

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”
DIPARTIMENTO INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE**



**DOTTORATO DI RICERCA IN
SISTEMI E TECNOLOGIE DI PRODUZIONE**

XXI CICLO

TESI DI DOTTORATO

**ANALISI SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO AD USURA DI
MATERIALI COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA**

COORDINATORE

Ch.mo Prof. Ing. Giuseppe Giorleo

DOTTORANDO

Ing. Alessandro De Maio

TUTOR

Ch.mo Prof. Ing. Antonio Langella

ANNO ACCADEMICO 2007/2008

INDICE DEGLI ARGOMENTI

RINGRAZIAMENTI.....	1
PRESENTAZIONE DEL PROGETTO.....	2
CAPITOLO I – USURA ed ATTRITO	4
1.1 ASPETTI FISICI ED ANALITICI DEI MECCANISMI DI USURA.....	4
1.1.1 Introduzione.....	4
1.1.2 Conseguenze dell'usura.....	6
1.1.3 Teorie d'usura.....	7
1.1.4 Contatto meccanico.....	9
1.1.5 Classificazione dei meccanismi di usura.....	11
1.1.5.1 Usura adesiva.....	13
1.1.5.2 Usura abrasiva.....	18
1.1.5.3 Usura per fatica.....	23
1.1.5.4 Fretting.....	24
1.2 I FENOMENI di ATTRITO	24
1.2.1 Introduzione.....	24
1.2.2 Attrito secco.....	25
1.2.3 Attrito radente.....	26
1.2.4 Attrito volvente.....	27
1.2.5 Meccanismo di attrito metallico: ruolo della combinazione di tensioni e della contaminazione superficiale.....	28
1.2.6 Scorrimento macroscopico.....	33
1.2.7 Equazione di base della crescita della giunzione.....	34
1.2.8 Condizioni per lo strisciamento macroscopico.....	35
1.2.9 Osservazioni conclusive.	38
CAPITOLO II – L'USURA DEI COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA.....	41
2.1 I MATERIALI COMPOSITI.....	41
2.1.1 Introduzione.....	41
2.1.2 Fibre.....	42
2.1.2.1 Fibre di vetro.....	43
2.1.2.2 Fibre di carbonio.....	44
2.1.2.3 Fibre organiche.....	45
2.1.2.4 Formati commerciali.....	46
2.1.3 Matrici.....	47

2.1.3.1	Matrici plastiche.....	48
2.1.3.2	Resine poliestere.....	49
2.1.3.3	Resine epossidiche.....	49
2.1.3.4	Resine fenoliche.....	50
2.1.3.5	Resine siliconiche.....	50
2.1.3.6	Matrici metalliche.....	51
2.1.3.7	Matrici ceramiche.....	51
2.1.4	Compositi particellari.....	52
2.1.5	Tecnologie di fabbricazione di compositi a matrice termoplastica.....	52
2.1.5.1	Formatura per contatto a mano.....	54
2.1.5.2	Formatura per contatto a spruzzo.....	55
2.1.5.3	Centrifugal Casting.....	55
2.1.5.4	Formatura con sacco sotto vuoto.....	56
2.1.6	Laminati.....	57
2.2	USURA DEI MATERIALI COMPOSITI.....	59
2.2.1	Introduzione.....	59
2.2.2	Parametri caratteristici nella valutazione dell'usura abrasiva.....	61
2.2.3	Precedenti studi bibliografici relativi all'usura di compositi particellari.....	89
2.2.4	Confronti nel comportamento all'usura dei diversi materiali compositi.....	94
2.2.4.1	<i>L'usura contro superfici di acciaio lisce.....</i>	94
2.2.4.2	<i>L'usura abrasiva.....</i>	98
CAPITOLO III – MATERIALI E METODI DI PROVA.....		101
3.1	INTRODUZIONE.....	101
3.2	MATERIALE TESTATO.....	102
3.2.1	I materiali caricati.....	102
3.2.2	Le contropaccie abrasive e le prove di rugosità.....	107
3.3	LE PROVE DI USURA ABRASIVA.....	109
3.3.1	Introduzione.....	109
3.3.2	La macchina di prova.....	109
3.3.3	Le specifiche della prova.....	113
CAPITOLO IV – LE PROVE SPERIMENTALI.....		114
4.1	INTRODUZIONE.....	114
4.2	PROVE SU PROVINI A TESTA SEMISFERICA.....	114
4.3	PROVE SU PROVINI A TESTA PIATTA.....	120
4.4	FORMULAZIONE ANALITICA.....	125

4.5	DISCUSSIONE dei RISULTATI.....	127
CAPITOLO V – IL CASO OGGETTO DI STUDIO.....		131
5.1	INTRODUZIONE.....	131
5.1.1	La Kerr Italia S.p.A.	131
5.1.2	Obiettivi della ricerca.....	131
5.2	LE PROVE DI SCORRIMENTO.....	132
5.2.1	Le prove a secco.....	133
5.2.2	Le prove “in umido”	139
ANALISI DEI MATERIALI UTILIZZATI DURANTE LA LAVORAZIONE DELLE RESINE		
5.3	CARICATE.....	147
5.3.1	Introduzione.....	147
5.3.2	Valutazione delle proprietà meccaniche di teflon® caricati.....	148
5.3.3	Scorrimento.....	
5.3.4	Release.....	164
5.3.5	Microdurezza.....	166
5.3.6	Esame dei risultati.....	167
CONCLUSIONI.....		169
BIBLIOGRAFIA.....		171

RINGRAZIAMENTI

Mi sembra doveroso, alla fine di un percorso durato tre anni, ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine e che mi hanno permesso di giungere a questo traguardo.

Questi tre anni passati all'interno del D.I.M.P. mi hanno permesso di stringere rapporti con Professori, Ricercatori e colleghi che si sono succeduti nel tempo. Sarebbe ingiusto ringraziare qualcuno in particolare perché con TUTTI ho instaurato rapporti di amicizia, stima e fiducia.

Per questo motivo mi limiterò a fare un ringraziamento particolare solo al Prof. Antonio Langella, al Prof. Ignazio Crivelli Visconti ed al Prof. Massimo Durante (già relatore nel precedente lavoro di tesi di laurea). Tutto quello che ho imparato lo devo a loro, si sono mostrati sempre disponibili e comprensivi e mi hanno aiutato a risolvere dubbi teorici e pratici nati nel tempo. Ringrazio, inoltre, l'intero Dipartimento per avermi offerto la possibilità di usufruire delle attrezzature del Laboratorio. In ultimo non posso non ringraziare la mia famiglia e la famiglia di Flavia che mi hanno sempre sostenuto nei momenti difficili e che hanno gioito con me per i risultati raggiunti.

PRESENTAZIONE DEL PROGETTO

Oggetto della ricerca è lo studio del comportamento ad usura di materiali compositi, valutando la possibilità di incrementare la resistenza della matrice polimerica mediante l'utilizzo di polveri di materiale duro come il Carburo di Silicio oppure sfere di vetro.

Attualmente sta diventando sempre più marcata la sostituzione dei materiali metallici con i materiali compositi a matrice polimerica, soprattutto in campi a forte valenza tecnologica. Nei settori aeronautico ed aerospaziale è stato sempre profuso un grosso impegno sia economico che umano, verso la scoperta di nuovi materiali che consentissero il raggiungimento del miglior compromesso tra resistenza, peso e costo delle strutture degli aeromobili visto che i materiali metallici, come le leghe di alluminio e titanio, seppur recentemente scoperti, non avevano pienamente soddisfatto i ricercatori. E proprio lo studio di nuove soluzioni al fine di realizzare prestazioni altrimenti inavvicinabili sia in termini assoluti, sia in termini di risparmio energetico a parità di condizioni d'impiego, ha condotto alla scoperta dei materiali compositi che traggono il nome dalla loro plurifasicità. In essi, infatti, si trova la coesistenza di due o più fasi:

- l'elemento o gli elementi di rinforzo, ovvero fibre di varia origine (vetro, carbonio, boro, fibra aramidica);
- la matrice di resina (poliestere, vinilica, epossidica, fenolica).

Le fibre risultano inglobate nella matrice di resina che non ha compiti di resistenza meccanica, ma garantisce la coesione tra le fibre di uno stesso strato e tra strati adiacenti.

La caratteristica che ha reso competitivi agli occhi dei costruttori i compositi è la loro buona resistenza specifica:

utilizzare un materiale con elevata resistenza specifica significa costruire un particolare che a parità di peso resiste molto di più, oppure che, a parità di resistenza, presenta un peso inferiore. Significa quindi unire leggerezza e resistenza.

Esistono però dei limiti alla loro diffusione su vasta scala ed uno di questi è legato alle non soddisfacenti proprietà superficiali come ad esempio la resistenza all'usura e all'attrito. Tale limite non consente ai compositi di essere

utilizzati in accoppiamenti tribologici; d'altra parte le proprietà superficiali non possono essere migliorate con lavorazioni particolari dopo la fase di formatura e polimerizzazione, questo perché le tecnologie di rivestimento sono tutte post-produzione nel senso che vengono applicate al laminato una volta che esso è ottenuto e la maggior parte di esse può essere effettuata ad alte temperature, dannose per la matrice polimerica. Ciò comporta che, essendo il composito un buon isolante termico, il film (coat) di materiale cui danno vita tali lavorazioni è caratterizzato da una cattiva adesione al substrato del composito ed i risultati che si hanno più o meno positivi non giustificano i notevoli tempi di lavorazione ed i costi per raggiungerli. [1]

In questo lavoro di ricerca, si vuole valutare la possibilità di migliorare il comportamento ad usura dei compositi a partire da sperimentazioni eseguite sulla sola matrice che è stata caricata a tale scopo con polveri di materiale duro e metallico, per continuare con sperimentazioni eseguite su laminati nei quali le lamine esterne a contatto con l'ambiente fossero formate adoperando una matrice allo stesso modo caricata. Tutto ciò alla luce del fatto che un materiale composito con gradiente funzionale delle proprietà determinato dalla distribuzione della carica nella matrice, evita i problemi inerenti le tecnologie di rivestimento e rende la resistenza ad usura una proprietà intrinseca della lamina.

Il primo anno di ricerca è stato orientato all'acquisizione di tutto il materiale reperibile in letteratura al fine di definire lo "stato dell'arte" e quindi analizzare il lavoro finora svolto evidenziandone problematiche ancora aperte e possibili vie di sviluppo.

Durante il secondo anno di ricerca, partendo dalle informazioni reperite in bibliografia, sono stati condotti una serie di prove sperimentali di usura abrasiva, utilizzando provini di matrice epossidica caricata con polveri di Carburo di Silicio (SiC); i risultati ottenuti sono stati analizzati ed utilizzati per la formulazione di un modello previsionale dell'usura di siffatti provini, note le condizioni cinematiche e le caratteristiche degli elementi in contatto.

Il terzo anno di ricerca, infine, è stato orientato allo studio di una reale applicazione del rinforzo particellare di una matrice utilizzata prevalentemente in campo odontoiatrico, per la ricostruzione dell'apparato dentale.

CAPITOLO I – USURA ed ATTRITO dei MATERIALI

1.1 ASPETTI FISICI ED ANALITICI DEI MECCANISMI DI USURA

1.1.1 Introduzione

Nell'ingegneria vengono ampiamente usati metalli e leghe ed in modo particolare è molto diffuso l'utilizzo degli acciai.

La maggior parte dei metalli che vengono impiegati presenta una forte affinità con diverse specie chimiche come ossigeno, acqua, zolfo, anidride carbonica, ecc.; essi perciò, se non sono adeguatamente impiegati o protetti, possono venire attaccati in maniera molto violenta.

L'effetto corrosivo che si ottiene a causa dell'azione di questi elementi può inoltre essere reso ancora più dannoso dalla sinergia con fenomeni meccanici, infatti questo è ciò che avviene anche quando si ha a che fare con parti meccaniche in frizione, e quindi con attrito, in presenza di un ambiente aggressivo per il materiale di cui tali pezzi sono costituiti.

L'usura [2] è la maggior causa della riduzione e della perdita delle performance delle macchine, quindi ogni diminuzione di tale fenomeno risulta considerabilmente vantaggiosa.

Lo sfregamento è la causa principale dell'usura, ma anche della dissipazione di energia (per attrito), perciò migliorandone il controllo si ottiene un grosso vantaggio. È stato infatti stimato che un terzo delle risorse energetiche mondiali è necessario per sconfiggere l'attrito tra corpi in una forma o in un'altra.

La lubrificazione è uno dei metodi utilizzati per controllare l'usura e per ridurre l'attrito.

La scienza che studia come risolvere questi problemi di grande interesse economico è la **TRIBOLOGIA** (dal vocabolo greco *tribos* che significa strofinare o scorrere).

Risulta quindi chiaro che, nella nostra economia, è molto importante l'interazione tra superfici in moto relativo, in quanto ogni componente in movimento implica usura. Analizzando i guasti nelle macchine si scopre come, nella maggior parte dei casi, la rottura e l'arresto siano associati a interazioni tra

parti in movimento quali ingranaggi, cuscinetti, giunti, camme, frizioni, sigillanti, ecc..

Anche il corpo umano contiene superfici interagenti in moto relativo, basti pensare a tutte le articolazioni presenti .

Un osservazione generale, derivata da innumerevoli esperimenti, è che nello studio dell'usura occorre valutare:

- le caratteristiche dei film che si hanno tra i corpi in contatto,
- le conseguenze del "fallimento" del film (che in genere è usualmente riscontrabile con attrito ed usura severa) oppure l'assenza di un film. La formazione di una pellicola tra ogni coppia di oggetti, che scorrono l'uno sull'altro, è un fenomeno naturale e la si ottiene anche senza l'intervento umano. Questo meccanismo è fondamentale per prevenire l'azione degli elevati carichi di taglio agenti all'interfaccia tra due corpi rigidi in movimento relativo.

La tribologia ha in parole semplici il fine pratico della minimizzazione dei due svantaggi dati dal contatto tra solidi: attrito e usura. In realtà ciò non è sempre vero, infatti come illustrato nella fig. 1.1 di seguito riportato, ci sono casi in cui è desiderabile massimizzare l'uno, l'altro o entrambi questi effetti.

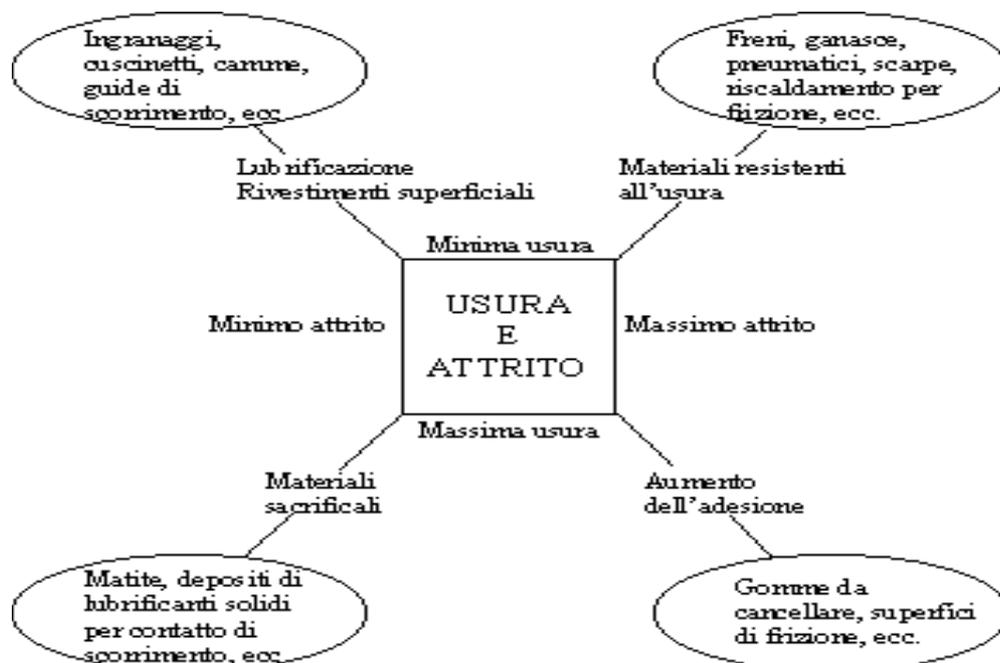


Figura 1.1 - Schema illustrativo di usura ed attrito

In molte situazioni pratiche il film superficiale è formato da attacco chimico su altri rivestimenti e anche se questo può portare a una certa lubrificazione, una significativa usura è inevitabile. Il moto relativo tra le superfici dei corpi a contatto, che causano l'usura, può manifestarsi in modo macroscopico, come in molti elementi di macchina, oppure in altri casi può essere costituito da microscopiche vibrazioni (sfregamento o fretting).

In generale due organi di macchine tra loro accoppiati costituiscono 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. Tale sistema è caratterizzato dallo stato di sollecitazione, dal campo di temperature nella zona di contatto, dalla rugosità superficiale, dalla natura dei materiali a contatto e dal lubrificante interposto, nonché dallo stato superficiale derivante da interazioni dell'ambiente con le superfici. Sebbene l'usura si manifesti sulla superficie che costituisce la sede naturale dei corrispondenti fenomeni d'attrito, le due cose, attrito ed usura, non sono correlabili in modo semplice. Esistono casi in cui un basso attrito non necessariamente significa una bassa usura e viceversa come pure per talune combinazioni di materiali, è possibile raggiungere situazioni in cui con il passare del tempo, il tasso d'usura (volume di materiale rimosso / area apparente di contatto per unità di distanza di scorrimento) aumenta e l'attrito diminuisce.

1.1.2 Conseguenze dell'usura

Spesso [3] l'usura è considerata come una naturale conseguenza dell'uso, ciò però non consente di poter migliorare la situazione in quanto per alcune applicazioni questo giudizio può essere corretto mentre per altre può comportare costose penalità.

Si possono avere diverse conseguenze dell'usura:

- costi dovuti ad usura;
- utilizzazione dei materiali. In quanto l'usura contribuisce a ridurre la vita utile soprattutto nel caso in cui quest'ultimi non siano recuperabili attraverso opportune operazioni;
- guasti causati dall'usura. In quanto essa non è solo un modo di guasto ma a sua volta ne causa di ulteriori poiché le parti usurate comportano

un' incremento delle vibrazioni, della fatica, dei carichi impulsivi nonché possibili disallineamenti.

In base a quanto detto risulta che durante le fasi di progettazione ed esercizio dei componenti meccanici, si è alle prese con un numero elevato di problemi relativi all'usura i quali si verificano in diversi momenti del ciclo di vita di un prodotto. In particolare questi riguardano:

- comprensione degli effetti del lubrificante. Il lubrificante assolve a diverse funzioni nella progettazione: riduzione dell'attrito, raffreddamento, separazione della superficie mediante generazione di un film fluido e riduzione dell'usura. La scelta del lubrificante avviene considerando non solo le sopracitate funzioni da soddisfare ma anche definendo le condizioni operative quali temperatura, ambiente ecc.;
- prevedere la vita utile del componente;
- determinazione delle conseguenze dell'usura di un componente.

A questo proposito è molto importante, per il progettista, conoscere la quantità di cui un componente può usurarsi prima di essere sostituito.

D'altra parte l'usura tollerabile da un componente dipenderà molto anche dal tipo di applicazione a cui sarà sottoposto. C'è quindi necessità di stimare queste informazioni per ogni componente ed inoltre stabilire come questi limiti possano essere alterati dai cambiamenti realizzati in fase di progettazione;

- determinare la qualità dei prodotti acquistati;
- previsione del fabbisogno delle parti di ricambio.

1.1.3 Teoria d'usura

Tutte le superfici dei componenti industriali presentano una rugosità; in termini tribologici questa è una prima importante caratteristica, infatti ciò vuol dire che quando esse sono premute insieme si toccano in corrispondenza di piccole parti dell'area apparente di contatto [3]. Si può quindi affermare che la meccanica del contatto è usualmente rappresentata da protuberanze superficiali (dette comunemente asperità) considerate come parti di sfere.

Quindi per lo studio della meccanica del contatto si fa generalmente riferimento a dei corpi sferici.

Una seconda importante caratteristica di queste superfici è che esse presentano sempre delle contaminazioni, infatti superfici perfettamente pulite possono essere ottenute solo mediante tecniche speciali, in cui si realizza un vuoto molto spinto.

D'altra parte, affinché sulla superficie sia presente un film contaminante, è necessario che un opportuno strato di molecole sia assorbito dall'atmosfera in modo da incrementare lo spessore di ossido che si va a formare ed inoltre altri film superficiali sono formati da reazioni chimiche che avvengono tra le superfici e l'ambiente.

L'esistenza di questi film di contaminanti è di importanza cruciale in tribologia, infatti anche nel caso di sfregamento non lubrificato essi riducono considerevolmente l'usura ed il danno che si verificherebbero se il contatto avvenisse tra superfici perfettamente pulite.

Da quanto detto risulta che un evento significativo in tribologia è il contatto tra due asperità di opposte superfici ed il loro contributo, durante questo, a sopportare il carico agente su di esse. Un ulteriore risultato che si ottiene in corrispondenza di queste superfici è che nel contatto o in conseguenza ad esso, il materiale è rimosso. Tale rimozione può avvenire in diversi modi secondo dei meccanismi che hanno probabilità di variare in un intervallo molto ampio, dando origine al fenomeno dell'usura.

Si è visto che la lubrificazione è il metodo più comune per evitare o ridurre l'usura, segue allora che i lubrificanti più utilizzati quotidianamente sono i film di ossido presenti sulle superfici metalliche ed anche quelli superficiali naturali che diventano così il primo vero agente di riduzione dell'usura.

Un altro metodo ideale di protezione è la completa separazione delle superfici mediante un film fluido (liquido oppure gas).

Il film fluido può essere prodotto in due modi principali. In un primo modo (fig. 1.2 (a)) il fluido può esser iniettato tra le superfici tramite una pompa: questa è la lubrificazione idrostatica; in un secondo modo, (figg. 1.2 (b) e (c)), qualora il fluido sia presente tra le superfici, poichè il movimento relativo delle superfici può generare una pressione tra esse, la quale può sopportare il carico applicato ed in questo caso si parla lubrificazione idrodinamica.

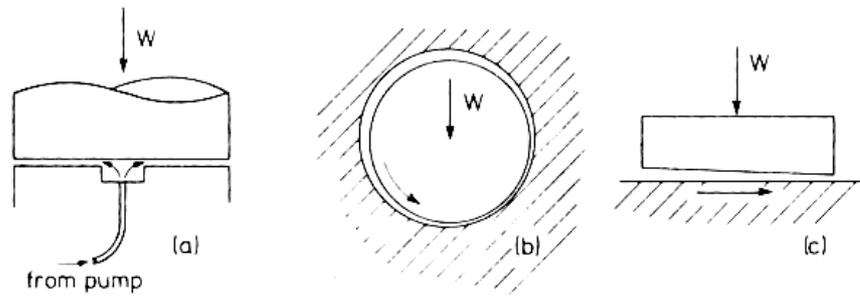


Figura 1.2, (a) lubrificazione idrostatica, (b) e (c) lubrificazione idrodinamica.

1.1.4 Contatto meccanico

Quando una sfera è pressata contro un'altra sfera oppure contro una superficie piatta sotto un leggero carico W , le deformazioni sono interamente elastiche e diverse cose accadono [3]. Inizialmente i due corpi a contatto si muovono insieme sotto il carico applicato, in seguito le superfici dei due corpi in prossimità del contatto saranno deformate così da toccarsi in corrispondenza di una definita regione o area che, nel caso del contatto fra sfere, sarà un cerchio (fig. 1.3).

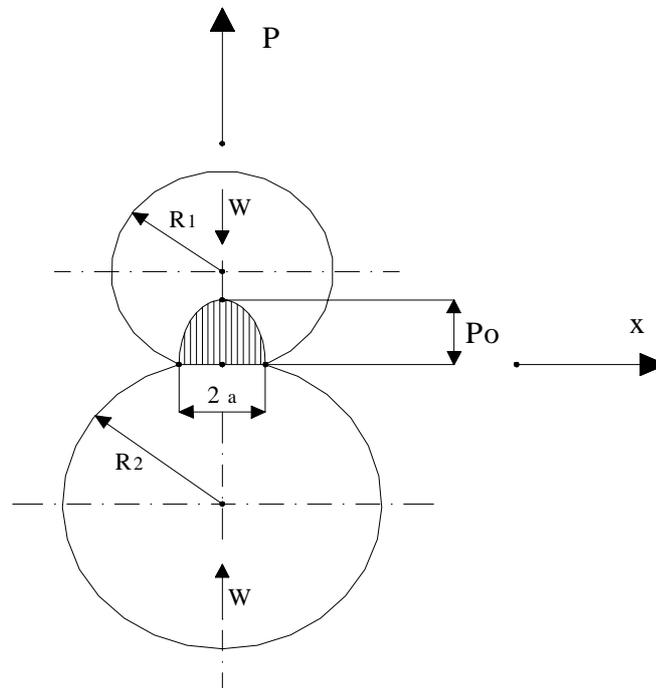


Figura 1.3 - Contatto fra sfere.

L'espressione che descrive questo contatto elastico è dovuta ad Hertz. Indicato con a il raggio dell'area circolare di contatto,

$$a = \left[\frac{3}{2} W \frac{R}{E} \right]^{1/3}$$

si ricava la seguente espressione della pressione di contatto ad una distanza $r < a$:

$$p = p_o \left[1 - \frac{r^2}{a^2} \right]^{1/2}$$

con $p_o = 3/2 p_m$ dove p_o è la pressione massima di contatto e p_m la pressione media di contatto.

Si noti come nelle precedenti espressioni compaiano R ed E i cui valori sono dati dalle seguenti formule:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad e$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

con E_1 ed E_2 moduli di Young dei due corpi ed R_1 ed R_2 i corrispondenti raggi di curvatura.

Si consideri ora la condizione all'altro estremo, cioè il caso in cui il contatto avvenga sotto un carico elevato. Se si assume che un corpo sia più duro dell'altro allora la sfera più dura deformerà plasticamente la superficie opposta lasciando un'impronta permanente. In questo caso il raggio della regione circolare di contatto sarà ricavato dalla seguente relazione:

$$W = \pi a^2 H$$

$$p_m = \frac{W}{\pi a^2} = H$$

con H dove H è la durezza della più tenera delle superfici a contatto.

Noto il comportamento dei due corpi in contatto ai due estremi sarà possibile ricavare il comportamento corrispondente ad un regime elasto-plastico ed anche il valore W del carico applicato che lo genera.

1.1.5 Classificazione dei meccanismi d'usura

Si consideri una situazione che si verifica comunemente nella pratica (fig. 1.4) cioè usura non lubrificata. La figura mostra in modo semplice l'andamento del tasso di usura (volume usurato per unità di distanza di strisciamento) durante il contatto di un pin d'acciaio su di un disco dello stesso materiale [3]. Il diagramma si presenta in scala doppio logaritmica riportando il tasso d'usura in funzione del carico applicato.

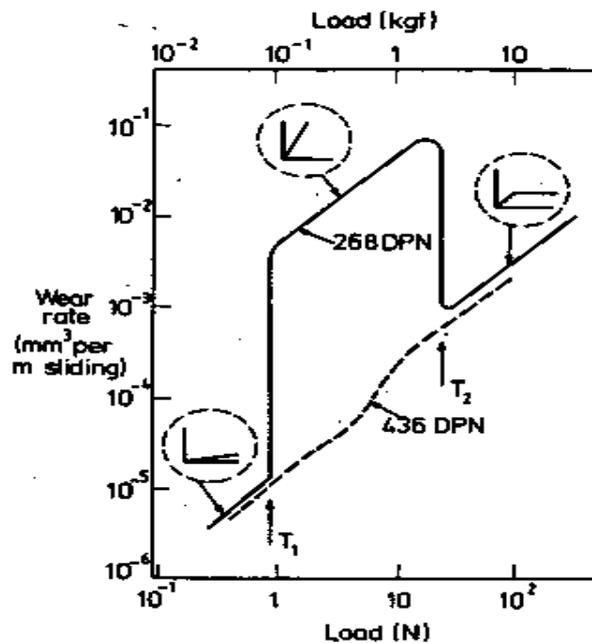


Figura 1.4 - Andamento del tasso di usura in condizioni non lubrificate (transizione tra usura moderata ed usura severa).

I valori del tasso di usura riportati in tale diagramma sono ottenuti considerando lo strisciamento per un periodo sufficientemente lungo in modo da ottenere condizioni di equilibrio stabile dove il volume d'usura incrementa linearmente con la distanza di strisciamento. Dall'analisi della figura si nota che per carichi modesti, minori del valore di transizione T_1 , il tasso di usura presenta livelli bassi; in questo regime le superfici restano lisce e relativamente non danneggiate ed i detriti d'usura sono difficilmente distinguibili. Questo meccanismo di usura è detto "usura moderata".

In corrispondenza di T_1 c'è una variazione del tasso di usura che incrementa di due ordini di grandezza, oltre questo valore del carico i detriti di usura consistono in particelle metalliche sufficientemente larghe visibili ad occhio

nudo mentre le superfici in frizione sono severamente danneggiate. Questo è il meccanismo di “usura severa”.

Per alti valori del carico, T_2 , si ha un ulteriore transizione nel comportamento ad usura. Oltre T_2 , sebbene l'usura iniziale è severa, si ristabilisce un'usura moderata. Questa situazione è dovuta al fatto che al regime di usura moderata è associata la comparsa, sopra la superficie di sfregamento, di uno strato duro causato da elevate temperature istantanee che si realizzano a seguito dell'attrito.

Di grande rilevanza è la conseguenza del cambiamento della durezza iniziale dei corpi a contatto dovuta ad un indurimento e temperamento; infatti come la durezza iniziale dei membri in contatto incrementa, il regime di usura severa, tra T_1 e T_2 , si riduce nello stesso range finché, quando la durezza raggiunge un valore critico (che in fig. 2.3 è compreso fra 400 e 450 DPN), il regime di usura severa scompare ed un'usura moderata persiste per tutto il successivo range di carico.

Ciò spiega il ruolo che compete alla durezza dei materiali nel comportamento ad usura.

Da quanto detto è possibile fare delle opportune osservazioni conclusive:

- a) le transizioni nel comportamento ad usura possono verificarsi con il cambiamento delle condizioni operative. Queste transizioni non sono solo il risultato di un cambiamento dei meccanismi di usura e, delle volte, possono causare aumenti elevati nel tasso di usura. In termini di pratica ingegneristica un cambiamento nell'usura severa dei metalli dovrebbe essere interpretato come un guasto, il primo obiettivo della progettazione dovrebbe essere quello di evitare ciò;
- b) evitare l'usura severa dei metalli essenzialmente vuol dire evitare la severa e persistente saldatura tra i due membri a contatto;
- c) all'interno dei diversi regimi di usura, il comportamento più comune è quello che il tasso di usura incrementa proporzionalmente con il carico;
- d) un incremento della durezza superficiale è normalmente benefico, esso è utile per evitare l'usura severa nonché una riduzione nel tasso di usura moderata;
- e) con i metalli il ruolo degli ossidi e di altre protezioni superficiali è significativo ai fini di evitare l'usura severa;

- f) l'influenza dell'ambiente sul comportamento ad usura è significativa in quanto spesso serve ad evitare guasti attraverso reazioni chimiche e formazione di film superficiali protettivi. La presenza di un ambiente che è chimicamente reattivo può causare un incremento nel tasso di usura moderata, dovuto ad una pronta produzione e rimozione di prodotti di reazioni chimiche. In questo caso l'applicazione di lubrificante rappresenta un buon compromesso tra, da un lato, la possibilità di evitare l'usura severa e, dall'altro, il pericolo di incrementi di usura corrosiva;
- g) molte discussioni sui meccanismi di usura riguardano il comportamento dopo la realizzazione di condizioni di equilibrio stazionario. L'origine di queste condizioni spesso si riferisce a significanti modificazioni della natura delle superfici in contatto e detti cambiamenti sono sempre una parte vitale dei sistemi di sfregamento. Nello sfregamento dei polimeri su metalli un sottile film di polimero, invisibile ad occhio nudo, si stabilisce sulla superficie del metallo, la presenza e la natura di quest'ultimo può giocare un ruolo cruciale nel successivo comportamento ad usura;
- h) come esplicitato al punto c), dove si è detto che il tasso di usura è proporzionale al carico, si può affermare che deviazioni da questo comportamento si verificano particolarmente quando le condizioni di equilibrio superficiale sono cambiate. La causa più comune di queste deviazioni è l'effetto del calore sviluppatosi per attrito.

Si considerano ora in dettaglio i meccanismi mediante i quali il materiale può essere rimosso dalla superficie. I meccanismi base sono i seguenti.

1.1.5.1 Usura adesiva

Il meccanismo di **usura adesiva** è probabilmente il fenomeno d'usura più diffuso anche se non è stato ancora adeguatamente interpretato. La teoria dell'adesione [2] 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. Quest'ultimi hanno ipotizzato la formazione di microgiunzioni a freddo tra le asperità superficiali di due corpi a contatto. Tali saldature, nel moto relativo, vengono distrutte a causa

delle forze applicate per cui le due superfici subiscono una perdita progressiva di materia 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. 1.5 che mostra tre istanti successivi del processo di formazione e distruzione di una microgiunzione.

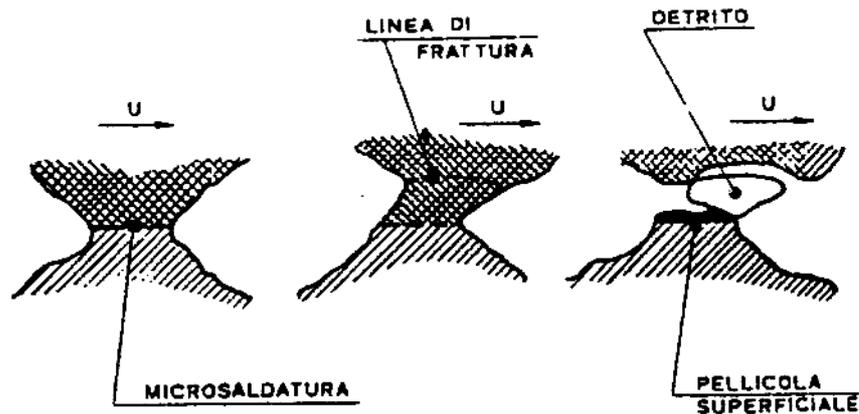


Figura 1.5 - Formazione e distruzione di una microgiunzione.

Distrutto lo strato superficiale, i due materiali vengono a contatto diretto e, se questi sono dello stesso tipo o chimicamente affini, si saldano localmente. Nel moto relativo, la microgiunzione formatasi, viene quindi distrutta nella parte del materiale avente minore resistenza al taglio. Infine, il materiale che ha aderito alla superficie della controfaccia più dura 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. Le saldature che si formano all'interfaccia possono essere relativamente deboli se il fenomeno è caratterizzato da una semplice attrazione fisica oppure possono essere estremamente tenaci se si sviluppano per affinità chimica. Le superfici soggette ad un meccanismo di usura adesiva sono caratterizzate da una serie di piccoli crateri, conseguenza degli strappi cui il materiale è stato sottoposto, in genere seguiti da piccole solcature più o meno profonde nella direzione del moto.

Da queste considerazioni e dalle conoscenze sulla natura del contatto fra superfici ruvide, si può formulare un'equazione per l'usura adesiva.

Si consideri [3] quindi un singolo evento del fenomeno di strisciamento, ossia il contatto tra due asperità (fig. 1.6).

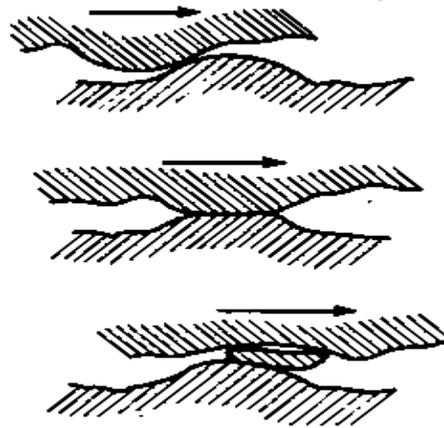


Figura 1.6 - Contatto singolo fra due asperità.

Si può assumere che durante quest'ultimo la massima area di contatto sarà $\delta A = \pi a^2 = \delta W / H$, dove δW è l'aliquota massima del carico totale sopportabile dalle due asperità in contatto, similmente δA è il massimo contributo della area reale di contatto, mentre H è la durezza Brinell del materiale più tenero. Si assume inoltre che la deformazione delle due asperità sia plastica. Se le asperità in contatto si considerano come particelle di usura geometricamente simili, allora ci si può aspettare che il volume di queste particelle δV , detto anche volume d'usura, sia proporzionale all'area reale di contatto, per cui si può scrivere $\delta V = 2/3 \pi a^3$. Dopo quanto detto, considerando la distanza di strisciamento delle due asperità in contatto δL , questa è proporzionale alla dimensione del contatto a , ed è quindi un'assunzione conveniente, derivante da molti modelli, porre $\delta L = 2a$.

Segue che il volume di usura per unità di distanza di strisciamento (tasso di usura) sarà dato da:

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \frac{1}{3} \pi a^2 = \frac{1}{3} \delta A = \frac{1}{3} \frac{\delta W}{H}$$

quindi con riferimento all' area totale di contatto si ottiene per il tasso di usura la seguente:

$$\frac{V}{L} = \sum \frac{\delta V}{\delta L} = \frac{1}{3} K_1 \sum \delta A = \frac{1}{3} K_1 A = \frac{1}{3} K_1 \frac{W}{H}$$

dove K_1 è un'opportuna costante di proporzionalità che viene introdotta per fornire l'accordo tra la teoria e la sperimentazione.

Infine posto $K = 1/3 K_1$, la legge dell'usura adesiva diventa:

$$\frac{V}{L} = KA = K \frac{W}{H} \text{ o anche}$$

$$V = K \frac{W}{H} L$$

dove K è definito coefficiente d'usura. In altre parole le leggi dell'usura possono riassumersi nelle seguenti:

- a) il volume d'usura è proporzionale allo spazio percorso.

Questo enunciato ha trovato conferma in un ampia gamma di condizioni;

- b) il volume d'usura è proporzionale al carico applicato.

Questo enunciato ha trovato sicura conferma in molte prove a carico limitato, con l'aumentare del carico si sono invece riscontrate improvvise transizioni da un tipo di andamento ad un altro (vedi fig. 1.4);

- c) il volume d'usura è inversamente proporzionale alla durezza del materiale più tenero.

Anche in questo caso si è dimostrata la validità dell'affermazione, particolarmente per i metalli puri.

