

MECCANISMI DI USURA

Generalità

L'usura può essere definita come la progressiva rimozione per perdita o trasferimento di materia per effetto di interazioni meccaniche fra due superfici a contatto, superfici che spesso sono in moto relativo e tra loro compresse da una forza di chiusura.

In generale due organi di macchine tra loro accoppiati, costituiscono (fig. 3.1.) un sistema chimico-fisico individuato dal materiale base dei due organi, da uno strato solido o semisolido aderente a ciascuno di essi e dall'eventuale lubrificante interposto.

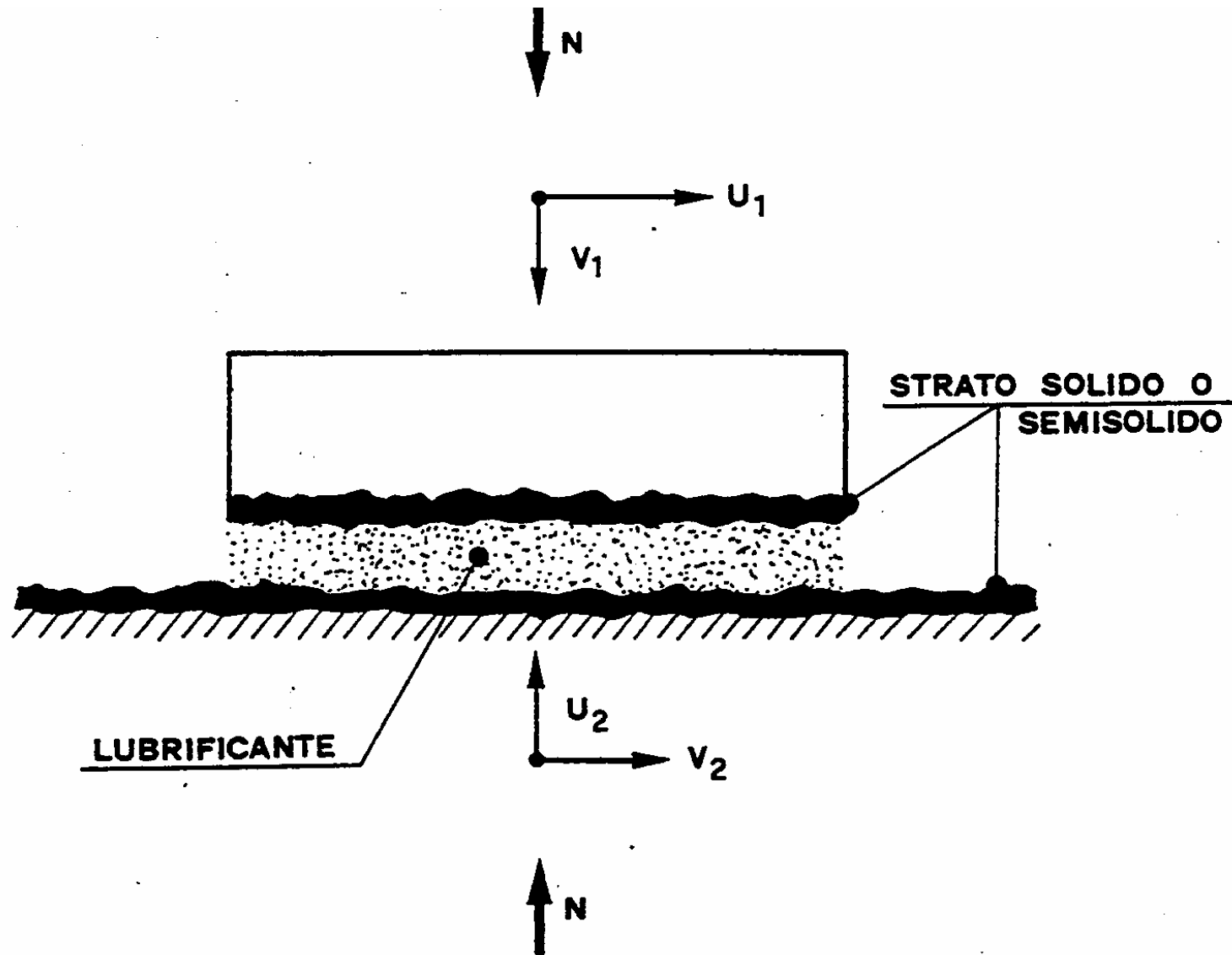


Fig. 3.1. Sistema chimico-fisico di un accoppiamento tribologico

Detto sistema risulta caratterizzato, dallo stato di sollecitazione e dal campo di temperature nella zona di contatto, dalla rugosità superficiale, dalla natura dei materiali a contatto e/o dal lubrificante interposto, nonché dallo strato superficiale derivante da interazioni dell'ambiente con le superfici. In assenza di lubrificante, o in condizioni di lubrificazione limite, caratterizzata da un film d'olio discontinuo, le superfici reali degli organi in moto relativo vengono ad interferire per cui, in relazione alle condizioni di esercizio ed a quelle ambientali, si può avere una compenetrazione degli strati superficiali aderenti e l'asportazione di materiale da una o entrambe le superfici.

Ciò comporta continue modifiche della forma delle superfici stesse o addirittura la crisi del componente tribologico.

Infatti se l'insieme dei fenomeni d'interazione che causano l'asportazione di materia resta un fatto locale e non generalizzato a tutta la superficie, si ha il fenomeno dell'*usura moderata* che, pur riducendo la vita degli organi a contatto, è normalmente tollerata ed in qualche caso addirittura desiderabile (fenomeno del rodaggio che comporta un adattamento delle superfici reali in moto relativo).

In tali circostanze il detrito d'usura è costituito da particelle di materiale della grandezza di pochi microns.

In altri casi, invece, specialmente quando la temperatura di esercizio risulta troppo elevata, si può avere la crisi dello strato superficiale (costituito, in genere, da ossido e/o da lubrificante adsorbito) che risulta asportabile con azioni meccaniche di modesta entità per cui si manifestano fenomeni di usura all'interfaccia metallo-metallo.

Tale fenomeno, denominato *usura severa*, risulta molto più rapido di quello precedentemente descritto ed è, il più delle volte, distruttivo.

Il detrito d'usura è costituito da particelle che raggiungono la grandezza di centinaia di microns.

L'usura severa è attenuata se lo strato superficiale si riforma rapidamente nel punto in cui viene distrutto per cui, nei contatti diretti, la velocità di formazione dell'ossido influenza notevolmente le condizioni di funzionamento e la durata degli organi accoppiati.

I meccanismi di usura che si attuano fra gli elementi di macchine si manifestano sotto varia forma a causa delle condizioni di lavoro estremamente varie e per le differenti proprietà dei materiali che possono presceglersi per la costruzione degli elementi stessi.

E' bene precisare che alcuni meccanismi di usura, denominati "tipici", si

presentano con un processo chimico-fisico ben individuato cui si associa un caratteristico danno superficiale (usura adesiva, usura abrasiva, usura da fatica ecc.) laddove, in altri casi di usura, classificati atipici, diversi meccanismi si sovrappongono e si susseguono (fretting, usura per cavitazione ecc.). Ovviamente per ridurre l'entità delle interazioni è conveniente interporre, quando possibile, un lubrificante fluido o solido che separi le superfici impedendo o limitando l'usura e opponendo una minore resistenza al moto. La conoscenza dei meccanismi d'usura risulta di particolare importanza nel dimensionamento dei componenti tribologici, consentendo al progettista una corretta selezione dei materiali e dei processi di lavorazione, che possono influenzare le proprietà dei materiali stessi, incrementando così l'efficienza e l'affidabilità degli organi di macchine.

Nello studio dei problemi applicativi di carattere tribologico sono stati individuati diversi meccanismi di usura tra i quali i più classici sono l'usura adesiva, l'usura abrasiva, l'usura corrosiva e l'usura per fatica superficiale.

Usura adesiva

Il meccanismo di usura adesiva, che probabilmente è il più diffuso, non è stato ancora interpretato adeguatamente.

Allo stato attuale, la “teoria dell’adesione”, assunta come modello d’usura da diversi studiosi, viene ancora ritenuta valida nonostante sia in corso di approfondimento un nuovo modello teorico denominato “teoria dell’usura per delaminazione” di cui si accennerà in seguito.

La teoria dell’adesione proposta per l’attrito da Holm nel 1938 e poi da Bowden e Tabor nel 1942, è stata in seguito migliorata ed applicata all’usura, soprattutto per merito di Hirst, Lancaster ed Archard nel 1956.

Questi ultimi hanno ipotizzato la formazione di microsaldature a freddo tra le asperità superficiali di due corpi a contatto. Tali microsaldature, nel moto relativo, vengono distrutte a causa delle forze applicate per cui le due superfici subiscono una perdita progressiva di massa il che comporta, a lungo andare, l’alterazione delle dimensioni e della geometria degli organi a contatto.

Il fenomeno si sviluppa secondo il meccanismo schematicamente descritto in fig. 3.2., che mostra tre istanti successivi del processo di formazione e distruzione di una microsaldatura.

Inizialmente lo strato superficiale è stato distrutto per cui i due metalli, venuti a contatto diretto, se sono dello stesso tipo o chimicamente affini

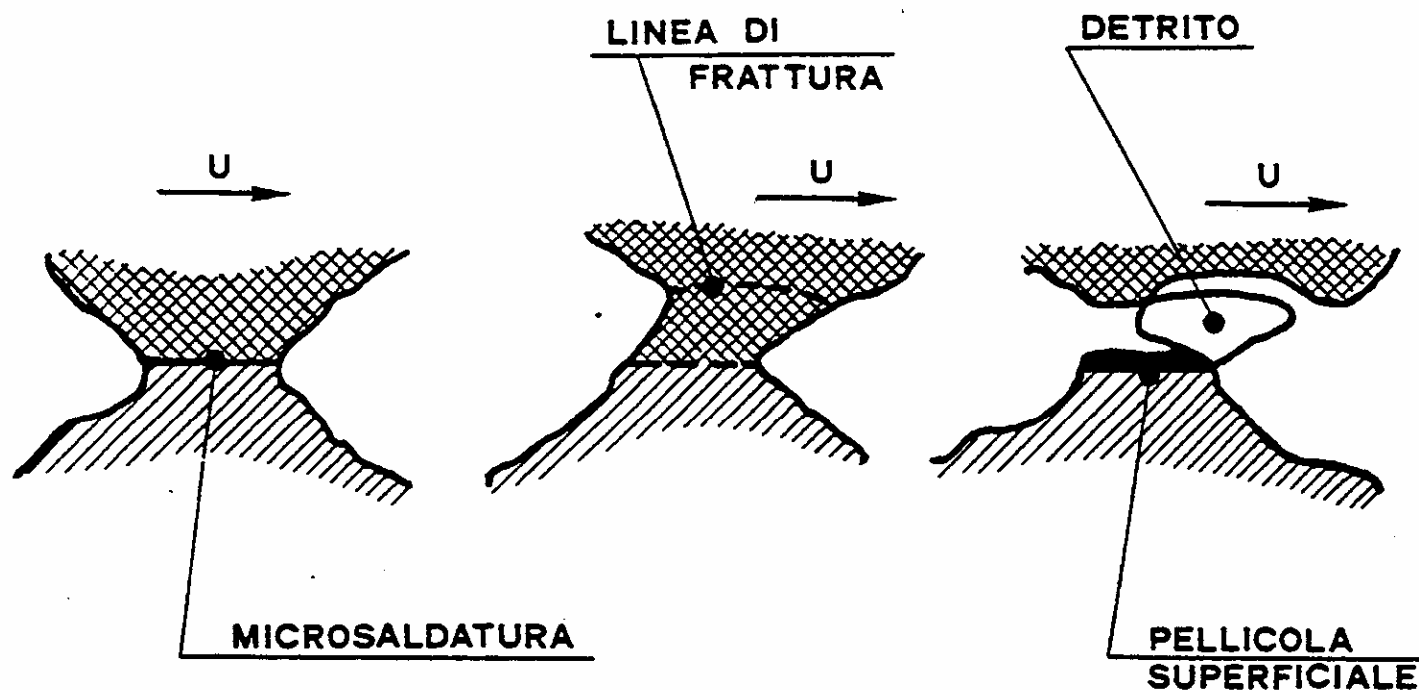


Fig. 3.2. Meccanismo di formazione e distruzione di microsaldature

(struttura cristallina affine) si saldano localmente.

La microgiunzione formata viene quindi distrutta dalla parte del metallo avente minore resistenza al taglio; infine il materiale che ha aderito al metallo più duro può distaccarsene per azione meccanica dovuta all'urto con le successive asperità.

In genere, ad ogni rottura di una microgiunzione, piccole masse di materiale meno duro restano aderenti alla superficie del materiale più duro, formando una pellicola superficiale continuamente danneggiata e ricostruita.

E' bene precisare che nella zona della giunzione se la microsaldatura è debole, per effetto del moto relativo essa si distrugge senza produrre particelle di usura ma solo deformazione plastica delle superfici. Le saldature che si formano all'interfaccia possono essere relativamente deboli se il fenomeno è caratterizzato da una semplice attrazione fisica (dovuta ad es. alle forze di Wan der Vaals) ovvero possono essere estremamente tenaci se si sviluppano per affinità chimica.

L'energia di adesione dipende dalle proprietà cristallografiche dei metalli: metalli con struttura cristallina esagonale sono più resistenti all'usura adesiva dei metalli a reticolo cubico, soprattutto se a corpo centrato.

Inoltre un'alta densità atomica ed una bassa energia superficiale dei grani conferiscono al metallo una maggiore resistenza all'usura adesiva.

Volendo contenere questo meccanismo di usura in assenza di lubrificante, converrà ricorrere a coppie di metalli chimicamente non affini e che non abbiano, perciò, tendenza a saldarsi.

Limitate quantità di leganti (soprattutto zolfo o carbonio in poche parti per milione) riescono, inoltre, a minimizzare l'usura.

Naturalmente, laddove possibile, si fa uso di lubrificanti solidi come la grafite o il bisolfuro di molibdeno, che hanno struttura cristallina stratificata e che aderiscono alle superfici in moto relativo proteggendole (fig. 3.3.).

