

## CAPITOLO 6

### L'ATTRITO

#### INTRODUZIONE

In questo capitolo viene data una descrizione del fenomeno fisico dell'attrito a livello macroscopico e microscopico e sono illustrati diversi comportamenti che tengono conto delle sue caratteristiche fisiche.

#### 6.1 L'ATTRITO TRA DUE CORPI

Per capire meglio quali sono i fattori che influenzano l'attrito, è necessario concentrarsi sulle superfici a contatto dei corpi, tra le quali si sviluppa attrito [1]. Due corpi possono essere a contatto **conforme** o **non conforme**. In un contatto conforme l'area macroscopica di contatto è determinata dalle dimensioni dei corpi, come da figura 6.1, dove la pressione esercitata dal **corpo a** è proporzionale alle forze esterne e alla forza peso.



**Figura 6.1: contatto conforme.**

Nel caso in cui i due corpi abbiano raggi di curvatura diversi, allora si parla di contatto non conforme tra corpi, come si vede in figura 6.2. Inoltre si distinguono caso ideale e reale di contatto non conforme, in quanto idealmente l'area di contatto si riduce ad un punto, mentre nella realtà la zona macroscopica di contatto è ben più grande ed è dipendente dal carico che i due corpi devono sopportare e dalla rigidità dei materiali.

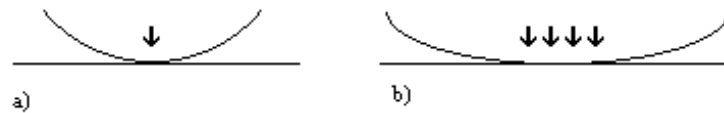


Figura 6.2: a) caso ideale, b) caso reale.

Contatti non conformi si hanno soprattutto tra parti rotanti accoppiate mediante **cuscinetti a sfere** e tra i **denti delle trasmissioni ad ingranaggi dei robot industriali**, in cui la larghezza tipica della zona di contatto non conforme è dell'ordine dei millimetri.

A livello microscopico invece le **asperità** delle superfici fanno sì che la vera area di contatto sia molto più piccola rispetto a quella apparente a livello macroscopico in cui le superfici appaiono lisce, così che i veri punti di contatto sono quelli in cui le asperità delle due parti si congiungono, come mostrato in figura 6.3.

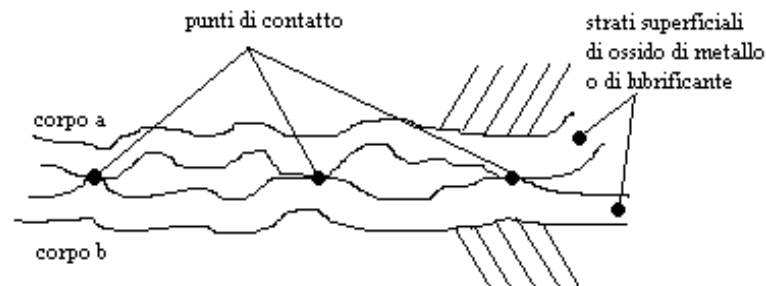


Figura 6.3: Fisionomia della zona di contatto.

Le asperità si deformano in modo da generare delle aree di contatto locali che sopportino il carico totale. La pressione nei punti di giunzione può essere considerata in prima approssimazione proporzionale al coefficiente di rigidità del materiale, mentre l'area di contatto d'altra parte è proporzionale al carico totale.

L'attrito risulta proporzionale alla somma delle forze di rottura delle giunzioni nelle zone di contatto, in modo tale che l'aumento dell'area microscopica di contatto dovuto a maggior carico incrementa il numero delle forze di rottura, mentre la singola forza resta costante e quindi l'attrito risulta in proporzionalità diretta con il carico.

$$F_a = \alpha \sum_{i=1}^n f_{rottura}^i \quad (6.1)$$

$$n = \beta A_{contatto} \quad (6.2)$$

$$A_{contatto} = \gamma F_{carico} \Rightarrow F_a = k F_{carico} \quad (6.3)$$

La presenza di lubrificanti, olio o grasso, o la formazione di ossido di metallo, crea degli strati superficiali di scivolamento. I lubrificanti vengono aggiunti per controllare l'attrito e ridurre l'usura delle parti a contatto; in tal modo si diminuiscono le forze di rottura delle giunzioni delle asperità e così anche l'attrito.