Dalle considerazioni fatte risulta che riveste grande importanza nella trattazione dell'usura adesiva il significato fisico attribuibile alla costante K definita coefficiente d'usura. In particolare ricordando la precedente relazione si può porre:

e quindi, con riferimento alla fig. 1.7 dove è rappresentata la regione che si deforma plasticamente a seguito della penetrazione di un corpo in un altro, si può scrivere:

dalla

$$K = \frac{VH}{LW} = \cos t.$$

quale segue che K è proporzionale al rapporto del volume di usura V rispetto al volume V_p che dovrebbe deformarsi plasticamente sotto uno stesso carico applicato W, in condizioni di completa plasticità, muovendosi della stessa distanza di strisciamento L .

$$K = \left[\frac{VH}{WL} \right] \propto \frac{V}{V_p}$$

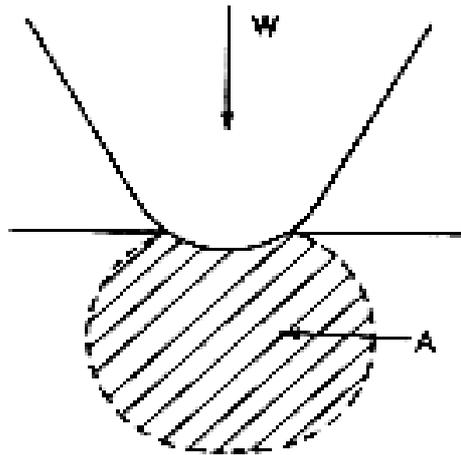


Figura 1.7 - Deformazione plastica dovuta a penetrazione di un corpo nell'altro.

Ne segue che K può essere interpretato come il rapporto tra il volume d'usura ed il volume che verrebbe prodotto se ogni singolo evento producesse una particella d'usura.

Inoltre quanto si sa sui film superficiali e sulla distribuzione dell'altezze delle asperità porta a concludere che gli effetti dell'adesione diventano significativi solo a certi livelli di contatto delle asperità. Anche il fenomeno dell'adesione, in sé, non può da solo portare al distacco di particelle d'usura perché il taglio conseguente allo strisciamento potrebbe ancora avvenire alla stessa interfaccia della giunzione. Le particelle di usura si formano probabilmente quando le giunzioni sono più resistenti del materiale sottostante per cui parte di esso viene strappato via ed eventualmente messo in circolazione da ripetuti scorrimenti della controparte.

In questi termini, in conclusione, K può essere interpretato anche come un *fattore di probabilità*, che appunto indica la probabilità che le particelle d'usura si vengano a creare per effetti adesivi fra le diverse popolazioni di asperità delle due superfici affacciate.

1.1.5.2 Usura abrasiva

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

Un esempio comune di tale problema è l'usura dei macchinari per la movimentazione dei terreni. Il problema dell'usura abrasiva è molto più diffuso di quello che si possa pensare, ogni materiale può esserne soggetto se sono presenti particelle più dure. Una delle maggiori difficoltà nella prevenzione e nel controllo di tale fenomeno è che il termine usura abrasiva non descrive precisamente il meccanismo che si ha. Ci sono infatti molti diversi meccanismi di azione (che si possono anche avere contemporaneamente) ognuno con diverse caratteristiche.

Le asperità [2] superficiali del materiale più duro, per effetto della forza di chiusura, penetrano nella superficie più tenera (fig. 1.8), generando nella maggior parte dei casi una deformazione plastica e, in condizioni di moto relativo, un effetto arante con la relativa asportazione di materiale.

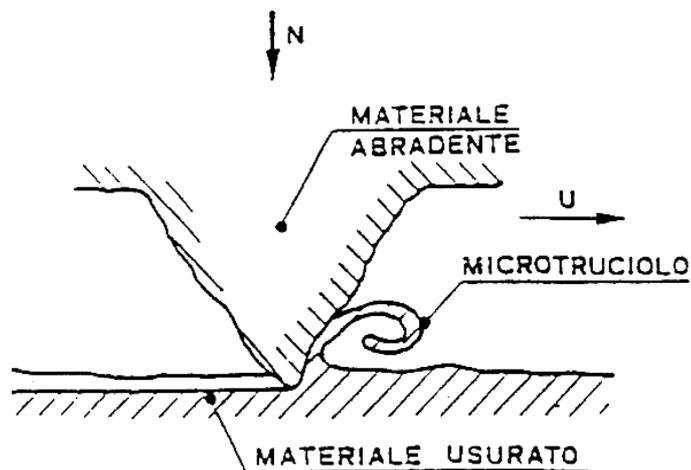


Figura 1.8 - Meccanismo di asportazione di materiale per usura abrasiva.

Da questa figura si nota come l'azione di un'asperità appartenente alla superficie dura su quella tenera è esclusivamente meccanica di taglio.

L'asperità dura, infatti, si comporta come un microutensile da taglio asportando dalla superficie più tenera materiale in forma di microtrucioli le cui dimensioni

variano in condizioni di usura moderata o severa. Questo meccanismo è detto usura abrasiva a due corpi, si parla di usura abrasiva a tre corpi invece quando particelle dure, intrappolate tra due superfici in moto relativo, rimuovono per abrasione materiale da una o ambedue le superfici, figure 1.9 e figura 1.10 :

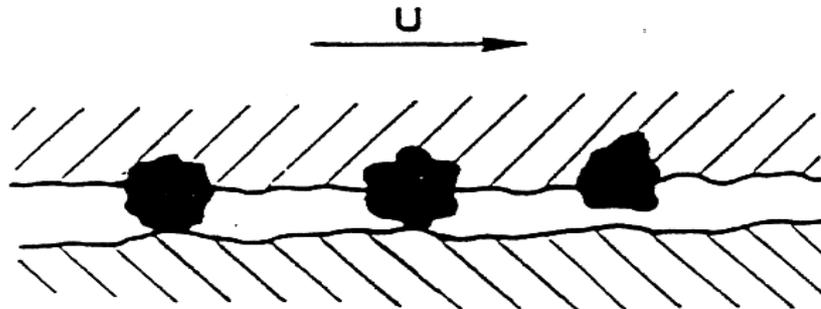


Figura 1.9 - Azione su una superficie da parte di particelle imprigionate in un'altra superficie con la quale è in contatto.

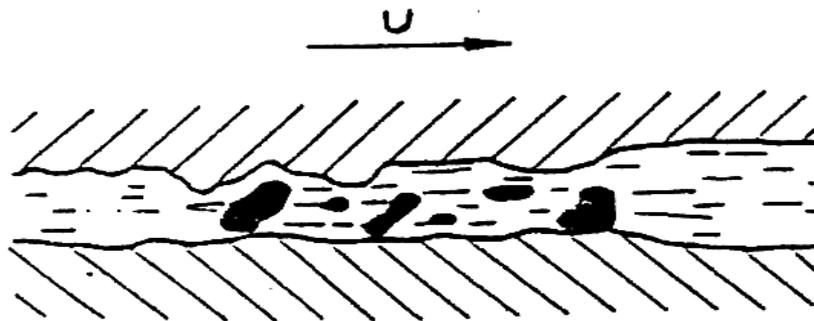


Figura 1.10 - Azione di particelle abrasive che si trovano fra due superfici in moto relativo.

Sia per l'usura abrasiva a due che a tre corpi l'aspetto delle superfici usurate è caratterizzato da solcature parallele alla direzione del moto relativo con la presenza, talvolta, di un rigonfiamento plastico di materiale al bordo del solco. I diversi meccanismi di usura abrasiva sono normalmente distinti a seconda 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 tipi seguenti di usura abrasiva:

- 1) **Usura abrasiva da strappamento** (gougin abrasion):

si ha quando particelle di grosse dimensioni vengono strappate dalla superficie che si usura che è quindi caratterizzata da alte sollecitazioni e da macrodeformazioni (fig. 1.11).

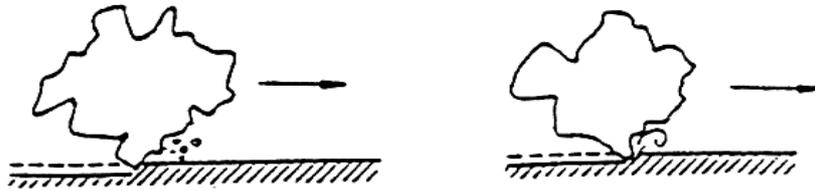


Figura 1.11 - Meccanismo di usura abrasiva da strappamento.

1) **Usura abrasiva da molatura** (grinding abrasion):

si manifesta quando due superfici in moto relativo in un ambiente sabbioso, esplicano forze tali da produrre un'azione di frantumazione delle particelle fra loro intrappolate, dando vita a grani estremamente taglienti e capaci di rigare, sia pure leggermente, le superfici stesse (fig. 1.12).

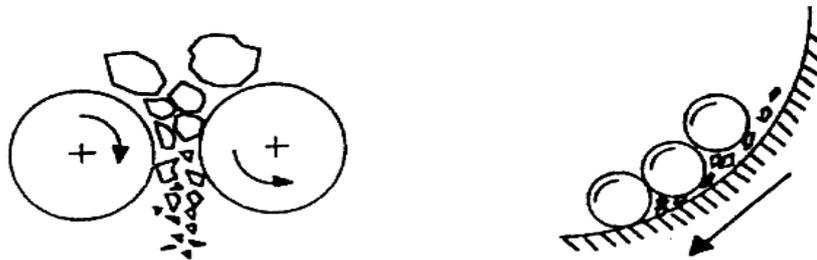


Figura 1.12 - Meccanismo di usura abrasiva da molatura.

2) **Usura abrasiva da erosione** (erosion abrasion):

si manifesta quando materiale abrasivo scorre libero su una superficie con alte velocità relative e carichi modesti (fig. 1.13) .

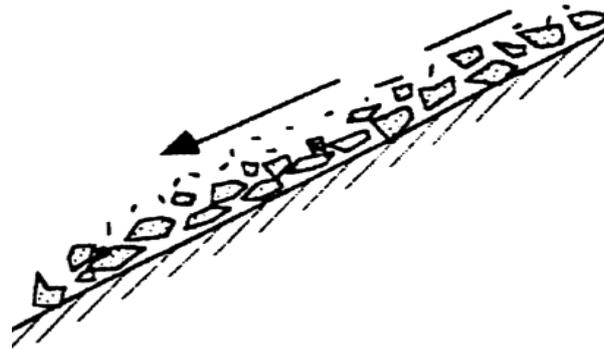


Figura 1.13 - Meccanismo di usura abrasiva da erosione.

Quindi il meccanismo di usura abrasiva è 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.

A questo punto, così come fatto per l'usura adesiva, è possibile ricavare una semplice ma utile equazione che rappresenti l'usura abrasiva, ottenibile considerando l'azione di una singola asperità così appuntita da penetrare nella superficie opposta. Per semplicità [3] si supponga che l'asperità abbia forma conica e sia θ il semiangolo del cono, come in figura 1.14 .

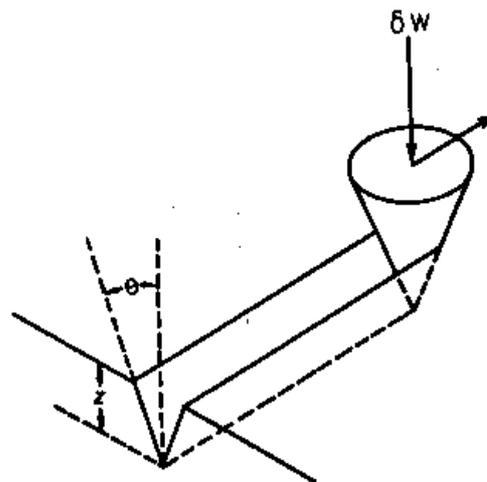


Figura 1.14 - Usura abrasiva dovuta ad una singola asperità di forma conica.

Sotto l'azione di un carico δW le particelle abrasive penetrano nella superficie opposta di una quantità pari a z in modo che in base ad assunzioni geometriche si può scrivere:

$$\delta W = \frac{1}{2} \pi z^2 \tan^2 \theta \cdot H$$

essendo il valore $\frac{1}{2}$ giustificato dal fatto che solo la parte frontale dell'asperità entra in contatto con il materiale tenero. Segue allora che il volume di materiale rimosso δV in seguito ad uno strisciamento per una lunghezza δL è:

$$\delta V = (z^2 \tan \theta) \delta L$$

Combinando le due equazioni precedenti si ottiene che il volume di usura per unità di distanza di strisciamento (tasso di usura) sarà:

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \left(\frac{2 \overline{\cot \theta}}{\pi} \right) \frac{\delta W}{H}$$

Se ora, come fatto in precedenza per l'usura adesiva, si considera il tasso d'usura per tutte le particelle abrasive, assumendo la continuità del carico sopportato e introducendo una costante di proporzionalità K_2 , si ottiene:

$$\frac{V}{L} = K_2 \left[\frac{2 \overline{\cot \theta}}{\pi} \right] \frac{W}{H}$$

dove $\overline{\cot \theta}$ è un valore medio per tutte le particelle abrasive.

A questo punto definito il coefficiente d'usura come:

$$K = K_2 \left[\frac{2 \overline{\cot \theta}}{\pi} \right]$$

si arriva all'espressione finale della legge dell'usura abrasiva:

$$\frac{V}{L} = K \frac{W}{H}$$

Questa equazione ha molte affinità con la legge dell'usura adesiva vista prima, sebbene sussista una differenza notevole, infatti in questo secondo caso il coefficiente d'usura K è in stretta relazione con le caratteristiche geometriche delle asperità dure, rappresentate nella formula dall'angolo θ . Inoltre quando il meccanismo abrasivo diventa il meccanismo d'usura prevalente, il coefficiente d'attrito acquista un valore più grande di quanto esso stesso non assuma durante il fenomeno dell'usura adesiva.

Sebbene la legge dell'usura abrasiva sia stata ottenuta ipotizzando un modello di asperità a cono, essa è ugualmente ritenuta valida per definire le azioni di taglio che generano le particelle d'usura libere. In tali casi il valore di K diventa sensibilmente più piccolo. Molti ricercatori hanno in effetti trovato che questa legge è sostanzialmente valida sperimentalmente.

Quando invece una stessa parte di una superficie è permanentemente impegnata nel contatto, le asperità vengono rapidamente livellate perché il materiale meno duro, specialmente se esibisce un marcato comportamento plastico, si trasferisce sulla superficie più dura riempiendo le valli tra le asperità. Il meccanismo di usura subisce, perciò, da un certo istante in poi, una radicale trasformazione, infatti nel momento in cui il materiale della superficie più tenera si è trasferito sulla parte più dura riducendone la rugosità, si ha un passaggio da usura abrasiva ad adesiva (fig. 1.15).

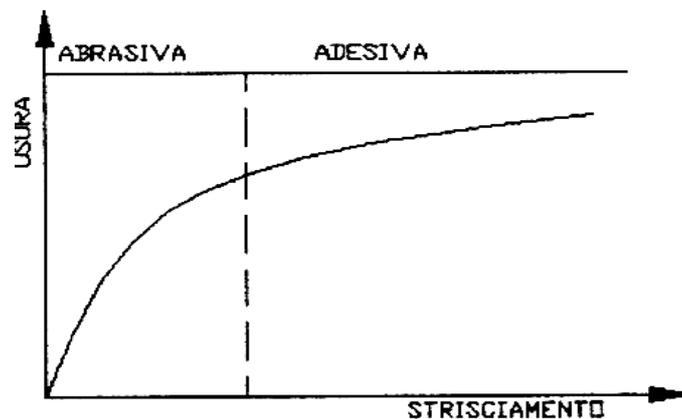


Figura 1.15 - Andamento dell'usura per corpi in continuo contatto.

1.1.5.3 Usura per fatica

L'usura per fatica superficiale [2] è un meccanismo tipico dei sistemi a contatto localizzato caratterizzato da condizioni di rotolamento-strisciamento e carichi variabili o alternati. In tali circostanze le superfici degli organi accoppiati sono soggette a notevoli sollecitazioni cicliche che tendono a produrre microlesioni superficiali.

Tale tipo d'usura si manifesta in due forme principali; la macroscopica e la microscopica. La prima è dovuta alla non conformità degli elementi di macchine

impegnati in rotolamenti e strisciamenti, è la forma più importante e dannosa in quanto si manifesta con guasti alle macchine.

L'usura per fatica microscopica è simile alla prima ma è associata al contatto di singole asperità degli elementi non conformi di macchine.

1.1.5.4 Fretting

Il fretting [2] è il meccanismo d'usura che si sviluppa quando le superfici a contatto fra loro sono dotate di moti oscillatori tangenziali di piccola ampiezza, intorno alla loro posizione normale. Il danno che si produce è tipico dell'usura meccanica prodotta dallo strisciamento di una superficie sull'altra ed è influenzato dall'azione chimica derivante dalla reazione eventuale, di una o entrambe le superfici, con l'ambiente circostante 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 d'usura che, rimanendo intrappolato fra le superfici stesse, si ossida abrando 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 protrae, con formazione di crateri (pits) dai quali possono partire delle cricche di fatica.

Le particelle d'usura assumono spesso una forma tondeggianti e, talvolta, restano intrappolate tra le superfici, comportandosi come microcorpi volventi mitigando l'attrito e il fenomeno di usura.

1.2 I FENOMENI di ATTRITO

1.2.1 Introduzione

L'attrito [2] è definito come una resistenza passiva che si manifesta attraverso una distribuzione di forze applicate agli elementi di superfici a contatto, tale da ostacolare oppure impedire il moto relativo tra le superfici stesse .

Il lavoro delle forze d'attrito è negativo nello spostamento effettivo del sistema e causa una perdita d'energia meccanica, che comporta una diminuzione del rendimento delle macchine, e lo sviluppo di un'equivalente quantità di calore.

In letteratura si distinguono due tipologie d'attrito, “ *attrito esterno* “ ed “ *attrito interno* “. Il primo si manifesta quando i corpi fra i quali si trasmettono le azioni d'attrito, appartengono a sistemi distinti (solido-solido, solido lambito da una corrente fluida ecc.), il secondo si manifesta quando i due corpi fra i quali si trasmettono le forze d'attrito costituiscono due parti solo idealmente distinte (deformazione plastica di un fluido o di un solido; in un fluido in moto laminare o turbolento ecc.).

Con riferimento al solo “ *attrito esterno* “, è possibile individuare per esso tre diverse modalità:

- *attrito secco (dry friction)*;
- *attrito radente*;
- *attrito volvente*.

1.2.2 Attrito secco

L'attrito secco “ *dry friction* “ è la resistenza al moto che si genera quando un corpo solido, a cui è applicato un carico normale, si muove rispetto ad un altro con il quale è a contatto diretto. L'attrito, pur svolgendo in molti componenti un ruolo attivo (freni, frizioni, ecc.), in molti cinematismi svolge un ruolo passivo dando luogo a fenomeni indesiderati e dannosi, da cui nasce l'esigenza di ridurre i suoi effetti mediante progetti più sofisticati, uso di lubrificanti, impiego di materiali più idonei.

Naturalmente l'attrito assolutamente secco si realizza nella pratica solo teoricamente per cui è più corretto parlare di “attrito secco tecnico” volendo con tale termine intendere che tra le superfici in moto relativo manca un fluido volutamente interposto ma che, nel contempo, lo stato superficiale è alterato da sostanze che si trovano nell'ambiente circostante per adsorbimento fisico, per reazione chimica ecc..

1.2.3 Attrito radente

Con riferimento alla figura 1.16 si possono distinguere due situazioni a seconda che la forza applicata al solido a contatto sulla superficie orizzontale sia tale da indurre o meno un moto relativo.

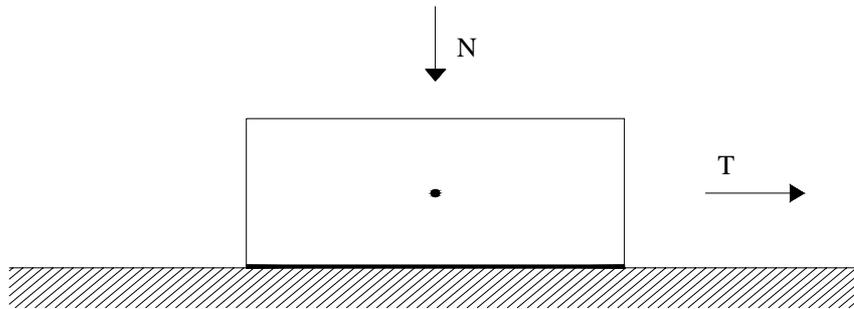


Figura 1.16 - Schema di un corpo soggetto ad una forza tangenziale a contatto con una superficie orizzontale.

Quando la forza tangenziale T risulta più piccola di un valore $|T_s| = f_s \cdot N$ la forza d'attrito all'interfaccia è uguale e contraria a T per cui è tale da prevenire il moto relativo e l'attrito è noto come “ *attrito statico* ”.

Viceversa quando la forza tangenziale risulta maggiore o al più uguale al valore T_s , si manifesta lo slittamento tra i corpi a contatto e l'attrito si definisce “ *cinetico* ”. Il moto relativo una volta instaurato, viene garantito applicando una forza $|T_c| = f_c \cdot N$ in genere minore di T_s . Infatti il coefficiente di attrito statico f_s risulta maggiore del corrispondente coefficiente d'attrito cinetico f_c per accoppiamenti con materiali metallici, per accoppiamenti con materiali polimerici può accadere che f_s sia minore di f_c .

La caratterizzazione quantitativa delle forze d'attrito deriva da alcune leggi classiche che possono sintetizzarsi nei seguenti punti:

- la forza d'attrito F_s è proporzionale al carico normale N ed è indipendente dall'area apparente di contatto;
- il coefficiente d'attrito, definito come rapporto tra la predetta forza F_s ed N , è indipendente dalla velocità di strisciamento e dipende dalla natura dei materiali accoppiati ed in moto relativo.

In realtà queste leggi, dovute soprattutto ad Amontons e Coulomb, possono ritenersi valide solo in prima approssimazione così come non rigorose sono altre teorie atte a spiegare i meccanismi di attrito.

Tra queste la più nota è la teoria dell'adesione per l'attrito proposta da Holm e studiata approfonditamente da Bowden e Tabor prima e da Archard e Green poi. Secondo la teoria proposta da Bowden e Tabor, l'attrito radente è dovuto alla formazione di microsaldature a freddo tra le superfici reali dei corpi a contatto e al susseguente taglio delle stesse per effetto della forza tangenziale cui è affidato il compito di indurre moto relativo.

1.2.4 Attrito volvente

E' la resistenza al moto che incontrano due corpi a contatto in condizioni di rotolamento relativo. La perdita di energia, dovuta agli strisciamenti corrispondenti alle deformazioni nella zona di contatto, al fenomeno di isteresi e agli urti causati dalle asperità superficiali, risulta, a parità di carico normale tra i corpi a contatto, notevolmente inferiore a quella prodotta dall'attrito radente.

Con riferimento a due corpi a contatto aventi geometria regolare, per effetto della deformazione (fig. 1.17), se con T si indica la forza richiesta per mantenere costante la velocità, si definisce parametro di attrito a rotolamento la grandezza $a = (T \cdot R) / N$.

Il coefficiente di attrito volvente può essere definito come rapporto tra il lavoro perduto e il carico normale moltiplicato per lo spostamento del punto teorico di contatto rispetto alla congiungente i centri di curvatura.

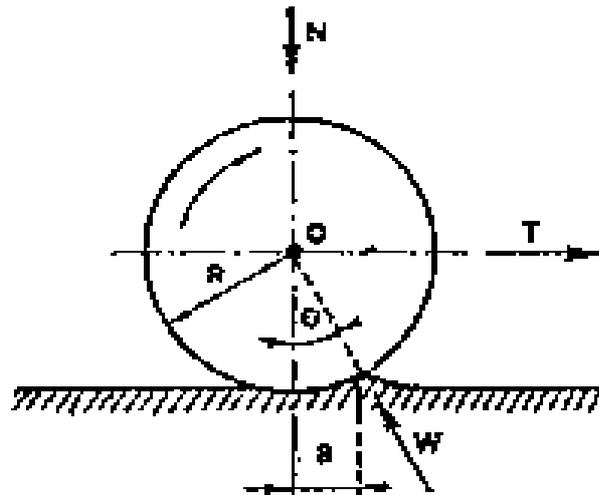


Figura 1.17 - Attrito volvente tra superfici regolari.

1.2.5 Meccanismo di attrito metallico: ruolo della combinazione di tensioni e della contaminazione superficiale

Si sviluppa la teoria dell'adesione per l'attrito metallico [3] che considera le proprietà d'attrito di entrambe le superfici pure e contaminate. In questa ottica l'attrito risulta dato da due cause. La prima è la forte adesione che si realizza nelle regioni in cui si ha realmente il contatto; le giunzioni formatesi devono essere tagliate quando lo scorrimento a luogo. Detta S la forza di taglio delle giunzioni. Il secondo meccanismo si presume che si verifichi quando le asperità sulla superficie più dura arano una superficie più tenera e la forza extra di aratura è indicata con P.

La forza d'attrito totale che si osserva è la somma dei due termini cioè :

$$F = S + P$$

Per le superfici che sono estremamente lubrificate la forza di taglio S diventa così piccola che P è comparabilmente maggiore. Per molte situazioni con superfici metalliche, comunque, P è generalmente piccolo rispetto ad S e nel seguito può essere trascurato, così per le superfici non lubrificate si porrà $F = S$. Considerando in dettaglio il termine S relativo all'adesione, è possibile osservare quanto segue (fig. 1.18).

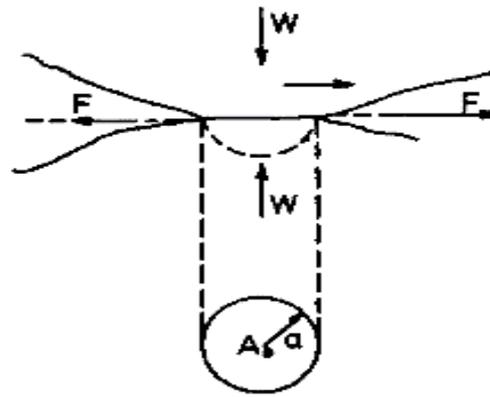


Figura 1.18 - Teoria dell'adesione per l'attrito.

Quando le superfici metalliche entrano in contatto si toccano soltanto in corrispondenza delle punte delle loro asperità. In queste regioni la pressione è sempre elevata ed è sufficiente a produrre uno scorrimento molto plastico, quindi le regioni di contatto si deformano plasticamente finché l'area reale di contatto è appena larga per sopportare il carico. Se il carico è W e la pressione di snervamento del metallo è p_o , ossia la pressione alla quale il materiale fluisce plasticamente ed è, con buona approssimazione coincidente con la durezza Brinell del materiale meno duro, l'area reale di contatto è $A_o = W/p_o$.

Così A_o è proporzionale al carico ed indipendente dalla forma o dimensione della superficie ed inoltre dipende dal minore dei valori della durezza Brinell dei due materiali a contatto.

Se le giunzioni formatesi per saldatura in corrispondenza di queste regioni di contatto hanno una resistenza specifica a taglio pari ad s , la forza di taglio (che è essenzialmente la forza d'attrito) è $F = A_o \cdot s = W \cdot s/p_o$.

Questa formula esprime le due leggi di base sull'attrito, ossia F è proporzionale al carico ed indipendente dall'area delle superfici, come già affermato in precedenza.

In accordo con l'espressione precedente il coefficiente d'attrito λ è dato da:

$$\lambda = F/W = s / p_o$$

che risulta essere una prima e semplice espressione della teoria dell'adesione proposta per l'attrito.

Ora per i materiali plastici ideali la pressione di snervamento locale è circa 5 volte la tensione critica di taglio s_m del metallo. Non è chiaro se s debba essere la tensione critica di taglio s_m oppure la resistenza specifica di taglio

dell'interfaccia. In ogni caso non può essere molto differente da s_m e per i materiali idealmente plastici in prima approssimazione si ha $s = s_m$. In conclusione per i materiali idealmente plastici si ha :

$$\lambda = s_m / p_o \approx 1/5 \text{ oppure } \lambda \approx 0.2$$

Nella pratica molti dei metalli non lubrificati hanno un valore di λ dell'ordine dell'unità.

Si nota che i processi di deformazione che portano ad un incremento di s_m tenderanno a produrre un incremento parallelo di p_o . E' per questo motivo, ad esempio, che la durezza dei metalli ha un piccolo effetto sul coefficiente d'attrito.

La teoria della plasticità dimostra che lo snervamento plastico nella giunzione risulta dalla combinazione della tensione normale e tangenziale. Per semplicità si ignora la presenza di un film di ossido e si assume una perfetta adesione all'interfaccia (fig. 1.19).

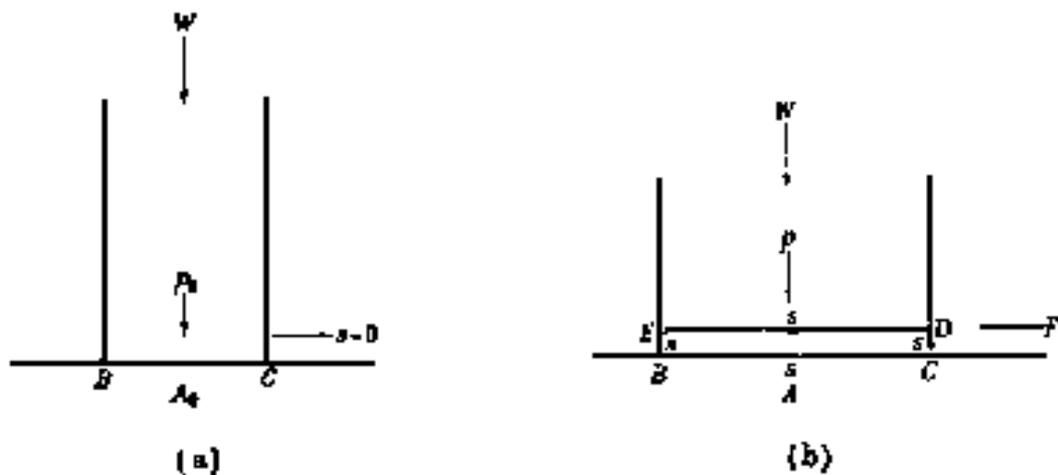


Figura 1.19 - Modello bidimensionale di valutazione degli effetti della combinazione di tensioni sul fenomeno della crescita di una giunzione.

Si supponga di avere una piastra bidimensionale di metallo dolce che sia premuta su una superficie dura e piatta in modo che a seguito della scorrimento plastico l'intera area A_o viene intimamente a contatto con la parte piana (fig. 1.19 (a)).

In tal caso la pressione normale media è $p_o = W/A_o$.

A questo punto se una forza tangenziale F , che produce una tensione tangenziale s , è applicata, in accordo con i criteri dello scorrimento plastico

sotto l'azione combinata di tensioni, il materiale sulla parte BCDE si plasticizzerà quando :

$$p^2 + 3 s^2 = K^2$$

dove K è una conveniente costante e comparabile alla tensione uniassiale di snervamento del metallo. Inizialmente $p = p_0$ ed $s = 0$ così $K = p_0$, allora si ha:

$$p^2 + 3 s^2 = p_0^2$$

Si nota come sia p che s giochino un ruolo importante nella determinazione delle condizioni di scorrimento della porzione BCDE. In realtà se p è inizialmente uguale a p_0 il materiale, in questa zona, è già plastico e la più piccola tensione tangenziale s sarà sufficiente a causare un ulteriore scorrimento plastico. La minore tensione tangenziale produce un piccolo ma finito spostamento e come risultato segue che l'area di contatto si incrementa da A_0 ad A (fig. 1.19 (b)). Raggiunto questo stato la pressione normale, che è pari a W/A , è minore di p_0 quindi insufficiente a produrre uno scorrimento plastico. La tensione tangenziale deve ora incrementarsi di un valore finito pari ad s in modo che l'effetto combinato di p ed s sia ancora capace di produrre uno scorrimento (deformazione) plastico all'interfaccia. In accordo con questo modello si verifica una crescita costante dell'area di contatto con il crescere di s.

Trattando il caso reale di giunzioni tridimensionali non esiste a riguardo una soluzione teorica esatta ma è possibile far riferimento ad una relazione del tipo :

$$p^2 + \alpha s^2 = k^2$$

dove α è una conveniente costante.

Al fine di valutare l'effetto delle forze tangenziali sul contatto fra corpi metallici, diversi esperimenti sono stati realizzati per studiare i microspostamenti prodotti quando dette forze, minori di quelle necessarie a produrre elevati scorrimenti, sono applicate nel contatto tra due corpi metallici. Tra questi esperimenti vi sono quelli realizzati in condizioni statiche e condotti da Stevens (1899), Rankin (1926), Verkhovskii (1926), Cocks (1954), Parker e Hatch (1950).

Verkhovskii [3] è stato il primo ad indicare che un'elevata pressione si verificherebbe in piccole regioni di contatto su corpi ordinariamente rugosi e queste regioni quindi sarebbero in stato plastico.

Egli ha descritto alcune caratteristiche degli spostamenti che si verificano prima degli scorrimenti, caratteristiche confermate anche da esperimenti di laboratorio.

I risultati ottenuti mostrano che quando la forza tangenziale cresce a partire da zero si assiste ad un incremento dei microspostamenti. Nel seguito si indicherà con x gli spostamenti tangenziali e con α il rapporto F/W fra le tensioni tangenziale e normale rispettivamente. Quest'ultimo è chiamato coefficiente di forza tangenziale e non va confuso con il coefficiente d'attrito λ , che è il valore di α quando lo scorrimento macroscopico è iniziato. La variazione di x con α ad W costante, assume alcuni andamenti generali per tutti i metalli e per tutti i carichi come in figura 1.20 .

Il valore λ si realizza quando α tende asintoticamente al tendere di x ad infinito, in accordo con il coefficiente di attrito statico citato da altri lavori realizzati per gli stessi materiali e sotto le stesse condizioni.

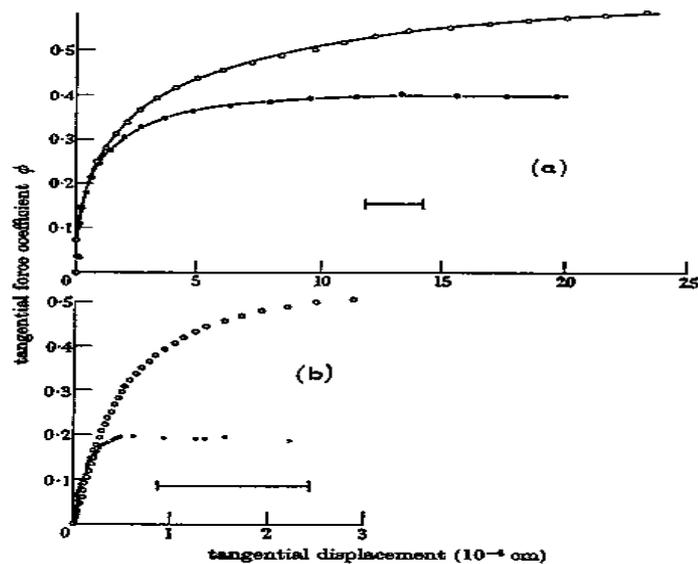


Figura 1.20 - Effetto del coefficiente di forza tangenziale sui microspostamenti tangenziali prima che lo scorrimento avvenga. (a) superfici platinata lucidate; (b) superfici di acciaio.

Curve più alte, esperimenti con superfici pulite; curve più basse, esperimenti con superfici cosparse di acido in cetano.

A questo punto, allo scopo di valutare l'effetto dei film di lubrificanti, si può far riferimento ai risultati descritti dalla figura precedente i quali mettono in

evidenza che la presenza di quest'ultimi non influenza gran che il processo di crescita delle giunzioni quando una forza tangenziale è applicata. I risultati sono ancora comprensibili se si assume che delle giunzioni resistenti si vengono a formare fra i corpi in modo che nella regione di contatto questi si comportino come un corpo singolo. Ciò a patto che l'area di contatto abbia una resistenza a taglio sufficientemente grande affinché le tensioni si trasmettano in modo da mantenere le giunzioni in uno stato plastico, quest'ultime continuano a comportarsi come un singolo corpo e crescono continuamente al crescere della forza tangenziale.

Anche se il film lubrificante mantiene la sua integrità esso possiederà una finita resistenza a taglio e, entro i limiti della tensione di taglio a cui può resistere, la crescita delle giunzioni avverrà come per delle superfici non lubrificate.

Quando in un secondo momento la resistenza media a taglio della giunzione indichi dove la giunzione non può più mantenere lo stato plastico, il processo di crescita della giunzione non potrà più continuare e, se la forza tangenziale è ulteriormente incrementata, si realizza uno scorrimento macroscopico.

1.2.6 Scorrimento macroscopico

Dalle precedenti osservazioni risulta che se una forza tangenziale è applicata a due corpi in contatto si realizza un processo di crescita di giunzioni e questo è accompagnato da microspostamenti di un corpo rispetto all'altro. Il processo di crescita delle giunzioni sembra essere una parte intrinseca dei meccanismi dell'attrito metallico.

Ci sono due studi a riguardo, il primo è dovuto ad esperimenti condotti da Bowden e Young (1951), il secondo, come già visto, dovuto a Courtney-Pratt e Eisner. In particolare quest'ultimi mostrano che la crescita delle giunzioni è inizialmente la stessa per entrambe le superfici pure e lubrificate e continua a patto che l'interfaccia è sufficientemente resistente per trasmettere le tensioni richieste. Non appena le tensioni tangenziali eccedono la resistenza all'interfaccia, la crescita delle giunzioni non può continuare e gli scorrimenti si verificano. Questo rappresenta un modello, dal quale si può dedurre in via semi-quantitativa, il verificarsi di condizioni che inducono uno scorrimento macroscopico.

1.2.7 Equazione di base della crescita della giunzione

Si consideri [3] ora il comportamento di due corpi premuti insieme e che realizzano un contatto presso una singola regione. Il carico normale W produce un'area iniziale di contatto A_0 . Quando si applica una forza tangenziale si ha, come visto, una crescita di giunzione e l'area di contatto incrementa fino ad A . Se la nuova pressione è $p = W/A$ e la tensione tangenziale è $s = F/A$, il criterio dello scorrimento plastico in corrispondenza della regione di contatto assume la forma :

$$p^2 + \alpha s^2 = p_0^2$$

Resta da considerare il valore di α che negli esperimenti condotti da Courtney-Pratt e Eisner è stato assunto pari a 12. Tuttavia ulteriori studi hanno portato a considerare valori elevati di α per le seguenti ragioni.