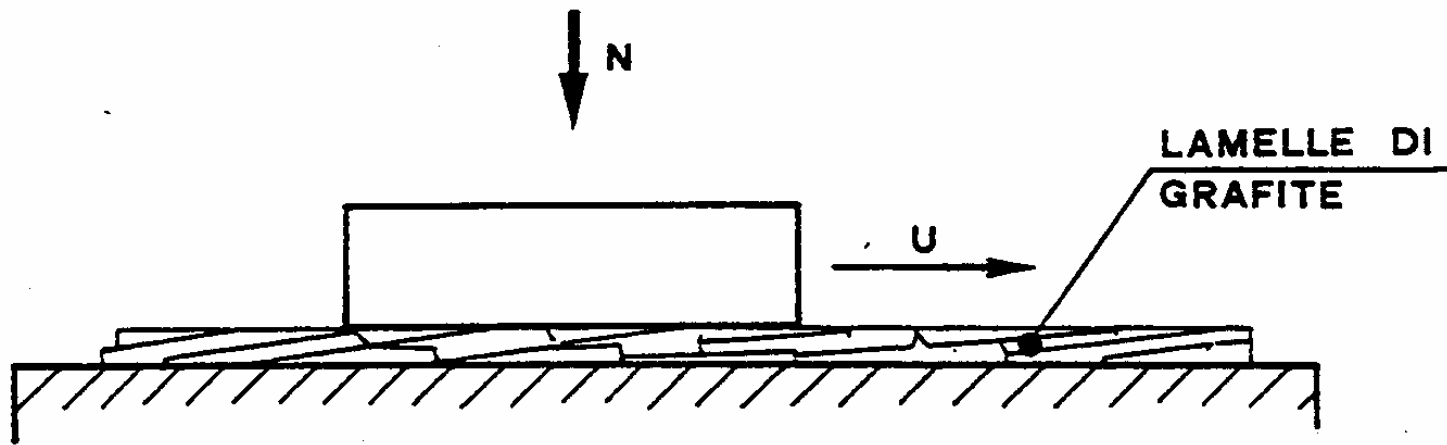


Fig. 3.3. Superfici a contatto lubrificate con grafite

In alcune applicazioni si fa ricorso a materiali non metallici aventi un'elevata inerzia chimica e perciò con scarsa tendenza a saldarsi.

Le superfici soggette ad un meccanismo di usura adesiva sono caratterizzate da una serie di piccoli crateri, conseguenza degli strappi cui il materiale è sottoposto, in genere seguiti da piccole solcature più o meno profonde, nella direzione del moto (fig. 3.4.).

Il detrito d'usura è costituito da particelle la cui morfologia tipica è rappresentata da scaglie di dimensioni medie corrispondenti alle dimensioni delle microgiunzioni che si formano fra le due superfici a contatto (fig. 3.5.).

Naturalmente la grandezza delle particelle individuano la gravità del danno superficiale che, in talune condizioni, diventa intollerato o addirittura irreversibile.

Tali livelli dell'usura adesiva sono rappresentati dallo "scuffing" e dal "seizing" ovvero dal grippaggio parziale o totale tra le superfici in moto relativo. Il grippaggio si manifesta anche nei componenti tribologici lubrificati, qualora si realizza una crisi globale del film lubrificante.

Tale fenomeno è generalmente dovuto alle velocità relative troppo alte per cui il lavoro di attrito interno dell'olio sviluppa una temperatura tanto alta

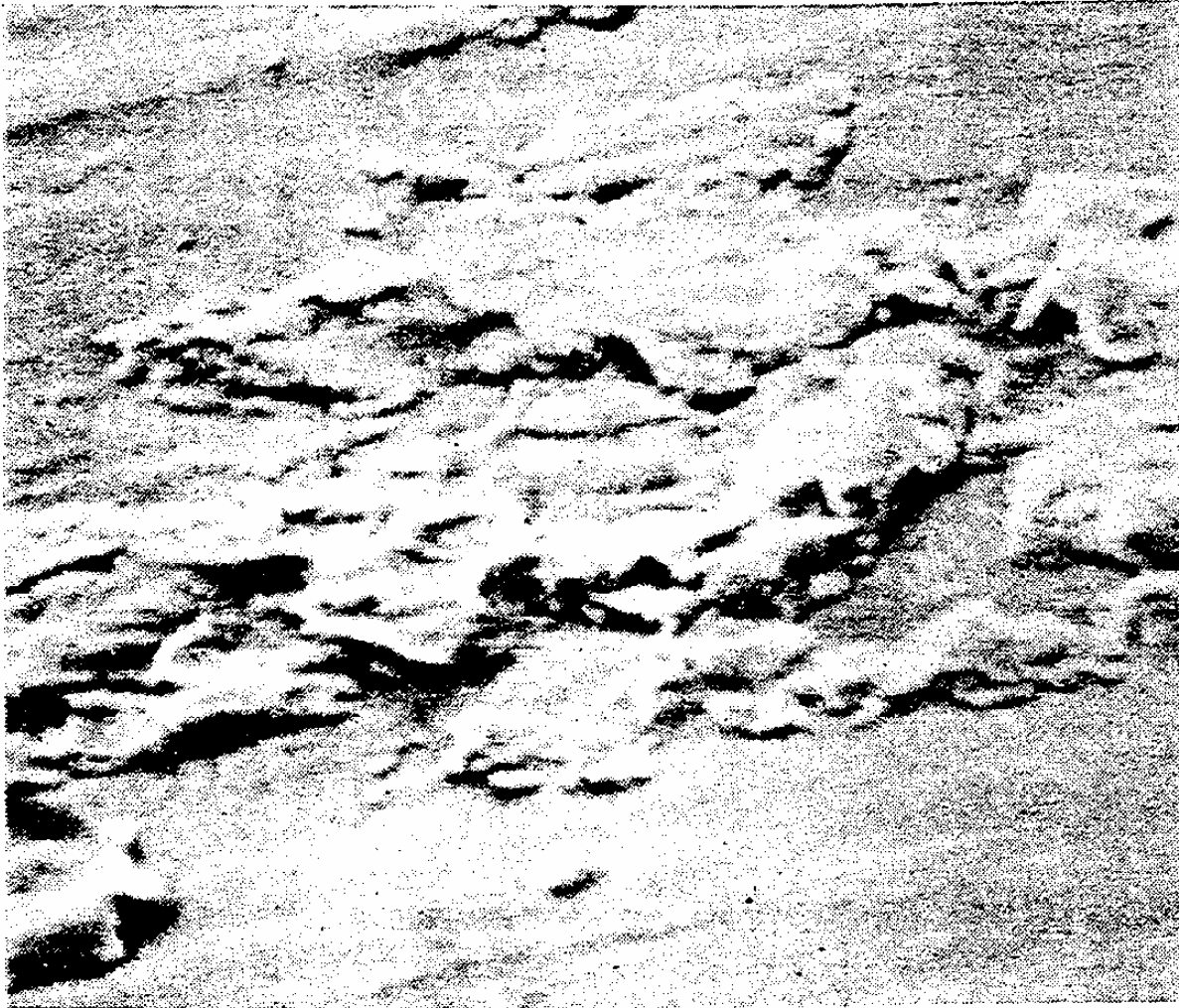


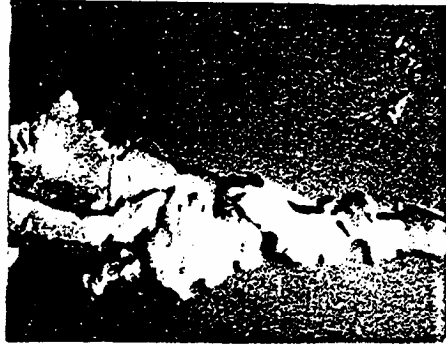
Fig. 3.4. Aspetto di una superficie sottoposta ad usura adesiva

da provocare la lacerazione del film il che comporta un impatto violento dei due organi a contatto con conseguente fusione e distruzione delle superfici metalliche.

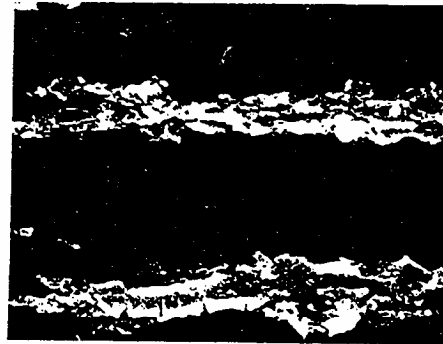
E' quando si verifica ad es. nei pistoni, in cui lo scuffing è un'avaria che si presenta con una certa frequenza e che interessa le fascie elastiche dei pistoni e le camicie dei cilindri.

Da quanto detto scaturisce l'importanza fondamentale che assume la conoscenza del comportamento tribologico dei materiali onde incrementare l'affidabilità e l'efficienza degli organi di macchine, soprattutto dal punto di vista del fenomeno dell'usura adesiva.

Sulla base di assunzioni empiriche e probabilistiche sono stati definiti dei modelli analitici che correlano la velocità di usura con le caratteristiche dei materiali e con alcuni parametri di esercizio.



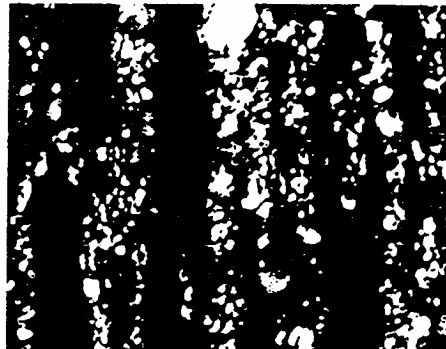
S.E.M. x 5900



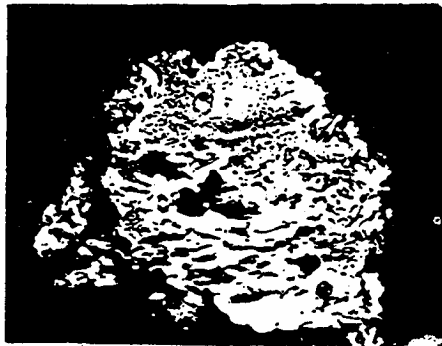
S.E.M. x 1000



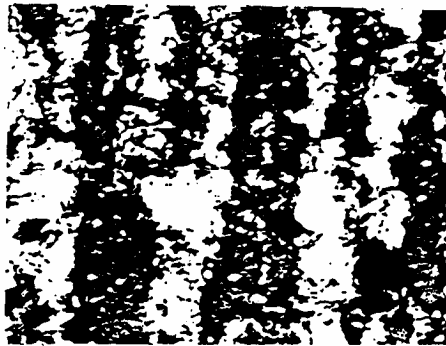
OPT. x 1600



OPT. x 1600



OPT. x 800



OPT. x 1600

Determinazione della velocità d'usura adesiva

E' stato sperimentalmente osservato da numerosi ricercatori che il volume V di materiale asportato per usura adesiva dipende linearmente dalla forza di chiusura N , dallo strisciamento s ed inversamente dalla pressione di flusso p_f del materiale meno duro.

La legge fondamentale dell'usura adesiva può conseguentemente scriversi nella forma:

$$V = k(N/p_f) \cdot s = v_s \cdot Ns \quad (3.1)$$

in cui k è una grandezza adimensionale detta *parametro d'usura*, il cui valore dipende dalla natura dei materiali a contatto e dallo stato di contaminazione delle superfici.

Lo strisciamento s precedentemente menzionato, viene definito come lo spazio che i punti omologhi di una superficie descrivono nel moto relativo rispetto all'altra superficie mentre sono a contatto con quest'ultima.

Per meglio comprendere la differenza tra spostamento relativo e strisciamento si consideri la fig. 3.6.: se la slitta prismatica ivi raffigurata descrive uno spostamento x maggiore della sua lunghezza L , i punti della sua superficie inferiore strisciano per una distanza pari ad x , perchè durante il moto sono permanentemente a contatto con il piano di scorrimento.

I punti del piano compiono, invece, spostamenti relativi pari a $-x$ e strisciamenti variabili tra 0 ed L .

In particolare i punti A, B e C del piano hanno rispettivamente strisciamento nullo, pari ad L e ad a in quanto per un tale tratto restano impegnati nel

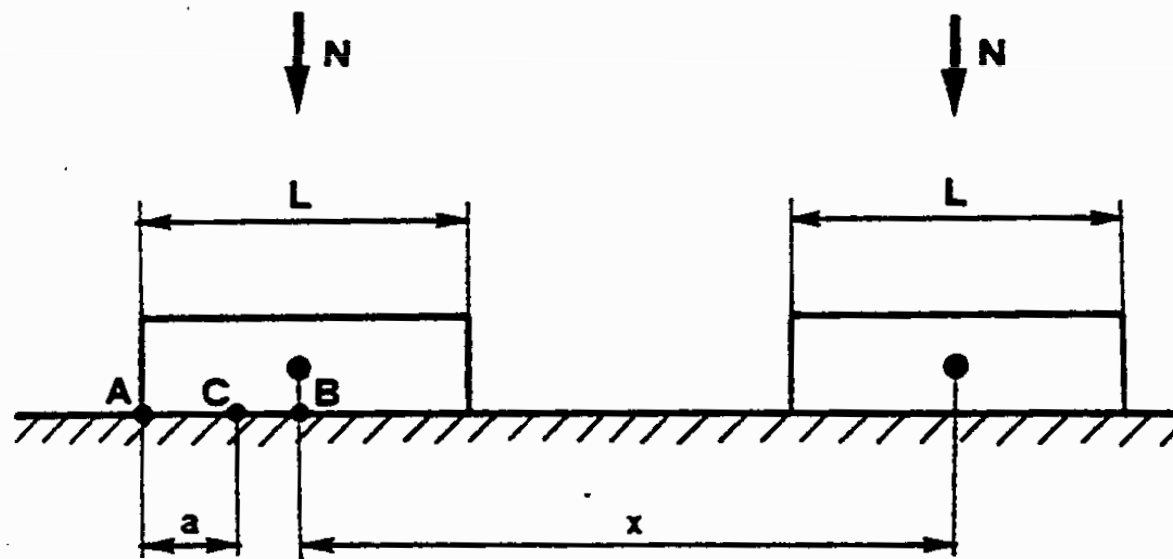


Fig. 3.6. Concetto di strisciamento

contatto per lo spostamento x della slitta.

La (3.1.) può anche porsi in una forma alternativa alla quale compete, come si vedrà in seguito, un più ampio significato.

Con riferimento alla fig. 3.7., indicando con A l'area apparente di contatto della guida prismatica e con u la sua *usura lineare*, uniforme per ipotesi, essendo ovviamente il volume usurato pari ad $A \cdot u$, dividendo ambo i membri della (3.1) per A e ricordando che la pressione media di contatto è $p_m = N/A$ si ha:

$$u = ksp_m / p_f = v_s p_m s \quad (3.2)$$

Al rapporto k/p_f si dà spesso il nome di *velocità d'usura specifica* v_s che esprime l'usura che si verifica sotto una pressione specifica unitaria per effetto di uno strisciamento unitario.

Nella tab. 3.1 vengono riportati i valori dei parametri d'usura k , della pressione di flusso (durezza Brinell o Vichers) p_f e della velocità d'usura specifica v_s per alcune coppie di materiali di interesse tecnico.

Nella tabella vengono indicate, altresì, le così dette coppie di materiali incompatibili, intendono parlare di materiali che hanno spiccata tendenza a formare microsaldature a freddo per cui è assolutamente necessario evitare di realizzare coppie di organi a contatto diretto metallo-metallo con siffatti materiali.