## 6.2 L'ATTRITO COME FUNZIONE DELLA VELOCITÀ

A basse velocità di scivolamento, in presenza di lubrificante, si riconoscono quattro regimi di attrito in funzione di altrettanti regimi di lubrificazione, che individuano la **curva di Stribeck**, come mostrato in figura 6.4.

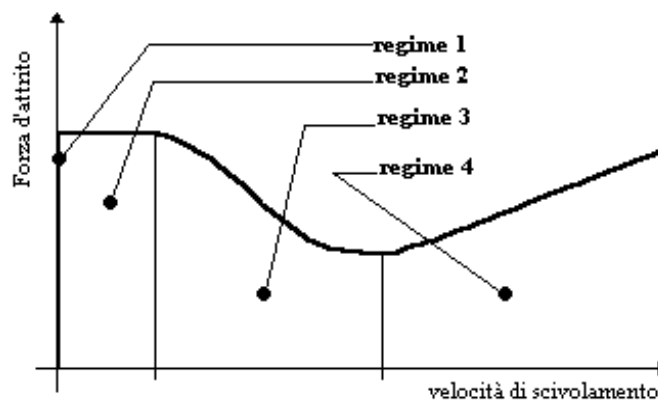


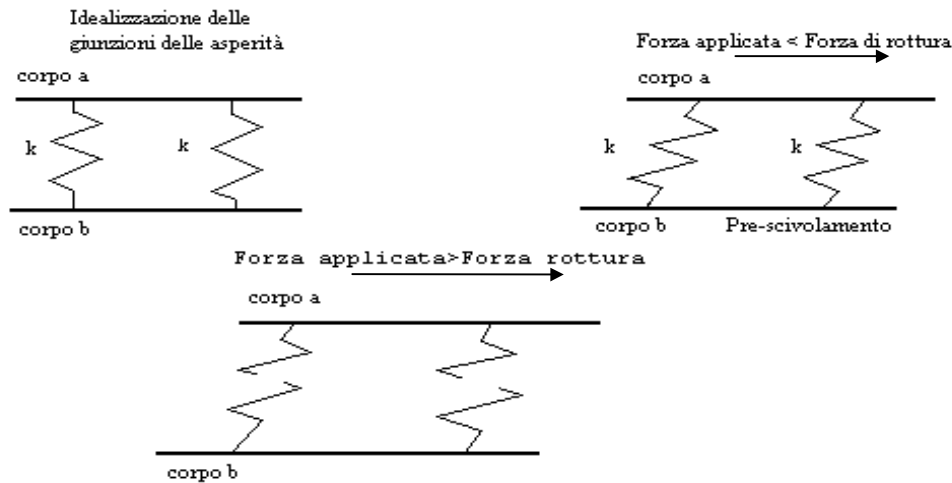
Figura 6.4: Curva di Stribeck.

- **regime 1:** regime di attrito statico, nessun scivolamento tra i corpi, ma solo una deformazione elastica delle giunzioni tra asperità
- **regime 2:** confine di lubrificazione
- **regime 3:** parziale lubrificazione
- **regime 4:** piena lubrificazione

### 6.2.1 ATTRITO STATICO E PRE-SCIVOLAMENTO

A velocità nulla è presente l'**attrito statico** e le giunzioni tra le asperità possono essere modellizzate come delle molle che mantengono unite le due parti e che si deformano elasticamente

determinando uno spostamento di pre-scivolamento. Ciò fino a che la forza applicata, responsabile del movimento, non supera la forza di rottura degli elementi elastici dando luogo ad un vero e proprio movimento, come si nota in figura 6.5.



**Figura 6.5 Modellizzazione dell'attrito statico e del pre-scivolamento**

Lo spostamento di pre-scivolamento dipende dalla forza tangenziale applicata al **corpo a**. Essendo il comportamento delle asperità come quello di molle con costante di **rigidezza tangenziale**, possiamo esprimere:

$$F_{applicata} = -k \cdot x \quad (6.4)$$

La costante **k** di rigidezza tangenziale della molla dipende dalla geometria delle asperità, dall'elasticità del materiale e dalla forza normale applicata. In prima approssimazione, se si considera costante lo spostamento di pre-scivolamento alla rottura  $x_r$  (cioè la massima deformazione tangenziale delle asperità), allora la costante **k** è data da:

$$k = \frac{F_{rottura}}{x_r} \quad (6.5)$$

Se la forza normale varia e il coefficiente di attrito statico rimane approssimativamente costante, allora **k** risulta proporzionale alla forza normale.

La conoscenza dello spostamento di pre-scivolamento è importante per il controllo nelle applicazioni ad alta precisione.