Detta s_m la tensione critica di taglio, allora per un contatto assialsimmetrico la pressione di snervamento è dell'ordine $p_0 = 5 s_m$. Quindi l'equazione precedente assume la forma :

$$p^2 + \alpha s^2 = 25 s_m^2$$

Si consideri ora il caso in cui le superfici siano leggermente in contatto ed una tensione tangenziale s sia applicata finché l'area di contatto cresca raggiungendo un valore in corrispondenza del quale p tende a zero. In questo stato è chiaro che $s = s_m$ ed inoltre α deve essere uguale a 25. La relazione generale da considerare è allora :

$$p^2 + 25s^2 = p_0^2$$

Come si può notare il valore empirico di α è minore di questo trovato. Ci sono due possibili motivi. Il primo è legato alla determinazione sperimentale dell'area interessata dalla crescita delle giunzioni. Misure dell'adesione tendono a dare dei piccoli valori per la vera area, perché ci sono difficoltà nella misura

dell'adesione. Il secondo motivo è la difficoltà di dedurre una relazione sulla plasticità nel caso tridimensionale analoga a quella ricavata per il caso bidimensionale.

Per convenienza si assumerà per α un valore pari a 9. Fortunatamente, come altri studi hanno evidenziato, il valore di α non è di importanza fondamentale.

Di conseguenza si assumerà come relazione di lavoro:

$$p^2 + 9s^2 = p_o^2$$

ciò implica che p_o non è uguale a $5s_m$ ma a $3s_m$ così che valga la seguente:

$$p^2 + 9s^2 = 9s_m^2$$

La figura 2.21 mostra cosa accade quando la forza tangenziale è gradualmente incrementata: l'area di contatto cresce e la tensione tangenziale s pure finché, per un opportuno valore di F , quest'ultima tende asintoticamente ad s_m . Ciò è chiaro dalla precedente equazione, infatti per un opportuno valore di F l'area di contatto è molto larga e p tende a zero.

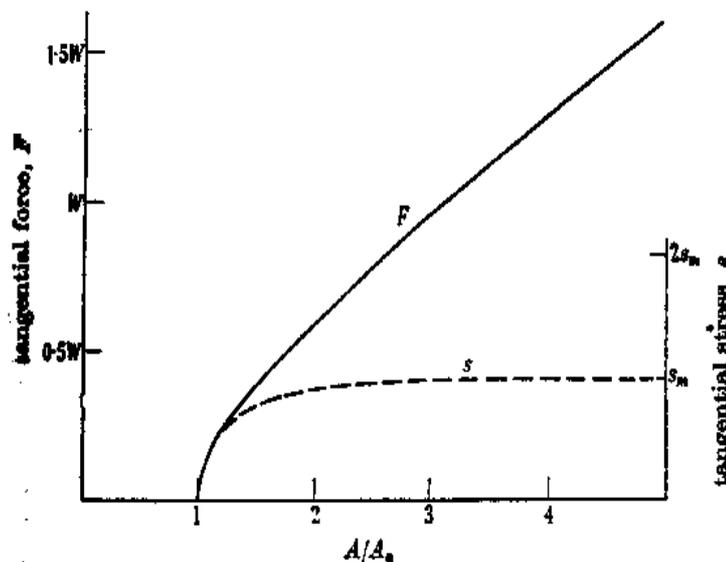


Figura 1.21 - Curva teorica della crescita dell'area di contatto con l'incremento di F .

1.2.8 Condizioni per lo strisciamento macroscopico

Si assume che le superfici nelle loro regioni di contatto siano separate da un film contaminante (film di ossido e/o strati di molecole gassose assorbite) che è più debole della massa di metallo, esso presenta una tensione critica di taglio s_c

che risulta minore della tensione critica di taglio s_m della massa metallica (figure 1.22 (a) e (b)).

Si nota come lo snervamento degli strati all'interfaccia non dipende dal valore della tensione normale, così lo scorrimento plastico si avrà quando la tensione di taglio tende al valore critico s_i .

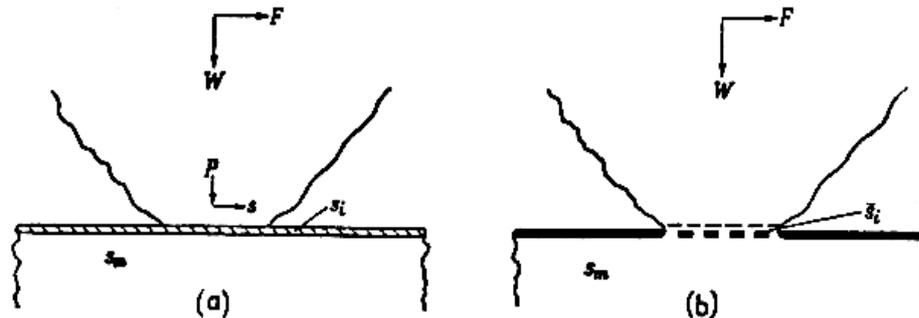


Figura 1.22 - (a) arresto della crescita di una giunzione quando la tensione di taglio raggiunge la tensione di taglio critica s_i di un film d'interfaccia; (b) comportamento quando l'interfaccia consiste nella rottura dell'ossido e successivo contatto metallico; s_i = tensione critica media di taglio dell'interfaccia.

Se la tensione tangenziale è minore di quest'ultimo, essa è trasmessa al di sotto del metallo e produce una crescita di giunzione come mostrato in figura 1.22 .

Se la tensione di taglio eccede questi valori, lo sviluppo della giunzione cesserà ed il taglio avverrà all'interfaccia con il film contaminante. In questo caso un elevato scorrimento avrà luogo in corrispondenza dell'interfaccia.

La condizione affinché ciò possa verificarsi diventa:

$$p^2 + 9 s_i^2 = 9 s_m^2$$

Assumendo ora $s_i = k s_m$, dove $k < 1$, lo scorrimento avverrà quando:

$$p^2 = 9 s_i^2 (k^{-2} - 1) \quad \text{oppure} \quad \frac{s_i}{p} = 3 \cdot (k^{-2} - 1)^{1/2} \quad \text{il tutto elevato alla -1.}$$

Se ora l'area di contatto è A , la forza tangenziale è $F = s_i A$ e il carico normale è $W = p A$; il coefficiente d'attrito λ è pari a:

$$\mu = F/W = s_i A / p A = \frac{s_i}{p} = 3 \cdot (k^{-2} - 1)^{1/2}$$

La variazione di λ con k è mostrata in figura 1.23 dove si nota che per

$k = 1$, $\lambda \rightarrow \infty$. Ciò corrisponde a superfici perfettamente pure dove la giunzione cresce indefinitamente. Tuttavia si nota come una riduzione di k del 5%, comporta che λ da ∞ tende invece ad 1; quindi per un piccolo aumento nell'indebolimento dell'interfaccia si ha che la tensione di taglio che induce plasticizzazione è il 95% della tensione di taglio del metallo, in questo modo λ si riduce di un ragionevole valore.

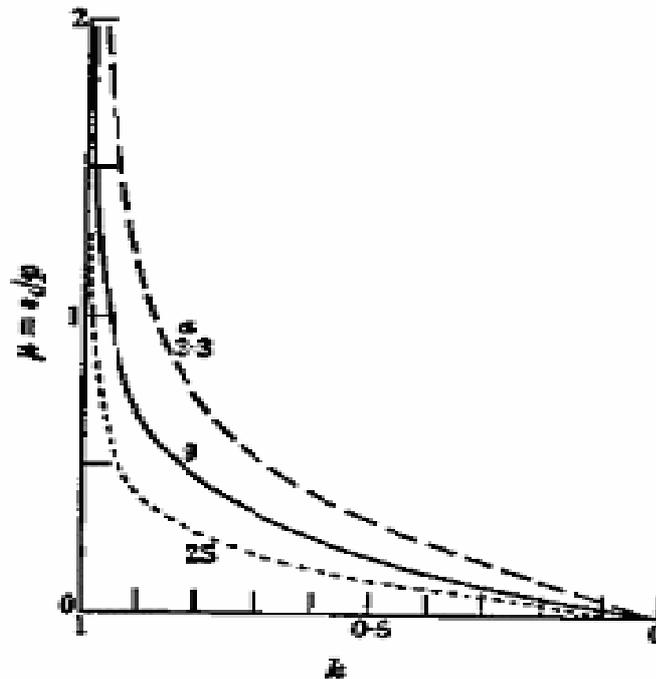


Figura 1.23 - Variazione del coefficiente d'attrito in funzione di $k = s/s_m$.

Dall'analisi del diagramma si può dedurre la seguente:

$$\lambda = ks_m/p_o = s_i/p_o$$

e quindi λ è dato dal rapporto fra la tensione di taglio critica all'interfaccia e la pressione di snervamento plastico del metallo sottostante. Questa relazione, che rappresenta una seconda semplice espressione della teoria dell'adesione per l'attrito, è simile a quella ottenuta dalla teoria iniziale:

$$(\lambda = F/W = s/p_o).$$

Le ragioni sono comprensibili facilmente. Per bassi valori di k le tensioni di taglio all'interfaccia non sono elevate a sufficienza per produrre un'apprezzabile crescita della giunzione. L'area reale di contatto è perciò data da W e dalla pressione statica di snervamento, allora la forza di taglio dell'interfaccia è

semplicemente quest'area moltiplicata la tensione critica di taglio dell'interfaccia.

Questo si osserva quando le superfici sono lubrificate con saponi metallici oppure si hanno film sottili di metallo più tenero. Una situazione diversa si ha quando questi film non hanno caratteristica di omogeneità ed uniformità. Quando le superfici sono inizialmente poste in contatto, il film superficiale può non danneggiarsi, ma se una tensione tangenziale è applicata, i film superficiali sono soggetti a distruzione. Ciò è osservato negli esperimenti di Courtney-Pratt e Eisner su superfici metalliche.

L'interfacce consistono in questo caso di un film di materiale con tensione critica di taglio pari ad s_j e di piccole giunzioni metalliche aventi tensione critica di taglio pari a s_m .

1.2.9 Osservazioni conclusive

Dalla teoria sviluppata da Bowden e Tabor si è visto che l'attrito che si genera sulle superfici è dovuto al taglio delle giunzioni che si formano nelle regioni dove si ha l'effettivo contatto. In realtà è possibile esplicitare quantitativamente i valori osservati dell'attrito in termini di durezza e resistenza della massa dei solidi, anche se in generale è difficile poter estrapolare i risultati ottenuti circa il comportamento ad attrito di giunzioni formatesi tra le superfici dei corpi a contatto.

Inizialmente le giunzioni sono collegate a sostanze molto grosse che possono imporre loro delle deformazioni. Successivamente le giunzioni sono soggette ad elevate tensioni di compressione mentre gli effetti prodotti dal taglio sono ancora incerti. Inoltre le giunzioni per la loro natura sono delle costrizioni e quindi sono esse stesse sorgenti di elevate concentrazioni di tensioni.

E' noto che i solidi fragili soggetti a pressione possono divenire più resistenti e più duttili (Bridgman, 1952) in quanto la compressione degli strati superficiali può sanare i difetti superficiali e le cricche. Quest'effetto può essere molto importante nel processo di attrito di molti solidi come il vetro e quarzo che sono normalmente deboli a taglio oppure a tensione.

Ad esempio King e Tabor (1954) nei loro esperimenti sull'attrito di detti materiali hanno dimostrato che la resistenza a taglio delle giunzioni nei punti di

contatto è molto alta ma è comunque apprezzabilmente inferiore rispetto a quella teorica del cristallo, tuttavia il risultato ottenuto da questo lavoro è che l'elevate pressioni locali nelle regioni di contatto possono cambiare le proprietà di resistenza dei solidi nelle loro vicinanze, inoltre i processi di deformazione in queste regioni sono complicati ulteriormente se c'è la presenza di film contaminanti.

In realtà, come già detto inizialmente, anche la teoria dell'adesione proposta da Bowden e Tabor non è rigorosa, infatti il coefficiente d'attrito assume valori che non concordano con quelli ottenibili dall'ultima relazione ricavata, attingendo valori molto maggiori o molto minori per effetto dello stato cinetico della superficie.

Valori sensibilmente più alti si verificano quando uno dei materiali a contatto è molto più duro dell'altro, per cui le asperità del primo si comportano come microutensili che solcano la superficie del secondo materiale (si veda usura abrasiva). Addirittura valori del coefficiente d'attrito maggiori dell'unità si riscontrano qualora il contatto si realizzi tra superfici ben levigate ed incontaminate che hanno notevole tendenza all'adesione.

Usualmente il coefficiente d'attrito assume valori minori di quelli espressi dalla precedente relazione essendo le superfici metalliche quasi sempre ricoperte da uno strato di ossido e/o da strati di molecole gassose adsorbite.

Naturalmente la presenza di lubrificante interposto tra le superfici, induce coefficienti d'attrito modesti potendosi avere valori prossimi a 0.1 in condizioni di lubrificazione limite, 0.001 e 0.01 in condizioni di lubrificazione fluidodinamica.

Infatti in condizioni di lubrificazione limite, gli strati molecolari adsorbiti dalle superfici, ostacolano la saldatura delle asperità deformate ovvero impediscono la crescita delle microgiunzioni riducendo, così, le forze d'attrito. In presenza di lubrificazione fluidodinamica, essendo garantita a regime, la completa separazione delle superfici reali dei corpi a contatto, l'attrito si manifesta all'interno del fluido dipendendo, sostanzialmente, dalla viscosità del fluido stesso.

Infine si possono enunciare altri fattori che influenzano il coefficiente d'attrito ma che non sono previsti dalla teoria di Bowden e Tabor, essi sono principalmente la velocità di strisciamento, la temperatura superficiale, che varia nel tempo

incrementandosi per la potenza dissipata in attrito, nonché i continui cambiamenti all'interfaccia tra i solidi in moto relativo, cioè variazioni della geometria superficiale e quindi della pressione di contatto. L'influenza di questi parametri o solo di alcuni di essi sul coefficiente d'attrito può essere, naturalmente, valutata solo attraverso idonee prove di laboratorio che simulino le reali condizioni di esercizio.

CAPITOLO II – L'USURA dei COMPOSITI a MATRICE POLIMERICA

2.1 I MATERIALI COMPOSITI

2.1.1 Introduzione

In periodi di rapida evoluzione tecnologica come quello in cui si vive le applicazioni più diverse nel campo aeronautico, civile, meccanico ed aerospaziale, richiedono continuamente materiali con caratteristiche fisico-meccaniche sempre migliori. Tali richieste sono divenute così stringenti che non esiste praticamente un solo materiale in grado di soddisfarle tutte.

La necessità di disporre di materiali sempre più sofisticati e l'evoluzione dei processi tecnologici hanno portato all'introduzione di una nuova generazione di materiali detti compositi che uniscono un'elevata resistenza e rigidità ad un peso contenuto oltre che buon comportamento a fatica e buona resistenza meccanica.

Il termine composito, di per se indica che il materiale è composto da più elementi diversi messi insieme sfruttando al meglio le proprietà di ognuno di essi per ottenere prestazioni indispensabili per i singoli componenti ottenendo così un effetto sinergico.

Si definisce composito un materiale artificiale formato dall'unione di due o più elementi diversi; i componenti di un composito non sono solubili l'uno nell'altro, ma restano divisi nel corpo del materiale da una superficie fisicamente identificabile.

In un composito sono così individuabili due componenti:

- il materiale di contenimento detto anche matrice;
- l'elemento di rinforzo fibroso e/o particellare.

Normalmente il rinforzo presenta alte caratteristiche meccaniche e ad esso è affidato il compito di sostenere il carico mentre la matrice serve a sostenere proteggere ed unire le fibre ed a trasmettere loro il carico, inoltre dà la forma al pezzo.

Il composito può essere classificato in base al tipo di fibra e quindi si dirà particellare se esso è costituito da particelle di piccole dimensioni e simili fra loro mentre si dirà fibroso se le fibre avranno una lunghezza molto grande rispetto alle dimensioni trasversali.

Il carico di rottura dipende dall'adesione delle due fasi: se l'interfaccia è resistente la rottura si può avere a carichi superiori al carico di rottura della matrice, altrimenti si può avere distacco delle particelle. Se ciò avviene, ogni particella diviene dal punto di vista meccanico, equivalente ad un vuoto, dando origine ad una riduzione di sezione resistente della matrice. La resistenza alla frattura è peggiore se l'adesione tra carica e matrice è forte e peggiora all'aumentare del fattore di forma delle particelle.

Un'altra classificazione può essere fatta in base al tipo di matrice e quindi si avranno:

- compositi a matrice plastica;
- compositi a matrice metallica;
- compositi a matrice ceramica.

L'idea di creare tali materiali non è originale, in quanto già esistenti in natura; ad esempio il bambù ha una struttura del tutto simile a quella di un composito fibroso; le ossa sono costituite da fibre resistenti e fragili (apatite) inglobate in una matrice duttile (collagene).

La storia dei compositi per uso tecnico è tuttavia molto recente ed il suo inizio si può ricondurre al 1940 quando, per esigenze belliche, fu messo a punto il primo tipo di vetroresina.

Il P.R.F.V. (Poliestere Rinforzato con Fibre di Vetro), comunemente chiamato "vetroresina" è un materiale composito a matrice termoindurente, stabilizzata agli U.V., all'interno del quale le fibre di vetro assicurano l'alta resistenza meccanica, la resina poliestere assicura la resistenza chimica.

La vetroresina presenta una compattezza ed una resistenza agli agenti chimici, biologici e naturali nettamente superiori al ferro, al calcestruzzo ed ai materiali termoplastici: non forma sfaldature, non rilascia liquame e non subisce deformazioni al variare della temperatura.

Per molti anni la vetroresina è stato l'unico composito commercialmente disponibile, solo alla fine degli anni 50 e metà anni 60 furono messe a punto

fibre di carbonio e di boro e nel '68 quelle di kevlar; le loro proprietà hanno aperto nuovi orizzonti nell'uso dei compositi per applicazioni strutturali.

2.1.2 Fibre

Le fibre [4] sono da considerarsi come il costituente di maggior importanza in un composito dal punto di vista delle proprietà meccaniche anche se influiscono su numerose altre caratteristiche. L'esteso successo che incontrano i compositi fibrosi dipende proprio dalla possibilità di disporre di fibre aventi non solo densità inferiore ai tradizionali materiali metallici, comprese le leghe leggere, ma anche resistenza e modulo elastico superiori al proprio materiale costitutivo in forma massiva e prossimi ai valori teoricamente previsti. Queste migliori proprietà derivano dal fatto che il processo di fabbricazione con cui si produce la fibra conferisce ad essa una struttura molto particolare rispetto al materiale massivo, riducendo anche i difetti superficiali consentendo di ottenere una perfezione strutturale fuori dal comune.

Sono attualmente in fase sperimentale molti tipi di fibre, ma solo poche di esse sono usate correntemente grazie al loro costo relativamente basso; quelle di vetro, che hanno dominato la scena dei compositi per molti anni, sono ancora oggi le più usate in assoluto. Nei settori a maggior contenuto tecnologico come l'industria aeronautica ed in quella aerospaziale, sono invece le fibre di carbonio che riscuotono il maggior successo.

Le fibre di boro, sebbene molto promettenti, presentano delle difficoltà, come il loro alto costo, che ne hanno limitato fino ad oggi la diffusione.

2.1.2.1 Fibre di vetro

Le fibre di vetro [5] rappresentano il tipo di rinforzo più diffuso nei compositi, soprattutto per l'elevata resistenza specifica rapportata al costo contenuto; altri pregi sono resistenza alla corrosione, eccellenti proprietà ottiche ed elettriche, buon isolamento termico ed acustico. Di contro, possiedono una resistenza a fatica ed un modulo elastico modesti.

La tecnologia di produzione di tali fibre di colore bianco è semplice; un caricatore alimenta un forno che contiene il bagno di fusione a temperatura

tipicamente pari a 1200÷1300°C sul cui fondo vi è una filiera sulla quale sono praticati un centinaio di fori di diametro opportuno. Un motorino rotante ad altissima velocità provvede alla trafilatura delle fibre. Prime di essere avvolte su di una bobina quest'ultime sono ricoperte da una guaina di materiale (sizing) il cui compito è quello di impedire il danneggiamento delle singole fibre nel reciproco contatto, di favorirne l'unione in un fascio e di permettere, all'atto dell'utilizzazione, una corretta adesione tra fibra e matrice. Variando la composizione del bagno di fusione variano le proprietà delle fibre. Commercialmente si hanno più tipologie di fibre di vetro con diverse proprietà. Il tipo di vetro più utilizzato è denominato "E" ed è composto da SiO₂, CaO, Mg, Be, Pb, di cui si riportano alcune proprietà della fibra.

Modulo elastico E [MPa]	Resist. a trazione σ_r [MPa]	Massa volumica P [g/cm³]	Resist. specifica σ_r/ρ [m²/s²]	Modulo specifico E/ρ [m²/s²]
410000	3500	2,60	1,35	158

Tabella 2.1 - Caratteristiche meccaniche delle fibre di vetro

Esistono altri tipi di vetro come quello "M" che presenta modulo di Young molto elevato e pari a 110000 N/mm², quello "S" che presenta un incremento del 30% delle caratteristiche di elasticità rispetto al vetro "E" ed infine il vetro "R" che presenta a 400 °C una resistenza pari a quella del vetro "E" a temperatura ambiente; inoltre si citano anche i vetri tipo "A", "C" e "D" di minore rilievo.

2.1.2.2 Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio o di grafite [5] sono state introdotte a metà degli anni '60 per soddisfare le esigenze dell'industria aerospaziale, che richiedeva fibre aventi proprietà analoghe ma modulo superiore a quelle di vetro, senza badare al maggior costo. Si presentano di colore nero brillante e sono ottenute grafitizzando in atmosfera inerte ad oltre 2000 °C fibre organiche tessili di rayon o poliacrilonitrile. Durante tale fase le fibre sono sottoposte a trazione e maggiore è la trazione più alto risulterà il modulo elastico del prodotto. In

relazione alle principali proprietà meccaniche le fibre di carbonio sono contrassegnate dalle sigle "C1", "C2" e "C3" o con terminologia anglosassone rispettivamente "HM" ("high modulus" alto modulo), "IM" ("intermediate modulus" modulo intermedio) e "HT" ("high tensile strength" alta resistenza a trazione).

Rispetto alle fibre di vetro hanno i seguenti vantaggi:

- massa volumica bassa;
- modulo elastico molto alto;
- basso coefficiente di dilatazione termica;

Per contro hanno però un costo elevato.

Le proprietà di tali fibre sono di seguito riportate:

Proprietà Tipo	Modulo elastico E [MPa]	Resist. a trazione σ_r [MPa]	Massa volumica ρ [g/cm ³]	Resist. Specif. σ_r/ρ [m ² /s ²]	Modulo specif. E/ ρ [m ² /s ²]
C1	380000	1900	1,85	1,10	205
C2	250000	2480	1,78	1,39	140
C3	210000	2700	1,78	1,30	128

Tabella 2.2 - Caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio

Per quanto riguarda le fibre del tipo "IM" sono quelle più recenti ed hanno resistenza simile alle "HT" nonché valore del modulo intermedio tra i due precedenti.

2.1.2.3 Fibre organiche

Altre fibre sintetiche organiche sono le cosiddette fibre polimeriche ad alto modulo (FPHM), di cui sono esempi quelle di polietilene ad alto modulo, aramidiche, copoliestere termotropico, polibutilene tereftalico.

Dal 1972 è disponibile un nuovo ed interessantissimo tipo di fibra organica dal nome commerciale di Kevlar. Tale fibra, la cui composizione ed il processo produttivo non sono del tutto noti, presenta le proprietà seguenti:

Modulo elastico E [MPa]	Resist. a trazione σ_r [MPa]	Massa volumica ρ [g/cm³]	Allungamento a rottura [%]	Coeff. di dilatazione termica α [10⁻⁶/°C]
130000	2700	1,45	2,10	2,0

Tabella 2.3 - Caratteristiche meccaniche delle fibre organiche, note con il nome di Kevlar.

Dal confronto delle proprietà con quelle di carbonio e di vetro, si possono notare i vantaggi di tali fibre di colore giallo riassunti in massa volumetrica bassa, buona resistenza a trazione e modulo elastico meno elevato di quello del carbonio ma più alto del vetro ed inoltre il costo le rende competitive rispetto a quelle in carbonio. Gli svantaggi si possono riassumere in un rapido calo delle proprietà meccaniche all'aumentare della temperatura d'esercizio dovuto alla natura organica delle stesse e ad una resistenza a compressione di circa un quarto inferiore a quella a trazione.

2.1.2.4 Formati commerciali

Le fibre utilizzate nei compositi si possono trovare in commercio sottoforma di rovings, mat, tessuto [5]. Il roving è costituito da un gruppo di fibre continue ed essenzialmente parallele avvolte in bobine. Si distinguono in base al titolo cioè al peso espresso in gr per unità di km. Se si dispongono in un piano con orientazione casuale delle fibre tagliate si ottiene un mat; in esso le fibre sono tenute insieme da un opportuno legante in tal modo il prodotto acquista la compattezza di un feltro e può essere facilmente maneggiato. I tipi commerciali sono due, a fibre corte ed unifilo ed inoltre sono diversificati in base al loro peso per unità di superficie che normalmente varia fra i 40 gr/m² e gli 800 gr/m². Come per le fibre tessili le fibre dei compositi possono essere tessute intrecciando i rovings secondo una configurazione trama-ordito. In tal modo si ottengono i tessuti che sono caratterizzati dal peso per unità di superficie e dal

numero di rovings per unità di lunghezza sia nella direzione dell'ordito (longitudinale) che in quella delle trame (trasversale).

Per ottenere migliori proprietà meccaniche dal composito è necessario che il legame di adesione fra matrice e fibra sia efficiente e per favorire tale adesione vengono impiegati degli appretti che sono sostanze chimiche che consentono di realizzare un legame perfetto tra i due componenti del composito.

In molte applicazioni, invece di utilizzare come materiale di partenza resine e fibre separatamente, si preferisce lavorare con i preimpregnati (prepregs). Questi sono costituiti da fibre preimpregnate di resina ad uno stato di prepolimerizzazione; in tale resina è già presente l'indurente, per cui per completare la polimerizzazione necessitano solo dell'energia fornita dal riscaldamento. Sono disponibili con percentuali di impregnazione variabili fino al 45% di resina, sia sotto forma di unidirezionali e sia di tessuti.

Il materiale viene fornito in rotoli sigillati di varia lunghezza, con un film distaccante di polietilene che riveste entrambi i lati del tessuto, vanno conservati in celle frigorifere.

Il materiale deve essere tagliato nella forma desiderata con forbici o taglierine prima di rimuovere i film protettivi, una volta fatto ciò strati successivi di materiale possono essere sovrapposti fino a raggiungere lo spessore desiderato.

I vantaggi che l'uso dei preimpregnati può offrire sono diversi; migliori caratteristiche meccaniche dei laminati ottenuti, maggiore controllo del peso finale, assenza di zone povere o ricche di resina, pulizia della lavorazione, miglioramento delle condizioni di sicurezza del lavoro.

2.1.3 Matrici

Nonostante l'alto valore della resistenza e del modulo elastico, le fibre non avrebbero importanza se non fosse possibile dare al pezzo da progettare una forma stabile. A questa funzione provvede la matrice [4] che, inglobando le fibre, assume nello stesso tempo il compito di dare la forma al pezzo e proteggere le fibre stesse dall'ambiente esterno. Come già detto si distinguono matrici plastiche, metalliche e ceramiche.

2.1.3.1 Matrici plastiche

Una matrice plastica può essere costituita da una resina termoindurente o termoplastica. Le resine termoindurenti presentano una struttura tale che innalzando la temperatura oltre un certo limite si degradano in maniera irreversibile, quindi dopo polimerizzazione non possono essere portate allo stato liquido; quelle termoplastiche invece, all'aumentare della temperatura diventano più fluide, ma una volta raffreddate riacquistano tutte le loro proprietà e quindi presentano il vantaggio di poter essere rimodellate anche dopo la polimerizzazione. Il diverso comportamento è dovuto alla struttura delle molecole polimeriche e precisamente alla distribuzione spaziale dei monomeri di diverso tipo ed al grado di cristallinità. L'applicazione dei termoplastici è ostacolata dalle basse temperature di esercizio e quindi vengono utilizzati per ottenere in maniera semplice e veloce geometrie anche complesse, mentre i termoindurenti possono essere impiegati in un vasto range di temperature.

Sebbene sia opinione di molti che il futuro riservi un ruolo di primo piano ai compositi a matrice termoplastica, molto lavoro dovrà essere fatto prima che quest'ultimi trovino un impiego estensivo in campo strutturale. Le matrici plastiche (resine) di tipo termoindurente più importanti sono le poliestere, epossidiche, fenoliche e siliconiche.

Le matrici termoindurenti normalmente usate nel campo dei compositi, si presentano, prima della messa in opera, sotto forma di liquido più o meno viscoso. In tali condizioni esse non hanno ancora subito reticolazione, affinché quest'ultima inizi si aggiungono al polimero degli opportuni agenti che sono detti catalizzatori nel caso di matrici poliestere, induritori o indurenti negli altri casi. Il tempo occorrente per la reticolazione può essere regolato mediante l'aggiunta di acceleranti o inibitori. A parità di composto tale tempo è però nettamente influenzato dalla temperatura, diminuendo al crescere di essa.

Agendo opportunamente sulla quantità e sul tipo di catalizzatori, induritori, acceleranti ed inibitori, si possono ottenere a seconda delle necessità matrici con tempi di polimerizzazione molto brevi (pochi minuti) anche a temperatura ambiente o viceversa molto lunghi (diverse ore) ad alta temperatura.

2.1.3.2 Resine poliestere

Vengono prodotte a partire da un glicole ed un acido i quali vengono mescolati all'interno di un opportuno reattore chimico, e producono, attraverso un processo di polimerizzazione a passi, un polimero che si trova nello stato di liquido molto viscoso. La viscosità viene abbassata aggiungendo appropriate quantità di monomero. Viene aggiunto al composto anche un inibitore per prevenire una ulteriore polimerizzazione. Così il composto rimane stabile per mesi od anni. Presentano buone caratteristiche, basso costo, sono facilmente lavorabili, induriscono a temperatura ambiente. Grazie alla loro facile e veloce reticolazione, che riduce notevolmente i costi delle tecnologie di produzione, queste resine sono largamente usate nel campo della nautica da diporto e dell'edilizia. In queste applicazioni sono impiegate prevalentemente in unione con fibre di vetro.

2.1.3.3 Resine epossidiche

Vengono prodotte attraverso una reazione di policondensazione tra l'epicloroidrina ed il defenilpropano. Si utilizza un eccesso di epicloroidrina in modo da assicurare la presenza di gruppi epossidici ad entrambi gli estremi del polimero a bassa massa molecolare. In base al peso molecolare questo polimero è un liquido viscoso od un solido fragile. Le resine epossidiche subiscono i processi di cura in presenza di innumerevoli materiali tra cui le poliammide, fend-formaldeide, urea-formaldeide, acidi ed anidridi acide. Le reazioni che hanno luogo possono essere di accoppiamento o di condensazione.

Queste resine presentano proprietà migliori rispetto alle poliestere in particolare presentano un buon allungamento a rottura, fattore questo importantissimo per le proprietà meccaniche dei compositi. Per contro presentano un costo superiore ed una messa in opera più laboriosa rispetto alle poliestere, per questi motivi le resine epossidiche sono utilizzate soprattutto nei campi tecnologicamente più avanzati come quelli aeronautici, aerospaziali e sportivi.

2.1.3.4 Resine fenoliche

Si sono affermate soprattutto per la buona capacità di resistenza a temperature elevate (fino a 250 °C). Per questa loro caratteristica sono usate estensivamente nell'industria aerospaziale, in quella elettronica ed in quella automobilistica.

2.1.3.5 Resine silconiche

Queste resine sono costituite da polimeri inorganici, ciò consente una notevole resistenza in campi di temperatura impensabili per i polimeri organici sebbene quest'ultimi presentino a temperatura ambiente delle proprietà più elevate. Le resine silconiche hanno reso possibile l'uso strutturale dei compositi per temperature fino a 450 °C ÷ 500 °C; sono quindi impiegate soprattutto per scopi elettrici ed in parti di velivoli supersonici.

Il tipo di matrice ha scarsa influenza sulle proprietà meccaniche e statiche del composito nella direzione delle fibre. La matrice è però il componente a diretto contatto con l'ambiente in cui il composito deve lavorare e ne determina pertanto :

- la resistenza alla corrosione;
- la resistenza al calore;
- la resistenza all'abrasione.

In tutte le applicazioni (contenitori di liquidi corrosivi o di prodotti alimentari, parti automobilistiche, ecc.) in cui queste proprietà sono richieste, assume una grande importanza la ricerca del giusto tipo di resina. Di seguito si riportano le proprietà delle principali matrici termoindurenti.

Tipo di matrice	Modulo elastico E [MPa]	Resist. a trazione σ_r [MPa]	Massa volumica ρ [g/cm ³]	Allungam. a rottura [%]	Coeff. di dilat. termica α [10 ⁻⁶ /°C]

Poliestere	4900	70	1,22	1,8	60
Epossidica	3800	70	1,20	2,9	60
Fenolica	7500	45	1,39	0,6	/
Siliconica	5000	25	1,90	0,5	/

Tabella 2.4 - Caratteristiche meccaniche delle diverse matrici plastiche.

2.1.3.6 Matrici metalliche

Questo tipo di matrice può essere utilizzato a temperature più elevate rispetto ai compositi plastici. La temperatura dipende dal tipo di metallo che funge da matrice ed è comunque superiore a quella alla quale, a parità di condizioni, il metallo da solo può essere adoperato. La temperatura massima è quella di scorrimento viscoso (deformazione sotto carico costante) oltre la quale la matrice non è più in grado di trasmettere il carico alle fibre.

Nell'ottica della massima riduzione di peso la matrice metallica più utilizzata è quella in lega di alluminio nonostante la temperatura di esercizio non possa essere molto elevata.

Si sono inoltre studiati compositi con matrici a base di rame, nichel, titanio e magnesio. Il limite maggiore di questo tipo di matrici consiste nel pericolo di reazioni chimiche con le fibre con conseguente degradazione delle proprietà meccaniche ottenibili.

2.1.3.7 Matrici ceramiche

I compositi con matrice ceramica sono quelli più promettenti sotto il profilo delle proprietà meccaniche e della resistenza alle alte temperature. Attualmente sono scarsamente utilizzati a causa della tecnologia poco avanzata ed in particolar modo della difficoltà di distribuire uniformemente le fibre nella matrice ed eliminare le porosità al suo interno. Le matrici finora utilizzate sono essenzialmente ossidi di alluminio e silicio (Al_2O_3 , SiO_2).

2.1.4 Compositi particellari

Un materiale composito è, nella sua accezione più generale, qualunque tipo di materiale non presente in natura, caratterizzato da una struttura non omogenea, costituita dall'insieme di due o più sostanze diverse, fisicamente separate da un'interfaccia e dotate di proprietà differenti. I singoli materiali che formano i compositi sono chiamati costituenti: matrice e il rinforzo.

Il rinforzo è di solito molto più rigido della matrice e dà al composito le caratteristiche per il quale è conosciuto; per tipologie di rinforzo sotto forma di particelle sciolte, si parla di Compositi Particellari.

Le cariche particellari vengono spesso aggiunte a matrici polimeriche sia termoplastiche che termoindurenti. In questo modo si raggiungono alcuni obiettivi come una certa diminuzione dei costi e un aumento della rigidità; contemporaneamente si ha il peggioramento di alcune proprietà meccaniche come la resistenza allo snervamento e alla rottura e la resistenza alla frattura.

Le proprietà meccaniche sono determinate da alcuni parametri come :

- la frazione volumetrica delle cariche particellari;
- il loro rapporto di forma (rapporto tra dimensione massima e minima);
- il rapporto tra il modulo elastico delle cariche e quello della matrice.

2.1.5 Tecnologie di fabbricazione dei compositi a matrice plastica

Le tecnologie di produzione [5] di elementi in composito con matrice plastica variano secondo la forma, dimensione e proprietà richieste al pezzo finito.

Sebbene siano stati sviluppati diversi metodi di fabbricazione è possibile individuare le operazioni fondamentali comuni a tutte le tecnologie:

- 1) preparazione dello stampo;
- 2) disposizione del rinforzo;
- 3) disposizione della resina;
- 4) compattazione;
- 5) estrazione del pezzo.

Le operazioni elencate possono essere effettuate in differenti modi, secondo le diverse tecniche e con l'impiego di diversi materiali e macchinari secondo le caratteristiche dei particolari da realizzare, del numero di pezzi e dei costi.

Le tecnologie di fabbricazione possono essere distinte in tecnologie in cui si impiegano stampi aperti e quelle in cui si impiegano stampi chiusi, ancora le tecnologie possono essere suddivise in discontinue o continue ed in manuali o automatizzate.

Nei processi a stampo aperto lo stampo, concavo o convesso, è costituito da un solo pezzo, il prodotto è quindi a contatto con la superficie dello stampo soltanto su una faccia, solo questa avrà una finitura controllata dei particolari alla fine del processo. Questi processi sono gli unici che si prestano alla fabbricazione di pezzi di grandi dimensioni.

I processi a stampo chiuso prevedono uno stampo costituito da due parti, un maschio ed una femmina, sono indispensabili quando occorre una buona finitura superficiale su tutte le facce del prodotto.

Fra i processi a stampo aperto si annoverano:

- Formatura per contatto a mano (Hand lay-up)
- Formatura per contatto a spruzzo (Spray lay-up)
- Centrifugal casting (Formatura per centrifugazione)

Fra i processi a stampo chiuso si annoverano:

- Sacco a vuoto (Vacuum bag)
- Sacco a vuoto in autoclave
- Sacco in pressione (Pressure bag)
- Stampaggio ad iniezione
- Stampaggio fra stampi accoppiati
- Pultrusione

Nel seguito si procederà ad una sintetica illustrazione di alcuni dei processi sopra elencati.

2.1.5.1 Formatura per contatto a mano

E' uno dei metodi più vecchi e semplici di combinare fibre con una resina per formare una struttura, è adatta per fibre continue unidirezionali o sminuzzate e per MAT o tessuti.

La tecnica (fig. 1.1) consiste nel posizionare un primo strato di fibre in uno stampo dopo aver applicato il distaccante, normalmente una cera, e versare la resina liquida miscelata al catalizzatore sulle fibre.