Si noti che il parametro k , che dipende da ambedue i materiali componenti la coppia, si conserva costante se, al variare delle condizioni di lavoro dei

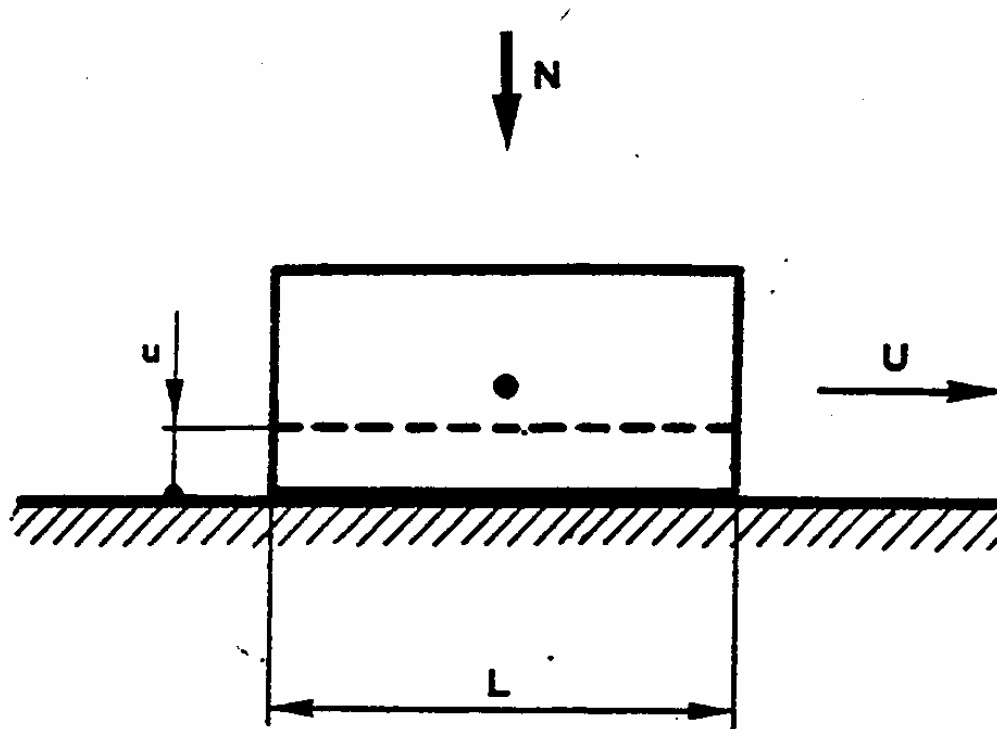


Fig. 3.7. Usura lineare di una slitta piana

due organi a contatto, non si alterano le proprietà chimico-fisiche dei materiali.

Tab. 3.1 Parametri di usura di alcune coppie di materiali metallici (la p_f si riferisce ad un valore medio dal materiale meno duro). Prove condotte con un carico di 400 g. e con una velocità di 180 cm/s

I Materiale	II Materiale	k	p_f [MN/m ²]	v_s [m ² /MN]
●Zn	Zn	53 · 10 ⁻³	400	1,33 · 10 ⁻⁴
●Acciaio C40	Acciaio C40	15 · 10 ⁻³	2.000	7,50 · 10 ⁻⁶
●Cu	Cu	10,6 · 10 ⁻³	400	2,65 · 10 ⁻⁵
●Acciaio Ni-Cr (austenitico)	Acciaio Ni-Cr (austenitico)	7 · 10 ⁻³	2.500	2,80 · 10 ⁻⁶
●Acciaio dolce	Acciaio dolce	7 · 10 ⁻³	1.860	3,76 · 10 ⁻⁶
Acciaio Ni-Cr (austenitico)	Acciaio S.R.	1,7 · 10 ⁻⁵	2.500	6,80 · 10 ⁻⁹
Acciaio S.R.	Acciaio S.R.	1,3 · 10 ⁻⁴	8.500	1,53 · 10 ⁻⁸
Ottone (40% Zn)	Acciaio S.R.	6 · 10 ⁻⁴	950	6,39 · 10 ⁻⁷
Ottone (30% Zn)	Acciaio S.R.	1,7 · 10 ⁻⁴	680	2,50 · 10 ⁻⁷
Cu	Acciaio C40	0,5 · 10 ⁻³	400	1,25 · 10 ⁻⁶

Mg	Cu	$4,5 \cdot 10^{-3}$	360	$1,25 \cdot 10^{-5}$
Ni	Acciaio S.R.	$3,2 \cdot 10^{-3}$	2.000	$1,60 \cdot 10^{-6}$
Acciaio C40	Acciaio S.R.	$2,5 \cdot 10^{-3}$	2.000	$1,25 \cdot 10^{-6}$
Mo	Cr	$8,75 \cdot 10^{-4}$	1.250	$7,0 \cdot 10^{-7}$
Au	Ni	$1,52 \cdot 10^{-3}$	200	$7,6 \cdot 10^{-6}$
Mg	Acciaio S.R.	$2,2 \cdot 10^{-3}$	330	$6,7 \cdot 10^{-6}$
Mg	Duralluminio	$2,6 \cdot 10^{-3}$	330	$7,90 \cdot 10^{-3}$
Lega di Al (lega inglese)	Acciaio S.R.	$1,6 \cdot 10^{-3}$	1.150	$1,40 \cdot 10^{-6}$
Lega di Al (lega americana)	Acciaio S.R.	$3,0 \cdot 10^{-3}$	700	$4,3 \cdot 10^{-6}$

(●) Coppie di materiali cosiddetti incompatibili

S.R. Acciaio da utensili super rapido

Dette alterazioni possono, ad es. essere causate da un eccessivo innalzamento termico superficiale il che comporta variazioni della durezza dei materiali e della capacità di reazione chimica.

Nel caso in cui tra i corpi in moto relativo sia interposto un lubrificante, il meccanismo di usura, pur risultando profondamente alterato, può comunque essere portato in conto semiquantitativamente moltiplicando il parametro d'usura della generica coppia di materiali, per un fattore Z che risulta tanto minore quanto più efficace è la lubrificazione.

I valori orientativi assunti da Z nelle varie condizioni di lubrificazione, sono raccolti nella tab. 3.2.

Tab. 3.2 Valori di Z in diverse condizioni di lubrificazione

LUBRIFICAZIONE	Z
ASSENTE	1,0
SCARSA	0,1
MEDIA	0,01
ECCELLENTE	0,001

Nelle tab. 3.3, 3.4 e 3.5 sono riportati i valori delle velocità d'usura di alcuni fra i più comuni materiali non metallici ottenuti mediante prove sperimentali nelle quali l'altro materiale è costituito da acciaio a basso tenore di carbonio con una finitura superficiale pari a $0,4 \mu\text{m}$ (finiture mi-

Tab. 3.3 Velocità d'usura e caratteristiche principali di alcuni materiali non metallici accoppiati su acciaio

Materiale	v_s (m^2/MN)	p_v (MN/ms)	f	P_{stat} (MN/m^2)	Coduc.termica K ($W/m^\circ C$)
PTFE	$4 \cdot 10^{-9}$	0,06	0,1	2	0,25
PTFE+15% vetro	$1,4 \cdot 10^{-10}$	0,39	0,09	5	0,43
PTFE+12% vetro +12% MoS ₂	$1,2 \cdot 10^{-10}$	0,62	0,09	7	0,51
PTFE+15% grafite	$6,8 \cdot 10^{-10}$	0,60	0,12	5	0,45
PTFE+55% bronzo +5% MoS ₂	$1,0 \cdot 10^{-10}$	0,44	0,13	100	0,72

Tab. 3.4 Velocità d'usura e caratteristiche principali di alcuni materiali non metallici accoppiati su acciaio

Materiale	v_s (m^2/MN)	pv (MN/ms)	f	P_{stat} (MN/m^2)	$T_d^{(+)}$ ($^{\circ}C$)
PC (Policarbonato)	$4,8 \cdot 10^{-8}$	0,01	0,35	2	130
PC+22% PTFE	—	0,06	0,15	2	130
PC+15% PTFE					
30% vetro	$5,8 \cdot 10^{-10}$	1,05	0,20	3	145
RA (Resina Acetalica)	$12,5 \cdot 10^{-10}$	0,12	0,20	2	125
RA+22% PTFE	$3,2 \cdot 10^{-10}$	0,40	0,15	2	100
RA+15% PTFE					
30% vetro	$3,8 \cdot 10^{-9}$	0,42	0,28	3	160
Nylon 6.6	$3,8 \cdot 10^{-9}$	0,09	0,25	2	70
Nylon+44% PTFE	$2,3 \cdot 10^{-10}$	0,75	0,18	2	82
Nylon+15% PTFE					
+30% vetro	$3,1 \cdot 10^{-10}$	0,70	0,26	3	250
PI (Polimmide)	$3 \cdot 10^{-9}$	1	0,50	15	260
PI+15% grafite	$5 \cdot 10^{-10}$	5	0,20	15	260
PI+15% MoS ₂	$5 \cdot 10^{-9}$	5	0,20	15	260

(+) T_d = Temperatura di distorsione

Tab 3.5 Velocità di usura e caratteristiche principali di alcuni materiali non metallici accoppiati su acciaio

Materiale	v_s (m^2/MN)	pv (MN/ms)	f	p_{stat} (MN/m^2)	$T_e^{(++)}$ ($^{\circ}C$)
Carbone amorfo	$2 \cdot 10^{-9}$	—	0,40	—	300
Carbo-grafite	$1,5 \cdot 10^{-9}$	0,3	0,30	2	350
Elettro-grafite	$2 \cdot 10^{-9}$	0,4	0,30	—	500
Carbone-metallo bianco	$6 \cdot 10^{-10}$	0,7	0,25	2	130
Carbo-grafite+Pb +Cu	$5 \cdot 10^{-10}$	0,7	0,40	2	300

(++) T_e = Temperatura max di esercizio

glieri riducono la velocità d'usura).

Nella tab. 3.4 viene indicata per ciascuna resina termoplastica la temperatura di distorsione sotto la pressione specifica di $1,8 \text{ MN/m}^2$.

Inoltre nelle tre tabelle precedentemente richiamate, è anche riportata la massima pressione statica ammissibile p_{stat} , unitamente al coefficiente di attrito e al massimo valore del prodotto p_v cioè del prodotto tra pressione specifica e velocità relativa.

Il prodotto p_v è molto diffuso nella letteratura specifica ed è una grandezza proporzionale alla potenza dissipata per attrito ($P_a = f p v A$) una volta definiti il tipo di materiale e la geometria degli organi a contatto.

Il valore massimo del p_v , riportato nelle tabs., esprime il limite oltre il quale il materiale non è più in grado di smaltire il calore prodotto.

Nella fig. 3.8. è riportato qualitativamente l'iperbole equilatera che corrisponde al valore limite del prodotto p_v per un generico materiale.

La curva delimita il dominio delle possibili condizioni di lavoro del materiale, caratterizzate da una coppia di valori pressione specifica-velocità relativa.

Ovviamente l'iperbole è interrotta in corrispondenza del massimo valore della p_{stat} e di un valore caratteristico di velocità v_{max} dal quale dipendono fenomeni di instabilità termica del materiale stesso.

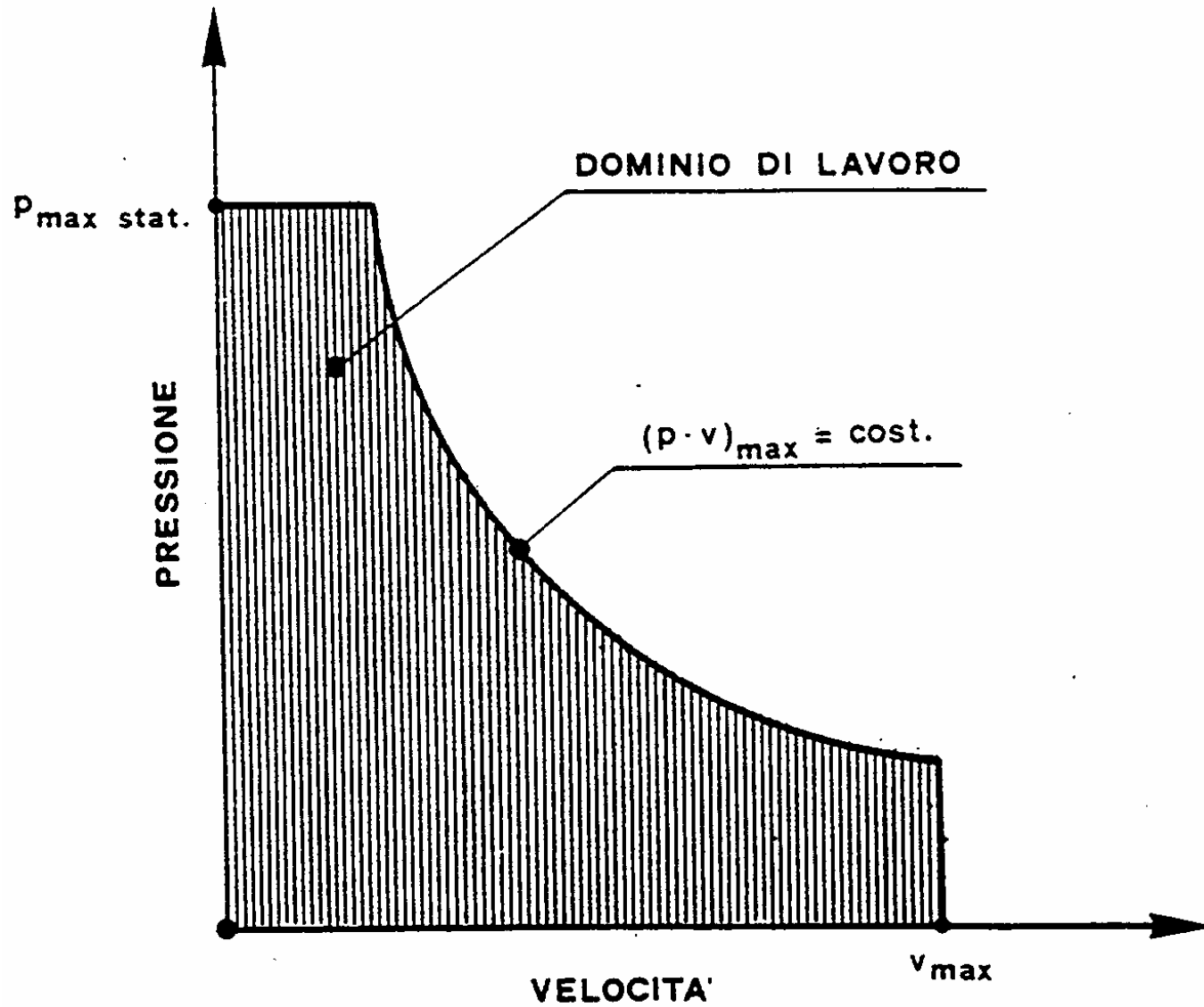


Fig. 3.8. Dominio delle condizioni di lavoro ammissibili per un materiale

Usura abrasiva

L'usura abrasiva, in condizioni di contatto diretto tra due superfici, tende a svilupparsi quando i relativi materiali hanno durezza molto diverse e non presentano affinità chimica.

Le asperità superficiali del materiale a maggiore durezza, per effetto della forza di chiusura, penetrano nella superficie più tenera inducendo una deformazione plastica e, in condizioni di moto relativo, un effetto arante con relativa asportazione di materiale.

L'azione di una asperità appartenente alla superficie più dura su quella tenera (fig. 3.9.) è esclusivamente meccanica di taglio: l'asperità dura, infatti, si comporta come un microutensile da taglio asportando dalla superficie tenera, materiale in forma di microtrucioli.

Il meccanismo descritto è tipico dell'usura abrasiva a "due corpi", laddove usura abrasiva a "tre corpi" (fig. 3.10.) si manifesta quando particelle dure, intrappolate tra due superfici in moto relativo rimuovono per abrasione, materiale da una o ambedue le superfici.