## 6.2.2 CONFINE DI LUBRIFICAZIONE

In questo secondo regime, essendo la velocità estremamente bassa, non si ha la creazione di uno strato di fluido lubrificante tra le due superfici, che quindi entrano in contatto diretto; lo slittamento tra metallo e metallo fa sì che la forza di attrito possa essere maggiore che nelle regioni **3** e **4** di figura 6.4, nelle quali è presente una lubrificazione più consistente.

## 6.2.3 PARZIALE LUBRIFICAZIONE

Quando una delle due parti si muove con velocità maggiore, allora il movimento di slittamento o rotazione porta a spingere del fluido lubrificante tra le superfici di contatto, fino a formare uno strato e l'attrito diminuisce. Maggiori sono la velocità e la viscosità del fluido, più spesso risulta essere lo strato di lubrificante.

Un altro comportamento osservato sperimentalmente in molti casi, è un ritardo di tempo nel passaggio da un condizione di attrito ad un'altra, in seguito ad un cambiamento di velocità in questo regime di lubrificazione. Infatti, nella transizione da un valore  $v_1$  ad un valore  $v_2$  della velocità, come mostrato in figura 6.6, persiste un ritardo di tempo per l'attrito nel passare da  $F_{a1}$  a  $F_{a2}$ , che può essere dell'ordine dei millisecondi o più. Questo fenomeno viene riportato con il nome di **memoria d'attrito**.

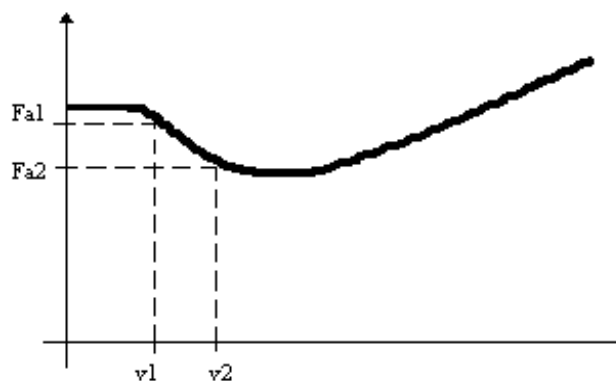
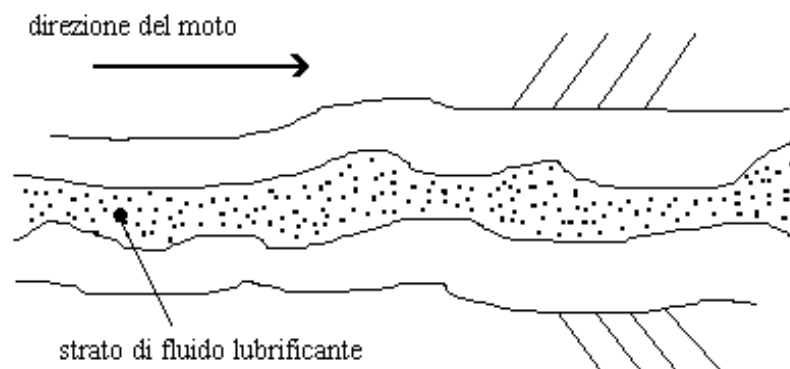


Figura 6.6 Fenomeno memoria d'attrito

Questo aspetto è fondamentale per la comprensione di un altro fenomeno caratteristico di questo regime a pendenza negativa della curva di Stribeck, cioè lo **stick-slip**, arresto-distacco, che è un effetto destabilizzante (avanzamento a scatto) per il controllo di posizione nelle macchine utensili e negli azionamenti elettrici ed è argomento di successivi paragrafi.

## 6.2.4 PIENA LUBRIFICAZIONE

Oltrepassata la velocità che conduce al regime di piena lubrificazione, i due corpi sono completamente separati e non si instaura nessun contatto tra le due parti che si muovono secondo una dinamica tipica dell'**attrito viscoso** (fig. 6.7), quindi con una caratteristica che ha una pendenza costante con l'aumentare della velocità: ciò corrisponde alla regione 4 della curva di Stribeck di fig. 6.4.