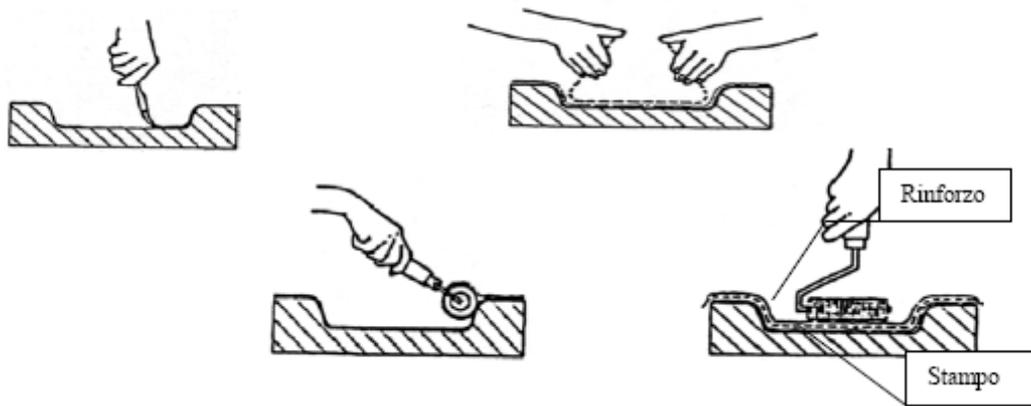


Figura 2.1 - Formatura per contatto a mano.

L'operazione di impregnazione è eseguita manualmente con rulli o pennelli ed è seguita da un'accurata rullatura che serve a compattare il materiale e ad eliminare le bolle d'aria in esso intrappolate. Si procede poi a posizionare un altro strato e si eseguono le stesse operazioni descritte in precedenza. La polimerizzazione avviene generalmente a temperatura ambiente. Per ottenere superfici di migliore qualità si usa spesso rivestire lo stampo con resine dette "gel coats" che possono essere anche colorate e costituiscono lo strato esterno del manufatto.

La formatura per contatto a mano non richiede attrezzature costose, gli stampi non sono sottoposti a grosse sollecitazioni meccaniche, per cui possono essere costruiti in gesso, legno o vetroresina, oltre che in metallo. D'altra parte questo metodo è essenzialmente manuale e la qualità del prodotto finito dipende dalla perizia dell'operatore.

2.1.5.2 Formatura per contatto a spruzzo

Nella formatura per contatto a spruzzo (fig. 1.2) gli strati di fibre corte disposte in modo casuale vengono ottenuti mediante un'apposita pistola che, alimentata con roving, resina e catalizzatore, provvede a:

- tagliare i roving in fibre corte di lunghezza desiderata;
- mescolare la resina ed il catalizzatore;
- spruzzare le fibre e la resina catalizzata sullo stampo.

L'operazione di spruzzo è seguita da una rullatura manuale dello strato ottenuto. La formatura a spruzzo costituisce uno stato di parziale meccanizzazione del processo di formatura manuale, essa consente perciò una riduzione dei costi di lavorazione. Inoltre permette di utilizzare roving invece del più costoso mat. D'altra parte a questi vantaggi si oppone un maggior costo degli impianti, complicati dalla presenza della pistola, e una maggiore difficoltà nel controllo degli spessori.

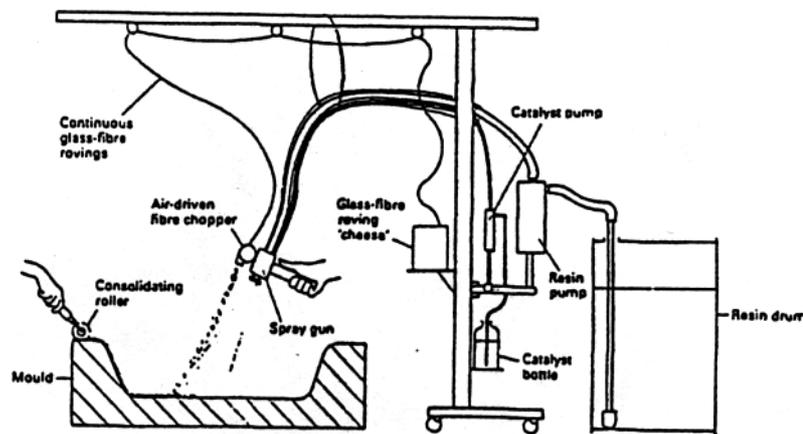


Figura 2.2 - Formatura per contatto a spruzzo.

2.1.5.3 Centrifugal casting

La tecnica mostrata in figura 1.3 è usata per produrre articoli cavi e conferisce all'esterno una superficie modellata. Le fibre e la matrice sono riposte all'interno di uno stampo cilindrico (rotative mould) che è fatto ruotare ad alta velocità. L'accelerazione centrifuga forza i materiali contro la superficie dello stampo, espellendo l'aria e consolidando la lamina. Il rinforzo, essendo più denso, tende a muoversi verso la superficie esterna, mentre la superficie interna diviene ricca di resina.

Per forme diverse da quelle cilindriche quest'effetto tende a ridurre lo spessore nei punti più vicini all'asse di rotazione e ad accrescerlo nei punti più lontani. Dove è richiesto solo un rinforzo di chop (fibre tagliate), una pistola a spruzzo,

che si muove lungo l'asse di rotazione, applica contemporaneamente in modo efficace matrice e fibre.

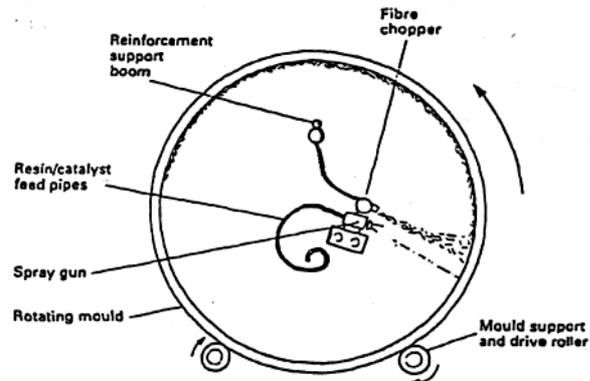


Figura 2.3 - Centrifugal casting.

Il costo delle attrezzature richieste per la formatura è piuttosto elevato. Il sistema consente di ottenere tubi, serbatoi, pali per l'illuminazione stradale e cavi telefonici ed è quasi completamente automatizzato richiedendo perciò un minimo impiego di manodopera.

2.1.5.4 Formatura con sacco sotto vuoto

In questo tipo di lavorazione (fig. 1.4) lo stratificato non polimerizzato, ottenuto con i metodi della formatura per contatto, viene ricoperto con un foglio di materiale plastico (polietilene, gomma, alcool polivinilico), detto sacco, che viene sigillato lungo il perimetro. Attraverso dei condotti lo stratificato viene collegato ad una pompa che crea il vuoto. A causa della differenza di pressione fra l'ambiente interno al sacco e l'atmosfera, il prodotto viene sottoposto ad uno sforzo di compressione distribuito sulla superficie. Il vuoto viene mantenuto durante l'intera fase di polimerizzazione.

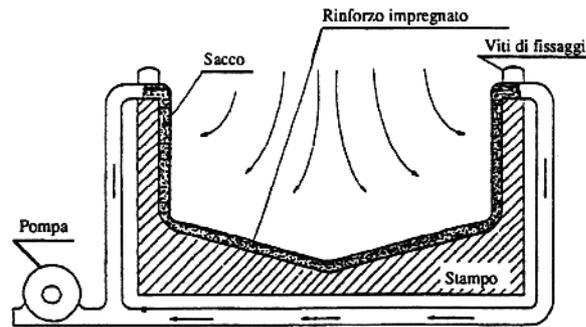


Figura 2.4 - Formatura con sacco sotto vuoto.

La formatura sotto vuoto presenta i seguenti vantaggi rispetto a quella per contatto:

- 1) riduce la percentuale di bolle d'aria nel manufatto a causa della pressione applicata;
- 2) migliora la finitura delle superfici non a contatto con lo stampo;
- 3) permette di ottenere prodotti con più alte percentuali di fibre dato che una parte della resina in eccesso viene forzata dalla pressione ad abbandonare il manufatto. Per contro il tempo impiegato dall'operazione aumenta per la necessità di confezionare il sacco e le attrezzature richieste, comportando un maggior costo d'impianto.

2.1.6 Laminati

Un composito è formato da LAMINE. Ogni lamina (fig. 1.8) è composta da fibre e matrice, dove le fibre possono essere continue o discontinue. Se la loro lunghezza è minore di una certa lunghezza critica $l < l_c$, si parla di fibre corte, altrimenti si parlerà di fibre lunghe.

Più lamine sovrapposte costituiscono un LAMINATO, cioè la sovrapposizione di più lamine costituite da fibre unidirezionali. Per ottenere un laminato con desiderate proprietà di resistenza e rigidità si realizzano una serie di lamine ognuna delle quali ha i filamenti con orientazioni diverse.

Una lamina monodirezionale ha un comportamento anisotropo ossia proprietà differenti nelle due direzioni, mentre una lamina con fibre pluridirezionali ha comportamento isotropo.

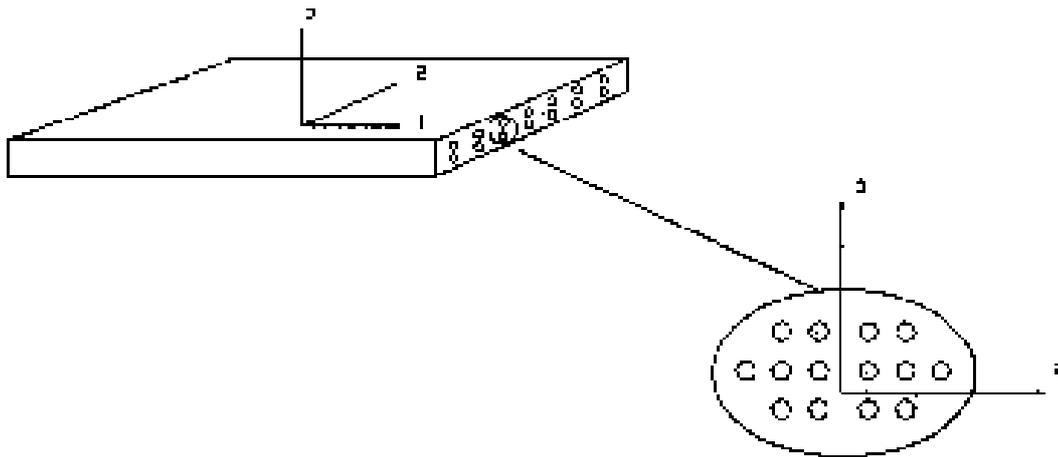


Figura 2.5 – Lamina e dettaglio della disposizione delle fibre.

Il laminato sarà costituito da una serie di lamine anisotrope ognuna individuabile dall'angolo θ che le sue fibre formano con la direzione dello sforzo, tale angolo è detto angolo di laminazione.

In teoria le lamine sovrapposte, o sequenza di laminazione, potrebbero assumere un qualsiasi angolo di laminazione. In pratica, invece, per tutta una serie di inconvenienti, il laminato progettato è equilibrato, vale a dire contemporaneamente simmetrico e bilanciato.

È simmetrico quando la sequenza di lamine è esattamente speculare rispetto all'asse neutro. La simmetria vale anche nel caso di un numero di lamine dispari.

Se non si adottasse questo accorgimento esso svergolerebbe anche in seguito ad un semplice sforzo di trazione come se fossero applicati momenti torcenti e flettenti e questo a causa della diversa rigidità delle lamine. Nascendo inoltre una sollecitazione in direzione ortogonale alla superficie delle lamine, dove la resistenza è bassissima, si potrebbe avere delaminazione proprio all'interfaccia delle varie lamine con conseguente loro distacco. Tuttavia disponendo le lamine in tal modo, all'applicazione del carico le fibre tenderebbero a ruotare, si ricorre pertanto al bilanciamento.

Il laminato è costruito in maniera bilanciata quando ad una lamina orientata a $+\theta$ viene accoppiata una a $-\theta$.

Il bilanciamento fa sì che la rotazione avvenga su due piani opposti in modo che i momenti di rotazione si equilibrino. È chiaro che lamine orientate a 0° e 90° sono automaticamente bilanciate.

Un laminato in genere non è isotropo in quanto non lo sono le lamine che lo compongono, è però possibile costruire una particolare classe di laminati detti “*quasi isotropi*” che presentano, approssimativamente le stesse proprietà nel piano. Ad un simile risultato si perviene all'aumentare del numero di lamine con orientazioni diverse.

2.2 L'USURA DI MATERIALI COMPOSITI

2.2.1 Introduzione

Qualunque siano le condizioni di contatto tra materiali compositi, l'elemento di primo contatto è in genere la matrice; viste le proprietà delle matrici, di cui al precedente capitolo, ci si trova spesso in condizioni severe di asportazione di materiale da parte di corpi esterni, che si comportano come taglienti.

E' questo il fenomeno più distruttivo, che produce in breve tempo un esteso consumo del materiale. Si verifica quando la superficie del materiale è tribologicamente sollecitata da controparti minerali dure e aguzze o quando materiali relativamente morbidi scorrono lungo controparti metalliche ruvide.

Il meccanismo di usura, in particolare per i materiali compositi, si può manifestare con modalità di: *microsolcatura* (accompagnata da elevata deformazione plastica), *microtaglio*, *microfrattura*. (fig. 2.6).

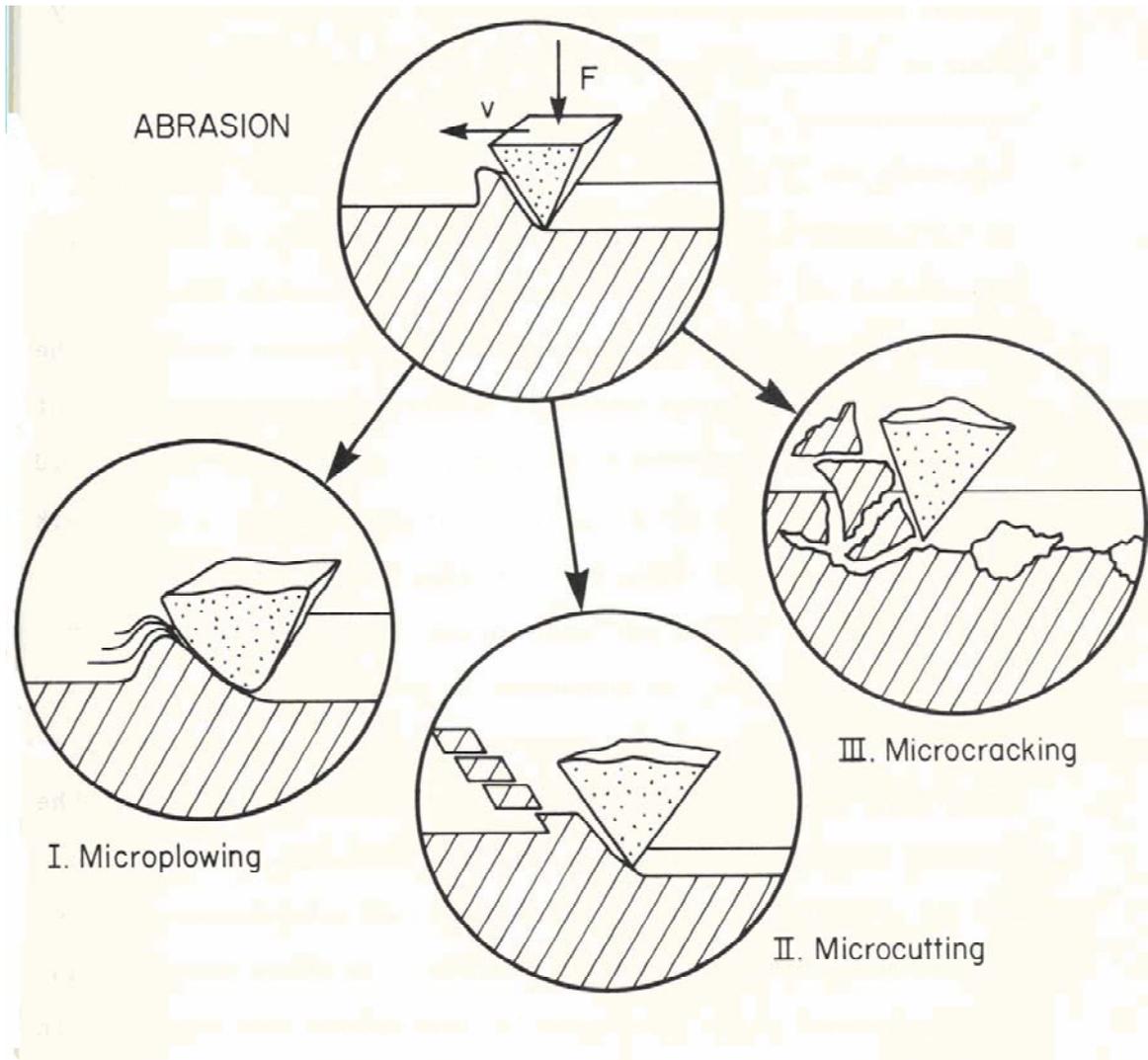


Figura 2.6 - Tre micromeccanismi di asportazione di materiale durante l'usura abrasiva

I primi due meccanismi determinano la formazione di solchi longitudinali nella direzione dello scorrimento; la quantità di materiale abraso si riduce in relazione alla sua durezza ed alla resistenza alla deformazione plastica.

La *microfratturazione* si verifica solo per materiali relativamente fragili ed è preceduta dallo sviluppo di fratture localizzate sulla superficie abrasa, che si propagano fino al distacco completo di particolari e senza rilevante deformazione plastica; la quantità di materiale perduto si riduce nelle sostanze con elevata resilienza.

2.2.2 Parametri caratteristici nella valutazione dell'usura abrasiva

Un primo modello analitico del problema fu impostato da Archard, con una relazione del tipo:

$$\frac{dy}{dx} = k * \frac{p}{H} \quad [2-1]$$

in cui (figura 2.7):

- dy è la profondità dell'asportazione causata dallo scorrimento
- dx è la lunghezza dello scorrimento
- p è la pressione normale fra le facce a contatto
- H è la durezza del materiale che si consuma
- k è una costante adimensionale che esprime la probabilità che il contatto in movimento fra e due superfici dia luogo a consumo del materiale.

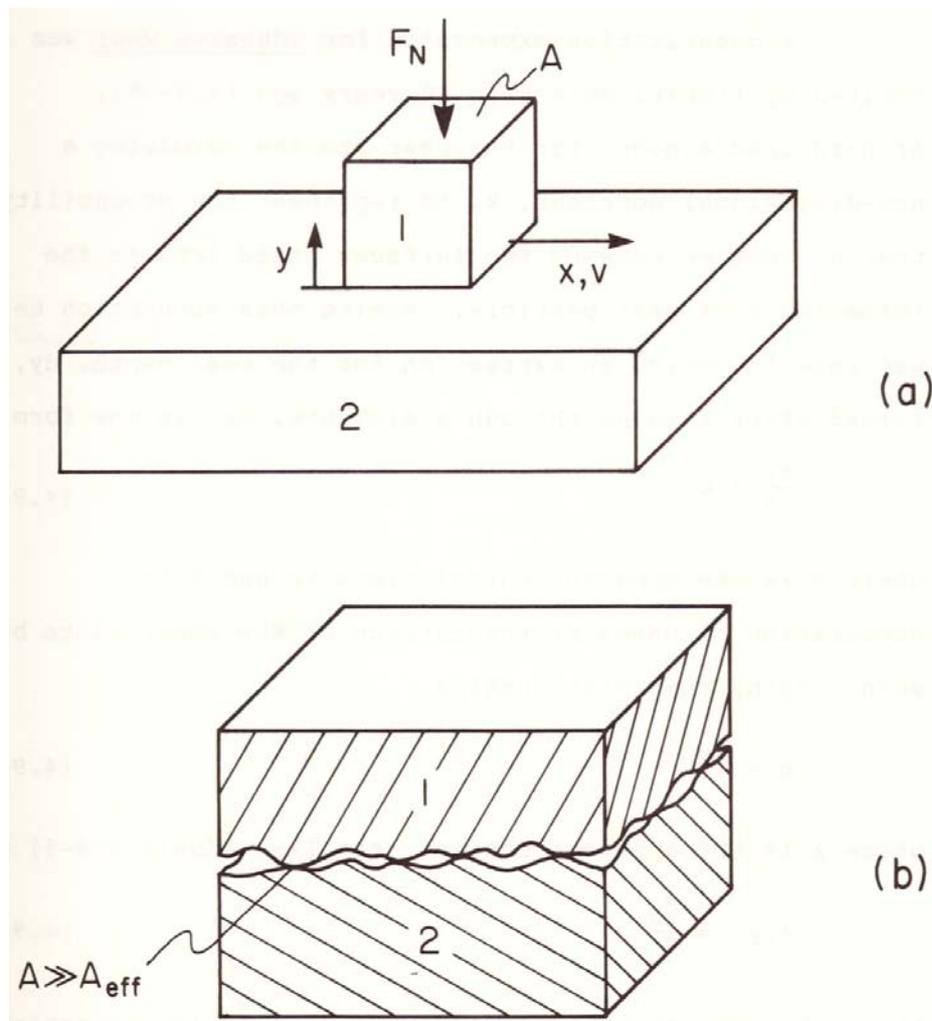


Figura 2.7 (a) schematizzazione di alcuni parametri dell'usura esterna
 (b) confronto fra le aree di contatto apparente ed effettiva

Esprimendo p in funzione della forza normale F_n e dell'area *apparente* di contatto A , e considerando l'area *effettiva* di contatto fra le superfici A_{eff} (A_{eff} cresce all'aumentare della durezza e al diminuire della forza normale: $A_{eff} \propto F_n / H$),

la [2-1] fornisce (con mutato valore di k):

$$\frac{dy}{dx} = k * \frac{A_{eff}}{A} \quad [2-2]$$

Tutti i parametri della [2-2] sono definiti, tranne k , il cui valore dipende dalla chimica delle superfici dalle forze che nascono nel contatto, ma anche – per la maggior parte dei materiali – dalla natura di questi e dalla presenza di lubrificanti o altre sostanze contaminanti fra le superfici.

Ulteriori considerazioni si possono svolgere, separando nell'analisi le proprietà del materiale dalle condizioni di prova o funzionamento, col porre la [2-1] nella forma:

$$w = \frac{\Delta V}{A * L} \quad [2-3a]$$

dove:

- w_a (adimensionale) definisce la misura del consumo di materiale; il suo reciproco w^{-1} si può considerare la resistenza del materiale all'usura
- $A \, dy$ [mm^3] rappresenta il volume di materiale consumato ($A \, dy \rightarrow \Delta V$)
- $dx \rightarrow L$: lunghezza dello scorrimento [m].

Si possono anche introdurre la massa di materiale perduto Δm e la massa specifica ρ del materiale, con il che la [2-3a] diviene:

$$w = \frac{\Delta m}{A * L * \rho} \quad [2-3b]$$

A w si può associare il suo valore specifico w_s :

$$w_s = \frac{w}{p} \quad [2-3c] \text{ e}$$

$$w_s = \frac{\Delta V}{F_n * L} \quad [2-3d]$$

Le relazioni [2-3a] e [2-3b] esprimono così l'usura in relazione alle proprietà del materiale e le [2-3c] e [2-3d] in funzione delle condizioni dei test.

L'usura specifica w_s ha (cfr. [2-3b]) le dimensioni del reciproco di un lavoro, ma è fisicamente più significativo esprimerla, come secondo la [2-3a], in [mm^3/Nm].

Assumendo ora di operare in condizioni di usura stazionaria, nelle quali inoltre un cambiamento della velocità v di scorrimento non influenzi gli altri parametri, segnatamente la temperatura delle superfici nella durata t del test, essendo $L = vt$, si ha:

$$w_s = \frac{\Delta V}{A * t * (pv)} \quad [2-3d]$$

La [2-3d] mostra l'influenza di un un fattore pv ampiamente trattato nella letteratura della materia, dove viene impiegato con due significati:

- un valore limite oltre il quale l'usura cresce rapidamente in conseguenza di effetti termici o dell'avvicinarsi al limite di elasticità;
- un fattore prefissato nel funzionamento continuativo ad uno specificato valore dell'usura.

Comunque non si può assumere il fattore pv come unico criterio di valutazione per il comportamento del materiale, dal momento che l'ipotesi che i cambiamenti di v non influenzino gli altri parametri è valida solo per un limitato range di valori di p e v .

La figura 2.8, curva A, mostra la relazione fra p e v per valori costanti dell'usura e si nota una proporzionalità inversa, vale a dire una costanza del fattore pv solo per il range centrale dei valori di p e v .

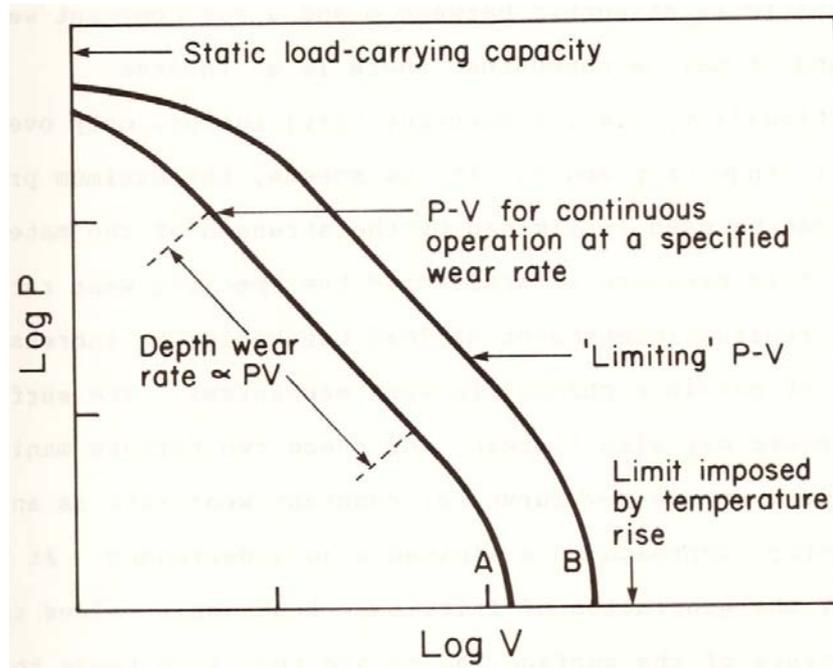


Figura 2.8 - Relazione tra p e v per i compositi utilizzati nelle applicazioni con carico a secco.

La curva B mostra il comportamento in corrispondenza del valore limite di p_v : l'andamento è lo stesso, ma la curva trasla verso valori più alti di p e v , l'entità dello spostamento dipende dalla natura del materiale.

La figura 2.9 mostra le variazioni della coppia di attrito e della temperatura in una prova di determinazione del valore limite di p_v , per un materiale composito a matrice di polimeri.

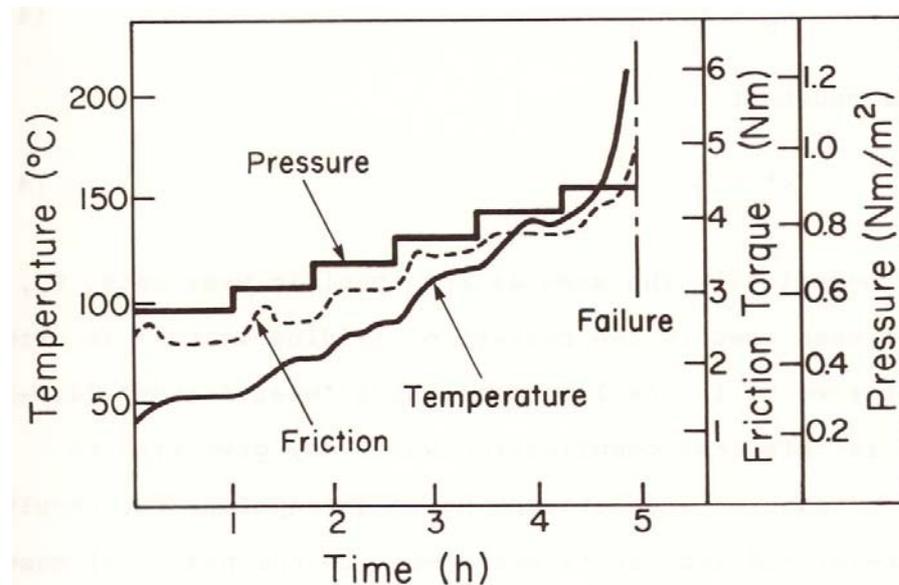


Figura 2.9 - Variazione tipica della coppia di attrito e della temperatura durante la determinazione del valore limite p-v per un materiale composito a matrice polimerica

Dalle [2-1] e [2-3a] si ricava:

$$w = \frac{k * p}{H} \text{ e } w_c = \frac{w}{p} = \frac{k}{H} \quad [2-4]$$

L'usura specifica è dunque legata alla durezza e dipende perciò da un complesso di proprietà meccaniche del materiale, quali il carico massimo, il carico di rottura a trazione, l'allungamento percentuale a trazione, il coefficiente di resilienza.

I due ultimi parametri rivestono particolare importanza quando al meccanismo di adesione si unisce quello dell'abrasione. In questo caso la dipendenza del consumo di materiale dalla durezza è meno chiaramente definito.

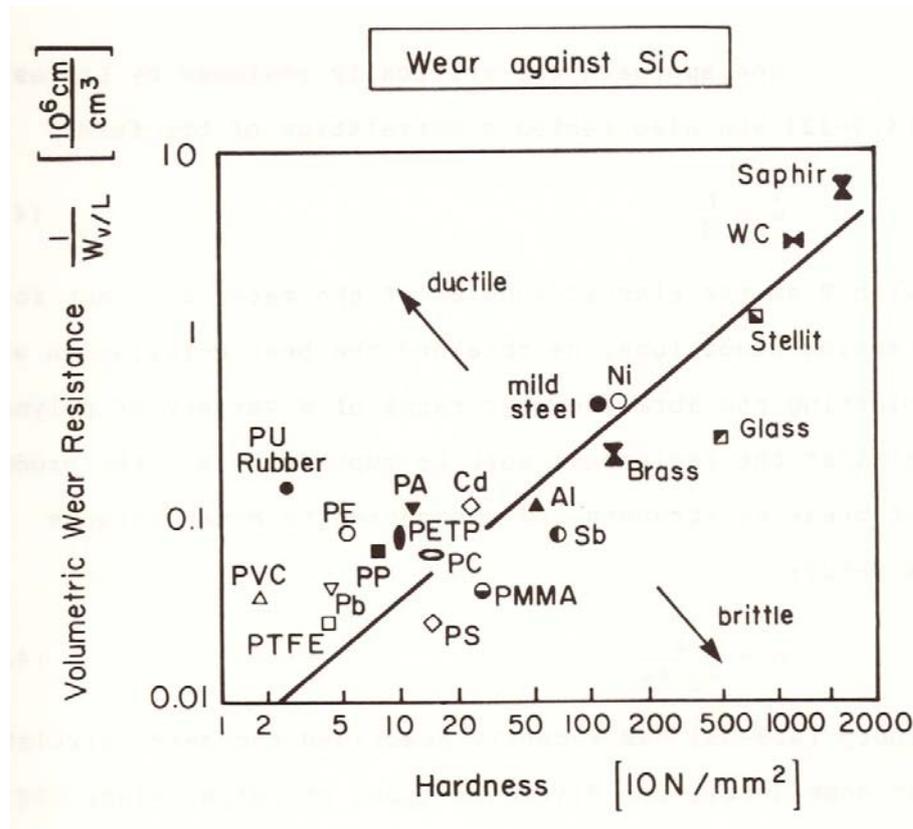


Figura 2.10 - Resistenza all'abrasione in funzione della durezza per polimeri e altri materiali

Selwood rileva che polimeri fragili come il polistirene vengono abrasati più velocemente di quelli duttili, a parità di durezza; più in generale osserva (v. figura 2.10) il comportamento di un gran numero di materiali per i quali la durezza da sola non descrive adeguatamente la resistenza all'abrasione.

Successivamente negli studi di Ratner il processo di usura dei polimeri viene suddiviso in tre stadi: una fase di intaccatura del polimero in misura inversamente proporzionale alla sua durezza; una fase di scorrimento legata alle forze d'attrito (μp , con μ coefficiente d'attrito); una fase di collasso finale che segue alla deformazione plastica, per la quale l'energia si assume espressa attraverso il prodotto del carico unitario di rottura (σ_B) per l'allungamento unitario (ϵ_F):

$$w \propto \frac{\mu^* p}{H \sigma_B \epsilon_F} \quad [2-5]$$

Questa conclusione è stata rivista da Lancaster, che ha proposto una correlazione nella forma:

$$w = \frac{E}{H} \quad [2-6],$$

con E modulo di elasticità del materiale.

Le ipotesi di correlazione di Ratner-Lancaster sono sintetizzate nel diagramma di figura 2.8 (nella pagina seguente), costruito, per diversi tipi di polimeri, riportando il consumo specifico di materiale in funzione del termine $(\sigma_B \ \varepsilon_F)^{-1}$.

Analoghi studi condotti da *Thorp* per differenti tipi di polietilene (PE), poliuretano (PU), poliammide (PA) portano ugualmente a concludere che tale termine è un indice sufficientemente approssimativo per valutare la loro resistenza all'usura.

Le conclusioni esposte correlano il valore di w e di w_s a numerose proprietà del materiale. Per definire il maggiore o minore rilievo delle singole proprietà, si sono distinti all'interno del meccanismo di usura due aspetti: uno in cui svolge un maggiore rilievo la deformazione plastica (con effetti combinati di microsolcature e microtaglio) ed un altro in cui è predominante la microfrattura, con limitata deformazione plastica.

Gli studi di *Hornbogen* e *Zum Gahr* hanno sviluppato modelli che definiscono le condizioni limite in cui opera ciascun meccanismo, in funzione di un valore *critico* della *pressione* locale.

Il comportamento si può allora definire attraverso il modello analitico:

$$w = \frac{\Psi}{H^a} = \frac{\Phi H^b}{G_{IC}} \quad [2-7]$$

in cui :

- G_{IC} è l'energia di rottura del materiale (G_I è l'energia elastica immagazzinata)
- a, b, c sono coefficienti di valore frazionario, legati alla microstruttura del materiale.

e: $\Phi > 0$ se $p > p_{crit}$;

$\Phi = 0$ se $p < p_{crit}$.

Dunque, p_{crit} rappresenta il limite al di sopra del quale il distacco di particelle avviene per microfrattura. Il suo valore è legato alla durezza del materiale, alla sua resilienza, alle dimensioni delle particelle di sostanze abrasive, alla presenza e dimensioni di cavità, intacchi, microfratture preesistenti ecc.

La figura 2.11 rappresenta schematicamente l'andamento dei diversi meccanismi di deformazione superficiale e usura legati alla pressione ed alla durezza del materiale.

Al di sotto della pressione critica il consumo del materiale si riduce in relazione del valore di Ψ .

Ψ si può esprimere con una relazione del tipo:

$$\psi = c_1 \mu f_{ab} p \quad [2-8]$$

dove f_{ab} è un fattore compreso fra 0 e 1, che esprime la porzione di materiale abrasa con un ideale processo di microtaglio. Il valore 1 esprime la condizione in cui tutto il materiale è rimosso per microtaglio; per $f_{ab} = 0$, il materiale viene ripetutamente deformato per microsolcatura, senza venire rimosso; il fattore c_1 esprime la dipendenza collettiva da altri parametri.