In entrambi i casi l'aspetto delle superfici usurate è caratterizzato da solcature parallele nella direzione del moto relativo (fig. 3.11.) con la presenza, talvolta, di un rigonfiamento plastico di materiale al bordo del solco.

Tale ultima circostanza si verifica soprattutto se il materiale "aggredito" è sufficientemente plastico.

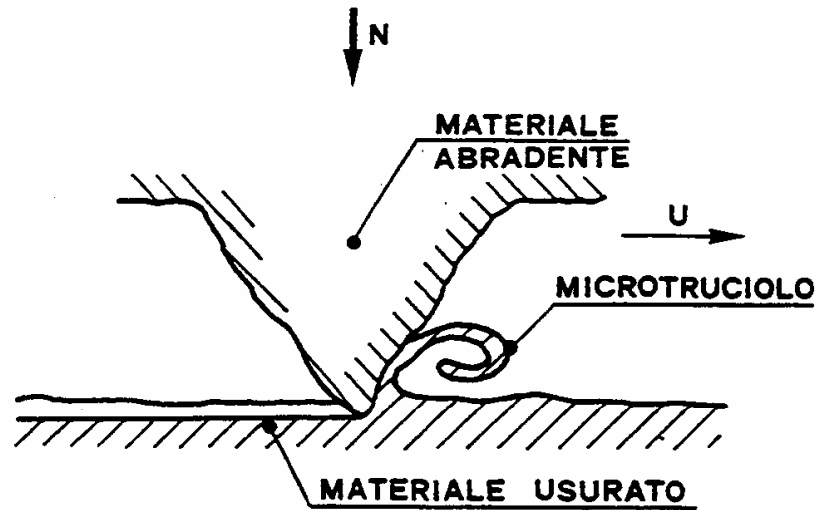
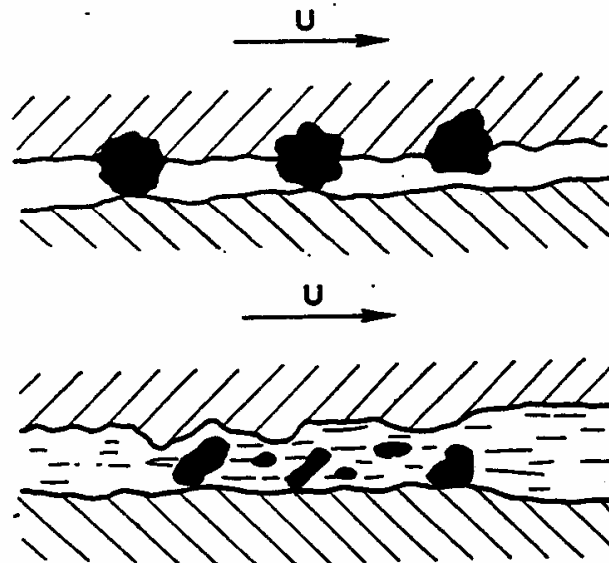


Fig. 3.9. Meccanismo di asportazione di materiale per usura abrasiva



Azione su una superficie da parte di particelle imprigionate in un'altra superficie con la quale è in contatto.

Azione di particelle abrasive che si trovano fra due superfici in moto relativo.

Fig. 3.10. Definizione dei diversi tipi di usura per abrasione



Fig. 3.11. Aspetto di una superficie sottoposta ad usura abrasiva



Fig. 3.12. Particelle d'usura abrasiva

La morfologia delle particelle (fig. 3.12.) è prevalentemente quella tipica dei microtrucioli, le cui dimensioni variano in condizioni di usura moderata o severa.

I diversi livelli di usura abrasiva sono normalmente distinti a secondo della gravità del danneggiamento che risulta, nella maggioranza dei casi, più grave e quindi più pericoloso nel caso di usura abrasiva a due corpi che non in quella a tre corpi.

In accordo con la classificazione più comune, si distinguono i tre seguenti tipi di usura:

a — *usura abrasiva da strappamento* (gouging abrasion), si manifesta (fig. 3.13.) quando particelle di grosse dimensioni vengono strappate dalla superficie che si usura ed è, quindi, caratterizzata da alte sollecitazioni e da macrodeformazioni;

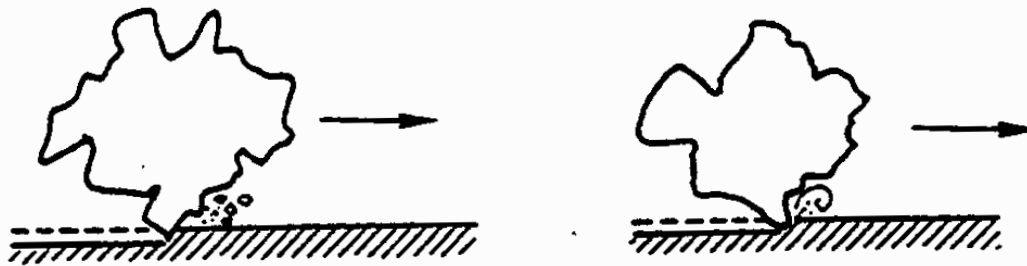


Fig. 3.13. Meccanismo di usura abrasiva da strappamento

b – *usura abrasiva da molatura* (grinding abrasion), si manifesta (fig. 3.14.) quando due superfici in moto relativo in un ambiente sabbioso, esplicano forze tali da produrre un'azione di frantumazione delle particelle tra loro intrappolate, dando vita a grani estremamente taglienti e capaci di rigare, sia pur leggermente, le superfici stesse;

c – *usura abrasiva da erosione* (erosion abrasion), si manifesta (fig. 3.15.) quando materiale abrasivo scorre libero su una superficie con alte velocità relative e carichi modesti.

Da quando esposto si deduce come il meccanismo di usura abrasiva sia fondamentalmente influenzato dalla durezza dei materiali e dalla rugosità superficiale del materiale più duro.

Un aumento di durezza comporta, infatti, un aumento progressivo della resistenza all'usura in maniera, però, diversa a secondo del modo in cui si ottiene l'incremento di durezza del materiale come mostrato qualitativamente in fig. 3.16.a e quantitativamente, per alcuni materiali in fig. 3.16.b.

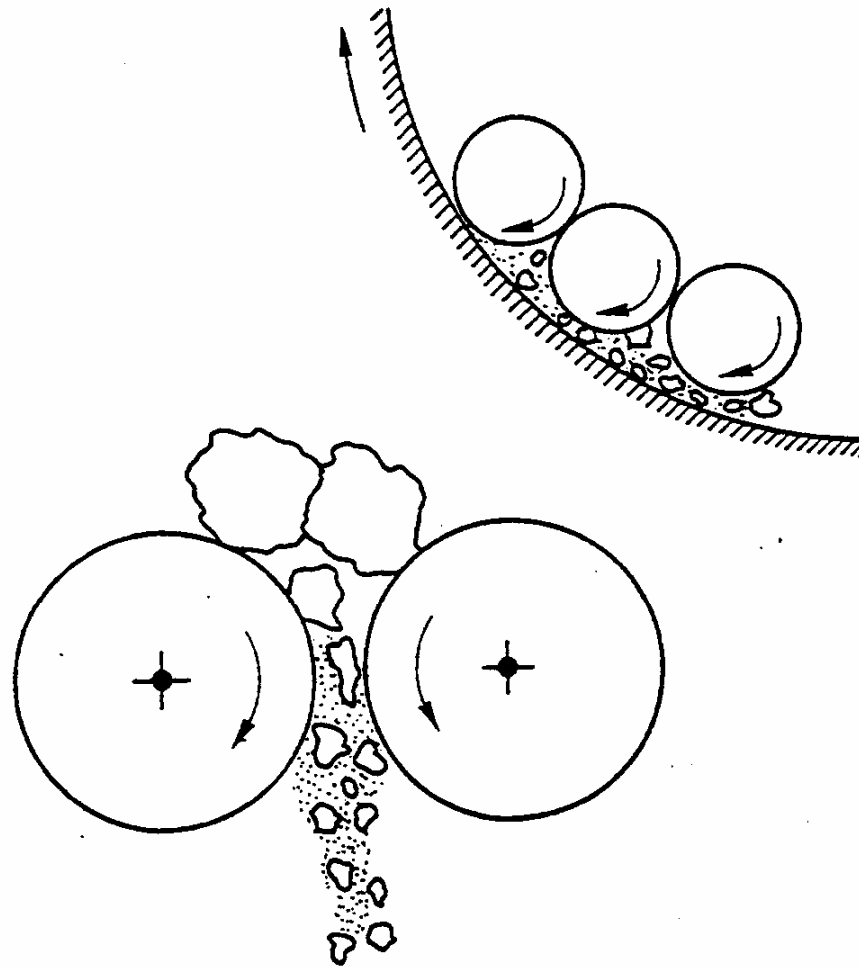


Fig. 3.14. Meccanismo di usura abrasiva da molatura

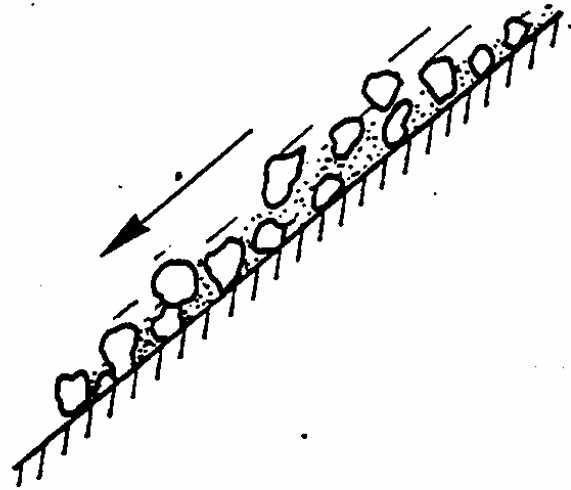


Fig. 3.15. Meccanismo d'usura abrasiva da erosione

E' importante osservare che se il materiale viene indurito mediante incrudimento non si ha un sostanziale aumento della resistenza ad usura.

Nella tab. 3.4 vengono indicati gli effetti di alcune tecniche di trattamenti superficiali per migliorare il comportamento di alcuni materiali nei confronti dell'usura abrasiva.

Per quanto concerne la rugosità è conveniente spingere il più possibile la finitura superficiale se non vi sono, però, motivi per temere l'instaurarsi di meccanismi di usura adesiva che potrebbero essere esaltati.

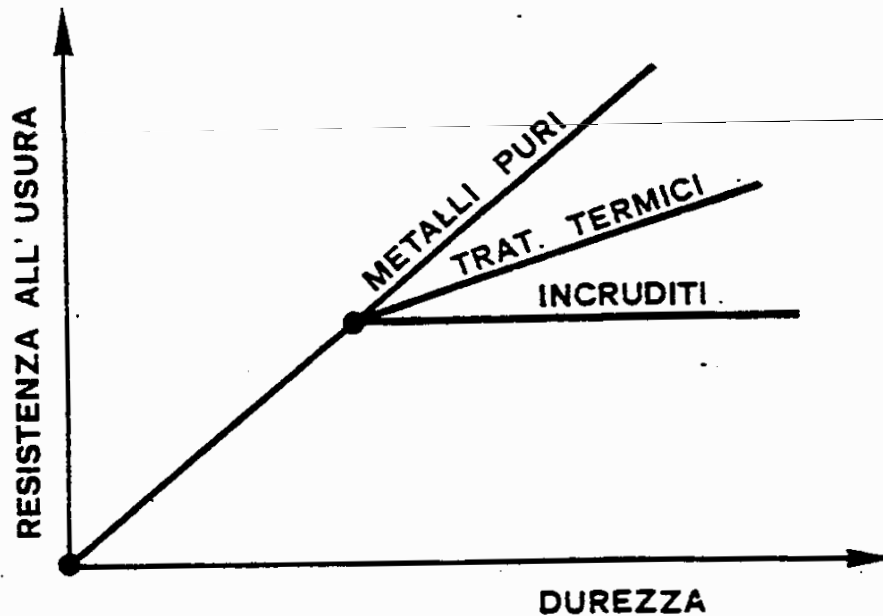
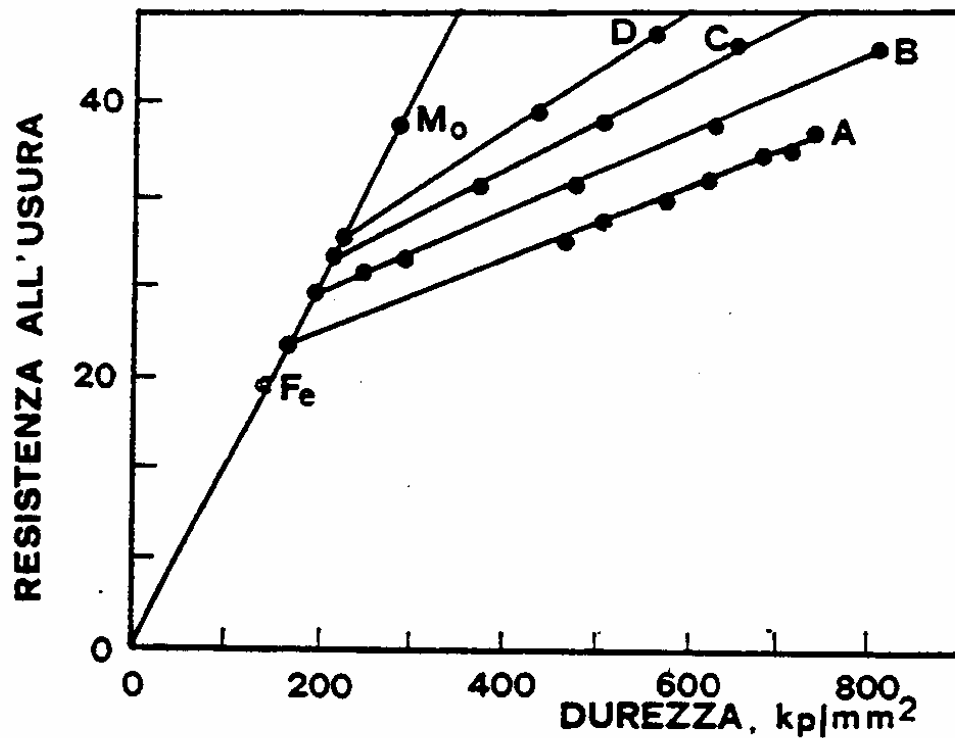


Fig. 3.16.a Resistenza all'usura abrasiva in funzione della durezza dei materiali



A = 0,41% carbonio
 B = 0,83% "
 C = 1,10% "
 D = 2,35% C + 11,9% Cr

Fig. 3.16.b Effetto della durezza del metallo sulla resistenza all'usura abrasiva

Tab. 3.4 Trattamenti idonei a migliorare la resistenza ad usura abrasiva

TECNICHE	APPLICABILE A	EFFETTI
Elettrodeposizione Cromo-Nichel.	Molti materiali ferrosi e non.	Sottile strato superficiale duro e levigato.
Ossidazione anodica.	Alluminio, Megnesio e Zinco.	Strato di ossido sottile e duro.
Carburazione e Carbonitrurazione.	Acciai a basso tenore di Carbonio.	Superfici dure.
Materiali di riporto duro me- diante saldatura a gas o ad arco.	Metalli ferrosi e non.	Leghe leggere o strato di carburo.
Pezzo fuso in conchiglia.	Ghise grigie ed alcuni acciai.	Superficie di ghisa bianca.
Indurimento alla fiamma.	Ferro e acciaio.	Superficie più dura localmente.