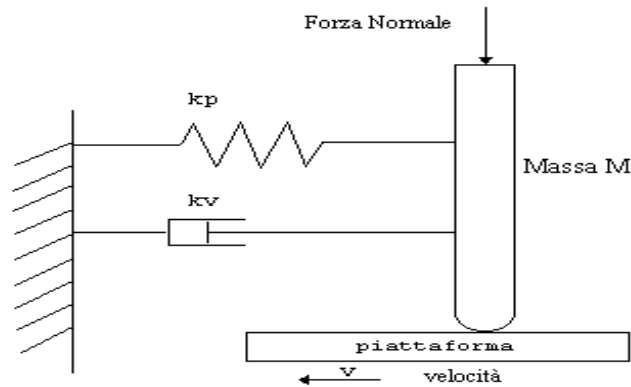


**Figura 6.7: Piena lubrificazione**

## 6.3 IL FENOMENO DELLO STICK-SLIP

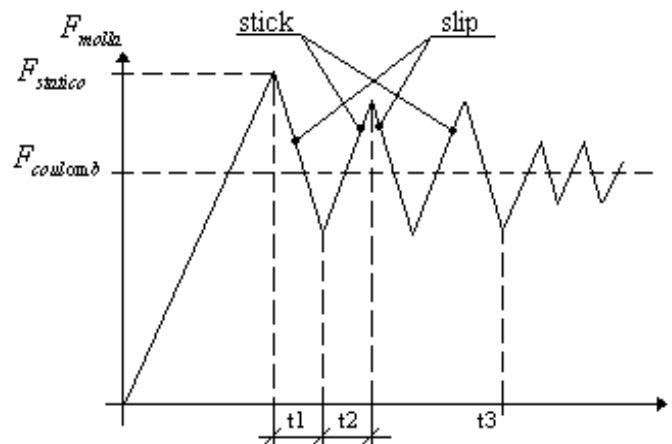
Il fenomeno dello stick-slip si sviluppa alle basse velocità e non è giustificabile con un semplice modello dell'attrito costituito da attrito statico e coulombiano; per capire in quali condizioni viene a manifestarsi è utile ricorrere ad un esperimento per individuare i fattori che intervengono

Il meccanismo rappresentato in figura 6.8 riproduce il comportamento di una servo macchina che si muove alla velocità desiderata  $v$  con una costante di controllo proporzionale  $k_p$  e una di smorzamento  $k_v$ .



**Figura 6.8 Modellizzazione del comportamento di una servo macchina**

Misurando la forza esercitata dalla molla dall'istante di contatto del pignone con la piattaforma, si osserva inizialmente il crescere di tale forza fino al raggiungimento della forza di attrito statico, vedi figura 6.9. Successivamente inizia la fase di scivolamento, che si risolve nel tempo  $t_1$  di *slip*, durante il quale la molla si scarica sino a quando non interviene la fase di arresto, *stick*, per il tempo  $t_2$  e la molla si ricarica.



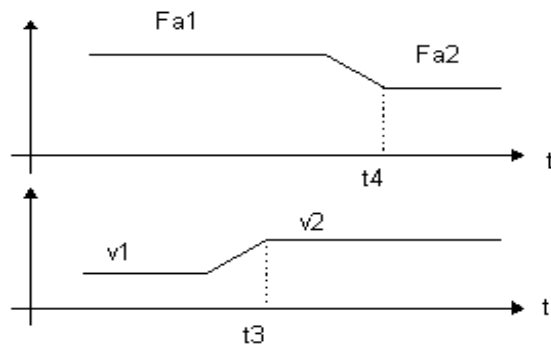
**Figura 6.9 Fenomeno Stick-Slip**

La molla non si ricarica al valore di attrito statico perché il tempo  $t_2$  detto *dwell-time* non è così lungo per consentirlo; si instaura comunque un ciclo limite stabile durante il quale si hanno il susseguirsi di fasi di arresto (*stick*) e scivolamento (*slip*).

Se all'istante  $t_3$  la velocità di traslazione della piattaforma aumenta passando da  $v_1$  a  $v_2$ , figura 6.6, allora si ha una riduzione dell'ampiezza delle oscillazioni perché il periodo di carica della molla, (*dwell-time*), diminuisce.

Si può affermare che l'ampiezza della forza della molla nel ciclo limite è funzione decrescente della velocità fino all'estinguersi del fenomeno dello stick-slip alle velocità più elevate.

Altro fenomeno che interviene in queste condizioni è la **memoria d'attrito**, che consiste nel fatto per cui ad un cambio di velocità nella zona di parziale lubrificazione non corrisponde una variazione istantanea della forza di attrito, figura 6.10, ma si verifica un ritardo  $\Delta t = t_4 - t_3$ .



**Figura 6.10** Fenomeno memoria d'attrito