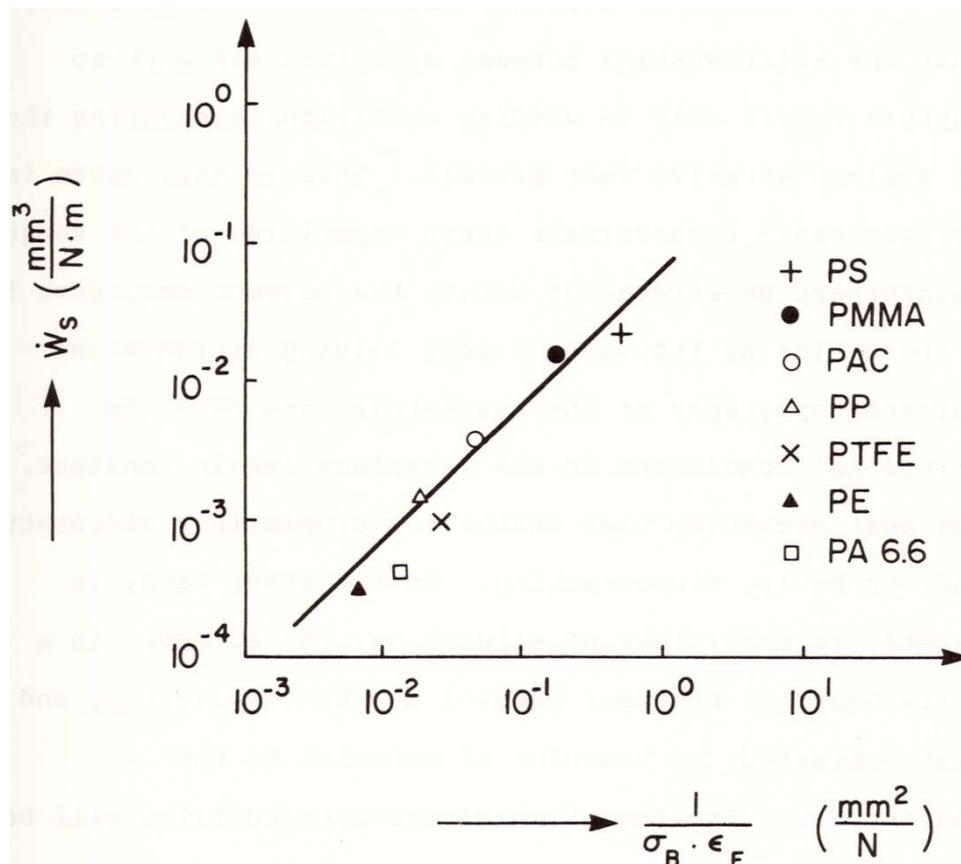


Figura 2.11 - La correlazione Ratner- Lancaster dell'indice d'usura *single-pass* in funzione dei parametri meccanici

Al di sopra della pressione critica invece, prevalgono gli effetti di microfrattura e la quantità di materiale rimosso cresce al crescere della durezza (figure 2.12 e 2.13)

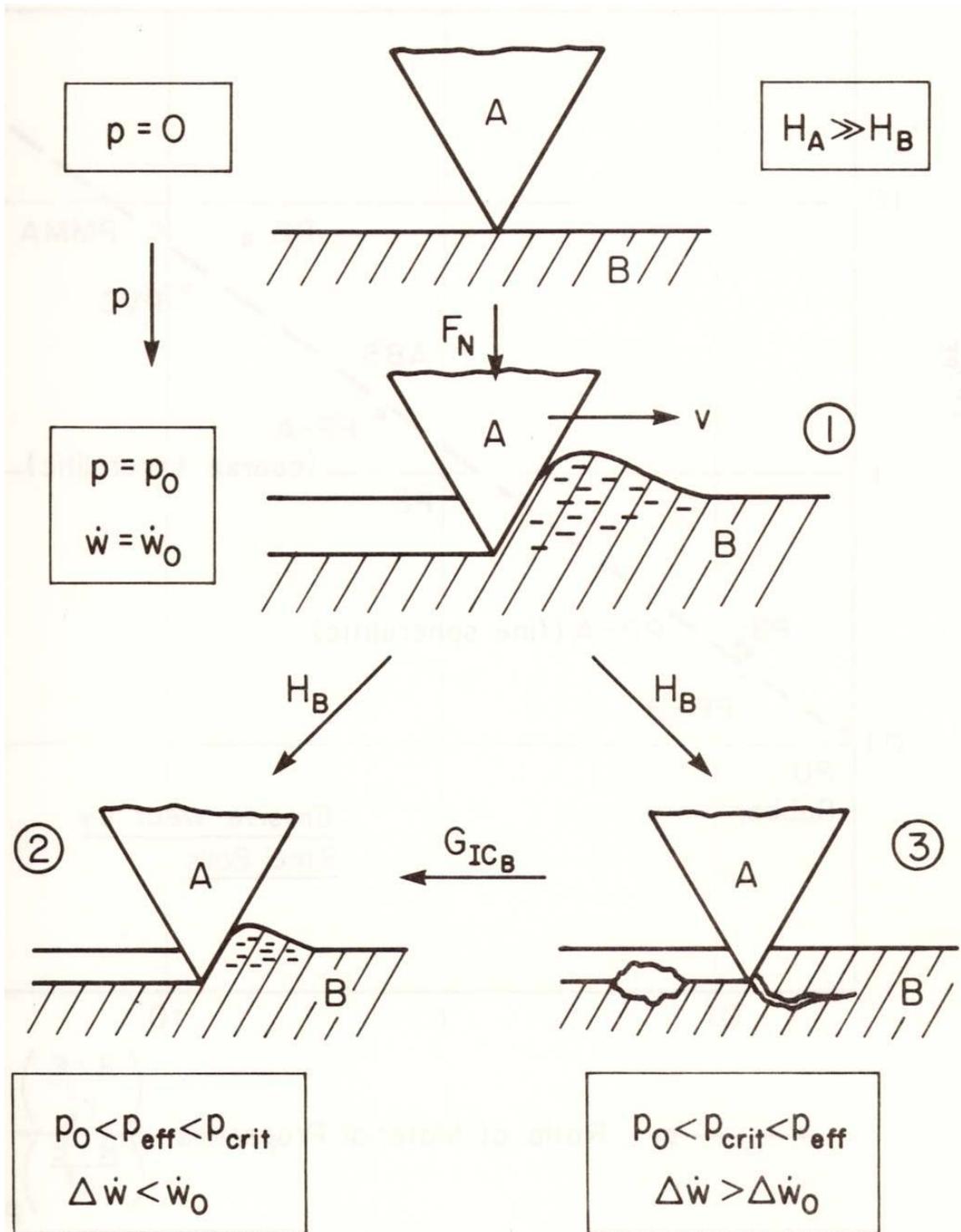


Figura 2.12 - Rappresentazione schematica della deformazione della superficie e dei diversi meccanismi di usura, in relazione alla pressione, alla durezza del materiale e all'energia di rottura

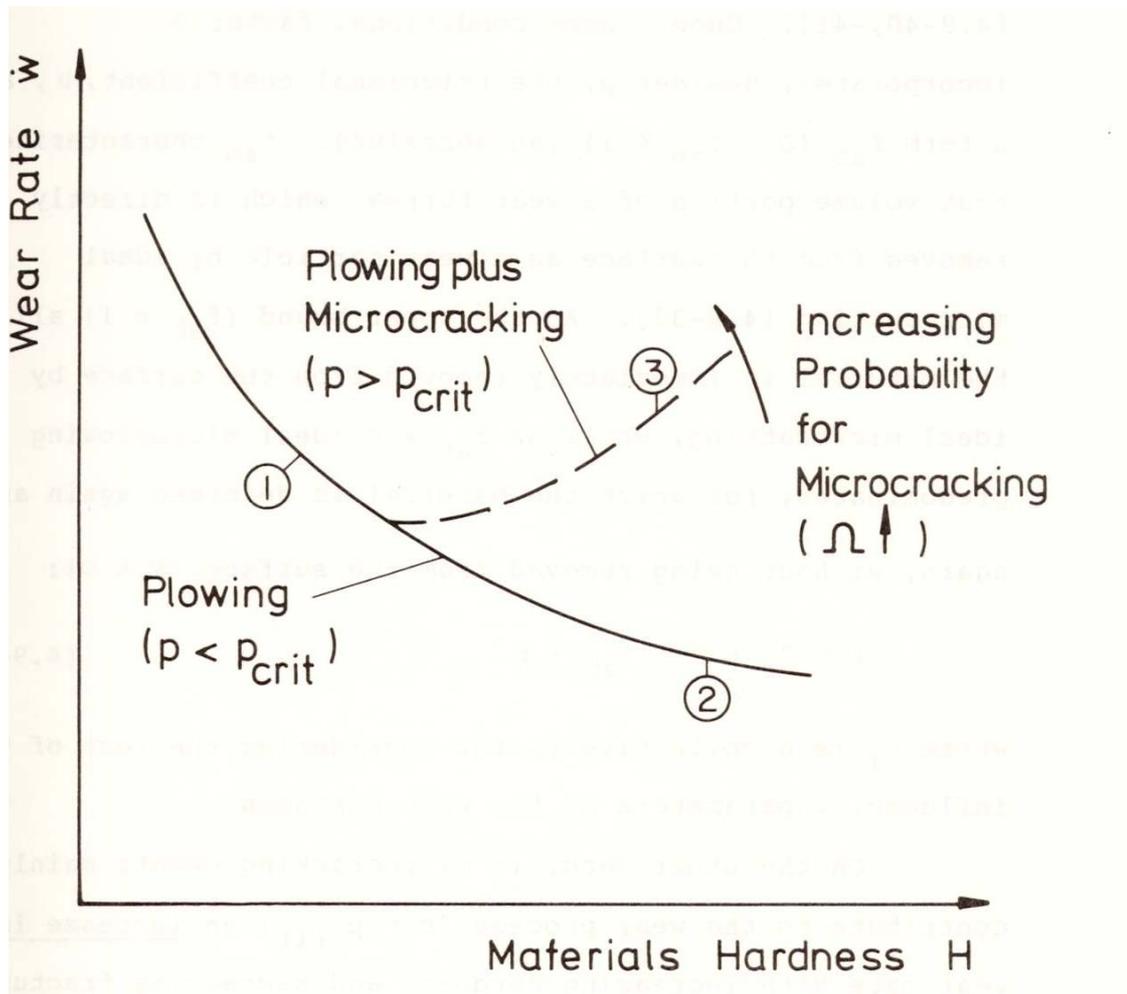


Figura 2.13 - Possibili andamenti dell'indice di usura abrasiva in funzione della durezza del materiale in conformità alla relazione 2-13

Il coefficiente Φ si può definire con una relazione del tipo:

$$\Phi = c_2 \Omega^* D^{3/2} \mu^2 p \quad [2-9]$$

dove Ω^* rappresenta un *fattore di probabilità di microfrattura*, esprimibile come:

$$\Omega^* = f \left(1 + \frac{2l}{d} \right) \left[1 - e^{-\sqrt{(p/p_{crit})}} \right] \quad [2-10]$$

dove l e d sono rispettivamente lunghezza e ampiezza delle intaccature presenti e c_2 esprime ancora la dipendenza collettivi da altri parametri.

Polymers		
Thermoplastics		Thermosetting resins
Polyethylene, high molecular weight		phenolics
Acetal-homo-, and co-polymer		polyesters
Polyamides (Nylon 6, 6.6 and 11)		epoxies
PTFE		silicones
Polyphenylene oxide		polyimides
Polycarbonate		
Fillers and reinforcements		
To improve mechanical properties	To reduce friction	To improve thermal properties
asbestos	graphite	bronze
glass	MoS ₂	silver
carbon	PTFE (particles or fiber)	carbon/graphite
textile fibers		
mica		
metals and oxides		

Cirino, Friedrich e Pipes [6-7-8-9], hanno individuato l'esistenza di una forte dipendenza dell'usura dall'orientazione delle fibre, nel caso in cui esse siano unidirezionali e continue e scorrono su superfici lisce di acciaio dolce.

Il comportamento ad usura dei materiali compositi ha messo in evidenza caratteristiche anisotrope.

Nella figura di seguito sono illustrate tre orientazioni base per le fibre comunemente utilizzate nello studio tribologico di materiali compositi con rinforzi unidirezionali continui (fig. 2.14).

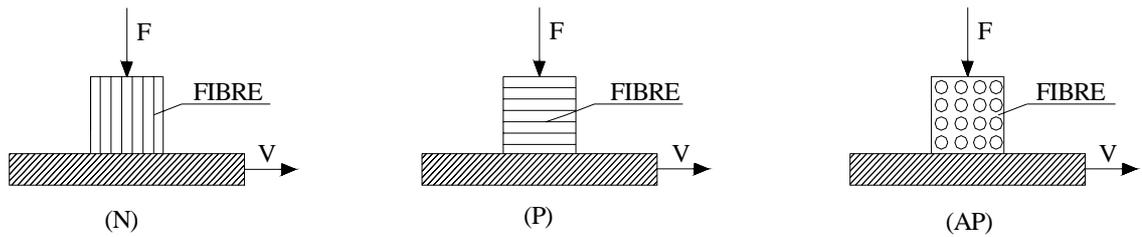


Figura 2.14 - Orientazioni delle fibre

Quando le fibre sono perpendicolari alla superficie di scorrimento si parla di orientazione normale (tipo N) che è considerata come un tipo di orientazione fuori piano, dove per piano si intende quello di scorrimento.

Nello stesso contesto le altre due sono considerate come orientazioni in piano. Più precisamente, l'orientazione parallela (tipo P) si ha quando le fibre sono in piano e parallele alla direzione di scorrimento e quella antiparallela (tipo AP) quando le fibre sono in piano e disposte normalmente alla direzione di scorrimento.

Utilizzando una macchina del tipo pin-on-ring [10], hanno valutato il comportamento ad usura attraverso i valori assunti da un parametro detto "tasso di usura specifico" espresso come,

$$W_s = \frac{W}{P}$$

con p pressione di contatto e W tasso di usura (adimensionale) a sua volta definito dalla seguente formula, già vista al [2-3a]

$$W = \frac{\Delta V}{A \cdot L}$$

dove $\Delta V = \Delta m/\rho$ è la perdita di volume rilevata dai campioni testati, A è l'area apparente di contatto ed $L = v \cdot t$ è la distanza di strisciamento.

Ecco una semplice illustrazione :

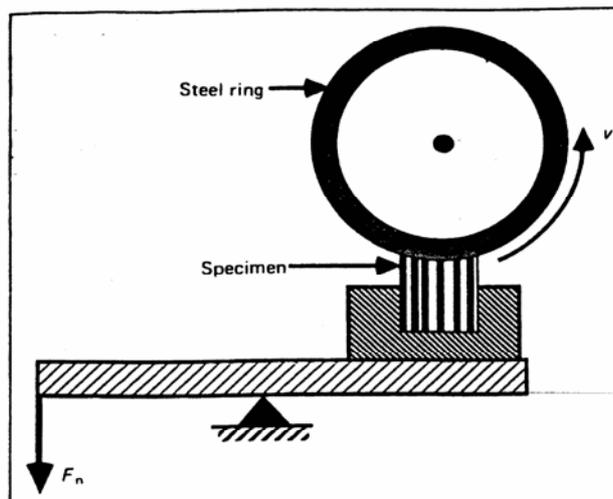


Figura 2.15 - Schematizzazione semplificata di una macchina pin-on-ring

Da queste prove è risultato che le fibre di carbonio e le aramidiche riducono l'usura di entrambe le matrici, ed in modo particolare per la resina epossidica, si riduce l'usura di due ordini di grandezza rispetto al caso di resina non caricata. Le fibre di vetro, di contro, non apportano alcuna riduzione dell'aliquota d'usura rispetto alla resina non caricata, eccezione fatta per le fibre orientate in piano e in direzione parallela (P).

In ogni caso la sola generalizzazione che è stato possibile ottenere da questi risultati è che l'orientazione parallela delle fibre, tipo P, risulta essere migliore rispetto alle altre due orientazioni. Dai rilievi sperimentali inoltre si è evidenziato che le aliquote di usura sono fortemente dominate dai meccanismi d'usura associati alle fibre piuttosto che da quelli associati alla matrice.

In particolare per quanto riguarda i compositi con matrice epossidica e fibre di vetro, analizzando le superfici d'usura si è notato che nell'orientazione tipo N, le fibre sono fratturate mentre, nelle orientazioni in piano le superfici d'usura sono costituite da fibre rotte e dalla presenza di debonding ("scollamento") all'interfaccia fibra-matrice.

Da altre ricerche [11] effettuate, risulta che i compositi con fibre di vetro presentano una maggiore usura rispetto a quelli rinforzati con fibre di carbonio, e questo è da ricercare in parte nelle proprietà lubrificanti del carbonio, le quali in tutte le direzioni si mostrano nell'adesione di un film, trasferito sull'acciaio, che esalta la resistenza ad usura della matrice riducendo in tal modo l'attrito, mentre per le fibre di vetro si ha una situazione diversa in quanto

queste, venendo a contatto con la controfaccia in acciaio, tendono ad essere frantumate in particelle di dimensioni di $1\ \mu\text{m}$ di diametro, e a volte più grandi.

Tali particelle sono molto taglienti e, quando vengono trascinate tra le superfici in moto relativo fra di loro, danneggiano il composito arandone la superficie.

Ulteriori approfondimenti di Friedrich, Pipes e Cirino [10], sono stati rivolti alla resistenza ad usura dei compositi, in severe condizioni abrasive, strofinandoli infatti contro carte di SiC, a diversa granulometria, ed i risultati sono rappresentati in fig. 2.16a e fig. 2.16b.

Il comportamento anisotropo è risultato abbastanza evidente sia per usura abrasiva che per solo scorrimento, tuttavia si è notato che la dipendenza dell'aliquota di usura dall'orientazione delle fibre, non è un fenomeno costante, infatti, in condizioni abrasive severe, il composito con fibre di vetro e resina epossidica ha una usura minore nell'orientazione N che non in quella AP; si ha una situazione inversa, invece, se si ipotizza semplice scorrimento (non in condizioni abrasive severe), poiché l'orientazione P dà luogo alla minima usura, mentre l'orientazione N dà luogo ad una usura maggiore

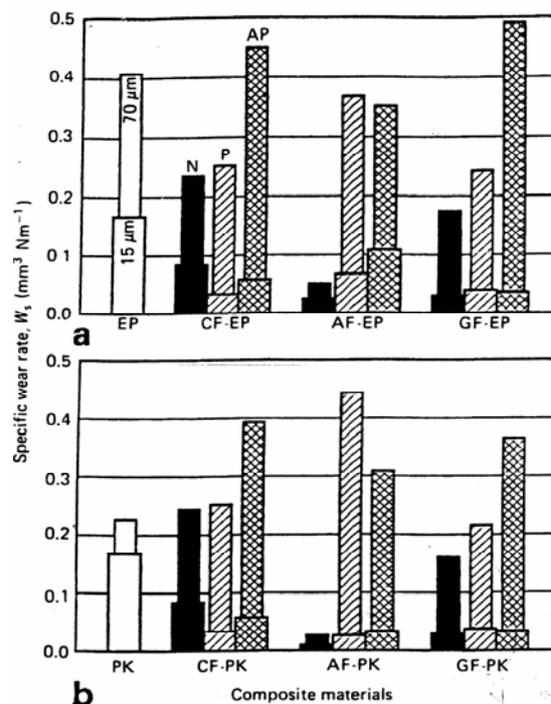


Figura 2.16 - Tasso di usura specifica, in caso di usura abrasiva; (a) compositi a matrice epoxy; (b) compositi a matrice peek.

Per comparare l'efficacia dei materiali con fibre a diverse orientazioni, sono state usate 2 diverse matrici polimeriche e sono state riferite tutte le resistenze specifiche di usura a quella di un materiale campione:

$$W_s^{-1} / W_{s(\text{standard})}^{-1} .$$

Analogamente ai risultati precedenti, ottenuti con altri tipi di indagini, è emerso che, sia per i compositi con fibre di carbonio sia per quelli con fibre aramidiche, a matrice epossidica, i rapporti specifici di resistenza ad usura aumentano per tutte le orientazioni allorquando si proceda dalle condizioni abrasive più severe a quelle meno severe.

In particolare, i sistemi con rinforzi in vetro hanno mostrato avere più alta resistenza ad usura con matrice peek, piuttosto che con matrice epossidica.

Tale schematizzazione può essere usata nel disegno di un composito ove siano richieste alte resistenze, nei confronti di una usura specifica.

Tale indagine con carte abrasive ha portato, dunque, a concludere che, in severe condizioni abrasive, sarebbe vantaggioso avere una matrice polimerica duttile, avente ad esempio una durezza alla frattura come la matrice peek, ed un rinforzo di fibre aramidiche, dirette normalmente alla superficie; ulteriori benefici possono prevedersi se si incorporano fibre di vetro o di carbonio, in piano e parallele alla direzione di scorrimento .

La fig. 2.17 mostra un preliminare design per un materiale composito avente buona resistenza all'usura, per un vasto mix di carichi :

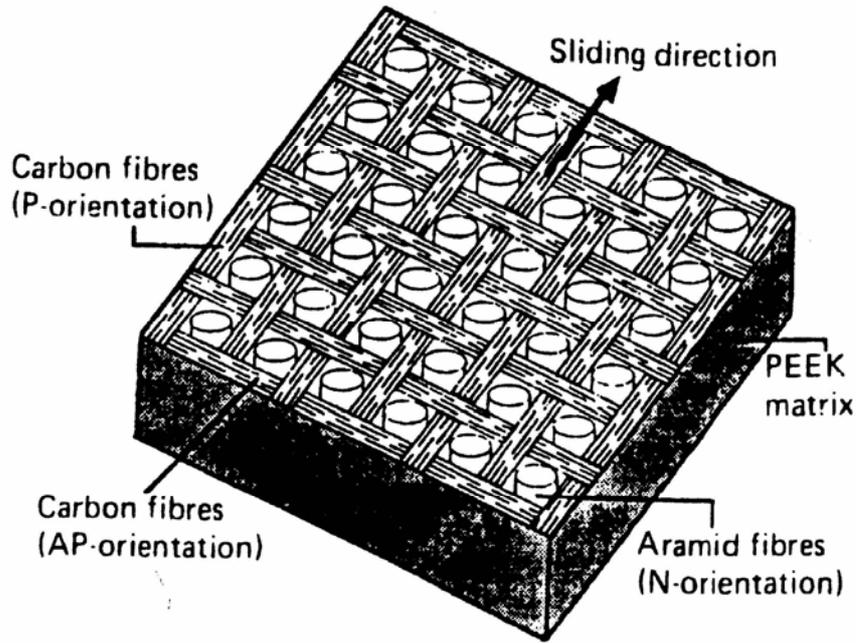


Figura 2.17 - Un design preliminare per un composito avente una buona resistenza all'usura, per un vasto mix di carichi.

La soluzione ottimale sarebbe, dunque, un composito ibrido, incorporante AF orientate perpendicolarmente alla superficie di usura, CF orientate in piano, sia parallele che antiparallele alla superficie di usura, con matrice peek: il tutto senza alcun additivo (atti a migliorare le attitudini lubrificanti dei materiali costituenti il composito) quali fibre lubrificanti di politetrafluorietilene, PTFE, intessuto nella struttura, o silicone fluido o, ancora, grafite sfaldabile.

Si è avuta, dunque, la conferma che i compositi con fibre di vetro presentano una maggiore usura rispetto a quelli rinforzati con fibre di carbonio, e questo è dovuto in larga parte alle proprietà lubrificanti del carbonio, infatti in tutte le direzioni tali proprietà di lubrificazione si mostrano nella adesione di un film trasferito sull'acciaio, che esalta la resistenza ad usura della matrice, riducendo in tal modo l'attrito, mentre per le fibre di vetro si ha un comportamento diverso in quanto queste, venendo a contatto con la controparte in acciaio, tendono a essere frantumate in particelle di dimensioni di 1 μm di diametro, a volte ancora più grandi.

Tali particelle sono molto taglienti e, trascinate tra le superfici in moto relativo tra loro, danneggiano il composito arandone la superficie .

La continua e crescente richiesta di compositi, con rinforzo in fibra, nel campo industriale, è stata un considerevole incentivo nello studio degli effetti tribologici sul comportamento del composito.

Possiamo dunque affermare, alla luce di quanto elaborato, che l'attrito e la resistenza ad usura, non sono proprietà intrinseche del composito, ma sono funzioni complesse di un gran numero di parametri esterni (velocità di scorrimento, geometria, carico normale ambiente), fisici, proprietà meccaniche dei materiali all'interfaccia .

Vishwanath, Verma e Rao [12], nei loro esperimenti sullo studio dell'usura e dell'attrito di compositi plastici rinforzati con fibre di vetro in tessuto, hanno mostrato che l'attrito e l'usura di questi compositi presentano entrambi una marcata dipendenza dalla velocità di strisciamento e dalla pressione normale. Osservazioni microscopiche delle superfici usurate indicano una maggiore perdita di usura e bassi valori del coefficiente d'attrito per i compositi sia ad elevate velocità di strisciamento che ad elevati carichi normali. Ciò è dovuto probabilmente alla frattura della trama del tessuto in fibre di vetro utilizzato come rinforzo.

L'aliquota di usura e di attrito in compositi polimerici con rinforzi in un fibre continue e unidirezionali, è dunque fortemente dipendente dall'orientamento delle fibre .

Essi, utilizzando una macchina del tipo pin-on-disk, hanno valutato l'andamento dell'usura in funzione della velocità di strisciamento per quattro diversi valori di carico ed hanno trovato che l'usura incrementa con il crescere del carico, tuttavia questo andamento non è lineare con la velocità di strisciamento (fig.2.18).

Quanto ottenuto è un risultato della rottura delle fibre di vetro sulle superfici a contatto, dovuta al cambiamento delle caratteristiche superficiali del provino.

Inoltre essi hanno trovato che anche la temperatura superficiale incrementa con il carico normale e la velocità di strisciamento e ciò comporta un indebolimento della resistenza all'interfaccia fra fibra e matrice, per tale motivo le fibre di vetro si allontanano dalla matrice e si inseriscono tra le superfici che scorrono provocando abrasione.

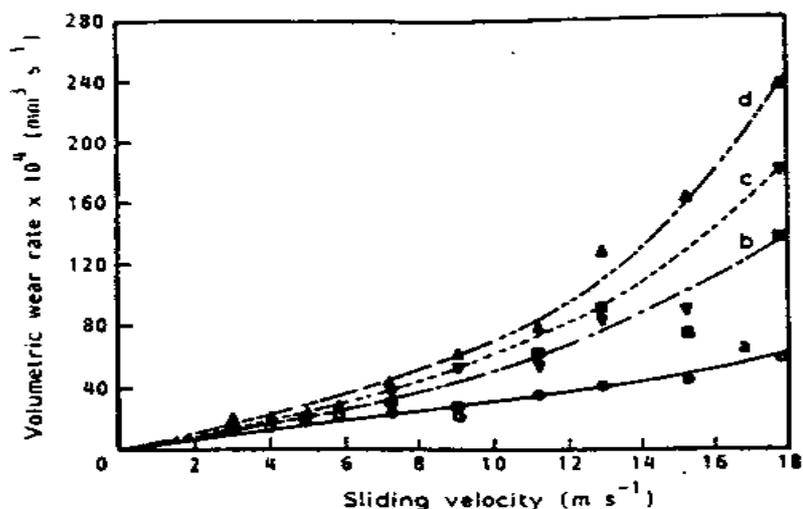


Figura 2.18 - Variazione del tasso d'usura volumetrico con la velocità di strisciamento per quattro differenti carichi normali (a,b,c,d).

Ciò è confermato dall'aumento della rugosità della superficie del disco rilevata a seguito di prove.

Il carico normale e la rugosità hanno quindi una grande influenza sull'usura dei compositi : quest'ultima varia non linearmente con la velocità e con il carico.

Analizzando al microscopio le superfici testate alle diverse velocità e ai quattro diversi carichi, si è notato, per basse velocità, la deposizione di detriti d'usura molto fini per tutte le tipologie di carico.

Inoltre in corrispondenza del carico maggiore si è osservata anche la presenza di cricche e di debonding (scollamento) tra fibra e matrice e proprio quest'ultimo è maggiore nella trama del tessuto perché queste fibre sono parallele alla superficie di scorrimento.

Per quanto riguarda il coefficiente d'attrito, essi hanno notato, per tutte le quattro tipologie di carico, un alto valore di μ a basse velocità di strisciamento, e poi un valore particolare di μ dopo il quale il coefficiente d'attrito decresce all'aumentare del carico. Ciò è da attribuirsi ad un incremento della temperatura nella zona di scorrimento a causa di elevati valori del carico.

Altri ricercatori, Al e Ramesh [13], proseguendo nello studio dei compositi di epoxy con rinforzo in vetro, eseguendo prove con diversi carichi normali a diverse velocità di scorrimento, hanno identificato un valore ottimale sia per la velocità di scorrimento (2.36 m/s), che rendeva minima l'usura, sia per il

carico normale che rendeva massimo il coefficiente di attrito (1.25×10^5 Pa per i compositi, 2×10^5 Pa per la resina epossidica).

Tuttavia la maggior parte degli studi disponibili riguarda compositi a fibre continue e unidirezionali, al 30- 40% in peso di resina nella matrice.

La ricerca tende verso l'uso di compositi, in modalità tessuto che non solo comportino equilibrio nel piano ma che siano anche facili da maneggiare.

In molte richieste di materiali compositi, l'obiettivo è avere buona resistenza all'impatto, senza alcun degrado di proprietà meccaniche.

L'esperienza [14] ha mostrato che usando le matrici di resina di fenolo (resina termoidurente resistente ad elevate temperature, con ottime caratteristiche meccaniche, bassa igroscopicità) puro o epossidico, il più delle volte si riduce la resistenza d' impatto del composito.

Wilson e Dougherty osservarono che circa il 20% in peso di tale resina rendeva la matrice abbastanza flessibile nel mantenere l'integrità strutturale del laminato mentre, all'aumentare di tale percentuale, non si aveva un miglioramento in termini di resistenza di impatto.

Laible osservò che combinando resine più molli, come il poly (vinyl) butyral (PVB), con resine di fenolo, la resistenza dei compositi, all'impatto, aumentava.

Risulta chiaro che nella richiesta di compositi, per uso industriale, è indispensabile una completa comprensione del comportamento primo tribologico, nonché delle proprietà meccaniche.

Al giorno d'oggi, nello studio di fibre di vetro in modalità tessuto, si usano le matrici commercialmente disponibili quali resine di fenolo modificate, PVB, le quali contengono butyraldehyde al 10% in peso.

Gli effetti della resina sul comportamento ad usura di tali compositi furono studiati anche da Verma, Rao, Vishwanath, variando la percentuale di butanale $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CHO}$ (aldeide butirrica) nella resina della matrice, costituita da poly e butanale, in rapporto 2 : 1.

Ulteriori studi [16] sono stati rivolti verso i compositi a fibre corte, di vetro e carbonio, in matrice plastica, realizzati tramite stampaggio per iniezione, tecnica che permette la realizzazione di forme complesse.

L'usura e il coefficiente di attrito sono stati valutati attraverso l'analisi della microstruttura, eseguita con un microscopio a scansione elettronica.

Per tale analisi sperimentale sono state usate fibre corte avente lunghezza media di circa 200 μm e diametro pari a circa 7 μm per fibre di carbonio e pari a 10 μm per fibre di vetro, disperse uniformemente nella matrice polimerica e termoplastica (polyphenylene sulphide).

La superficie delle fibre è stata trattata con uno speciale agente "di accoppiamento" per migliorarne l'adesione con la matrice.

Poiché l'orientamento delle fibre dipende dallo spessore, per l'analisi sperimentale è stata preparata una barra campione di composito fibroso, con orientazione uniforme, avente dimensioni 3 x 3 x 15 mm; furono preparati provini nelle tre orientazioni base (N, P, AP) ed adottando una macchina del tipo pin-on-disk.

Nella fig. 2.19 è illustrato il meccanismo:

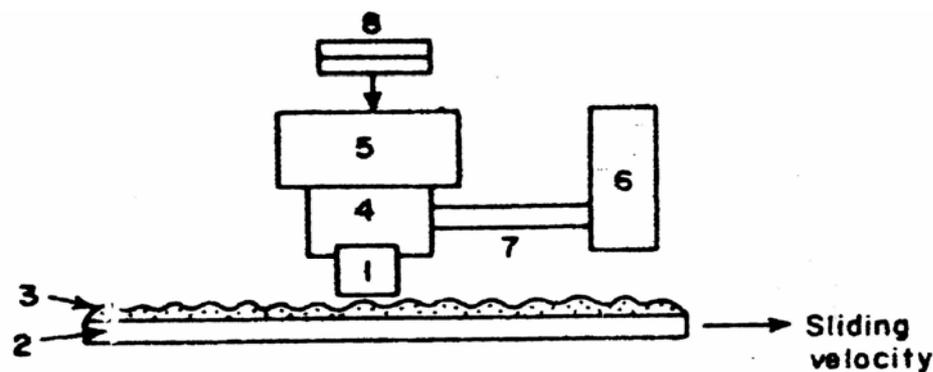


Figura 2.19 - Apparecchio di usura 1) provino, 2) piano di scorrimento, 3) carta abrasiva, 4) portaprovino, 5) braccio flessibile, 6) braccio rigido, 7) anello regolabile— carico normale

Il provino fu fatto scorrere su diverse carte abrasive, di granulometria 240, 400 e 600, avendo cura di sostituire tale carta dopo ogni prova di usura, in modo che la superficie da abrasione sia sempre in contatto con una pista di usura.

Al termine della prova il coefficiente di attrito μ veniva misurato da un indicatore del livello di sforzo (μ nasce e poi si stabilizza intorno ad un valore che potremmo definire quindi di equilibrio). Il carico normale variava tra 0,42 ÷ 1,32 Kg e la velocità di scorrimento era circa 60 mm/sec.

Misurando la perdita di peso dopo ogni prova, si è potuto stimare la aliquota di usura, avvalendosi di un microscopio a scansione elettronica SEM.

In fig. 2.20 sono rappresentate le curve relative alla perdita di peso in funzione della velocità di scorrimento: si nota una certa linearità .

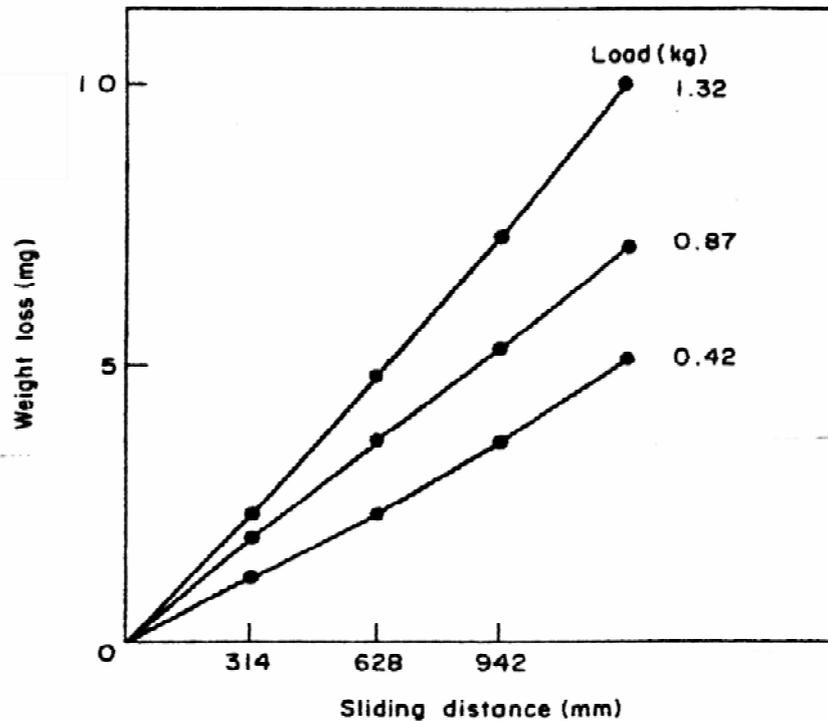


Figura 2.20 - Perdita in peso vs , in funzione della velocità di scorrimento, di un provino AP, su una carta abrasiva avente rugosità pari a 62.9 μm .

Dall' analisi dei risultati, è stato possibile trarre tali caratteristiche :

1. il rinforzo in fibra di vetro o di carbonio mostra una usura maggiore.; la resina , usata per tale applicazione, è generalmente considerata una resina fragile, avente bassa durezza, e questo può essere uno dei fattori che portano ad un' alta aliquota di usura. Furono effettuate, inoltre, prove di durezza Rockwell sui compositi, con diametro di penetrazione ($\sim 1\text{mm}$) maggiore della dimensione microstrutturale delle fibre ($7 \div 10 \mu\text{m}$ di diametro e $200 \mu\text{m}$ di larghezza);
2. usualmente l'usura cresce al crescere delle dimensioni delle asperità abrasive;

3. le fibre di vetro danno una aliquota di usura maggiore rispetto alle fibre di carbonio, nell' orientazione P e AP; la causa di ciò è da attribuirsi all'effetto di autolubrificazione delle fibre di carbonio, sebbene tale effetto decresca al crescere della forza di attrito.;
4. nei compositi con fibre di carbonio e matrice plastica, la aliquota di usura nei campioni P è maggiore che in quelli AP mentre nei compositi con fibre di vetro si riscontra una usura più bassa nella orientazione P che non nella AP, in questo ultimo infatti è rimosso più materiale : tale tendenza inversa può essere imputata, ancora una volta, all' azione lubrificante del carbonio. Pertanto la presenza di fibre di carbonio lungo la traccia di usura, in un campione AP, dà benefici alla resistenza all'usura stessa, poiché le fibre di carbonio fungono da lubrificante solido;
5. la differenza tra le aliquote di usura nei diversi compositi è amplificata dall'aumento delle dimensioni delle asperità, semplicemente a causa della maggiore deformazione prodotta dalle grandi dimensioni delle asperità. Il fattore di usura è stato interpretato come $1/(\sigma_y \varepsilon_y)$ ove σ_y è la resistenza a trazione e ε_y è l' allungamento.

La resistenza a trazione e la deformazione a rottura, sono state misurate con il metodo ASTM D 638.

Ratner], avvalendosi di tali risultati, ha misurato l'usura abrasiva come area sottesa alla curva $(\sigma - \varepsilon)$ e pertanto si tenderebbe ad ipotizzare che l'usura del materiale di contatto comporti un lavoro eguagliabile all'integrale della funzione $(\sigma - \varepsilon)$, approssimata dal prodotto $(\sigma_y \cdot \varepsilon_y)$, ma i risultati sperimentali relativi a fibre di carbonio e nylon 66 hanno smentito tale ipotesi.

È stato possibile affermare, a questo punto, che:

1. il coefficiente di attrito non è influenzato dalle variazioni di carico
2. il coefficiente di attrito aumenta proporzionalmente alla Ra
3. il coefficiente di attrito nei campioni N è maggiore di quello relativo ai campioni P e AP.

È stato notato, inoltre, un andamento pressoché costante, del coefficiente di attrito, nel range di carichi esaminati, per quanto riguarda i compositi a fibre di carbonio e matrice plastica.

Relazionando ancora la aliquota di usura con il coefficiente di attrito, è stato evidenziato che generalmente l'usura specifica aumenta all'aumentare di quest'ultimo, il quale, a sua volta, aumenta all'aumentare di R_a (nel modello abrasivo), proprio a dimostrare la condizione di " aratura " dove si ha una penetrazione delle asperità più dure in quelle meno dure.

Tale azione di aratura tende ad essere più marcata nei campioni N che non in quelli ad orientazione P e AP.

L' elevata plasticità della matrice, è probabilmente riconducibile all'azione arante delle particelle abrasive; i frammenti di usura consistono in particelle di matrice e fibre rotte, aventi formi irregolari ; la dimensione di tali frammenti dipende dalla ruvidità delle particelle abrasive.

Wang e Rack [16] hanno invece studiato il comportamento ad usura abrasiva di particelle e di whisker di carburo di silicio (S_iC), che rinforzano una matrice metallica di alluminio. Anch'essi hanno utilizzato una macchina del tipo pin-on-disk con diverse rugosità superficiali della controfaccia, adottando una velocità di rotazione costante ed utilizzando per i whisker due tipologie di orientazioni N e P.

Dai loro esperimenti, effettuati con un contenuto di particelle e di wisker pari al 20% in volume, si evince che entrambi i rinforzi consentono di aumentare notevolmente la resistenza ad usura rispetto alla lega non rinforzata. Tuttavia il valore della resistenza ad usura dipende fortemente dal tipo di rinforzo, dall'orientazione del rinforzo e dalla dimensione delle particelle abrasive della controfaccia. Ad esempio si è ricavato che i whisker presentano una maggiore resistenza ad usura rispetto alle particelle di S_iC per tutto il range di dimensione delle particelle abrasive della controfaccia.

Inoltre wisker orientati normalmente (tipo N) alla superficie di strisciamento presentano una maggiore resistenza ad usura rispetto a quelli orientati parallelamente (tipo P), ciò vale nel campo di piccole dimensioni delle particelle abrasive, mentre gli effetti sono opposti nel caso di particelle abrasive di grandi dimensioni.

Essi hanno osservato che il materiale rimosso da questi compositi presentava solchi e formazione di vuoti, tuttavia la presenza di S_iC riduce la severità dei solchi e ciò, presumibilmente, deriva dal fatto che dette particelle incrementano

la durezza del materiale, di contro però la loro durezza comporta probabilmente aumento della formazione di vuoti.

Altri studi [17] sono stati condotti con lo scopo di valutare il tasso d'usura di materiali compositi in cui la matrice presenta due riempimenti diversi con polveri di WC ed S_iO_2 . Dagli esperimenti compiuti risulta che la resistenza ad usura migliora quando la matrice è riempita con polveri ed in particolare, quando le polveri sono di WC. In generale dai risultati ottenuti si può supporre che l'usura dei compositi sia proporzionale al carico normale (N), al coefficiente d'attrito (μ) e alla velocità di scorrimento elevata ad un'esponente "a" (V^a) dove:

- per i compositi con matrice non caricata, $a = 1.3$;
- per i compositi con matrice caricata con polveri di WC, $a = 0.3$;
- per i compositi con matrice caricata con polveri di S_iO_2 , $a = 0.45$.

