raggiungono un minimo livello. Infine la viscosità dei grassi diminuisce rapidamente tanto più il gradiente di velocità aumenta.

## OLI CON INDICE DI VISCOSITÀ MIGLIORATO

I miglioratori dell'indice di viscosità (VI) sono spesso inclusi negli oli per motori, trasmissioni ed in alcuni flui-



**Figura 7, vediamo come cambia la viscosità dell'olio con velocità di raffreddamento diverse. Ad un'elevata velocità di raffreddamento, quindi ad un breve periodo, vediamo che corrisponde la più bassa viscosità, mentre alla più bassa velocità di raffreddamento corrisponde la viscosità più alta. Un altro olio testato con le stesse leggi di raffreddamento avrebbe avuto risultati diversi.**

di idraulici. Essi migliorano il range di utilizzo degli oli garantendo bassa viscosità per avviamenti alle basse temperature ed adeguata viscosità alle temperature di esercizio.

Questi additivi sono indispensabili per la formulazione di oli multigrado. Gli ingredienti attivi in questi oli sono dei polimeri organici, cioè grosse molecole contenenti migliaia di atomi di carbonio (contro solo qualche decina negli oli senza VI-miglioratori). E' interessante notare che la quantità di questi polimeri è circa dell'1%, ma è abbastanza per caratterizzarlo. Per capirne il comportamento possiamo pensare che la molecola polimerica in soluzione abbia una forma sferica come mostrato nella figura 5 e che sia raggomitolata su se stessa a basse temperature e che si espanda alle alte.

E' molto importante che queste molecole abbiano una buona stabilità al taglio meccanico, poiché, in caso contrario, durante il funzionamento di ingranaggi, distribuzione e punterie a causa dell'azione battente fra le parti metalliche sul film di lubrificante, si avrebbe il taglio della molecola, rendendola meno ispessente e meno attiva.

## OLI A BASSE TEMPERATURE

Una delle più critiche condizioni in cui i lubrificanti si trovano a lavorare è quella del dover fluire in angusti condotti a bassissime temperature. Infatti in queste condizioni le paraffine possono formare dei cristalli e precipitare in soluzione.

Quando un olio viene raffreddato al di sotto di una certa temperatura, i cristalli formano una struttura che intrappola l'olio ed impedisce al flusso di scorrere. Questi cristalli costituiscono solo una piccola parte, mentre la maggior parte degli altri componenti del lubrificante è ancora allo stato liquido (figura 6).

Gli oli nei quali si sono formate le strutture paraffiniche possono esibire alcuni comportamenti non-newtoniani. In primo luogo possono comportarsi come dei grassi. Possiamo definire infatti una sollecitazione di scorrimento che corrisponde a quella alla quale il fluido inizia a scorrere e che è simile a quella di un grasso.

In secondo luogo, quando sono sottoposti ad una sollecitazione superiore a quella in cui iniziano a rompersi le strutture cristalline, la loro viscosità decresce con il tempo. Infatti, man mano che si rompono queste

TABLE I

### VISCOSITY SYSTEM FOR INDUSTRIAL FLUID LUBRICANTS (ASTM D 2422)

ISO Viscosity Grade	Mid-Point Viscosity (cSt at 40°C)	Kinematic Viscosity Limits (cSt at 40°C)	
		Min.	Max.
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.48
ISO VG 10	10	9.0	11.0
ISO VG 15	15	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2

TABLE II

### ENGINE OIL VISCOSITY CLASSIFICATION SAE J300 FEB92

SAE Viscosity Grade	Low-Temp. Cranking	Low-Temp. Pumping	Kin. Vis. (cSt @ 100°C)		High-Temp. High-Shear
	Vis. (cP) Max.	Vis. (cP) Max. <sup>a</sup>	Min.	Max.	Vis. (cP) Min.
0W	3250 at -30	30000 at -35	3.8	—	2.4
5W	3500 at -25	30000 at -30	3.8	—	2.9
10W	3500 at -20	30000 at -25	4.1	—	2.9
15W	3500 at -15	30000 at -20	5.6	—	3.7
20W	4500 at -10	30000 at -15	5.6	—	3.7
25W	6000 at -5	30000 at -10	9.3	—	3.7
20	—	—	5.6	< 9.3	—
30	—	—	9.3	< 12.5	—
40	—	—	12.5	< 16.3	—
50	—	—	16.3	< 21.9	—
60	—	—	26.5	< 26.1	—

<sup>a</sup>With no yield stress

strutture, diminuisce la resistenza allo scorrimento. La viscosità rimane, comunque, più alta che nell'olio fluido perché i cristalli ispessiscono l'olio. Chiaramente facendo lavorare il lubrificante a temperature più basse del punto di scorrimento, vuol dire creare seri danni al macchinario.