Determinazione della velocità d'usura abrasiva

Una relazione quantitativa per l'usura abrasiva, valida quando la superficie a maggiore durezza si rinnova continuamente o si ravviva, è stata proposta da Khrushchov il quale ha utilizzato come modello, un cono di materiale a contatto e in moto relativo con la superficie di materiale tenero. Con riferimento alla fig. 3.17. se per effetto della forza di chiusura N il cono penetra nella superficie tenera di una quantità h , essendo l'area, nella direzione normale alla retta di applicazione del carico, rappresentata da un cerchio di raggio r , si può ritenere valida la relazione

$$p_f = N/(\pi r^2) \quad (3.4)$$

essendo, come al solito, p_f la pressione di flusso del materiale più tenero. Nel moto relativo, se il cono striscia di una quantità s , il volume di materiale rimosso è un prisma a sezione triangolare ed altezza s e vale, pertanto:

$$V = r \cdot h \cdot s = r^2 \cdot s \cdot \cotg\theta \quad (3.5)$$

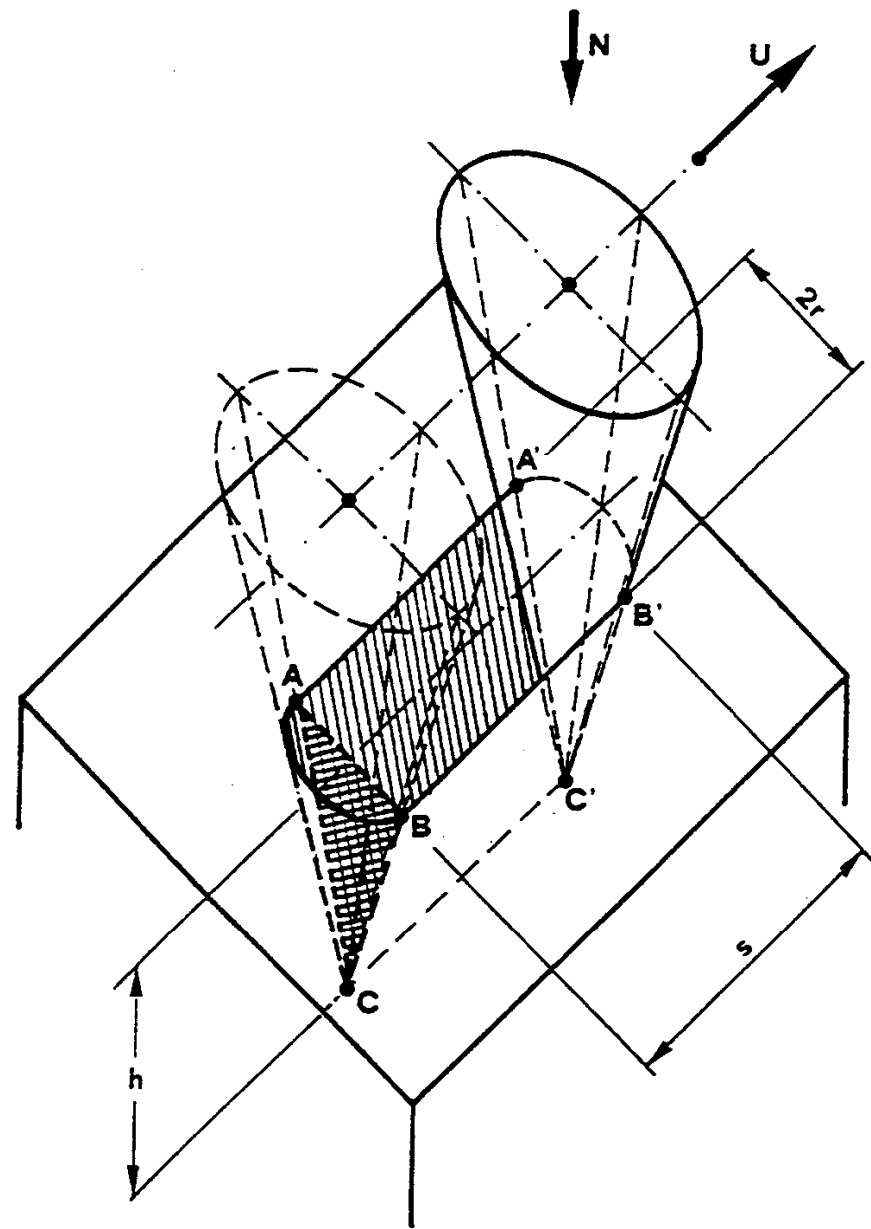


Fig. 3.17. Schematizzazione per la determinazione della velocità d'usura abrasiva

avendo indicato con θ la semiapertura del cono (l'angolo della rugosità effettiva può variare tra 10^{-1} e 10^{-2}).

La 3.5, stante la 3.4 si può scrivere:

$$V = (N/\pi p_f)s \cotg\theta = k*(N/p_f)s = H N s \quad (3.6)$$

Valori del parametro di usura H, in alcune condizioni, sono raccolti nella tabella 3.5.

Tab. 3.5 Valori di H per alcuni materiali in diverse condizioni di funzionamento

MATERIALE ABRASIVO	TIPO DI USURA	$10^3 H$
ACCIAIO	2 CORPI	80
OTTONE	2 CORPI	16
ACCIAIO (grani $150 \mu\text{m}$)	3 CORPI	6
ACCIAIO (grani $80 \mu\text{m}$)	3 CORPI	4,5

Quando, invece, una stessa parte della superficie abrasiva è permanentemente impegnata nel contatto, le asperità vengono rapidamente livellate perchè il materiale meno duro, specialmente se esibisce un marcato comportamento plastico, si trasferisce (fig. 3.18.) sulla superficie più dura riempiendo le valli tra le asperità.

Il meccanismo d'usura subisce, perciò, da un certo istante, una radicale trasformazione procedendo, l'usura stessa, per adesione (fig. 3.19.).

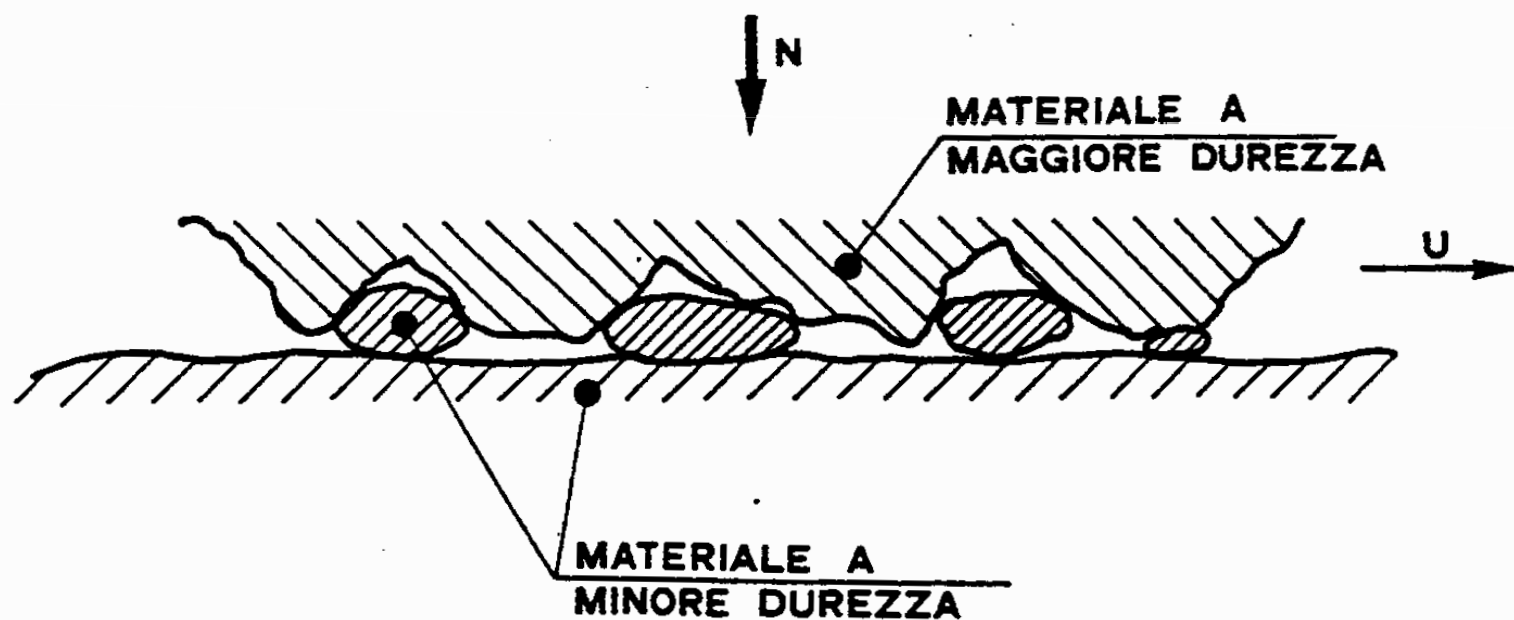


Fig. 3.18. Usura abrasiva tra corpi continuamente impegnati nel contatto.

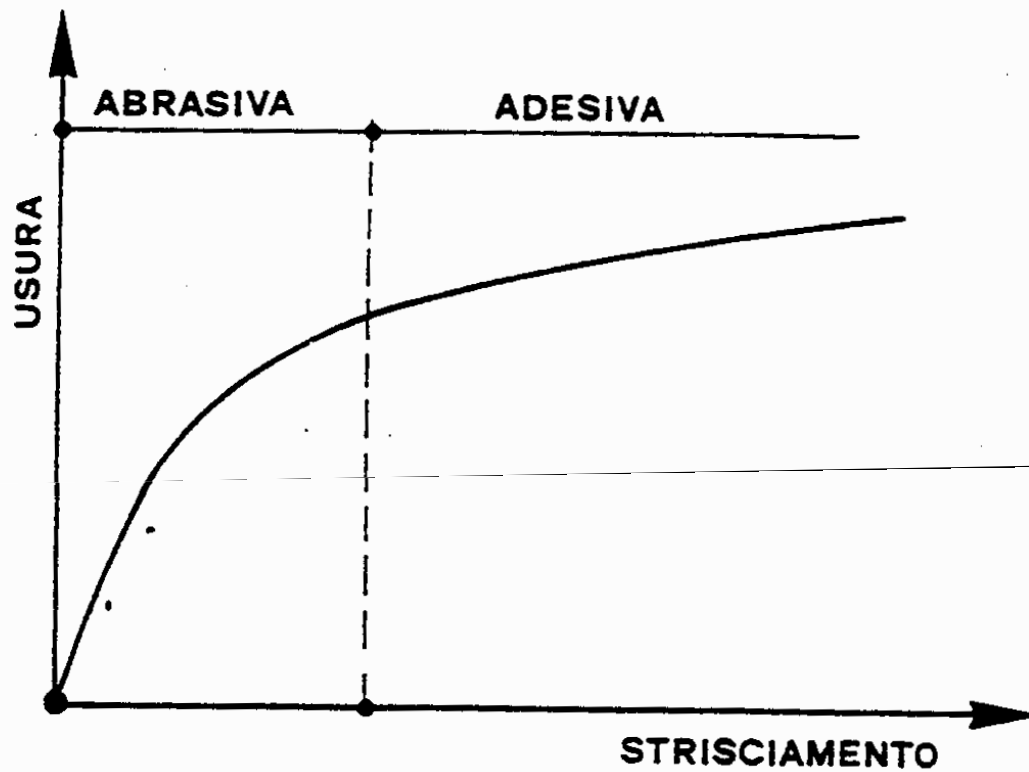


Fig. 3.19. Andamento dell'usura nell'ipotesi di corpi continuamente impegnati nel contatto.

Usura per fatica superficiale

L'usura per fatica superficiale è un meccanismo tipico dei sistemi a contatto localizzato caratterizzato da condizioni di rotolamento-strisciamento e carichi variabili o alternati (cuscinetti volventi, ruote dentate, cammes ecc.).

In tali circostanze le superfici degli organi accoppiati sono soggette a notevoli sollecitazioni cicliche che tendono a produrre microlesioni superficiali e/o subsuperficiali.

Dopo un elevato numero di cicli di carico, tali fratture tendono a propagarsi secondo il meccanismo descritto in fig. 3.20., dando luogo al distacco di frammenti liberi (detrito d'usura).

Questo meccanismo è esaltato dall'eventuale presenza di lubrificante (nei cinematismi anzi citati è generalmente presente) che riempiendo le microlesioni (fig. 3.21.) viene messo sotto pressione per effetto del contatto nei successivi passaggi del corpo volvente, per cui all'interno della lesione stessa viene ad instaurarsi una pressione variabile che tende a farla progredire.