Inoltre nella matrice riempita con polveri, l'usura incrementa con il crescere delle dimensioni delle polveri stesse, ciò è stato confermato anche dall'ottenimento, da parte degli sperimentatori, di un semplice modello analitico dal quale si osserva come la resistenza ad usura decresce con l'aumentare della dimensione delle particelle adoperate come riempitivo della matrice.

Essendo inoltre i compositi a matrice polimerica molto usati come materiali d'attrito in sistemi frenanti, sono stati realizzati diversi studi a riguardo, in particolare Katbab, Abbasi e Shojaei [18] nei loro esperimenti dinamometrici con questi materiali compositi su un disco d'acciaio per l'applicazione nei veicoli ferroviari, hanno riscontrato un incremento di temperatura del disco a seguito del contatto con i compositi. Questa temperatura non è però uniformemente distribuita sulla superficie del disco comportando elevate temperature locali.

Per questo motivo, secondo loro, è necessario progettare materiali compositi in modo che il calore generato per attrito sia uniformemente distribuito in corrispondenza dell'area di lavoro degli stessi compositi in modo da impedire la presenza di isolate zone ad elevate temperature.

A questo scopo, ossia minimizzare l'incremento di temperatura, propongono che l'area di contatto debba essere relativamente grande e perciò il materiale deve essere tenero a sufficienza. Ciò vuol dire che questi materiali dovrebbero mostrare un basso modulo di compressione oltre che aderire adeguatamente alla superficie opposta.

Nel caso in cui si utilizzino materiali per attrito con grande modulo a compressione, allora è richiesta un'elevata conduttività termica per favorire la conduzione del calore attraverso questi materiali.

Osservazioni simili sono state effettuate anche da Righes e Calderale [19] nei loro studi sul comportamento dei freni a disco per autoveicoli.

Altri ricercatori [20] con lo scopo di migliorare le prestazioni dei compositi polimerici, da utilizzare come materiali d'attrito (pasticche) dei sistemi frenanti per motrici ferroviarie, ed eliminare indesiderabili effetti termici e meccanici sulle opposte superfici, hanno pensato di introdurre in essi dei materiali riempitivi o di supporto quali fibre di rinforzo come; amianto, cotone, acciaio e fibre di carbonio; particelle minerali come solfuro di bario, silice e allumina, particelle metalliche di rame, ottone e zinco nonché lubrificanti solidi. A seconda dell'interazioni fra particelle riempitive e le asperità abrasive dure, sono state osservate notevoli differenze delle caratteristiche d'usura per differenti dimensioni delle stesse particelle.

Quando i riempitivi sono significativamente più piccoli delle asperità non si riesce a sostenere il carico dovuto al contatto e ciò comporta che il debonding all'interfaccia fra detti aggiuntivi e la matrice può divenire importante, mentre l'incremento dell'adesione all'interfaccia fra riempitivo e matrice migliora significativamente la resistenza ad usura.

Sung e Suh [21], nei loro studi sulle caratteristiche dell'attrito e dell'usura dei compositi a matrice epossidica con orientazione parallela e perpendicolare alla direzione di scorrimento, riportano che si ha un massimo coefficiente d'attrito quando l'orientazione delle fibre è trasversale alla direzione di strisciamento. Anche Roberts [22] ha condotto test su compositi a matrice epossidica e ha ricavato che il coefficiente d'attrito decresce con il crescere della forza normale. Herrington e Sabbaghian [23] hanno condotto esperimenti sul coefficiente d'attrito tra compositi in prepregs con resina epossidica e superfici metalliche con l'obiettivo di determinare sia il coefficiente statico che quello cinetico d'attrito sotto l'influenza di diverse variabili indipendenti quali; la forza di chiusura applicata, orientazione del piano più esterno del composito e tipo di materiale in contatto con il composito. Dai loro studi risulta che i coefficienti d'attrito sono dominati dalle proprietà superficiali sia del composito che del metallo dipendendo più marcatamente dalle proprietà di quest'ultimo. Ancora

hanno mostrato che l'incremento della forza normale fa aumentare la probabilità di asportazione del materiale che, quando si verifica, causa una transizione tra il fenomeno dell'attrito e quello dell'usura. La direzionalità delle fibre esterne ha poca influenza sui coefficienti d'attrito mentre quest'ultimi sono più dipendenti dalle caratteristiche della resina in superficie piuttosto che dallo strato più esterno delle fibre.

Infine hanno scoperto che la finitura superficiale e le condizioni del composito hanno un effetto significativo sul coefficiente d'attrito tra le superfici a contatto.

Il comportamento [10] ad usura viene determinato in modo indiretto considerando alcune grandezze come la riduzione di volume, di peso etc.. E' conveniente ricondursi a parametri adimensionali come la cosiddetta aliquota di usura " W " espressa come:

$$W = \frac{V}{A \cdot L}$$

dove:

V = volume perso;

A = area apparente di contatto;

L = distanza di scorrimento.

Tenendo conto che V è pari alla massa perduta Δm diviso la densità ρ ed L è pari alla velocità media v per il tempo di scorrimento t si ha:

$$W = \frac{\Delta m}{\rho \cdot v \cdot t \cdot A} \quad [2-10]$$

Da questa relazione si può definire l'aliquota specifica d'usura W_s semplicemente rapportando W alla pressione di contatto p, cioè:

$$W_s = \frac{W}{p}$$

Questa aliquota è spesso definita come " fattore d'usura ". Si definisce poi " resistenza ad usura " l'inverso di W o di W_s .

I meccanismi d'usura che sono stati osservati sulle superfici usurate dei materiali compositi sono essenzialmente quattro (fig. 2.21):

1. usura della matrice;
2. usura di scorrimento delle fibre;
3. frattura delle fibre;
4. debonding all'interfaccia fibra-matrice.

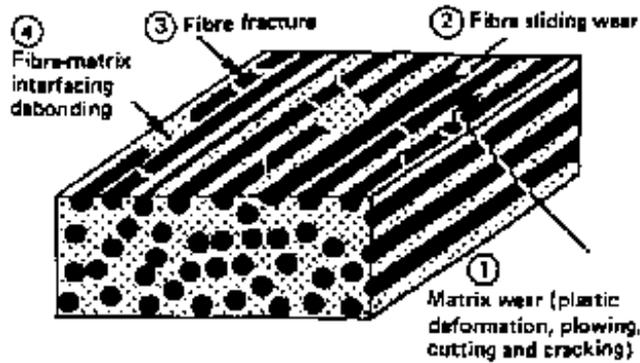


Figura 2.21 - Principali meccanismi d'usura osservati sulle superfici dei materiali compositi.

Questi meccanismi causano il processo di rimozione e trasferimento di materiale. Recenti lavori di Voss e Friedrich [24-25], hanno mostrato che i processi (3) e (4) avvengono in sequenza e possono essere considerati come un unico processo combinato che origina un'usura addizionale per la matrice, (aliquota W_{add}), in quanto le particelle delle fibre fratturate agiscono come un terzo corpo abrasivo tra le superfici a contatto. In base a tali meccanismi è possibile supporre l'aliquota d'usura del composito, indicata con W_{comp} , come la somma dell'aliquota d'usura W_{scorr} che tiene conto dei processi di scorrimento, e di un'aliquota W_{add} che tiene conto dei processi addizionali d'usura.

Ogni aliquota parziale d'usura è stata assunta essere funzione della frazione volumetrica delle fibre V_f , quindi:

$$W_{comp} = W_{scorr}(V_f) + W_{add}(V_f)$$

Dove la W_{scorr} comprende sia lo scorrimento delle fibre che della matrice.

I contributi di tali aliquote sono legati al rapporto tra l'area esposta e l'area dell'intera superficie di scorrimento:

$$\frac{1}{W_{scorr}} = \left(1 - \frac{A_f}{A}\right) \cdot \frac{1}{W_{scorr.Matrice}} + a \cdot \left(\frac{A_f}{A}\right) \cdot \frac{1}{W_{scorr.Fibre}}$$

dove:

A_f = area esposta delle fibre

A = area totale della superficie di scorrimento

$V_f = A_f/A$ = frazione volumetrica di fibre.

Il fattore a è stato introdotto per descrivere la frazione di fibre superficiali consumate dallo scorrimento.

Il secondo fattore b rappresenta la frazione di fibre superficiali rimosse dalla zona della frattura e del debonding.

Di conseguenza :

$$a + b = 1$$

$$W_{add}(Vf) = b \frac{Af}{A} W_{add} = b * Vf * W_{add}$$

Sostituendo tale equazione nella precedente :

$$W_{comp} = \left[(1 - Vf) * \left(\frac{1}{W_{scorrMatr}} \right) + a * Vf * \left(\frac{1}{W_{scorrFibr}} \right) \right]^{-1} + b * Vf * W_{add}$$

In generale a e b sono funzioni anche di Vf , ed i relativi contributi al meccanismo di usura possono rappresentarsi nel modo seguente:

$$a = 0.5 (1 + Vf^c)$$

$$b = 0.5 (1 - Vf^c)$$

Il coefficiente c rappresenta la frazione di transizione da un meccanismo all'altro, ed è funzione anche della geometria delle fibre nonché del collegamento fibra-matrice.

Per semplificare, si approssima a e b al valore 0.5 .

Nel modello proposto l'unica aliquota parziale d'usura che non è direttamente nota, pur se contribuisce all'aliquota totale d'usura del composito è W_{add} .

Inoltre, in precedenti studi [26], sono state determinati con successo appropriati valori per le aliquote d'usura di scorrimento delle fibre. Si è trovato che le fibre di vetro hanno il più alto fattore d'usura ($1 \times 10^{-7} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$), seguite da quelle aramidiche ($5 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$), mentre il valore minore spetta alle fibre di carbonio ($1 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$).

Per ciò che concerne l'aliquota di usura della sola matrice alcuni ricercatori [27] hanno studiato l'usura abrasiva di diversi materiali polimerici. Per polimeri rigidi, il più semplice contatto di usura abrasiva è quello in cui le asperità della superficie più dura penetrano nel polimero e rimuovono il materiale per azione di " taglio " .

Ratner e Al. [28] considerano che siano presenti tre stadi di evoluzione per la formazione di particelle d'usura:

1. deformazione della superficie nella zona di contatto;
2. opposizione al moto relativo da parte della forza di frizione;
3. rottura del materiale alle giunzioni che implica un lavoro di rottura uguale all'integrale della relazione tra sforzo e deformazione.

Essi proposero per il volume usurato W per unità di distanza una relazione di questo tipo:

$$W = \frac{\mu \cdot k}{H \cdot \varepsilon \cdot \sigma}$$

Il modello analitico trovato sperimentalmente ed utilizzato da Lhymn, Tempelmeyer e Davis [15] per i materiali compositi a fibre corte è:

$$V = \frac{k \cdot p \cdot N \cdot S \cdot \mu}{E \cdot I}$$

dove:

V = volume asportato;

μ = coefficiente d'attrito;

p = tensione normale;

N = carico;

S = distanza di scorrimento;

E = modulo di Young;

I = tensione di taglio interlaminare;

K = costante.

Da tale modello fu ricavata l'aliquota d'usura per unità di distanza di scorrimento (tasso d'usura):

$$W = a \cdot \left(\frac{p \cdot \mu}{E} \right)^b \cdot \frac{1}{I}$$

con a e b costanti opportune.

Zygmunt e Rymura [29] hanno utilizzato questo modello per il calcolo dell'usura di cuscinetti in materiale polimerico caricato con sfere e fibre di vetro, adottando per il coefficiente d'attrito la seguente formula:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{V_f}{\mu_f} + \frac{V_p}{\mu_p}$$

dove V_f è la percentuale volumetrica delle fibre e V_p quella del polimero, mentre μ_f e μ_p i relativi coefficienti d'attrito.

Infine da prove condotte su polimeri [30], in generale si individua un decremento dell'usura con la distanza di scorrimento e la quantità di materiale usurato può essere espressa approssimativamente come proporzionale a $d^{1/2}$, dove d è la distanza di scorrimento.

Tale decremento è presumibilmente causato dal progressivo livellamento della superficie e dalla formazione di un film protettivo di polimero sulla controfaccia [31].

2.2.3 Precedenti studi bibliografici relativi all'usura di compositi particellari

Il comportamento ad usura delle matrici plastiche caricate con polveri di materiale duro è stato già studiato da J.M. Durand per un contatto tra gli stessi materiali polimerici con una controfaccia in allumina e si riassume nella figura seguente 2.22:

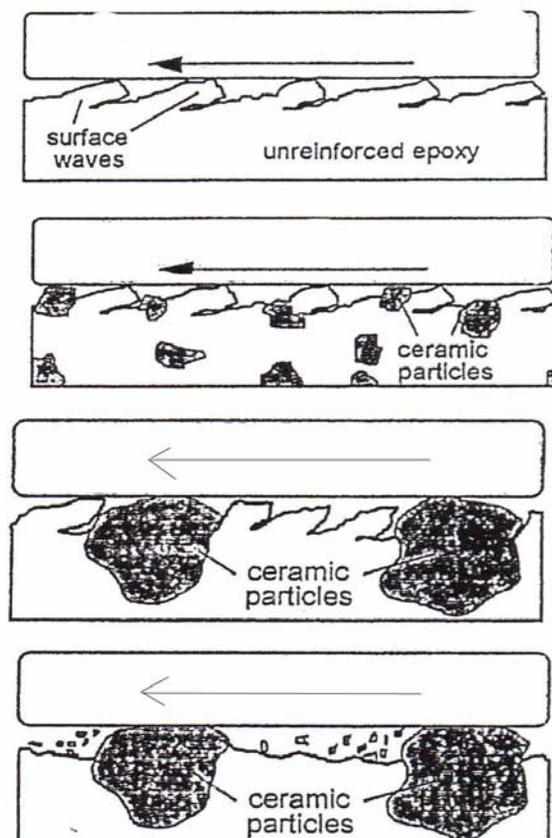


Figura 2.22 – Condizioni di plowing, cracking e cutting

J.M. Durand, utilizzando delle controfacce con sfere di diametro di 6mm e carichi di 30N, trovò il valore di questa dimensione limite delle particelle ceramiche in 20 μ m: particelle di dimensioni maggiori portavano un incremento della resistenza ad usura, mentre quelle di dimensioni inferiori venivano asportate insieme ai detriti della matrice polimerica. Durand, però, utilizzò pressioni molto elevate (125MPa) per cui si avevano severi fenomeni di microcracking che portavano ad un peggioramento generale della resistenza ad usura. [34]. Altre tipologie di prove furono condotte da X.S. Xing che utilizzò delle particelle sferiche di silice per incrementare la resistenza di una matrice epossidica. Xing utilizzò bassi carichi, di 1N e 2N e un pin sferico di carburo di tungsteno ricoperto di acciaio di diametro 5mm, avendo così delle pressioni molto più basse (<1MPa) di quelle testate da Durand. In ogni caso, con tutte le tipologie di polveri utilizzate, Xing trovò che la resistenza ad usura abrasiva veniva notevolmente incrementata caricando la matrice epossidica con polveri ceramiche, a prescindere dalle loro percentuali e dimensioni [35]. Va a questo proposito fatto notare che, a causa delle pressioni molto più basse, Xing, non trovò condizioni di microcracking.

Un altro ricercatore C. K. H. Dharan studiò lo stesso fenomeno, ma introducendo qualcosa in più rispetto agli studi precedentemente citati: C. K. H. Dharan parlò di formule per il calcolo della profondità di penetrazione dell'asperità della superficie abrasiva in funzione delle dimensioni delle particelle di carica. C. K. H. Dharan distinse il comportamento del materiale caricato in base al fenomeno fisico che si instaurava sotto determinate condizioni di contatto. Si passa infatti da condizioni di plowing, come mostrato in figura 2.23, quando si forma un'onda di materiale antistante all'asperità penetrante (dal verbo inglese "to plow" che significa "arare"), alla propagazione di cricche nella matrice, fino a raggiungere i primi grani di polveri di rinforzo. Queste cricche iniziano a propagarsi inizialmente nella zona di interfaccia tra matrice e rinforzo, poi la frattura si estende al grano di polvere di rinforzo [32] .

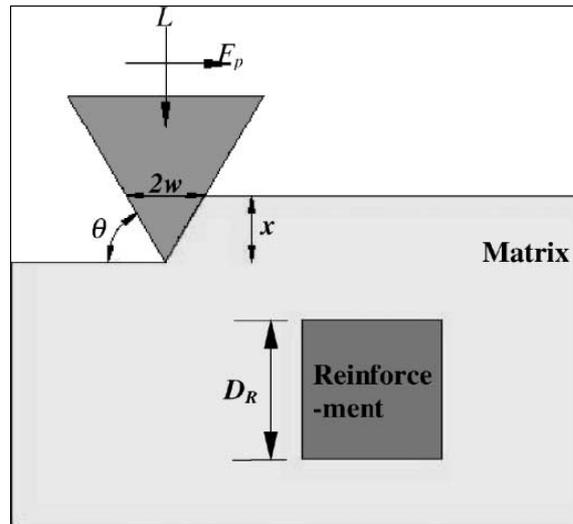


Figura 2.23 - Formazione di un'onda di materiale antistante all'asperità penetrante.

Ora, definendo G_{if} come la resistenza rottura del legame all'interfaccia e G_R come la resistenza a frattura nell'elemento di rinforzo, ha un fenomeno di:

- cracking all'interfaccia quando $G_{if}/G_R < 1/4$ (fig. 2.24a)
- cracking nel rinforzo quando $G_{if}/G_R \geq 1/4$ (fig. 2.24b)

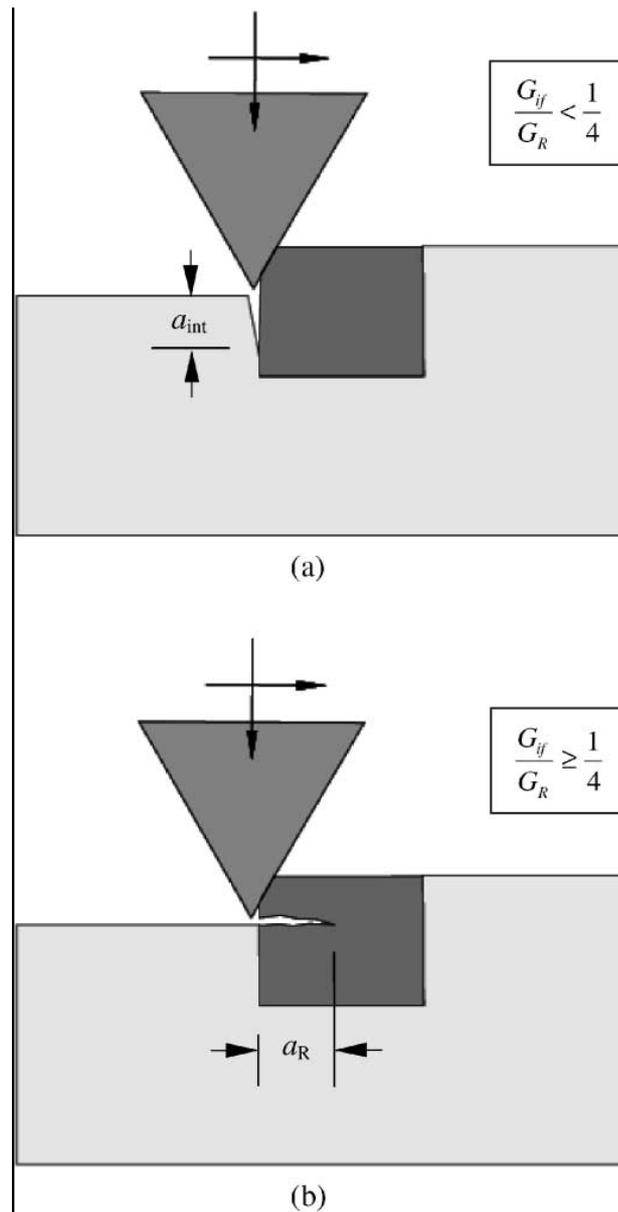


Figura 2.24 – Fenomeni di cracking nella matrice (a) e nel rinforzo (b).

L'ultimo fenomeno fisico che si rileva è quello del particle removal, dove le particelle dure vengono asportate in parte o interamente, in base al tipo di propagazione della cricca di frattura, non potendo dunque contribuire alla resistenza all'usura. Il loro "non-contributo" è indicato da Dharan come NCP (= Non-Contributing Portion) ed è calcolato nel modo seguente:

1. Quando il crack si manifesta nella zona di interfaccia (fig. 2.25) :

$$NCP = \frac{x + a_{int}}{D_R}$$

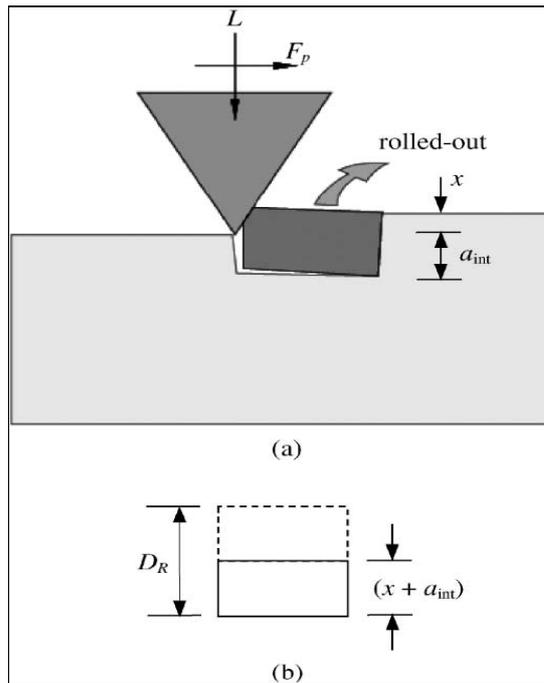


Figura 2.25 - Fenomeno fisico del particle removal con crack all'interfaccia

2. Quando il crack si manifesta nel rinforzo (fig.2.26) :

$$NCP = \frac{x a_R N}{D_R^2} = \frac{a_R}{D_R}$$

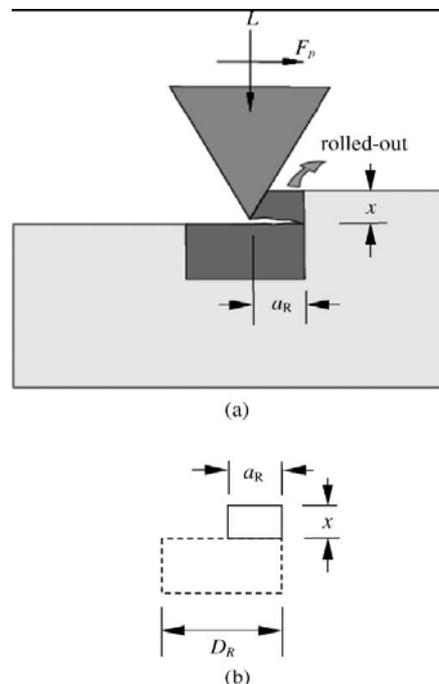


Figura 2.26 - Fenomeno fisico del particle removal con crack nel rinforzo.

2.2.4 Confronti nel comportamento all'usura dei diversi materiali compositi

2.2.4.1 L'usura contro superfici di acciaio lisce

Per i materiali a base di polimeri impiegati a contatto con superfici di acciaio lisce, si richiedono due principali requisiti: che il materiale sia in grado di sopportare il carico applicato senza subire apprezzabili deformazioni o indebolimenti e che il coefficiente di attrito e il consumo specifico di materiale siano bassi e poco influenzati da cambiamenti nelle condizioni di scorrimento dovute a temperatura, umidità, impurità ecc. Solo pochi del gran numero di polimeri disponibili in commercio risultano adatti a questi impieghi (Tab. 2.5).

Polymer†	Filler	Wear Factor k*	Frictional Coeff.	Limiting (p·v) value
PA 6.6	---	200	0.28	2500
PA 6.6	30% GF	75	0.31	7500
PA 6.6	30% CF	20	0.20	8000
PA 6.6	30% GF + 15% PTFE	16	0.26	17500
PA 6.6	30% CF + 15% PTFE	10	0.15	19000
PA 6.6	30% CF + 13% PTFE + 2% Silicon	6	0.11	20000

k* in 1.185×10^{-8} (cm³·min/kp·m·h)
 μ dynamic at 2.8 kp/cm² × 15.24 m/min
 p·v in 0.02 (kp·m/cm²·min) at 300 m/min
 counterpart: cold-rolled C-Steel, R_t = 0.3 μm, HRC 20

† from LNP Engineering Plastics

Tabella 2.5 - Caratteristiche di alcuni polimeri disponibili in commercio.

Per incrementare la rigidità dei polimeri è possibile ricorrere a degli elementi di rinforzo quali le fibre, alle quali è affidato il compito di sostenere il carico.

Le due tipologie più diffuse di fibre sono quelle di vetro e quelle di carbonio.

La presenza di fibre di vetro in una resina ne migliora le caratteristiche meccaniche e termiche, ma incrementa l'usura delle superfici di accoppiamento. L'uso di lubrificanti attenua questi inconvenienti; lubrificanti a base di polifluorotetraetilene (PTFE) predispersi nella resina di base, migliorano notevolmente le caratteristiche di usura e proteggono le asperità da urti e conseguenti rotture. Si possono impiegare anche lubrificanti a *migrazione interna*, che si spostano verso la superficie per diffusione molecolare o espulsione per incompatibilità dalla matrice; si ha così la continua formazione di un film protettivo di silicio (figura 2.27). La tabella 2.5 illustra l'effetto della lubrificazione e dell'aggiunta di fibre, sul consumo specifico, il coefficiente d'attrito, il fattore limite *pv*.

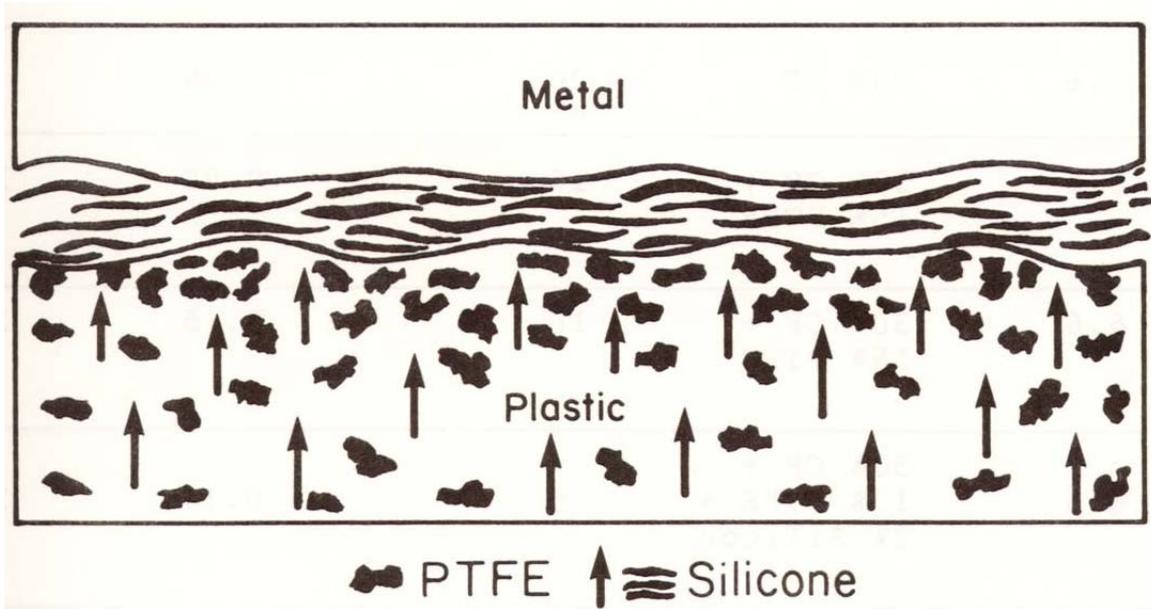


Figura 2.27 - Azione migratrice del silicio in un composto lubrificato contenente sia PTFE che silicio.

L'aggiunta di fibre di carbonio dà luogo a composti di elevata resistenza meccanica, alla deformazione, agli effetti termici, e con un basso coefficiente di attrito. La tabella 2.6 mette a confronto i valori del consumo specifico e del coefficiente d'attrito ottenibili senza e con la presenza di fibre.

Le ragioni per cui la presenza di fibre migliora la resistenza all'usura di una matrice polimerica è oggetto di intense ricerche.

Lancaster, sulla base di studi effettuati con fibre di carbonio, attribuisce questo comportamento a due fattori: le fibre degli strati esterni delle superfici in scorrimento sostengono una parte del carico, determinando la riduzione del consumo e dell'attrito; inoltre le fibre levigano per abrasione le superfici di acciaio della controparte, riducendo gli stress localizzati e l'effetto delle asperità. Questo ultimo comportamento potrebbe spiegare la minore efficacia, ai fini di riduzione dell'usura, delle fibre di vetro, che abradono le superfici di acciaio rendendole più ruvide.

Polymer	Wear rate, $\text{cm}^3/\text{cm kg} \times 10^{-10}$		Coefficient of Friction	
	No fiber	30 percent wt fiber	No fiber	30 percent wt fiber
Friedel-Crafts	860	0.13	0.56	0.24
Polyester (17449)	170	0.11	0.50	0.28
Polyvinylchloride	500	0.65	0.43	0.32
PTFE	460	1.6	0.25	0.25
Polypropylene	220	1.75	0.47	0.34
Polymethylmethacrylate	180	0.5	0.59	0.24
Polycarbonate	41	1.2	0.61	0.25
Nylon 6.6	10	1.1	0.40	0.35
Polyethylene	4.2	0.9	0.68	0.27
Polyimide	2.1	0.4	0.68	0.35

Tabella 2.6 - Tasso d'usura e coeff. di attrito di alcuni polimeri disponibili in commercio.

Le ricerche effettuate da *Tanaka* hanno peraltro mostrato che nei meccanismi di prova dell'usura svolge un ruolo anche la velocità: per valori molto bassi, matrici di poliacetato (PAC) non rinforzate mostrano indici di consumo inferiori a quelle muniti di fibre di carbonio o vetro; viceversa in un range di velocità superiori ad un valore critico (funzione del carico) i composti PAC/fibra manifestano usura più ridotta.

Tanaka ed altri hanno anche studiato gli effetti della forma e delle dimensioni delle fibre, rilevando che fibre di piccole dimensioni, al contrario di quelle maggiori, non sono in grado di evitare un diffuso danneggiamento della matrice.

Sono stati studiati anche gli effetti dell'orientamento delle fibre all'interno del polimero. Le figure 2.28 (a) e (b) mostrano gli andamenti del consumo in volume e del coefficiente di attrito per tre diverse disposizioni delle fibre (N = normale, P = parallelo, AP = antiparallelo).

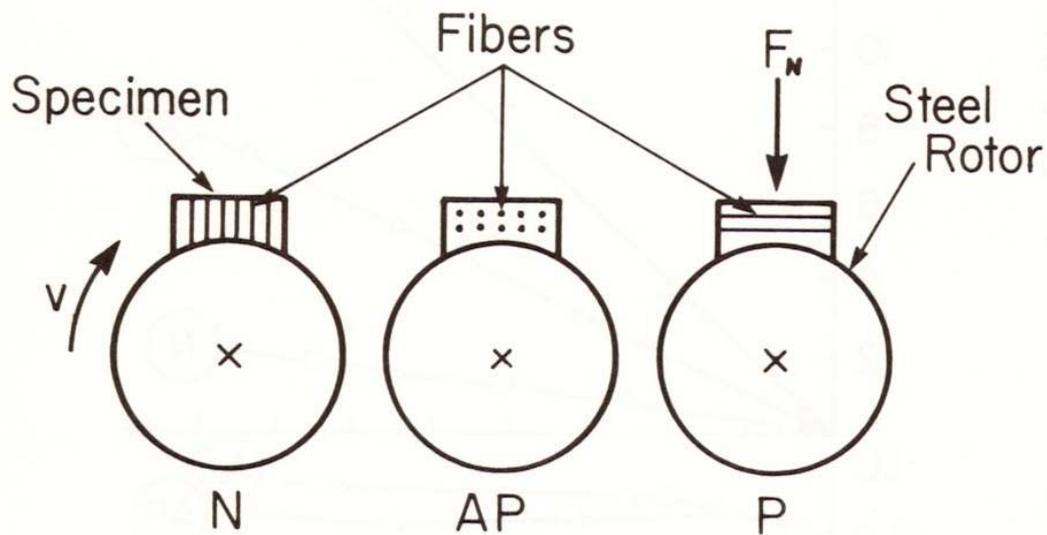


Figura 2.28 (a) - Definizione dell'orientamento delle fibre secondo la direzione di scorrimento

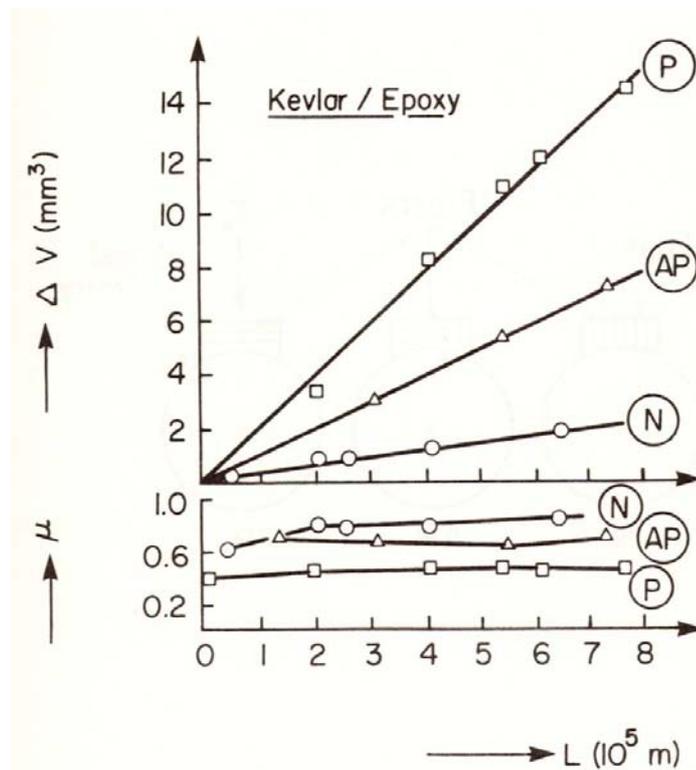


Figura 2.28 (b) - Coefficiente di attrito e volume di usura in funzione della distanza di scorrimento per contatto composito- acciaio

2.1.4.2 L'usura abrasiva

L'indice di consumo di metalli, polimeri e compositi è fortemente influenzato dalla morfologia della controparte.

Quando il materiale scorre contro superfici continuamente rinnovate, l'indice di consumo risulta approssimativamente proporzionale al quadrato della rugosità della controparte (R_a , secondo la terminologia ISO, v. figura 2.29).

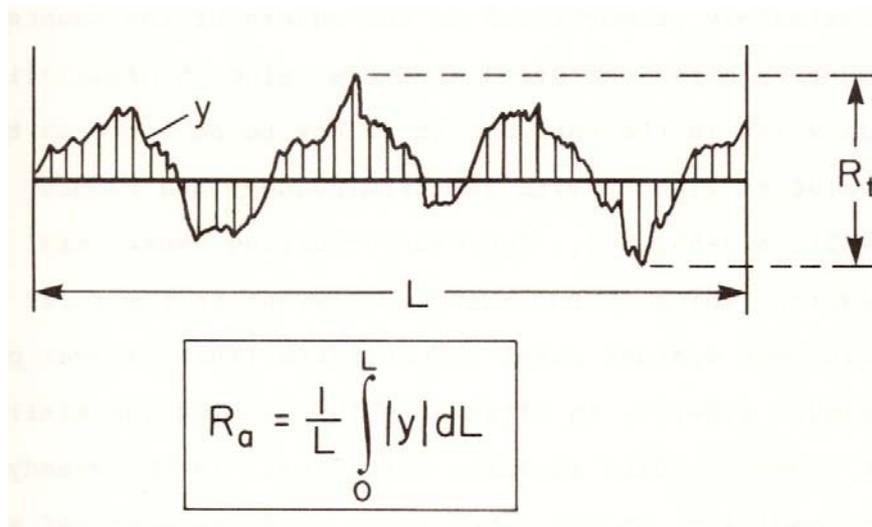


Figura 2.29 - Rappresentazione schematica e definizione di un profilo di rugosità,

In questa situazione l'usura è spesso di tipo abrasivo. In condizioni stazionarie peraltro l'usura abrasivo può diventare predominante se la superficie del materiale logorante si è modificata in passaggi precedenti: se tali modifiche hanno incrementato la rugosità, si ha il passaggio dall'usura da scorrimento a quella abrasiva. In alcuni casi le modifiche alla superficie della controparte influenzano l'usura del composito più che non il miglioramento delle sue proprietà introdotto dal rinforzo.

Le ricerche di *Lancaster* [36] hanno esaminato i meccanismi di usura attraverso i dati ottenuti impiegando polimeri con e senza rinforzo in fibre, interfacciate a superfici di acciaio lisce o rugose. I risultati mostrano che in condizioni stazionarie l'usura avviene prevalentemente per effetto di adesione lungo le asperità del contatto, fra il composito e la superficie di acciaio, ovvero un film di polimero e di fibra che si forma su questa. In condizioni di passaggi singoli invece predominano effetti di penetrazione e microsolcatura dell'acciaio nella

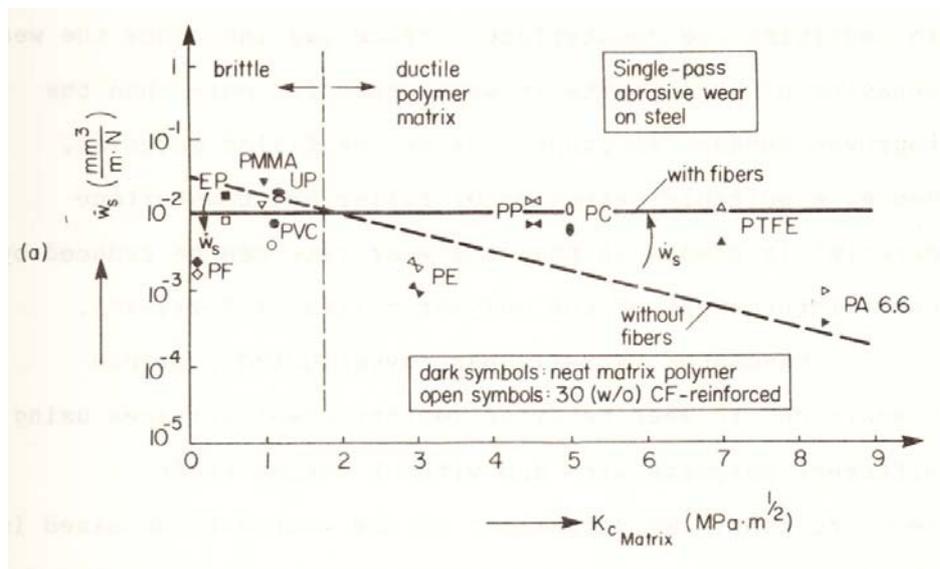
superficie del composito, con la formazione di detriti da abrasione per microtagli e microfratture.