Per esempio, in un carter motore freddo l'olio potrebbe fluire non abbastanza velocemente tanto da permettere alla pompa di aspirare aria quindi di far soffrire il motore, se non addirittura provocare rotture catastrofiche.

Molti lubrificanti contengono additivi che abbassano il punto di scorrimen-

to. Essi, unendosi alle paraffine, le fanno precipitare interrompendo l'ordinata crescita dei cristalli.

Questi additivi diminuiscono la temperatura alla quale l'olio sembra solidificare e vengono chiamati Pour Point Depressant (P.P.D.) e sono presenti per 0,3-0,5%

### EFFETTI DEL TEMPO DI RAFFREDDAMENTO

Non è da sottovalutare inoltre come l'olio si raffredda. Nel grafico di figura 7 notiamo infatti che a velocità diverse di raffreddamento corrisponde una viscosità diversa finale.

Questo comportamento riflette l'inte-

razione fra le paraffine, i P.P.D, i VI e gli altri additivi presenti negli oli.

### VARIAZIONE DELLA VISCOSITÀ DEL LUBRIFICANTE CON L'USURA

La viscosità della maggior parte degli oli aumenta lentamente con l'uso a causa delle reazioni chimiche che avvengono durante il servizio, in particolare quando sottoposto ad elevate temperature.

Alcune molecole dell'olio reagiscono con l'ossigeno formando dei composti ossigenati che aumentano la viscosità ed al contempo spesso lo scuriscono. L'esposizione a forte luce e la presenza di superfici metalliche lucide possono accelerare il processo. Come accennato, la viscosità di un olio dipende dalle viscosità dei suoi componenti.

Negli ambienti caldi la molecola più leggera e con minore viscosità tende ad evaporare lasciando quindi che le molecole più pesanti dei composti più viscosi caratterizzino il fluido.

Se prendiamo due oli con la stessa viscosità di riferimento (il primo composto da un mix di due componenti uno poco e l'altro molto viscoso, e il secondo del tutto composto di olio mediamente viscoso) ebbene, il primo subirà un maggior aumento della viscosità a causa delle perdite per evaporazione.

L'albero a gomiti di un motore lavora in condizioni particolarmente gravose. La viscosità di questi oli, infatti, tende ad aumentare con l'uso perché

sono studiati per tenere in sospensione i prodotti di combustione, i vari depositi e gli sfridi da usura meccanica. Si contrappone a questa tendenza all'ispessimento, la perdita di viscosità dovuta alla rottura delle molecole degli additivi VI-improver.

Il risultato di questi effetti opposti è che la viscosità dell'olio degli alberi motore tende inizialmente a diminuire abbastanza velocemente a causa della rottura dei polimeri, ma poi tende ad aumentare lentamente quando effetti come l'ossidazione ed altri effetti ispessenti tendono a prevalere.

### CLASSIFICAZIONE

Nella tabella I vediamo la classificazione degli oli lubrificanti per l'industria.

Nella tabella II vediamo, invece, la classificazione SAE per gli oli motore; questa propone undici gradazioni, sei invernali (con la lettera W = winter) e cinque estive. I lubrificanti multigradi soddisfano contemporaneamente ad una gradazione SAE invernale e ad una estiva.

Nella tabella III, invece, vediamo la classificazione dei lubrificanti utilizzati per le trasmissioni.

### CONCLUSIONI

Un olio motore moderno è costituito dal 12-18% di additivi e il rimanente 82-88% dalla "base". Quest'ultima è quindi il lubrificante vero e proprio. Il compito degli additivi è quindi quello di esaltare o modificare le caratteristiche della base. ■

TABLE III

### AXLE AND MANUAL TRANSMISSION LUBRICANT VISCOSITY CLASSIFICATION (SAE J300c)

#### SAE Recommended Practice

SAE Viscosity Grade	Maximum Temperature for Viscosity of 150,000 cP (°C)	Kinematic Viscosity (cSt at 100°C)	
		Min.	Max.