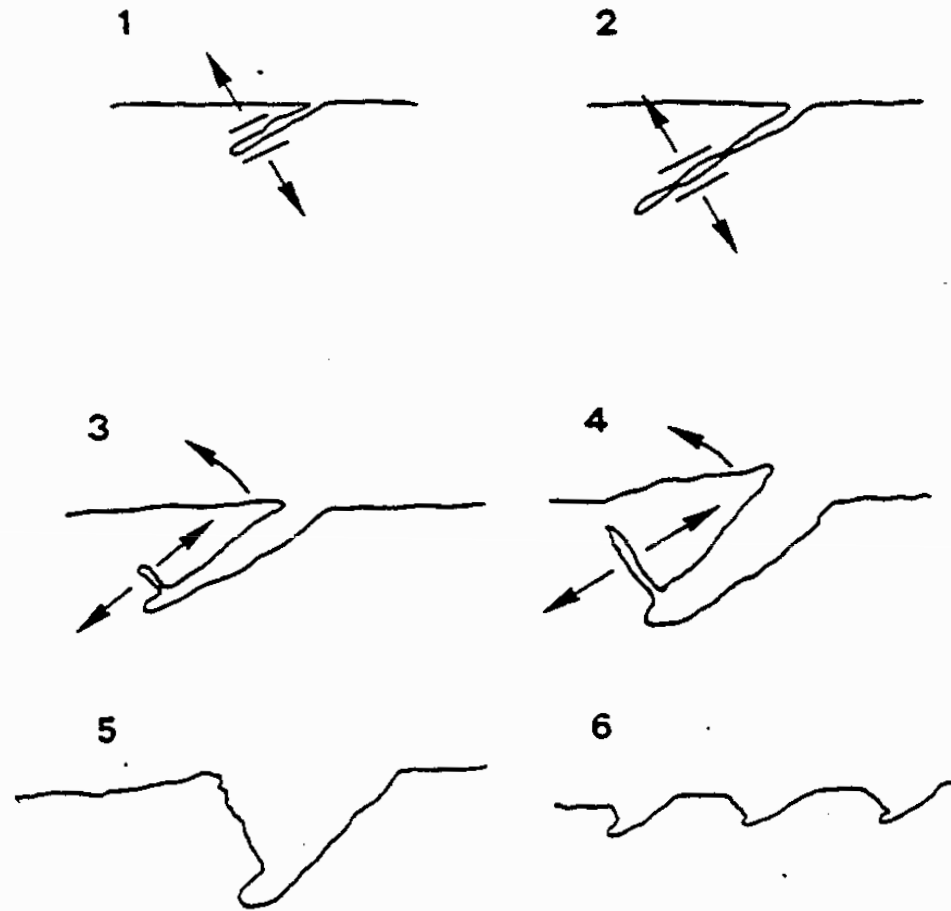


Fig. 3.20. Meccanismo d'usura per fatica superficiale

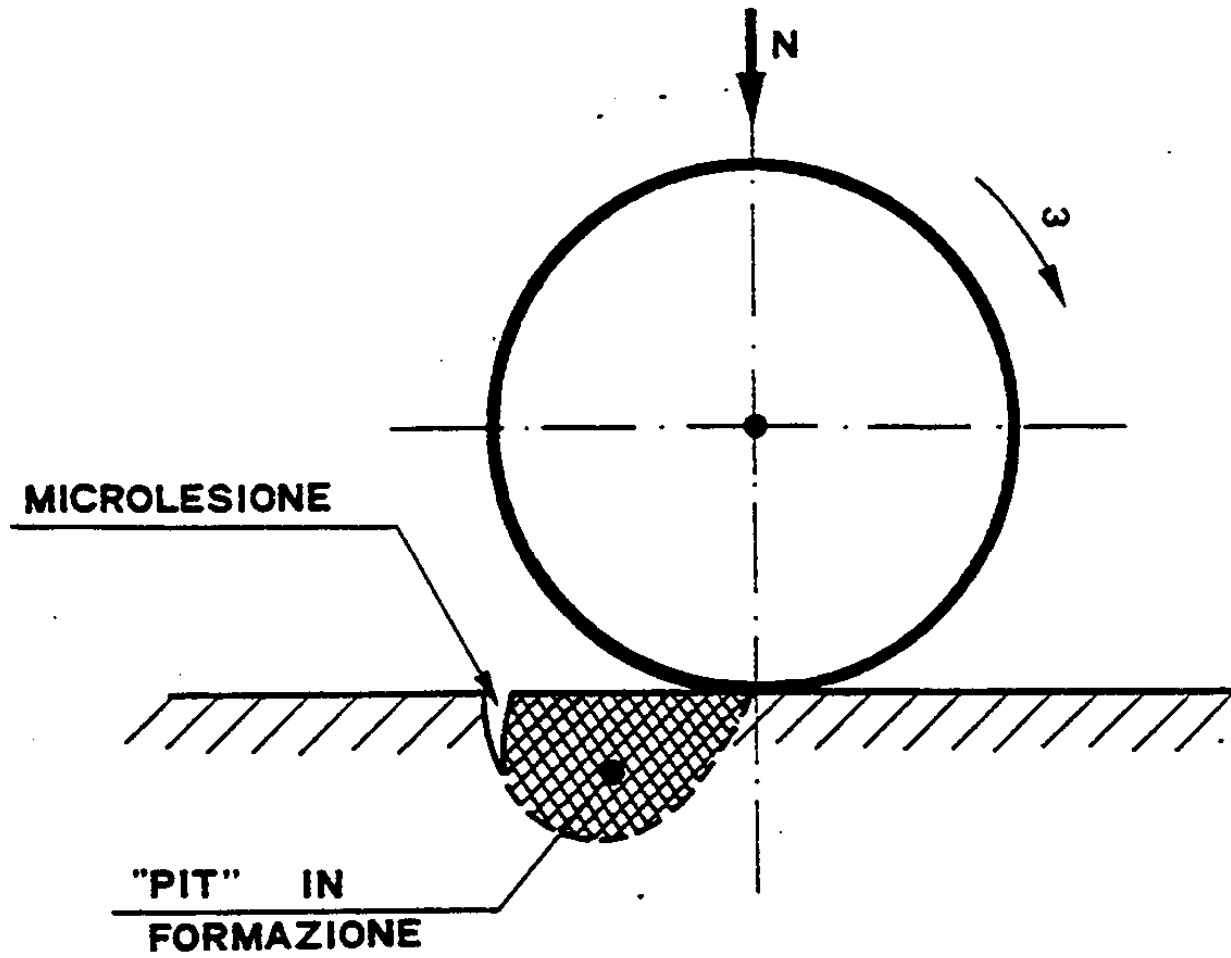


Fig. 3.21. Schema di formazione di "pits"

La presenza di fatti adesivi contribuisce all'asportazione di una porzione finita di materiale dando luogo ad un danno irreversibile che può anche compromettere definitivamente la funzionalità della coppia cinematica.

L'entità dei danni ed il tempo necessario affinché questi si manifestino, sono legati allo stato di sollecitazione della superficie e, quindi, alla forza di chiusura e alla forma degli organi accoppiati.

Per aversi fatica superficiale, la massima tensione hertziana deve essere tale da produrre lesioni da fatica, ma non tanto elevata da provocare, come detto in un paragrafo precedente, un flusso plastico di materiale (Brinelling).

I fenomeni di fatica superficiale, come detto in precedenza, sono tipici dei cuscinetti volventi e dei denti delle ruote dentate pur manifestandosi nei primi in maniera diversa che nei secondi.

Nei cuscinetti volventi il danneggiamento si presenta sotto forma di alveolatura (*pitting*) nel suo livello meno grave, laddove si manifesta sotto di sfaldatura (*flaking*) quando l'affaticamento del metallo raggiunge lo stadio di distacco di particelle sotto forma di scaglie (fig. 3.22.).

L'inizio del fenomeno di sfaldatura coincide con il termine della vita utile del cuscinetto.

Nelle ruote dentate, in cui i raggi di curvatura sono più grandi e gli strisciami più forti, l'usura per fatica superficiale si sviluppa sotto forma di scagliatura (*spalling*) e si manifesta, in genere, prevalentemente al di sotto



Fig. 3.22. Usura da fatica nei cuscinetti volventi (Flaking)

della primitiva verso la base del dente ove si osserva una vera e propria butteratura delle superfici (fig. 3.23.).

Nel meccanismo di usura per fatica superficiale la morfologia delle particelle asportate è influenzata dal rapporto rotolamento-strisciamento ed è costituita in genere da detriti sferici e scaglie (fig. 3.24.) di dimensioni variabili con il livello d'usura.

All'aumentare dell'aliquota di rotolamento predominano (fig. 3.25.) le particelle sferiche.

La fatica superficiale si combatte impiegando materiali ad elevato limite di fatica ed elevata durezza evitando materiali aventi superfici fragili.

Per tale motivo sono sconsigliati trattamenti termici superficiali.

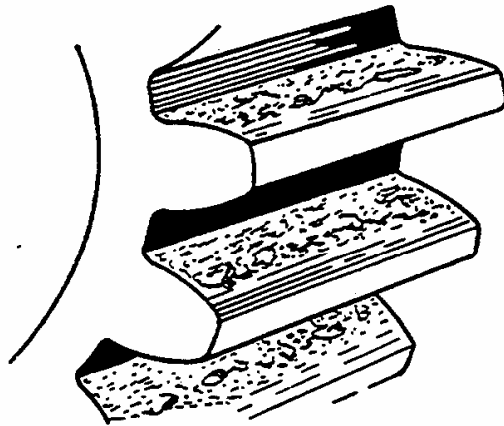


Fig. 3.23. Spalling

Teoria della laminazione

La teoria della delaminazione, proposta da Suh nel 1973, è applicabile quando i corpi a contatto si muovono con modeste velocità relative e l'incremento di temperatura all'interfaccia è basso.

Tale teoria viene a sintetizzare i meccanismi di usura adesiva, di usura abrasiva e quello per fatica superficiale, a valle di una serie di studi e risultati sulla meccanica della frattura.

Quando due corpi in moto relativo di strisciamento vengono a contatto, si trasmettono mutue sollecitazioni normali e tangenziali con azione adesiva e abrasiva.

Nella zona di contatto si determina la deformazione e la frattura delle asperità delle superficie tenera che attinge, pertanto, una minore rugosità.

Il contatto non avviene più tra le asperità delle superfici reali, ma tra le asperità delle superfici più dure con la superficie meno dura che risulta, come detto, spianata.

L'azione esercitata dalle asperità dure, in tali circostanze, induce una deformazione plastica tangenziale nel metallo tenero a causa dell'originarsi di dislocazioni che si muovono in uno strato sub-superficiale se non vengono spinte al di fuori della superficie stessa.

Tali dislocazioni si accumulano col perdurare del moto, formando dei vuoti dai quali vengono nucleate delle incrinature sotto la superficie; queste, per effetto dei carichi ciclici, si estendono e si propagano fino ad unirsi con quelle immediatamente vicine, finchè non raggiungono la superficie con relativa delaminazione del materiale.

Lo spessore dei frammenti di usura, che si presentano sotto forma di scaglie, dipende dalla posizione delle incrinature sub-superficiali che, naturalmente, è influenzata dalle proprietà del materiale, dal coefficiente di attrito, dai carichi normale e tangenziale e, più in generale, dalle condizioni ambientali. Da quando detto si comprende che la teoria della delaminazione, pur non essendo in contrasto con la teoria dell'adesione (vedi usura adesiva) che, unitamente a quella descritta per l'usura abrasiva è valida nel periodo iniziale dello strisciamento (fase di rodaggio), rappresenta un significativo passo in avanti per la comprensione di meccanismi d'usura.

Infatti l'usura non viene più a dipendere dal solo carico normale ma anche da quello tangenziale: l'adesione aumenta la trazione superficiale che, incrementando la deformazione plastica, è causa della formazione e propagazione delle incrinature sub-superficiali.

In conclusione del paragrafo si ritiene opportuno far notare che il modello della delaminazione stabilisce una relazione analitica tra il volume V di materiale asportato, il carico di chiusura N e lo strisciamento s , vale a dire

$$V = k N s \quad (3.7)$$

ove k è il parametro di usura.

Si osservi che la (3.7) risulta simile alle (3.1) e alla (3.6) essendo, però diverso il valore delle costanti v_s , H e k che vanno comunque derivate sperimentalmente.

Fretting

Il fretting è il meccanismo d'usura che si sviluppa quando le superfici a contatto fra loro sono dotate di moti oscillatori tangenziali di piccola ampiezza ($2 \div 100 \mu\text{m}$) intorno alla loro posizione normale.

Il danno superficiale che si produce è tipico dell'usura meccanica prodotta dallo strisciamento di una superficie sull'altra ed è influenzata dall'azione chimica derivante dalla reazione eventuale, di una o entrambi le superfici, con l'ambiente circostante e/o dall'ossidazione del detrito prodotto inizialmente.

In molti casi il fenomeno inizia in forma di usura adesiva con conseguente adattamento delle superfici e con formazione di detrito di usura che, rimanendo intrappolato fra le superfici stesse, si ossida abradendo i due materiali a contatto.

In altri casi, spesso definiti come "fretting corrosion", il fenomeno inizia con la formazione di ossido superficiale (dovuto all'azione chimica dell'ambiente sulle superfici a contatto) che viene localmente asportato con formazione di buttature o, se il fenomeno si potrae, con formazione di crateri (pits) dai quali possono partire delle cricche di fatica.

Secondo studi più recenti, il meccanismo del fretting si manifesta inizialmente mediante formazione di microsaldature a freddo associate ad asportazione di materiale per effetto delle vibrazioni, cui segue un riporto di materiale "smearing" con accomodamento delle superfici e quindi definitiva rimozione di materiale mediante un processo di delaminazione.

Il fenomeno del fretting si verifica soprattutto negli accoppiamenti forzati caratterizzati da assemblaggio mozzo su albero, e negli accoppiamenti dentati o scanalati; nelle giunture statiche, chiodate o bullonate sottoposte a vibrazioni (aeronautiche, ferroviarie ecc.); nei trefoli delle funi metalliche; in apparecchiature chimiche (ad es. in alcuni scambiatori di calore a fasci lamellari in cui le vibrazioni sono provocate dal movimento dei fluidi e dall'azione pulsante delle pompe); nei contatti elettrici, che subiscono una conseguente alterazione della resistenza di contatto (le vibrazioni sono, generalmente, indotte dal funzionamento di contatti vicini); in alcune protesi metalliche impiegate nel corpo umano in campo ortopedico.

I danni derivanti da tale meccanismo di usura, con riferimento ad applicazioni meccaniche, si possono sintetizzare sostanzialmente in una diminuzione della resistenza a fatica ed una uscita dei limiti di tolleranza.

Di questi il primo è maggiormente sentito in tutti quei casi in cui le super-

fici a contatto sono progettate per non subire movimenti relativi (collegamenti forzati o rivettati, flange bullonate, chiavette ecc.); il secondo, invece, è maggiormente sentito negli organi in cui il movimento relativo è consentito.

Le particelle di usura assumono spesso una forma tondeggiante (fig. 3.26.) e, talvolta, restano intrappolate tra le superfici, comportandosi come microcorpi volventi mitigando l'attrito e il fenomeno di usura.

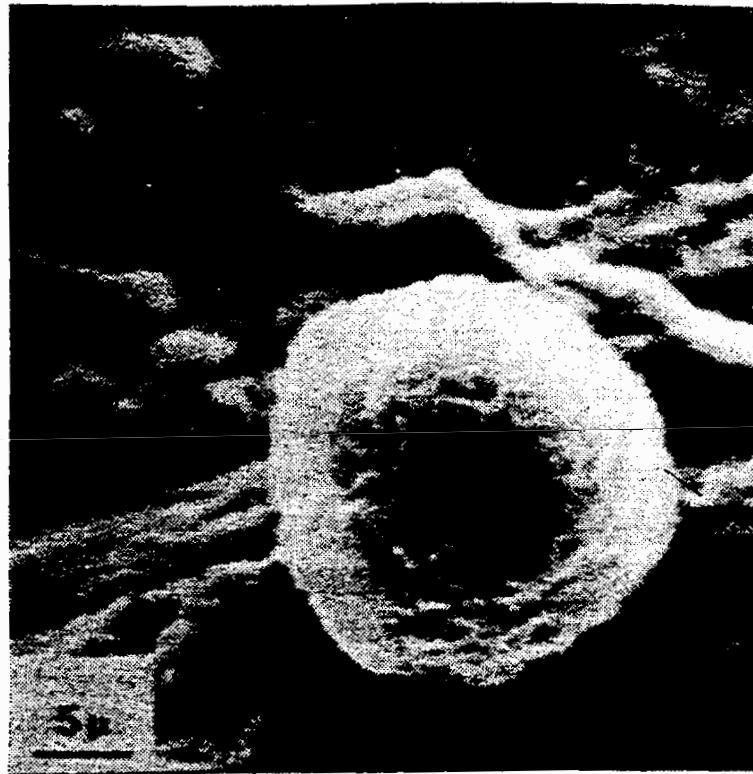


Fig. 3.26. Particelle sferiche prodotte dal Fretting

Principali fattori che influenzano il fretting

Nel definire i fattori che influenzano il fretting, bisognerebbe riguardare il fenomeno sotto i diversi aspetti che investono la fisica delle superfici, il comportamento della superficie sottoposta ad un complesso sistema di sollecitazioni oscillanti, il comportamento del materiale riguardo alle sue proprietà elastiche e plastiche ed infine l'effetto dell'ambiente sui materiali stessi.