Si è già visto [9,10,12,35] il legame di proporzionalità inversa, in regime di abrasione, fra l'indice di consumo e il prodotto $\sigma_B \epsilon_F$, fra il carico di rottura e il coefficiente di allungamento unitario.

Il rinforzo dei polimeri mediante fibre determina un aumento di σ_B con un fattore 1,5÷4, ma una diminuzione anche di 100 volte di ϵ_F . Il rinforzo in fibre determina quindi frequentemente una riduzione del prodotto $\sigma_B \epsilon_F$, e conseguentemente della resistenza all'usura abrasivo.

Secondo Lancaster tale riduzione è particolarmente avvertita per i materiali compositi con matrice duttile (polifluorotetraetilene, polipropilene, policarbonato ecc.) rispetto a quelli con matrice relativamente fragile (metacrilato poliammide, resine poliesteri ecc.).

I diagrammi della figura 2.30 mostrano i diversi comportamenti nel funzionamento a passaggi singoli e in quello in regime stazionario, nei casi di assenza o presenza di fibre.



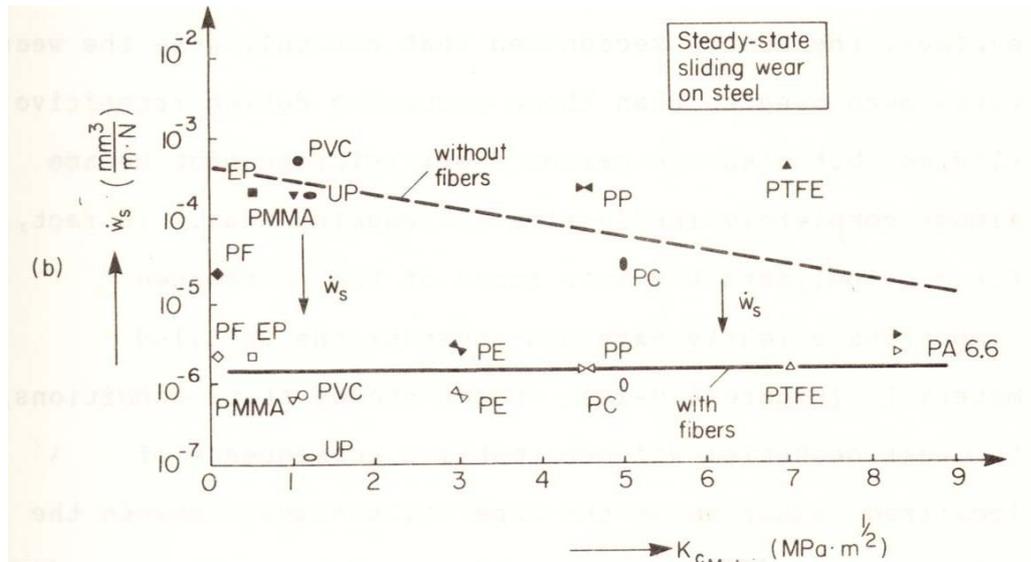


Figura 2.30 - Effetto del rinforzo in fibra di carbonio 30w/o e della duttilità della matrice su (a) l'usura durante il singolo passaggio trasversale e (b) l'usura in scorrimento stazionario.

I comportamenti riferiti sono confermati dall'andamento di test compiuti con dischi di acciaio di differente rugosità: i diagrammi della figura 2.31 mostrano che per polimeri duttili, la presenza di fibre di carbonio comporta un miglioramento della resistenza all'usura per valori molto bassi della rugosità, mentre per valori molto elevati l'effetto è negativo.

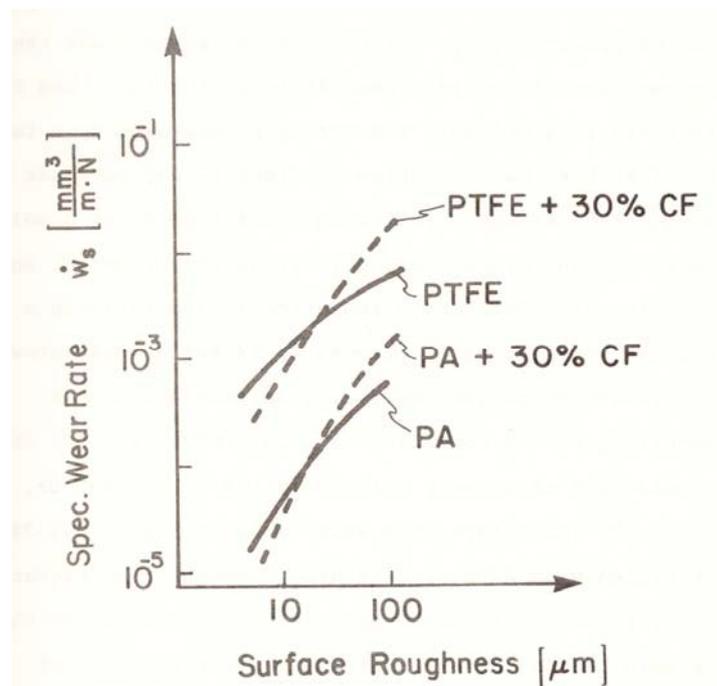


Figura 2.31 - Variazione dell'indice d'usura di polimeri con e senza rinforzo in fibre in funzione della rugosità della controparte

CAPITOLO III – MATERIALI e METODI di PROVA

3.1 INTRODUZIONE

Dovendo esaminare il comportamento ad usura abrasiva di materiali compositi a matrice polimerica caricati con polveri di materiali duri, sono state condotte una serie di prove sperimentali di usura abrasiva, utilizzando sia provini di sola resina epossidica, sia provini di resina epossidica caricata con polveri di SiC.

In passato sono stati già formulati dei modelli analitici; essi sono basati su due equazioni semplificate, la prima delle quali fu introdotta da Khruschov e Babichev per materiali a due fasi:

$$1/W_c = V_{m1}/W_{m1} + V_{m2}/W_{m2} \quad [3.1]$$

Dove W e V sono rispettivamente l'indice di usura e la frazione volumetrica di matrice e rinforzo. Tale equazione è basata sull'assunzione che i componenti del composito si usurino con lo stesso passo. Di conseguenza l'equazione di Khruschov predice che la resistenza ad usura abrasiva dei compositi è lineare ed è semplicemente la somma dei prodotti della resistenza ad usura ($R=1/W$) e della frazione volumetrica di ciascun componente. La seconda delle due equazioni predette, è relativa a materiali a più fasi e fu introdotta da Zum-Gahr. Questa equazione è la regola lineare delle miscele: il comportamento ad usura di un composito non è dominato da una singola fase, ma il contributo di ogni componente è direttamente proporzionale alla sua frazione volumetrica:

$$W_c = V_{m1}W_{m1} + V_{m2}W_{m2} \quad [3.2]$$

In questo modello l'indice di usura abrasiva decresce linearmente con l'aumentare della frazione volumetrica di rinforzo.

Mentre queste due equazioni si prefiggono di fornire limiti superiori e inferiori per l'indice di usura abrasiva in un composito, ciò non è confermato da alcuni risultati sperimentali a causa della natura semplificata e priva di basi fisiche dei due modelli [37]. Gli effetti di altri importanti fattori, come le proprietà

dell'interfaccia tra le diverse fasi, le loro diverse durezze non sono considerati sebbene sia chiaro che esse hanno una significativa influenza sull'abrasione.

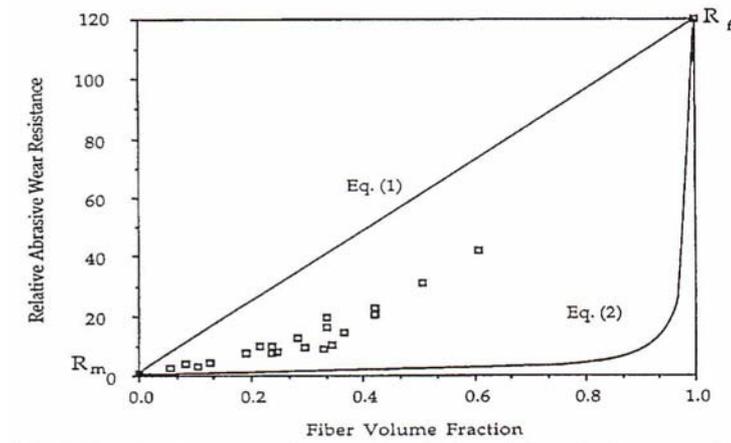


Figura 3.1 – Upper e Lower bounds

Si è così proceduto ad una serie di prove per mettere in evidenza l'influenza in tali prove di alcuni importanti parametri, quali:

- la rugosità della superficie abradente
- la distanza percorsa
- il carico normale applicato
- il modulo elastico del composito E_c

3.2 MATERIALE TESTATO

3.2.1 I materiali caricati

Per la realizzazione delle prove di usura abrasiva, sono stati realizzati due diverse tipologie di provini, rispettivamente di forma semisferica e di forma piatta.

I provini ricavati, sono stati successivamente incollati su un pin di acciaio di forma prismatica a base quadrata dell'altezza di circa 2 cm; per il corretto svolgimento della prova si è atteso che la colla fissante il provino sul pin, polimerizzasse per almeno 24 ore.

I provini a testa semisferica sono stati realizzati mediante i seguenti step:

- Realizzazione di uno stampo in resina siliconica utilizzando i pin di acciaio usati nelle prove precedenti (fig 3.2) garantendo una sola faccia del provino a finitura controllata.



Figura 3.2 – pin in acciaio utilizzato come forma per la realizzazione degli stampi in resina siliconica

- Estrazione del pin in acciaio una volta polimerizzata la resina siliconica
- Preparazione di resina epossidica BECOR SX 10 con l'opportuno catalizzatore (26%in peso), talvolta caricata con polveri o fibre
- Colata della soluzione all'interno dello stampo
- Estrazione del provino dopo circa 24 ore di polimerizzazione
- Rifinitura del provino semisferico ottenuto con carta abrasiva 1200 mesh sia sulla faccia inferiore per avere un piano parallelo alla faccia del pin su cui verrà incollato, e superiormente per eliminare eventuali bave acuminose che potrebbero rovinare la carta durante le prove falsandone i risultati



Figura 3.3 – Provino a testa semisferica in resina+Sin 30% 600mesh prima della prova

Per i materiali utilizzati si è voluto mettere in evidenza il diverso comportamento tra i provini di sola resina, resina caricata con polveri di carburo di silicio (SiC) in diverse percentuali e granulometrie. Infine sono stati realizzati provini prismatici a base quadrata di area 1cm^2 e spessore di 3mm di cui si parlerà in seguito. È stata, altresì, utilizzata una seconda tipologia di provini, di forma prismatica, al fine di avere una costanza della sezione durante la fase di asportazione di materiale.

Tali provini sono stati realizzati in laboratorio secondo i seguenti step:

- Preparazione di uno stampo a base rettangolare su una piastra di policarbonato liscio utilizzando sigillante ricoperto da un film di distaccante plastico
- Preparazione della resina Becor Sx 10 con l'opportuno catalizzatore ed eventuale aggiunta di polveri di SiC nelle percentuali volute
- Colata del preparato nello stampo
- Attesa per la polimerizzazione (almeno 24ore)
- Estrazione manufatto



Figura 3.4 – Piastre in resina epossidica caricata con polveri di SiC, dopo l'estrazione dallo stampo.

- Taglio mediante sega di provini a base quadrata di area 1cm^2



Figura 3.5 – Provini tagliati con base quadrata di 1cm^2 e porta provino metallico.

- Incollaggio su pin metallici a 45°

Per i materiali si sono fabbricati provini con così costituiti:

- Resina epossidica
- Resina epossidica caricata con SiC mesh 600 (10% vol)
- Resina epossidica caricata con SiC mesh 1000 (10% vol)
- Resina epossidica caricata con SiC mesh 2000 (10% vol)
- Resina epossidica caricata con SiC mesh 600 (30% vol)
- Resina epossidica caricata con SiC mesh 1000 (30% vol)
- Resina epossidica caricata con SiC mesh 2000 (30% vol)

Sono stati poi testati sulla macchina pin-on-disc descritta nei successivi paragrafi ponendo sul disco in acciaio fogli di carta abrasiva a mesh 280, 400, 600, 1200 e con le seguenti caratteristiche:

- Raggio = da 30mm a 100mm
- Carico 10, 20, 30N
- Velocità = da 0,048 m/s a 0,163m/s

Per rendere il contatto provino-carta uniforme, prima di ogni prova, i provini incollati sono stati lasciati girare per 30, 40 secondi su una pista a raggio 105mm in modo da farli usurare ed ottenere così un contatto con la carta su tutta l'area degli stessi e non solo in alcuni angoli.

Le dimensioni delle particelle di SiC utilizzate come rinforzo particellare per la resina epossidica, sono state rilevate da ricerche bibliografiche [38] e sono di seguito riportate:

Grana polveri	Dimensione (Rp) * particelle
600 #	9 µm
1000 #	5 µm
2000 #	1,5 µm

Tabella 3.1 – Dimensioni delle polveri di Carburo di Silicio, utilizzate come rinforzo particellare.

Per il calcolo del modulo elastico per l'utilizzo della formulazione descritta, trattandosi di compositi particellari, è risultato più indicato l'utilizzo della regola inversa delle miscele [39]:

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f$$

Con questa formula si stabiliscono i valori dei moduli elastici dei compositi particellari, al variare della percentuale volumetrica di carica che si riassumono nella tabella 3.2:

Tipo provini	E_c (formula inversa)
SiC 10% vol.	3,88 GPa
SiC 30% vol.	4,98 GPa

Tabella 3.2 – Valori del modulo elastico dei compositi particellari, calcolati con la regola inversa delle miscele

3.2.2 Le controfacce abrasive e le prove di rugosità

Per la valutazione dell'usura abrasiva dei provini testati, prima di ogni prova il disco di acciaio è stato rivestito con fogli di carta abrasiva del tipo 1200, 600 e 400 realizzati con polveri di SiC, fissati sul disco con nastro biadesivo e nastro di carta.

Le prove sono state condotte per determinare l'usura sui provini, valutata come perdita in peso, e quindi in termini di asportazione di materiale, che i provini mostrano dopo aver compiuto un giro completo sul foglio di carta abrasiva, quindi senza che ci siano sovrapposizioni di piste. È possibile schematizzare il contatto pin-carta abrasiva come nella figura 3.6:

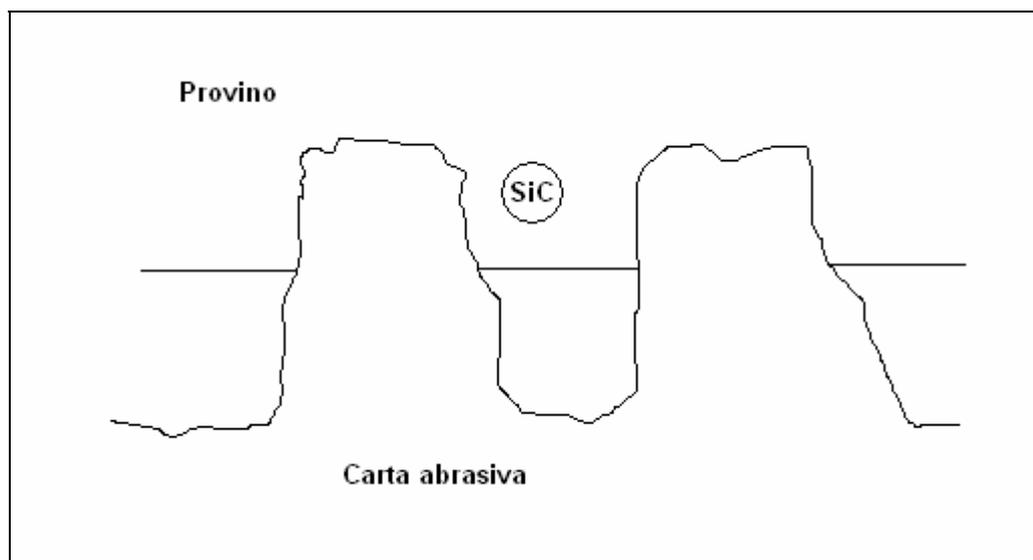


Figura 3.6 – Schematizzazione del contatto provino-carta abrasiva

Inoltre, per evitare che i residui asportati dalla superficie del pin andassero ad occupare le valli tra le asperità delle carte riducendone l'effetto abrasivo, si è ritenuto di far scorrere i provini sempre su tratti nuovi di carta, evitando, come sopra detto, sovrapposizioni di piste.

Le carte abrasive utilizzate, di marca Grinco, sono state caratterizzate in laboratorio, utilizzando un rugosimetro della Taylor-Hobson, modello SUBTRONIX SF3 (figura 3.7).

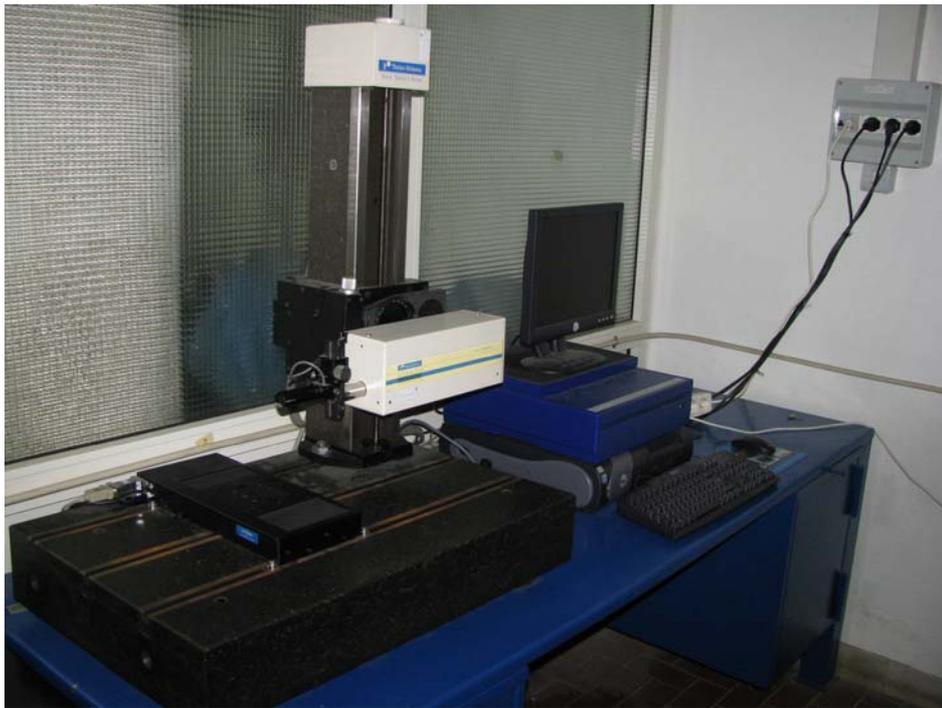


Figura 3.7 – Rugosimetro utilizzato per la determinazione del valore di R_a delle carte abrasive.

I valori di R_a (μm) rilevati dalle prove di caratterizzazione sono riportati nella tabella 3.3.

Tipo di carta	R_a (μm)
280 mesh	15.93 μm
400 mesh	11.04 μm
600 mesh	9.28 μm
1200 mesh	4.28 μm

Tabella 3.3 – Valori dell'indice di rugosità delle diverse carte abrasive

3.3 LE PROVE DI USURA ABRASIVA

3.3.1 Introduzione

Le prove sono state eseguite presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell'Università di Napoli, rilevando l'usura in termini di perdita di peso e volume, ossia valutando la perdita di peso dei provini testati utilizzando una bilancia di precisione in grado di misurare i millesimi di grammo, al termine di ogni singola prova e calcolando la relativa perdita volumetrica, valore che fa comprendere l'effettiva riduzione dimensionale che esso subisce a seguito dell'usura.

3.3.2 La strumentazione di prova

Per le prove d'usura è stata utilizzata una macchina del tipo pin-on-disk, riportata nella figura 3.8, presso l'officina del DIMP, con riferimento alla norma ASTM G 99 – 95a per le modalità di svolgimento delle prove.



Figura 3.8 Apparato sperimentale per le prove di usura.

Tale macchina, schematizzata in figura 3.9, è costituita da un basamento, su cui è disposto un disco d'acciaio inox di 400 mm di diametro, in grado di

ruotare a diverse velocità angolari, da un braccio rigido, che può traslare nel piano del disco rispetto all'asse di rotazione, alla cui estremità vi è il dispositivo di afferraggio del portaprovino.

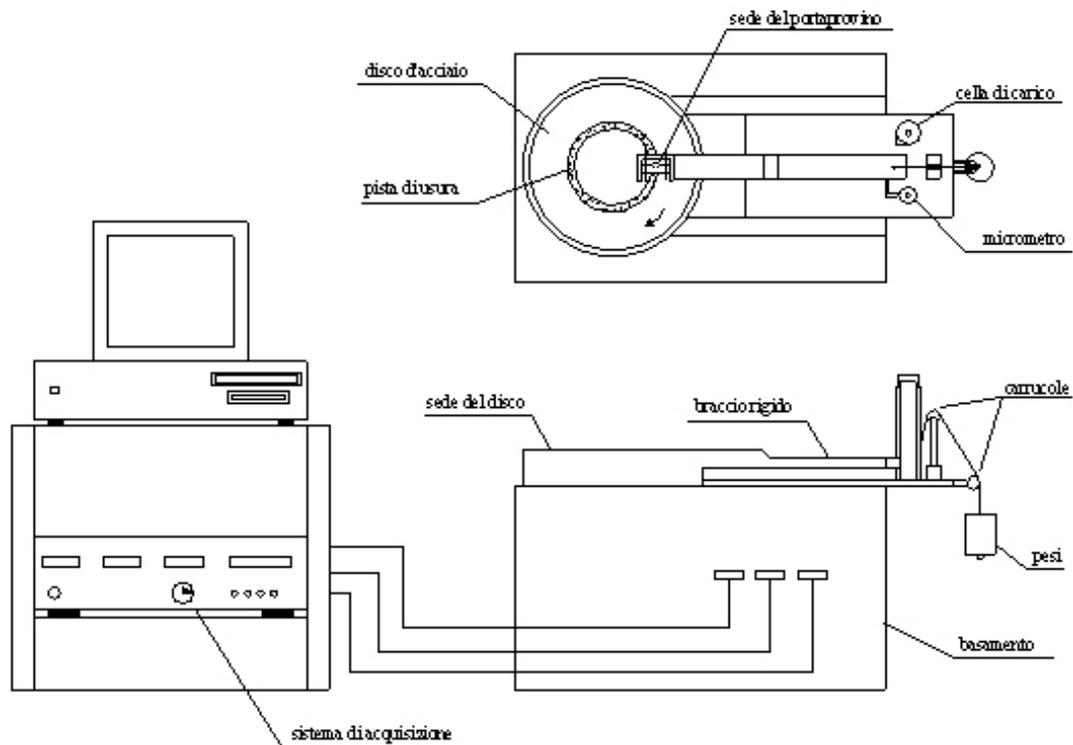


Figura 3.9 - Schema dell'apparato pin-on-disk collegato al sistema d'acquisizione.

Il portaprovino, a sua volta, è di acciaio di forma prismatica a base quadrata dell'altezza di circa 2 cm, su una cui faccia, opportunamente trattata su macchina utensile, viene incollato a 45° il provino anch'esso a sezione quadrata di 1 cm². Il tipo di provino viene realizzato in forme e composizioni diverse in base alla tipologia di prove a cui è destinato, come verrà mostrato nei capitoli successivi.

Il disco è azionato da un motore elettrico trifase mediante trasmissione con cinghia e dotato di un variatore di velocità.

All'estremità del braccio rigido, opposta a quella su cui è montato il portaprovino, è presente una cella di carico ad esso collegata che permette la valutazione della forza che agisce tangenzialmente (forza d'attrito) al provino durante il contatto tra esso e il disco. Inoltre sempre questa estremità del braccio è dotata di un'asticella trasversale d'acciaio che è in contatto con un opportuno tastatore di un micrometro che fornisce la misura dell'usura. Di

quest'ultima si riporta in figura 3.10 un andamento tipico acquisito al termine di una delle prove eseguite.

I segnali rilevati sia dalla cella di carico che dal tastatore del micrometro (figura 3.11) sono inviati, opportunamente amplificati, ad un idoneo sistema d'acquisizione e di registrazione collegato con un calcolatore su cui un software (WinAcq), concesso dalla casa costruttrice della macchina, fornisce in tempo reale i rilievi relativi all'usura ed alla forza tangenziale rispettivamente in $\mu\text{m/s}$ e in N (figura 3.12).

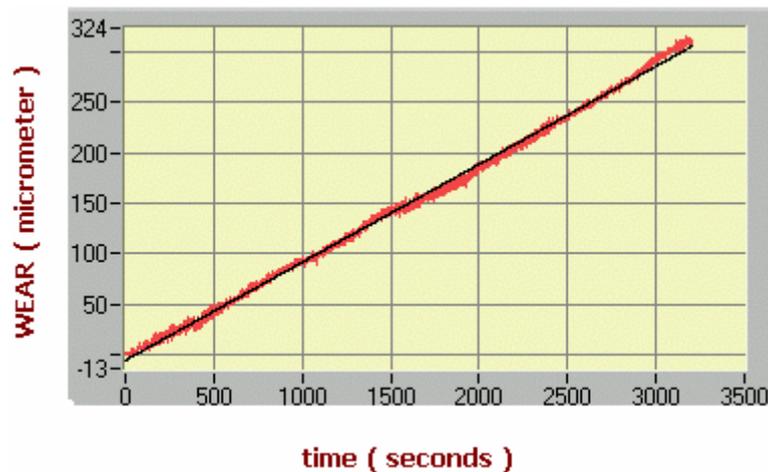


Figura 3.10 - Andamento dell'usura in funzione del tempo acquisito al termine di una prova.



Figura 3.11 - Particolare della macchina con cella di carico e micrometro.

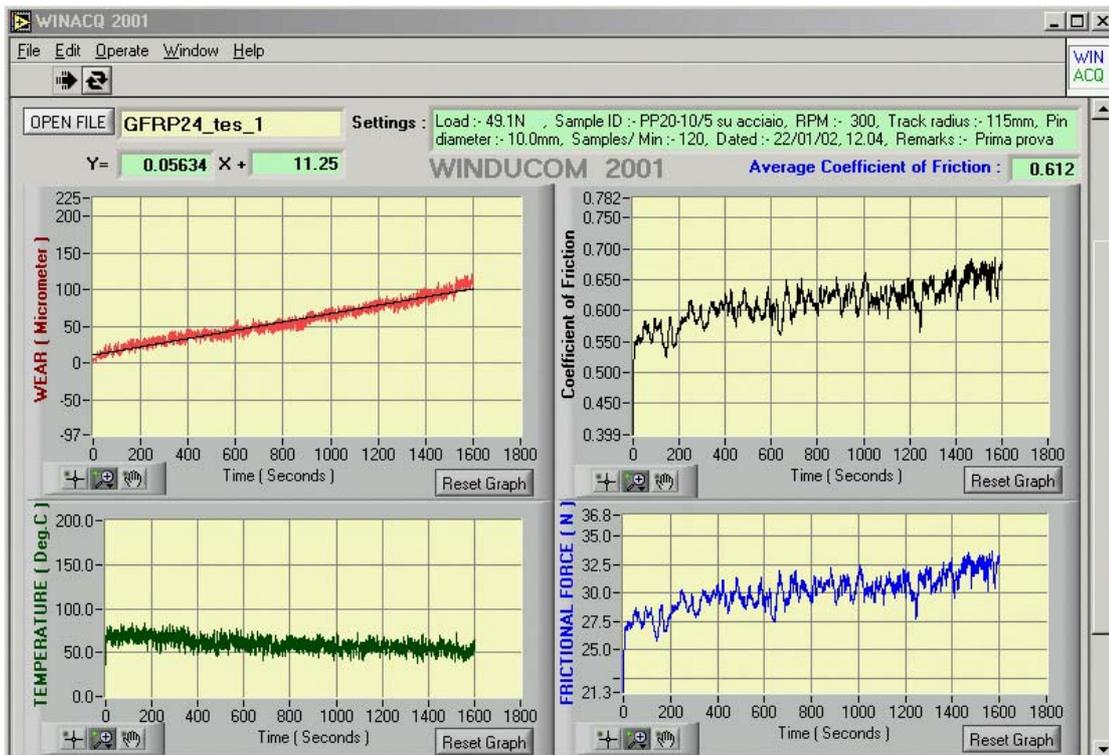


Figura 3.12 - Schermata tipo del programma di acquisizione Win Acq.

Al braccio sono collegati, mediante un filo metallico ed un sistema di carrucole, i pesi che forniranno la forza applicata sul provino. Nota la forza tangenziale e conoscendo il carico normale applicato (forza di chiusura), lo stesso software fornisce l'andamento del coefficiente d'attrito durante la prova.

3.3.3 Le specifiche delle prova

Per andare a considerare le dipendenze del comportamento ad usura dai parametri sopra descritti si sono effettuate prove con diversi valori di carico, distanza percorsa, rugosità della carta; ecco di seguito le specifiche adottate per le prove:

- Carico: 10N, 20N, 30N
- Distanza percorsa: 502mm, 691mm, 880mm
- Velocità di scorrimento variabile tra 0,048 m/s (ad $r=30\text{mm}$) e 0,163 m/s (ad $r=100\text{mm}$).
- Carte abrasive utilizzate e rispettivi valori dell'indice di rugosità R_a come da precedenti tabelle 3.2 e 3.3.

CAPITOLO IV – LE PROVE SPERIMENTALI

4.1 INTRODUZIONE

Nel presente capitolo verranno descritte le prove eseguite presso i Laboratori del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione. Sono state eseguite due tipologie di prove di usura abrasiva, le prime per determinare l'influenza delle polveri di rinforzo all'interno di una matrice caricata e le seconde per determinare l'entità del miglioramento apportato dalle particelle di carica.

La prima tipologia di prova ha visto l'impiego di provini con testa emisferica, realizzati mediante degli stampi in silicone e la successiva colata di resina, opportunamente caricata di polveri, all'interno degli stessi. Questa tipologia di prova è stata necessaria per determinare se le polveri di rinforzo portavano ad un miglioramento della resistenza al graffio di una matrice epossidica. La forma simmetrica di questa prima tipologia di provini ha certamente evitato la formazione di momenti sulle superfici in contatto, dovuti alla posizione di contatto eccentrica, tra il provino e la superficie abrasiva. Tuttavia, durante l'asportazione di materiale, l'area apparente di contatto del provino, andava aumentando con legge quadratica, pertanto si è ritenuto opportuno procedere con una seconda tipologie di prove, utilizzando provini prismatici, a testa piatta, con base quadrata in modo tale da potersi riferire ad un unico e costante valore dell'area di contatto dei provini sulla superficie abrasiva.

Dall'analisi dei risultati di queste tipologie di prove, si è proceduto alla formulazione di un modello analitico per il calcolo dell'usura in determinate condizioni di strisciamento, di cui si parlerà nei paragrafi successivi.

4.2 PROVE SU PROVINI A TESTA SEMISFERICA

Dopo aver realizzato in Laboratorio i provini, con le modalità tipologie già descritte nel capitolo precedente, sono state effettuate una serie di prove con i provini a testa emisferica.

Per lo svolgimento delle prove sono stati incollati i provini realizzati su opportuni portaprovini metallici e sono stati montati sul braccio della macchina Pin On Disc, descritta nel precedente capitolo.

Come controfacce abrasive sono state utilizzate carte abrasive, le cui caratteristiche di rugosità sono state sperimentalmente calcolate.

Dalle nuove prove sui provini in resina caricata con carburo di Silicio, è stato possibile rilevare che, rispetto alla sola resina, i provini caricati presentano, per bassi carichi, valori della perdita volumetrica leggermente inferiori. Le cose iniziano a essere più evidenti per carichi maggiori (30N), quando si nota che i provini con polveri più fini (2000mesh) resistono meno all'usura portando così a grosse perdite volumetriche. Dalle figure 4.1, 4.2 e 4.3 si nota come l'aumento della percentuale di polveri porti ad un miglioramento del comportamento ad usura per i provini con polveri a 600mesh, mentre produce un effetto meno marcato per provini con polveri a 2000mesh.

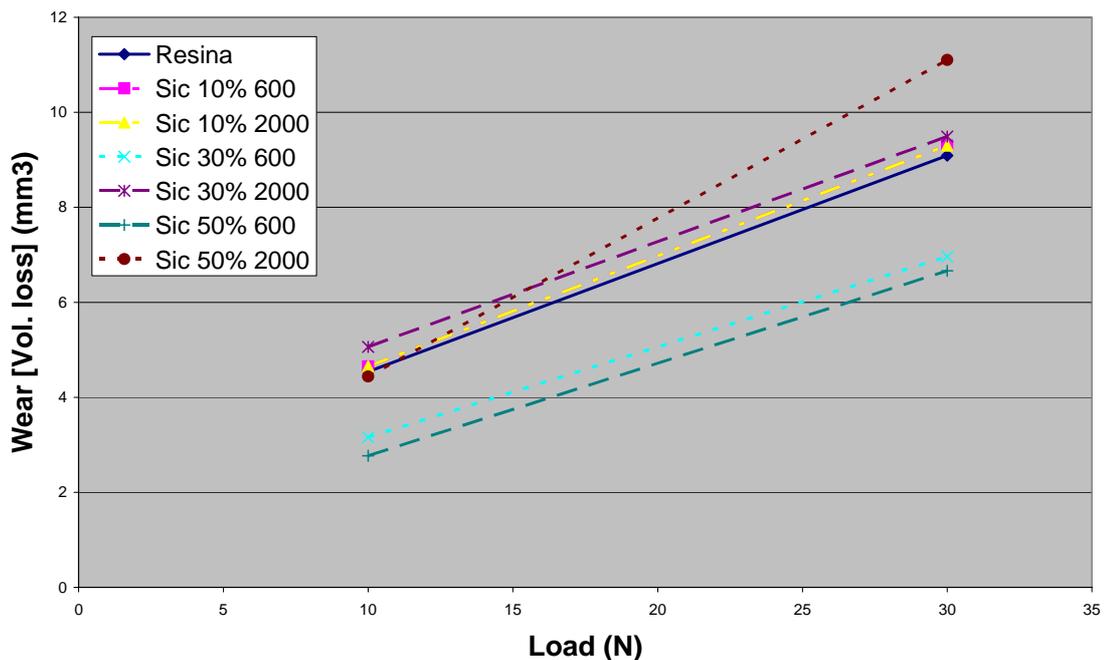


Figura 4.1 – Perdita volumetrica al variare del carico su carta 400 su 502mm percorsi

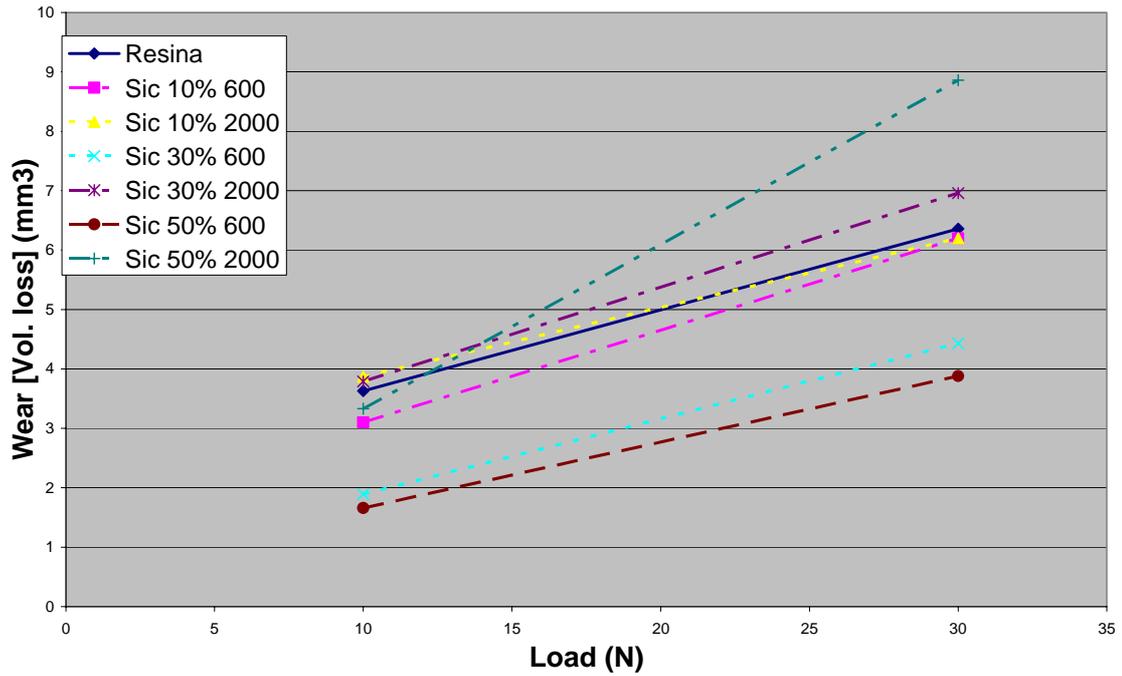


Figura 4.2 – Perdita volumetrica al variare del carico su carta 600 su 502mm percorsi

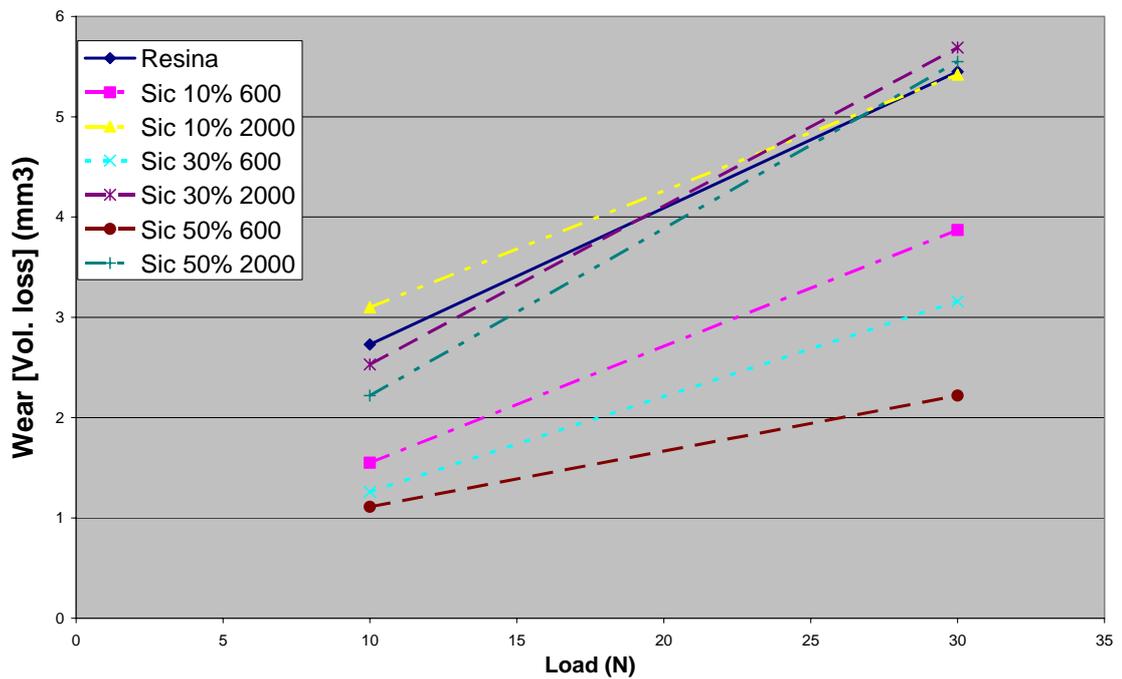


Figura 4.3 – Perdita volumetrica al variare del carico su carta 1200 su 502mm percorsi

Tale effetto si rileva essere amplificato per le prove svolte su carte 400 di rugosità maggiore ($11.04 \mu\text{m}$), ma è ugualmente visibile anche per le prove svolte su carte 1200 di rugosità inferiore ($4,28 \mu\text{m}$).