Volendo limitare l'attenzione verso un approccio prevalentemente ingegneristico si possono definire i seguenti principali fattori:

a — Numero di cicli: il volume di materiale asportato è proporzionale (fig. 3.27.) al numero di cicli, ossevandosi una rimozione molto rapida all'inizio e successivamente una diminuizione nel tempo.

La prima fase, caratterizzata da elevato coefficiente di attrito, è dovuta al contatto metallo-metallo con formazione e rottura di microsaldature a freddo e formazione di particelle d'usura, o alla rimozione del film di ossido se presente sulle superfici a contatto.

Successivamente la portata d'usura si mantiene stazionaria (curva B) o tende ulteriormente a diminuire (curva D), come osservato impiegando acciai dolci. Alcuni materiali caratterizzati da bassa durezza ma da ossidi ad elevata durezza, come l'alluminio, mostrano un brusco incremento del materiale asportato (curva A e C) a causa del contributo dovuto alla abrasione delle particelle dure dell'ossido.

b – Ampiezza del moto: alle ampiezze tipiche del fretting la portata specifica di usura aumenta linearmente con l'ampiezza del moto con pendenze, però, molto modeste (fig. 3.28.). Solo a valori maggiori di 70-100 μm , che difficilmente si riscontrano nella pratica, la pendenza aumenta notevolmente.

c – Carico normale: a parità di numero di cicli e ampiezza costante, il danno superficiale aumenta linearmente con il carico applicato, almeno per superfici piane in acciaio.

In alcuni casi l'aumento del carico è accompagnato da una riduzione dell'ampiezza del moto per cui, ad un iniziale aumento della portata d'usura, fa seguito una diminuzione della stessa.

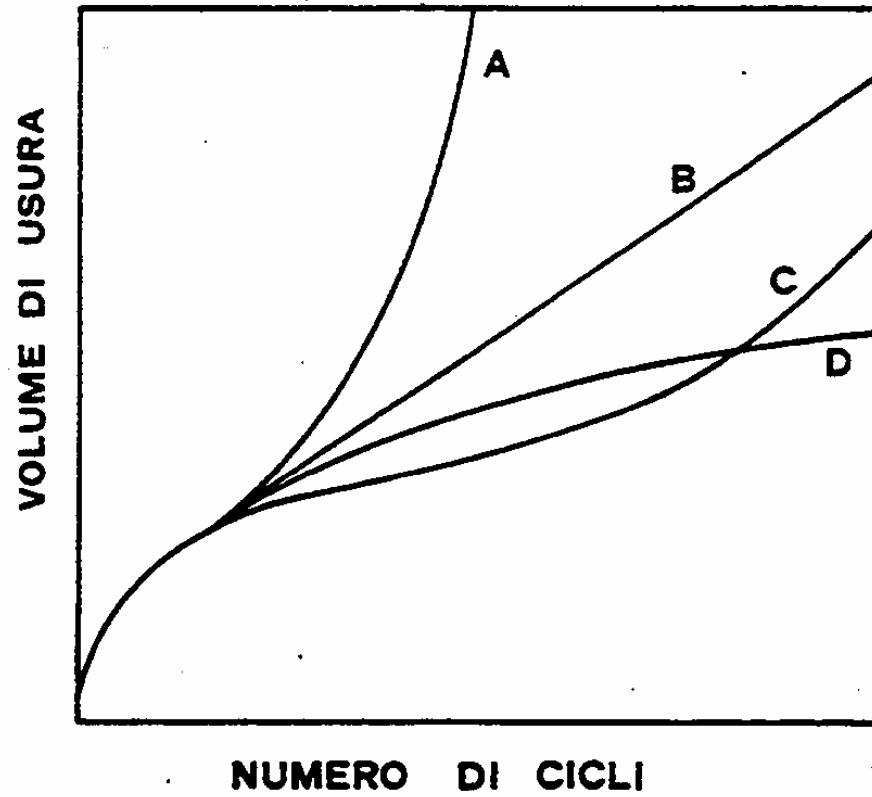


Fig. 3.27. Andamento dell'usura specifica dovuta al fretting, in funzione del numero di cicli

d – Frequenza. Per un dato numero di cicli il danno superficiale è più grande alle basse frequenze che a quelle più alte (fig. 3.29.) in quanto, essendo il meccanismo influenzato dal processo di ossidazione dei materiali e perciò dipendente dal tempo, le basse frequenze comportano un tempo maggiore per il processo chimico di ossidazione.

e – Finitura superficiale: si è osservato che generalmente un più alto grado di finitura superficiale è negativa per la resistenza al fretting nei confronti di superfici rugose, nella quali vi è possibilità di “scarico” della particelle d'usura che vengono, così, meno coatte tra le superfici.

A temperatura elevata l'effetto della rugosità sul fenomeno è negativo in quanto, probabilmente, il film di ossido risulta più aderente sulle superfici molto levigate che non su quelle rugose.

f – durezza: è conveniente ricorrere a superfici di durezza simile onde evitare iniziale usura abrasiva soprattutto in presenza di una certa rugosità.

Durezze più alte implicano più alti carichi di rottura e più alti limiti di fati-

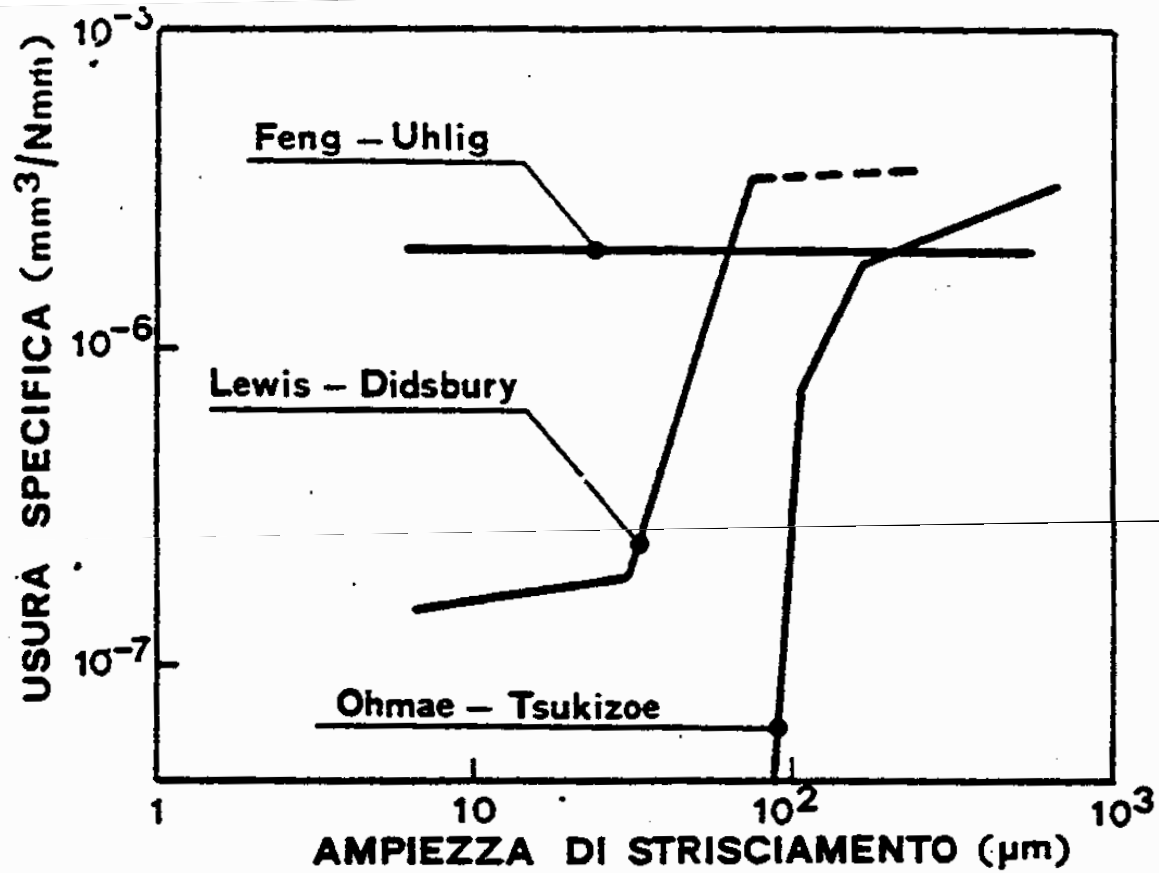


Fig. 3.28. Andamento dell'usura specifica dovuta al fretting in funzione dell'ampiezza di strisciamento (alcuni risultati sperimentali)

ca per cui dovrebbero portare una diminuzione del danno superficiale.

L'esperienza ha però mostrato che trattamenti superficiali quali la nitrurazione, la cementazione o la pallinatura hanno modesto peso sulla resistenza al fretting risultando, praticamente, ininfluenti sulla resistenza alla corrosione.

Alcuni sperimentatori hanno proposto alcune formule per quantizzare l'usura tenendo conto dei fattori anzì citati.

Per coppie di organi di acciaio può essere validamente utilizzata la seguente formula

$$V = [c/h(k_0 \sqrt{p_m} - k_1 p_m)] + k_2 p_m a c \quad (3.8)$$

in cui p_m è la pressione media di contatto, c il numero di oscillazioni, h ed a rispettivamente la frequenza e l'ampiezza dell'oscillazione.

Inoltre V è l'usura in volume di materiale asportato in mm^3 e k_0 , k_1 e k_2 tre costanti che, impiegando unità di misura del S.I., valgono:

$$k_0 = 7.77 \cdot 10^{-9} \quad k_1 = 2.79 \cdot 10^{-13} \quad k_2 = 3.02 \cdot 10^{-9}$$

E' bene notare che nella (3.8) il primo termine del secondo membro esprime il materiale asportato per abrasione, mentre il secondo quello per adesione ($a \cdot c$ rappresenta lo strisciamento).

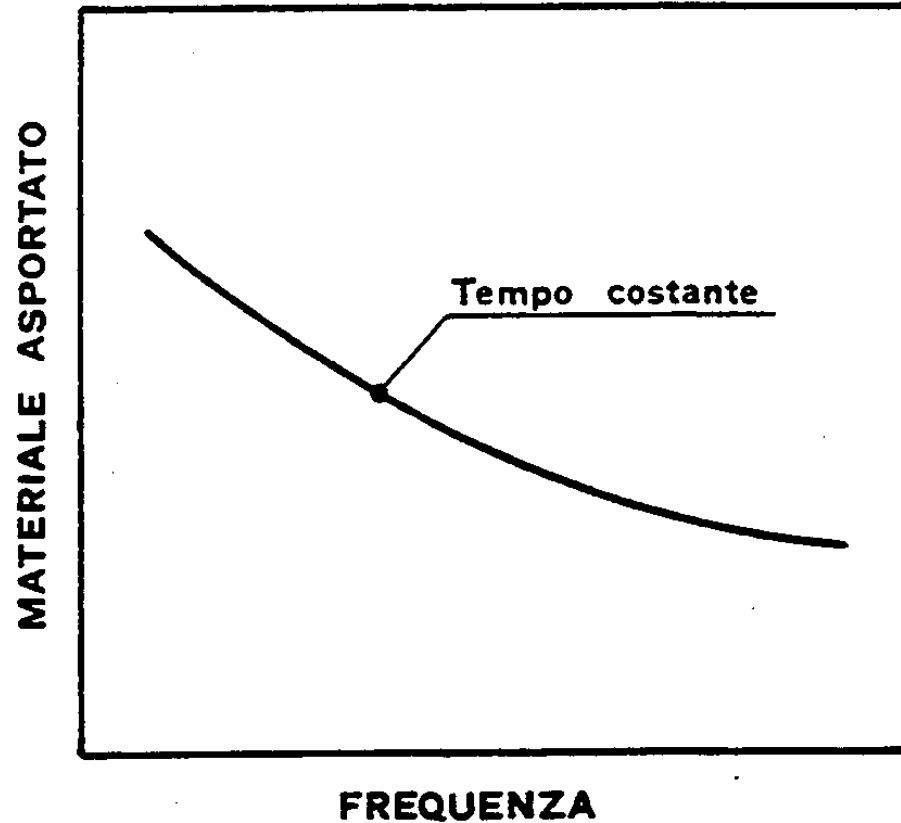


Fig. 3.29. Accumulo di particelle di usura in funzione della frequenza

Prevenzione del fretting

Nelle sue linee generali il fretting può essere prevenuto o contenuto agendo sul disegno degli organi a contatto, intervenendo opportunamente sui materiali da accoppiare e/o interponendo tra le superfici un lubrificante.

a – Disegno degli organi accoppiati: si può prevenire il moto relativo modificando il disegno in maniera da sostituire, se possibile (spesso non lo è!) quegli elementi in cui si può innescare fretting, con elementi ad es. saldati.

b – Trattamento dei materiali: se il movimento non può essere prevenuto si possono trattare le superfici a contatto in maniera tale da impedire le microsaldature a freddo o la delaminazione.

A tale fine si può fare ricorso a rivestimenti ottenuti mediante elettrodeposizione di metalli; rivestimenti non metallici ottenuti mediante fosfatazione, cromatazione, sulfinizzazione o meccanicamente applicati come i polimeri o il bisolfuro di molibdeno; rivestimenti per diffusione o impiantazione di alcuni elementi (C, N e Cr).

c – Impiego di lubrificanti: è difficoltoso l'impiego di lubrificanti convenzionali liquidi a causa delle modeste velocità relative accompagnate, spesso, da elevati carichi.

Se possibile gli organi soggetti a fretting dovrebbero essere completamente immersi in olio che ostacolerebbe, tra l'altro, l'ossidazione superficiale. Tale via è difficilmente realizzabile, anche per i relativi problemi di tenute, per cui si fa utilmente ricorso ai grassi o ai lubrificanti solidi.

Usura erosiva

L'usura erosiva viene prodotta dall'impatto di minute particelle abrasive, sospese in una corrente fluida che investe una superficie metallica o non, con una certa velocità.

E' opportuno notare che l'erosione prodotta da particelle solide è diversa da quella prodotta dall'impatto di goccioline d'acqua su un solido, essendo differenti i parametri che entrano in gioco nei due fenomeni.

In generale per quantizzare l'entità dell'usura prodotta per erosione si fa riferimento alla perdita specifica di massa ϵ , vale a dire alla massa di materiale rimosso per unità di massa delle particelle di impatto.

L'erosione si sviluppa comunemente, quando le particelle solide hanno dimensione media compresa nel campo $20 \div 200 \mu\text{m}$ (in alcuni casi si arriva fino a $1.000 \mu\text{m}$) velocità di impatto compresa tra $250 \div 500 \text{ m/s}$.

Tale processo d'usura si manifesta ad es. sulle pale degli elicotteri, sulle eliche per propulsione navale ad aerea, nelle palettature delle turbine a gas, nei trasporti pneumatici di materiale mediante tubazioni ecc.

Il meccanismo di erosione, nel caso di materiali duttili, è caratterizzato dalla rimozione di schegge per effetto delle particelle taglienti, con una azione simile ad un processo di taglio.

dimensione media compresa nel campo $20 \div 200 \mu\text{m}$ (in alcuni casi si arriva fino a $1.000 \mu\text{m}$) velocità di impatto compresa tra $250 \div 500 \text{ m/s}$.

Tale processo d'usura si manifesta ad es. sulle pale degli elicotteri, sulle eliche per propulsione navale ad aerea, nelle palettature delle turbine a gas, nei trasporti pneumatici di materiale mediante tubazioni ecc.

Il meccanismo di erosione, nel caso di materiali duttili, è caratterizzato dalla rimozione di schegge per effetto delle particelle taglienti, con una azione simile ad un processo di taglio.

Nei materiali fragili, invece, ogni impatto produce una cricca che tende a propagarsi per effetto dei successivi urti, fino ad indurre la rimozione di materiale.

Quando il flusso è radente per cui le particelle colpiscono la superficie bersaglio con angoli di impatto tendenti a zero si ha usura erosivo-abrasiva; quando il flusso è normale si ha usura erosiva da impatto.

In tutti gli altri casi si ha una combinazione dei due precedenti meccanismi.

Principali fattori che influenzano l'usura erosiva

L'entità dell'usura è in relazione, oltre che alle caratteristiche della superficie investita, ad una serie di parametri alcuni dei quali interessano le proprietà delle particelle erosive (durezza e dimensione media), altri interessano la meccanica con cui la corrente fluida investe la superficie (velocità, angolo di impatto, concentrazione delle particelle, temperature ecc.).

a – Durezza: in generale un incremento di durezza comporta una maggiore erosività secondo una legge del tipo:

$$\epsilon = K \cdot H^{2.3} \quad (3.9)$$

in cui H esprime la microdurezza Vickers e K una costante influenzata dalle dimensioni medie delle particelle e dell'angolo di impatto.

Per aversi usura erosiva non è sempre necessario che la durezza delle particelle sia maggiore di quelle della superficie bersaglio.

b – Dimensioni delle particelle: l'erosione risulta incrementata all'aumentare delle dimensioni delle particelle trasportate dalla corrente fluida, fino ad un certo livello di saturazione oltre il quale l'usura si mantiene praticamente costante (fig. 3.30.).

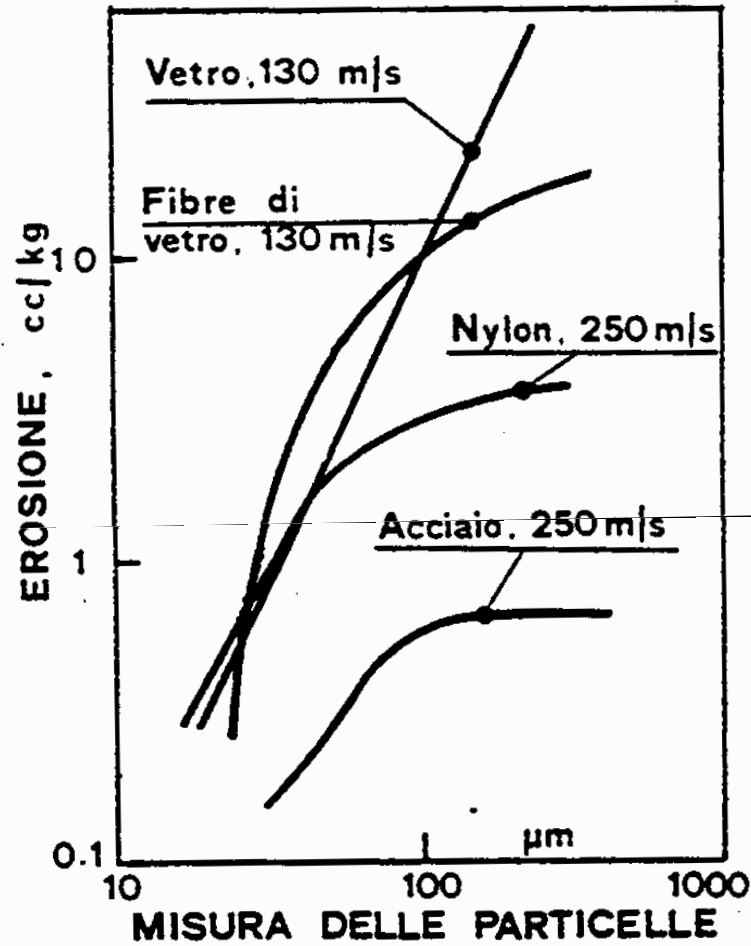


Fig. 3.30. Effetto della misura delle particelle sull'erosione di alcuni materiali.

c — Velocità: risultati sperimentali hanno suggerito che l'usura erosiva può essere correlata con la velocità di impatto da una relazione del tipo:

$$\epsilon = K' \cdot v^n \quad (3.10)$$

in cui n assume valori compresi nel campo $2 \div 2.5$ e K' è una costante. Alcune tipiche curve per differenti materiali sono riportate in fig. 3.31.

d — Angolo di impatto: è definito come l'inclinazione tra la superficie del bersaglio e la traiettoria delle particelle, ed influenza la velocità d'usura in maniera diversa a secondo che trattasi di materiali fragili duttili o gomme (fig. 3.32.).

Infatti i materiali duttili esibiscono il massimo danneggiamento superficiale quando l'angolo di impatto è di $20 \div 30^\circ$ mentre i materiali fragili risultano fortemente danneggiati per angoli di impatto prossimi a 90° .

Per i materiali gommosi (caso degli scivoli per materiali come sabbie o ghiaie) conviene realizzare l'angolo di impatto più grande possibile.

Risultati sperimentali relativi ad alcuni materiali caratteristici, sono ripor-

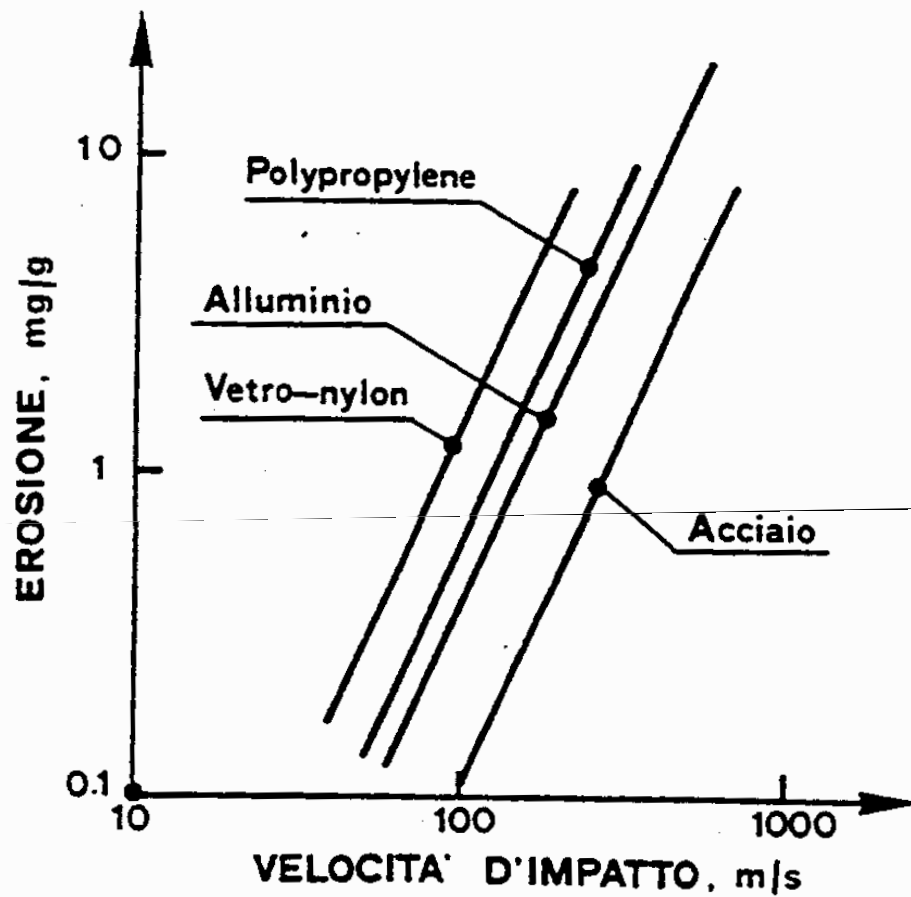


Fig. 3.31. Effetto della velocità sull'erosione

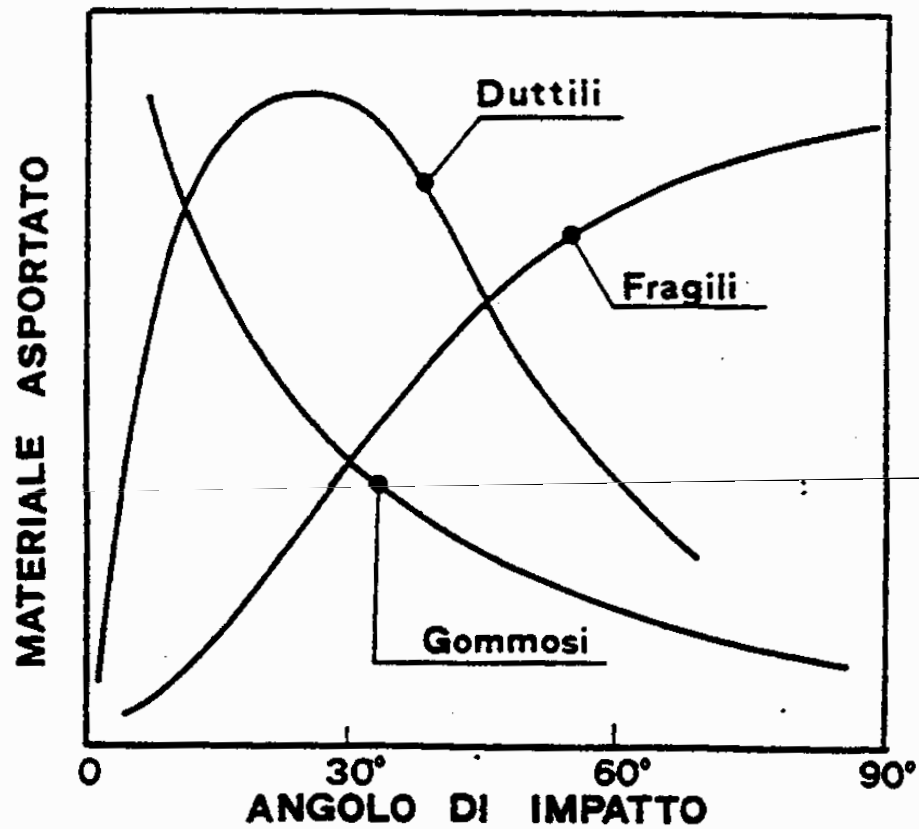


Fig. 3.32. Effetto dell'angolo di impatto sull'usura

tati in fig. 3.33.

Per concludere si ritiene opportuno mettere in evidenza che un incremento della concentrazione delle particelle comporta una riduzione del tasso di usura erosiva che, invece, si incrementa all'aumentare della temperatura.

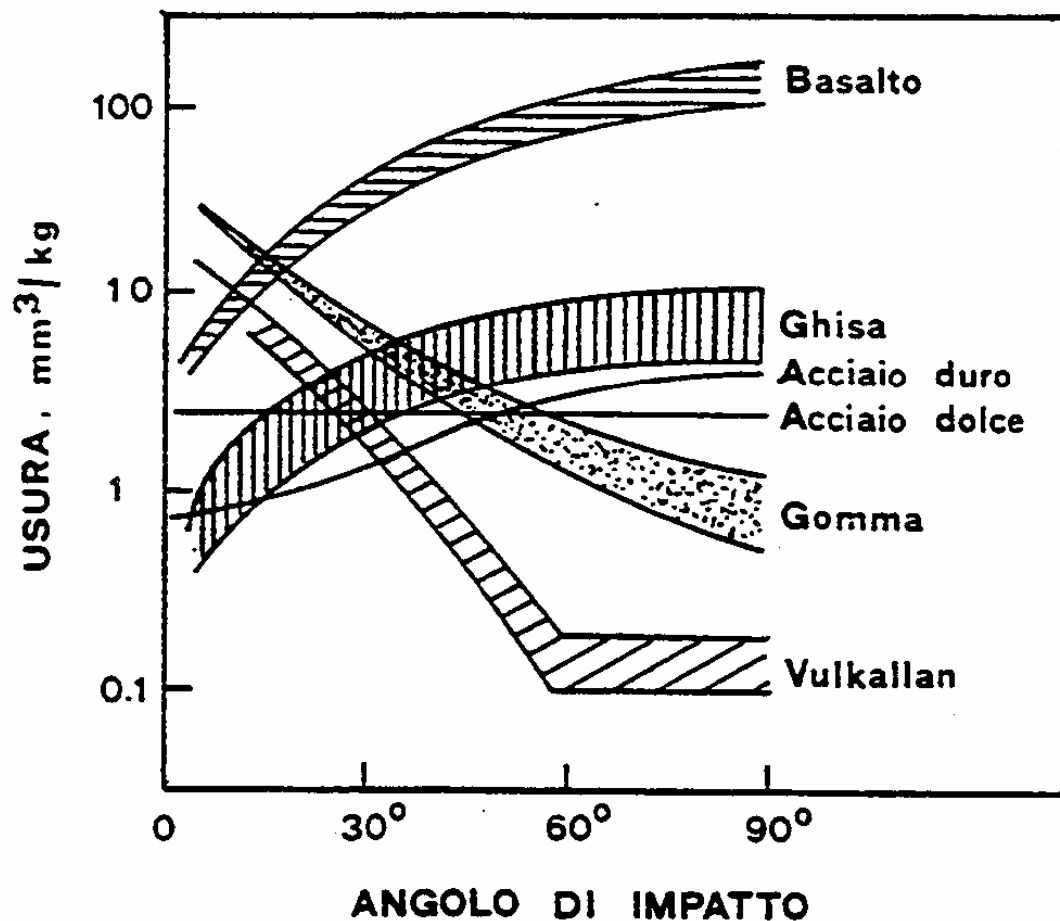


Fig. 3.33. Resistenza all'usura erosiva per alcuni materiali

Usura per cavitazione

Può essere considerata come una complessa forma di usura erosiva che si verifica quando su una superficie soggetta a pressione variabile passa un liquido in cui sia disciolto del gas.

Quando la corrente fluida lambisce una zona a pressione minore, parte del gas o vapore in essa disciolto passa in fase gassosa per effetto della diminuita solubilità.

La vena fluida si distacca dalla parete o forma bolle per la cui stazionarietà deve esservi equilibrio tra la pressione ambiente, pressione del gas e tensione superficiale del liquido.

Quando la bolla passa su punti a pressione più alta implode scomparendo, determinando sollecitazioni impulsive sulla parete solida lambita dalla corrente, finendo con l'intaccare la superficie determinandovi una alveolatura del tipo di quella che si ha con la fatica superficiale (vedi usura per fatica superficiale).

Il collasso delle bolle provoca aumenti di temperatura con possibili fusioni localizzate, effetti termochimici, dissociazione del liquido e diminuzione della resistenza del materiale dovuta all'infragilimento superficiale per diffusione di idrogeno.