Al fine di comprendere il fenomeno microscopico, si deve far riferimento sia alle altezze delle asperità presenti sulle carte abrasive sia ai carichi applicati per le singole prove: per carichi bassi le asperità della carta non penetrano molto nel materiale per cui l'effetto di rinforzo della resina con polveri di materiale duro non sortisce effetti apprezzabili. Ma con il crescere del carico normale, le asperità penetrano maggiormente nel provino, per cui la sua durezza, dipendente dal tipo e dalla percentuale di polveri, caratterizza il fenomeno.

Sperimentalmente, inoltre, è stato rilevato che provini caricati con polveri a 600 mesh mostrano un migliore comportamento rispetto a quelli caricati con polveri a 2000mesh ovvero quelli costituiti da sola resina non caricata: sotto carichi bassi, lo scorrimento del provino su carta abrasiva, provoca la formazione di onde superficiali di materiale (surface waves), al di sotto delle quali si propagano delle cricche. Quando andiamo a caricare la resina epossidica con particelle ceramiche come il Sic, si ha che le particelle di piccolo diametro vengono asportate insieme a detriti della matrice polimerica senza fornire un apprezzabile contributo alla resistenza ad usura. Man mano che aumenta la grandezza delle particelle, aumenta la resistenza che esse oppongono all'asportazione e pertanto migliorano il comportamento ad usura.

In questo lavoro di ricerca, sono stati considerati valori dei carichi e delle dimensioni delle particelle variabili in modo da esplorare il comportamento dei materiali in condizioni di usura, severe e non.

In particolare si è fatto uso di particelle di dimensioni fino a 9 μm per i SiC 600 mesh, di carichi di 10N, 20N, 30N e pressioni comprese tra 0,5÷5MPa.

Al fine di avere una relazione che mostri la dipendenza dell'usura anche dalla distanza percorsa, sono state effettuate altre due serie di prove sulle stesse tipologie di provini, ma a distanze superiori, rispettivamente di 691mm e 880mm. Le due serie di prove hanno mostrato comportamenti analoghi a quelli visti per le prove a 502mm (figura 4.4)

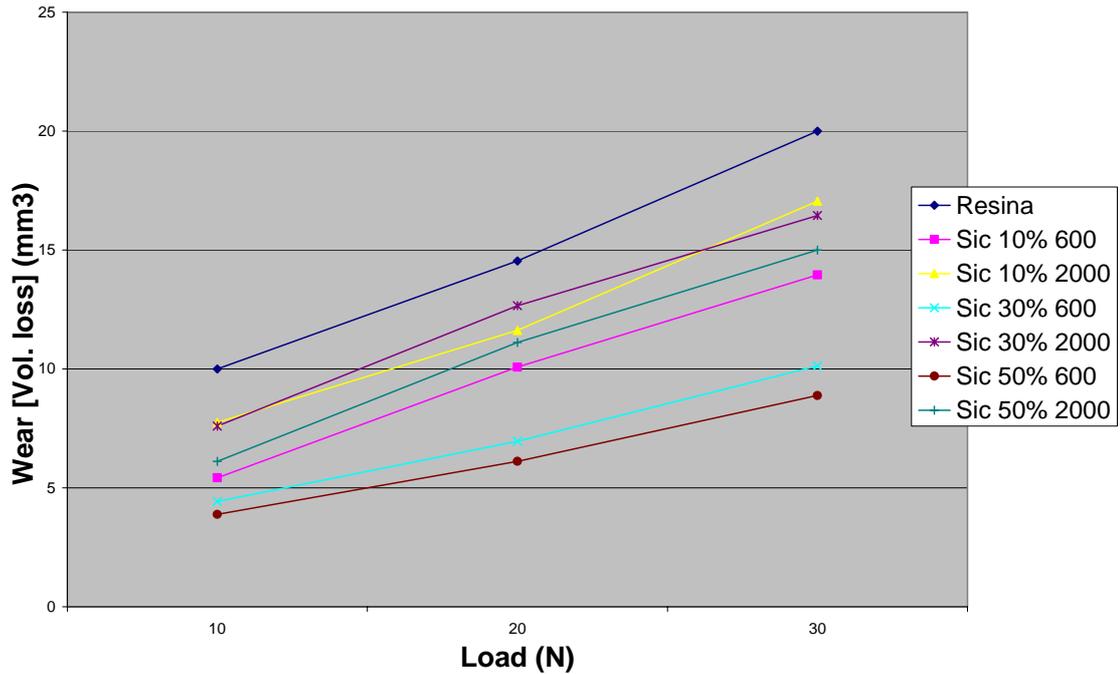


Figura 4.4 – Perdita volumetrica al variare del carico su carta 400 su 880mm percorsi. Da queste nuove prove, è stato possibile rilevare ancora meglio come, rispetto alla sola resina, l'aggiunta di polveri di Sic porti ad una diminuzione dell'usura valutata come perdita volumetrica; diminuzione che però dipende anche dalle dimensioni delle stesse particelle presentando le migliori caratteristiche per polveri di dimensioni maggiori.

È stato altresì rilevato, che per bassi carichi, le condizioni di microcracking sono ancora contenute per cui tutti i provini mostrano comportamenti simili, racchiusi in un breve intervallo. All'aumentare del carico, il microcracking cresce anch'esso portando ad una differenziazione delle diverse tipologie di provini.

Quanto alla dipendenza dalla distanza, è possibile osservare la figura 4.5:

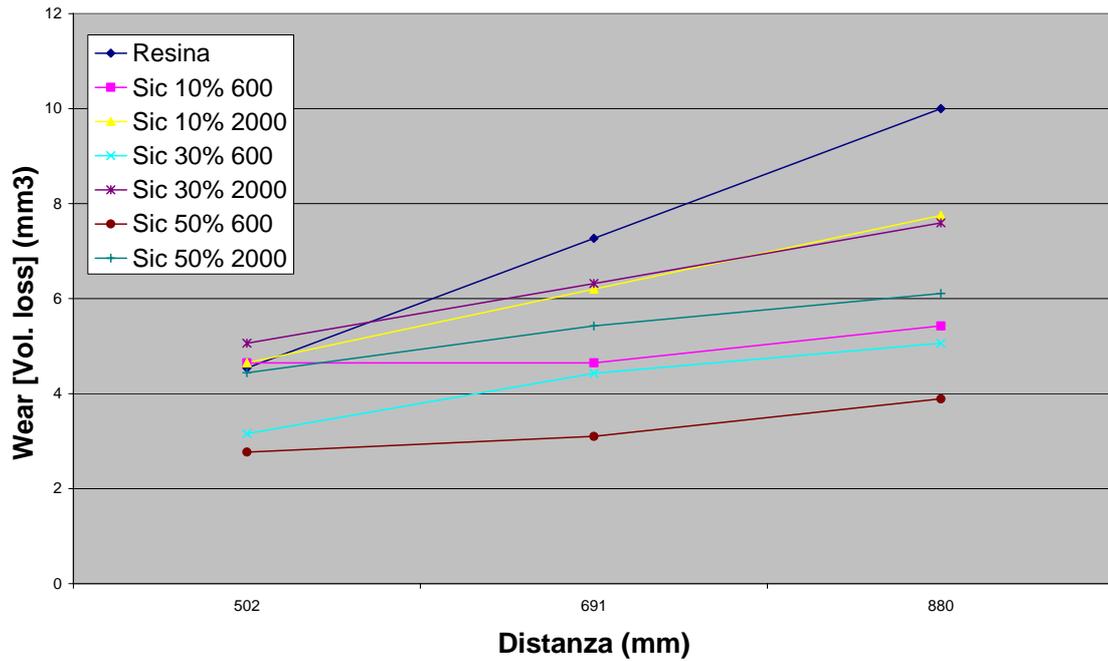


Figura 4.5 – Perdita volumetrica al variare della distanza su carta 400 a 10 N

Si nota dunque che l'andamento pressappoco lineare visto per i provini in resina, si ripete anche per i provini caricati con polveri di materiale duro. Per andare a valutare l'influenza dei singoli fattori in gioco, durante lo scorrimento, è stato necessario considerare costanti alcuni valori; dall'osservazione del pin, al di là del materiale utilizzato, si è notato che all'aumentare della perdita volumetrica, l'area di contatto aumenta notevolmente.

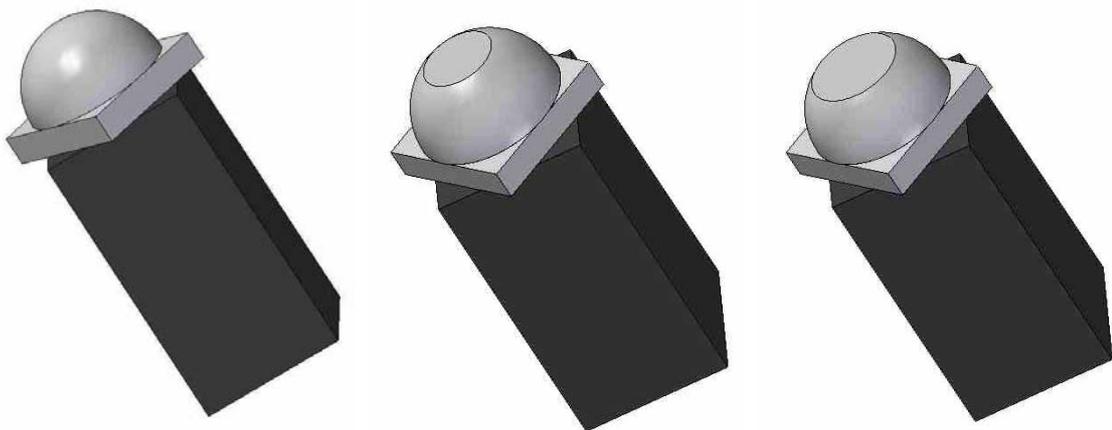


Figura 4.6 – Aumento dell'area apparente di contatto con la perdita volumetrica

Si è così deciso di adoperare una seconda tipologia di provini, con provini a testa piatta, per fare in modo da mantenere costante l'area apparente di contatto durante lo svolgimento della prova.

4.3 PROVE SU PROVINI A TESTA PIATTA

Con i medesimi materiali utilizzati per le prove di cui al paragrafo precedente, sono stati realizzati dei provini a base quadrata di lato 1cm, incollati successivamente su portaprovini prismatici in acciaio necessari per l'afferraggio della macchina.

Le prove svolte hanno visto ancora l'applicazioni di tre diversi carichi normali, rispettivamente, 10N, 20N, 30N per ogni tipologia di provino. Quanto alle distanze percorse sono state utilizzate tre valori rispettivamente di 565mm, 1130mm e 1694mm. Tutte le prove sono state eseguite su zone delle carte abrasive nuove e non soggette a precedenti piste di usura.

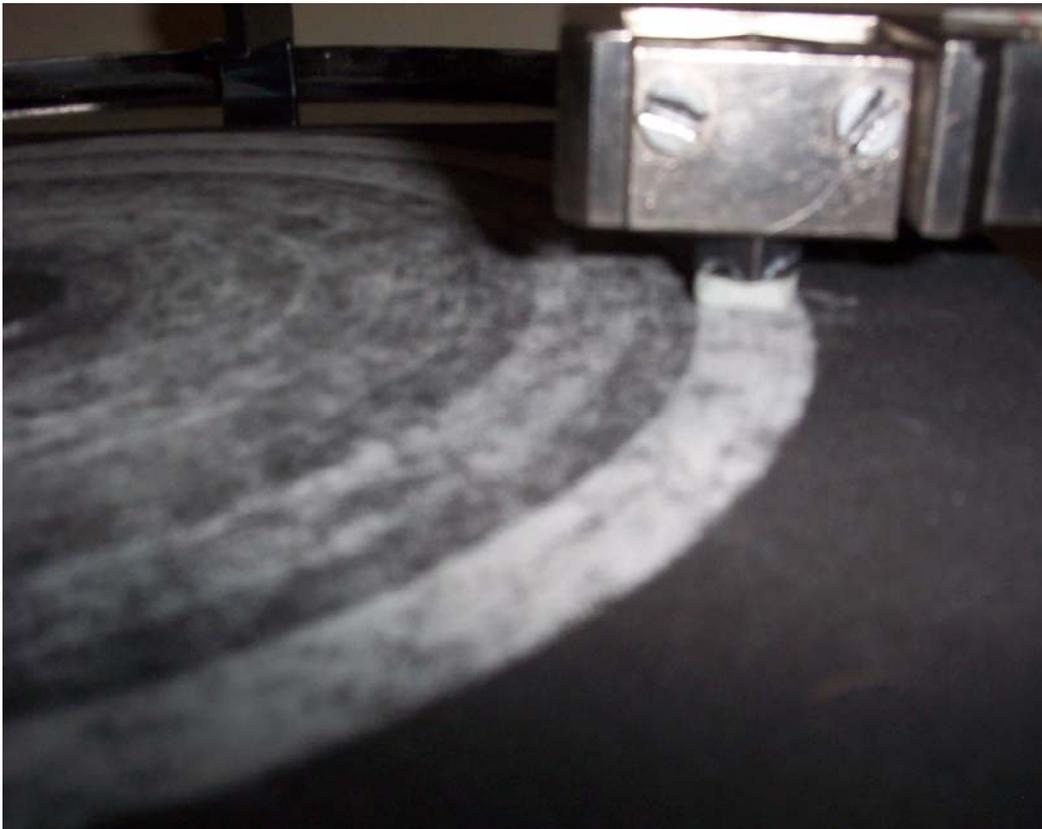


Figura 4.7 – Dettaglio della traccia da strisciamento lasciata dal provino sul disco rotante, rivestito di carta abrasiva.

Prima di ogni prova, il provino è stato fatto girare per 30 secondi su carte abrasive nuove, di analoga rugosità rispetto a quelle utilizzate in prova, al fine di avere una distribuzione uniforme di pressione su tutta la superficie quadrata del provino. L'usura sui provini testati è stata misurata come differenza di peso risultante dalle misurazioni, prima e dopo la prova, con bilancia di precisione a tre cifre decimali e successivamente valutata come perdita volumetrica.

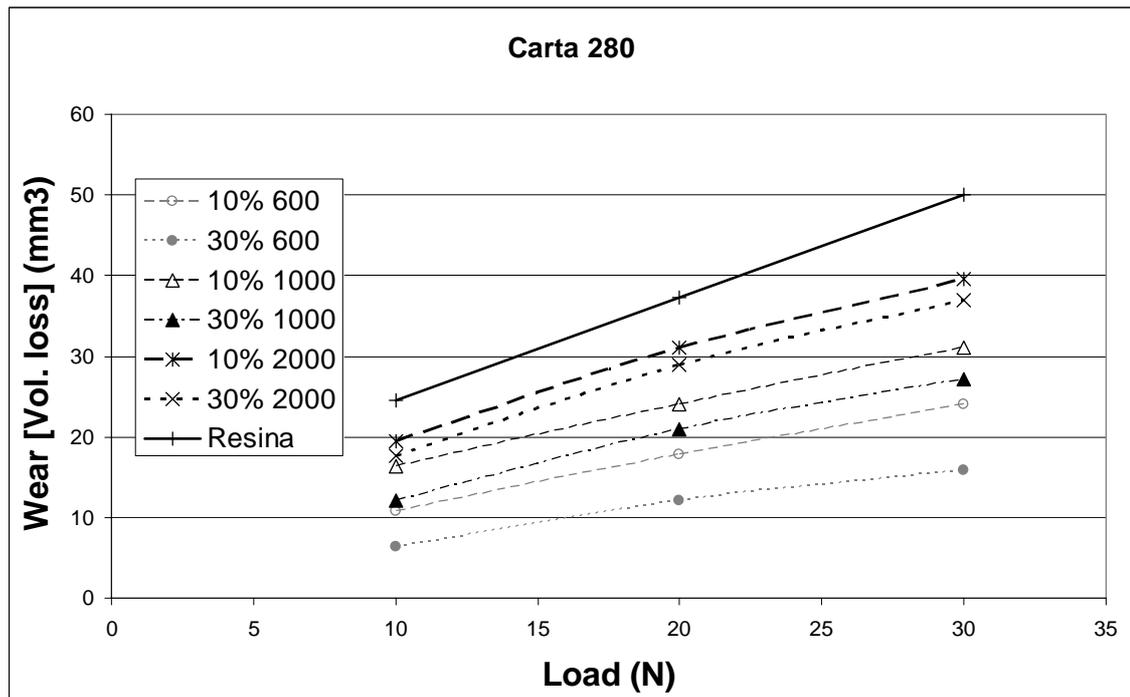


Figura 4.8 – Andamento della perdita volumetrica in funzione del carico.

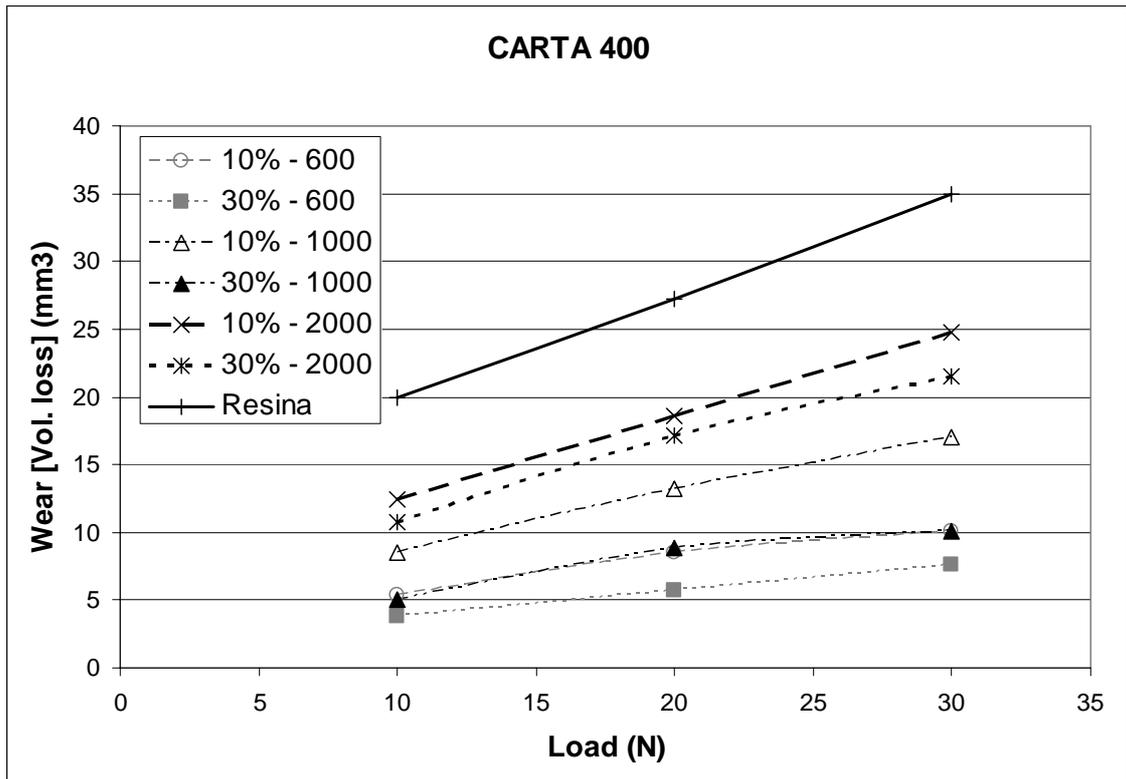


Figura 4.9 – Andamento della perdita volumetrica in funzione del carico.

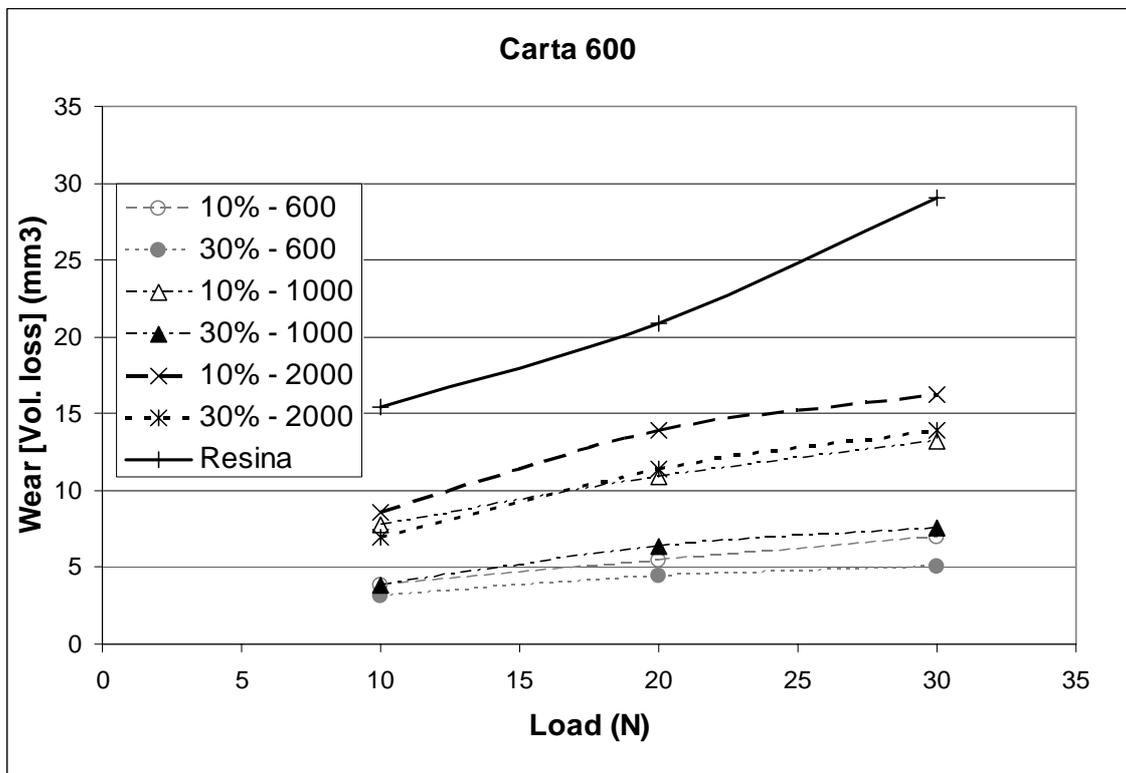


Figura 4.10 – Andamento della perdita volumetrica in funzione del carico.

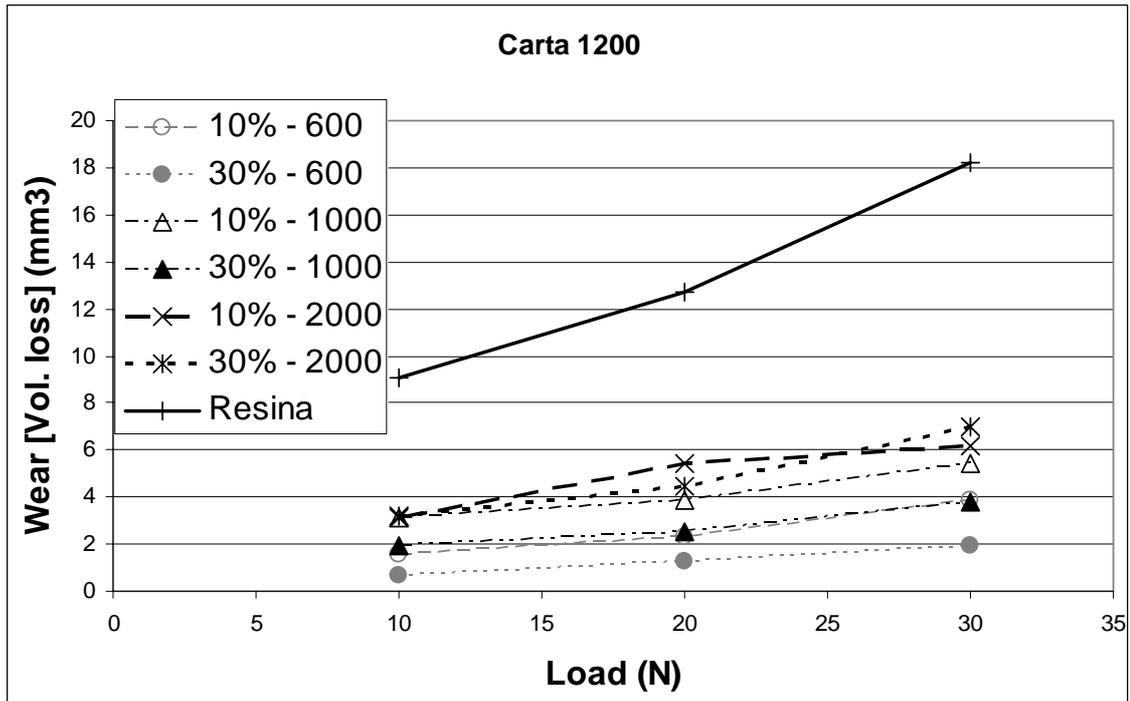


Figura 4.11 – Andamento della perdita volumetrica in funzione del carico.

Da questa nuova tipologia di prove sono emersi dei dati molto interessanti: resta confermata la teoria sulla grana delle polveri in base alla quale le polveri a mesh 600 apportano un notevole miglioramento alla perdita volumetrica rispetto alla sola resina, mentre l'entità del miglioramento va decrescendo, senza scomparire, con la diminuzione delle dimensioni delle polveri. La novità rispetto al caso precedente è che si nota che con il diminuire del valore dell' R_a da 15.93 μm per la carta 280 a 4,28 μm per la carta 1200, si ha che l'effetto del carico sulla perdita volumetrica diventa sempre meno significativo. Questa affermazione trova una giustificazione fisica nel fatto che con l'aumento del carico, le asperità della carta penetrano meglio nel materiale o meglio, quest'ultimo va a toccare la valle tra le asperità (fig. 4.12). Pertanto per carte con elevata rugosità difficilmente il materiale del provino raggiunge la valle tra le asperità della carta, pertanto ogni incremento di carico influenza la perdita volumetrica. Viceversa per carte a bassa rugosità (es. 4,28 per carta 1200) si ha che già con carichi normali dell'ordine di 20N di raggiungono le valli e ogni incremento di carico normale non influenza significativamente la perdita volumetrica.



Figura 4.12 - Schematizzazione del contatto tra carta abrasiva e pin a testa piatta.

Nei diagrammi precedenti si nota molto la differenza tra la contenuta perdita volumetrica dei provini in Sic rispetto a quelli in resina. In figura 4.13 si riporta la fotografia di alcune carte 400, da sinistra verso destra, utilizzate rispettivamente con provini di resina, resina+Sic 1000mesh, resina+Sic 600mesh per prove di scorrimento.

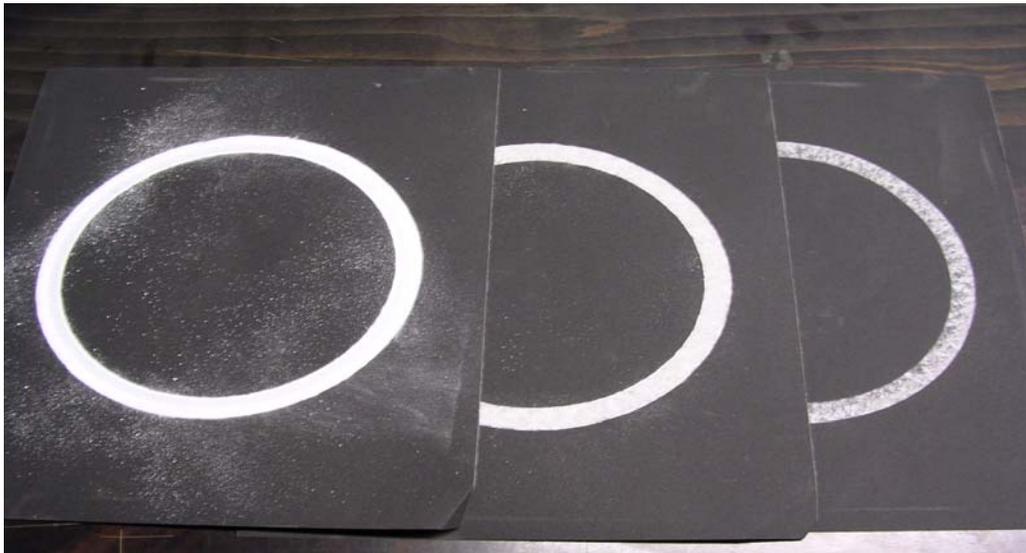


Figura 4.13 – Fogli di carta 400 per prove su provini a testa piatta rispettivamente, da sinistra verso destra, di resina, Sic 1000mesh e Sic 600mesh.

Infine si riporta l'andamento della perdita volumetrica al variare della rugosità (figura 4.14)

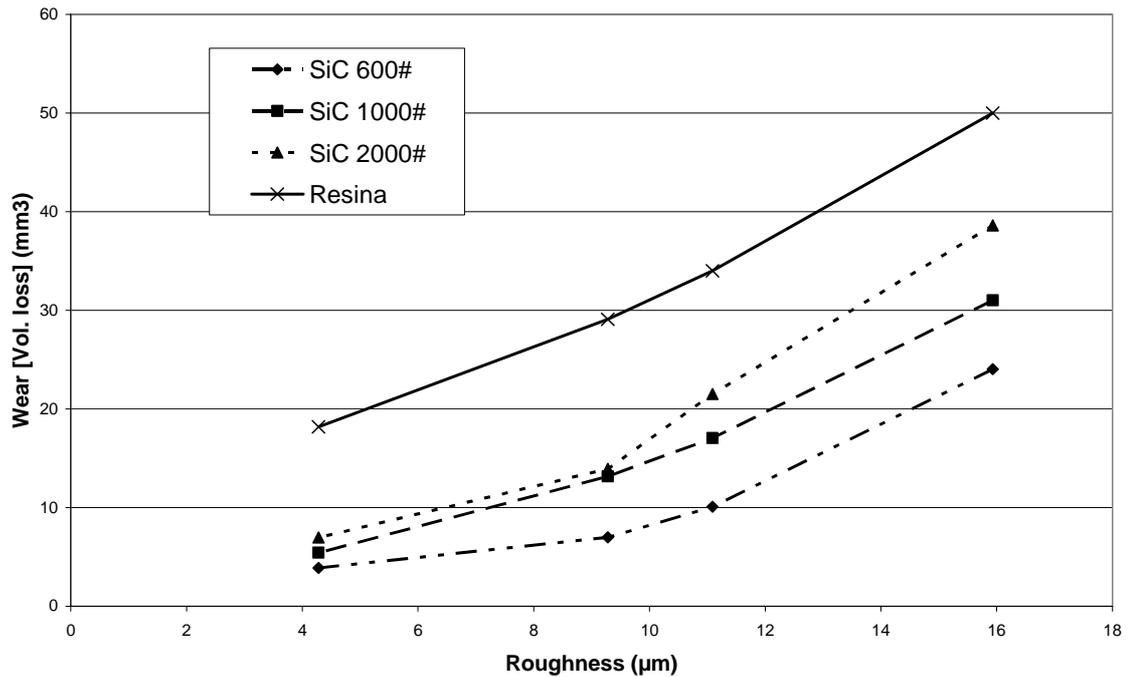


Figura 4.14 – Andamento W-Ra, parametrizzato in funzione dell'Rp

Si può dunque concludere che i provini che mostrano le migliori caratteristiche di resistenza sono quelli con resina caricata con polveri di SiC 600# al 30% in volume, fino ad arrivare a provini con resina caricata con polveri di SiC 1200# al 10% in volume che presentano un comportamento peggiore.

4.4 FORMULAZIONE ANALITICA

Tenendo ben presente di quanto l'usura abrasiva sia influenzata dalla durezza dei materiali e dalla rugosità superficiale del materiale più duro, il lavoro è proceduto verso la definizione di un modello analitico che fosse in grado di descrivere il comportamento ad usura abrasiva dei siffatti materiali compositi.

L'obiettivo è quello di trovare una regola generale per prevedere, conoscendo i parametri in gioco, l'usura da scorrimento, valutata come perdita volumetrica, di provini di materiale polimerico che scorrono su superfici abrasive.

Sulla base delle prove svolte, si è cercata una formulazione analitica che consentisse il calcolo della perdita volumetrica in funzione dei diversi parametri:

$$W_{analitica} (vol) = f (R_a, R_p, d, F_n, A_c, E_c) \quad [4.1]$$

Per una tale formulazione si è adoperato un parametro adimensionale k che esprimesse gli scostamenti tra il valore analitico e quello sperimentalmente trovato; si ha dunque una formulazione del tipo:

$$W_{\text{reale}} = k * W_{\text{analitica}} \quad [4.2]$$

con

W_{reale} = usura reale valutata mediante le prove sperimentali come perdita volumetrica

R_a = rugosità della carta abrasiva

R_p = Raggio dei granelli di polvere rinforzante (SiC)

D = distanza percorsa dal pin sulla carta

F_n = Carico normale applicato

A_c = Area di contatto

E_c = Modulo elastico del materiale composito

Per il calcolo del modulo elastico per l'utilizzo della formulazione descritta, trattandosi di compositi particellari, è risultato più indicato l'utilizzo della regola delle miscele [39]:

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f$$

Con questa formula si stabiliscono i valori dei moduli elastici dei compositi particellari, al variare della percentuale volumetrica di carica che si riassumono nella tabella n.1:

Tipo provini	E_c (formula inversa)
Sic 10% vol.	3,88 GPa
Sic 30% vol.	4,98 GPa

Tabella 4.1 – Valori del modulo elastico calcolato con le formule diretta ed inversa.

Come controfacce sono state utilizzate carte abrasive con diversa granulometria, rispettivamente 280#, 400#, 600#, 1200#. Tali fogli di carta abrasiva sono stati disposti e fissati sul disco della macchina pin-on-disc. Nella tabella seguente sono riassunte le dimensioni delle particelle rinforzanti e di quelle abradenti:

Grana polveri	Dimensione particelle (Rp) *
600 #	9 µm
1000 #	5 µm
2000 #	1,5 µm

Carta abrasiva	Ra **
280 #	15.93 µm
400 #	11.04 µm
600 #	9.28 µm
1200 #	4.28 µm

* Dati ricavati da studi bibliografici [38];

** Dati ricavati da prove sperimentali di rugosità.

Tabelle 4.2 e 4.3 – Dimensioni delle particelle rinforzanti ed abradenti.

Per determinare il valore del parametro k in maniera del tutto indipendente dalle condizioni di carico, rinforzo ed abrasione, si è ritenuto utile ragionare sui singoli parametri indicati nella formula [4.2], mantenendo costanti di volta in volta gli altri parametri, al fine di determinare i singoli andamenti che permettano al k di variare il meno possibile.

Seguendo questo metodo per la distanza, l'Ra, l'Rp ed il carico, si è giunti ad una formulazione finale così espressa:

$$W_{reale} = k * \frac{(d * C^{0,7})}{E_c} * \frac{(R_a)^{1,35}}{(R_p)^{0,35}} \quad [4.3]$$

Dal confronto con il valore reale della perdita volumetrica calcolata con le prove sperimentali si è ricavato il valore del k dimensionale per le diverse tipologie di contatto. Facendo una media aritmetica tra i diversi valori trovati per il k, si giunge ad un valore del k dimensionale medio, pari a 0,23 con una deviazione standard di 0,0474.

4.5 DISCUSSIONE RISULTATI

Sulla base delle prove sperimentali, si è notato che il comportamento ad usura dipende da una serie di fattori tra cui il confronto tra le particelle di rinforzo e quelle abrasive ed il carico applicato. Al variare di questi fattori, variano radicalmente i meccanismi di usura che si instaurano. Ad esempio quando si utilizzano polveri di rinforzo molto piccole (es. 2000mesh) si hanno valori bassi

di adesione tra le particelle e la matrice. In più, si verifica che le cricche generate dalle asperità abrasive, si propagano nelle intercapedini tra le particelle, creando un effetto disgregante che porta alla integrale asportazione delle particelle senza che le stesse contribuiscano alla resistenza ad usura.

Viceversa, quando si utilizzano particelle di polveri di rinforzo molto grandi (es. 600mesh), le asperità della controfaccia abrasiva, difficilmente riescono ad asportarle.

Un altro importante fattore è costituito dalla percentuale volumetrica con cui si carica la matrice epossidica. Sperimentalmente infatti si nota che aumentando la percentuale di rinforzo dal 10% al 30% si ha un incremento della resistenza ad usura, per tutte le tipologie di polveri utilizzate. Questa variazione è giustificata anche dall'aumento del valore del modulo elastico del composito particellare, calcolato con la formula inversa sopra descritta. Altresì si intuisce come l'entità del miglioramento sia dipendente dalla dimensione delle particelle di rinforzo, presentando un miglioramento al sempre meno considerevole al diminuire delle dimensioni delle particelle di SiC.

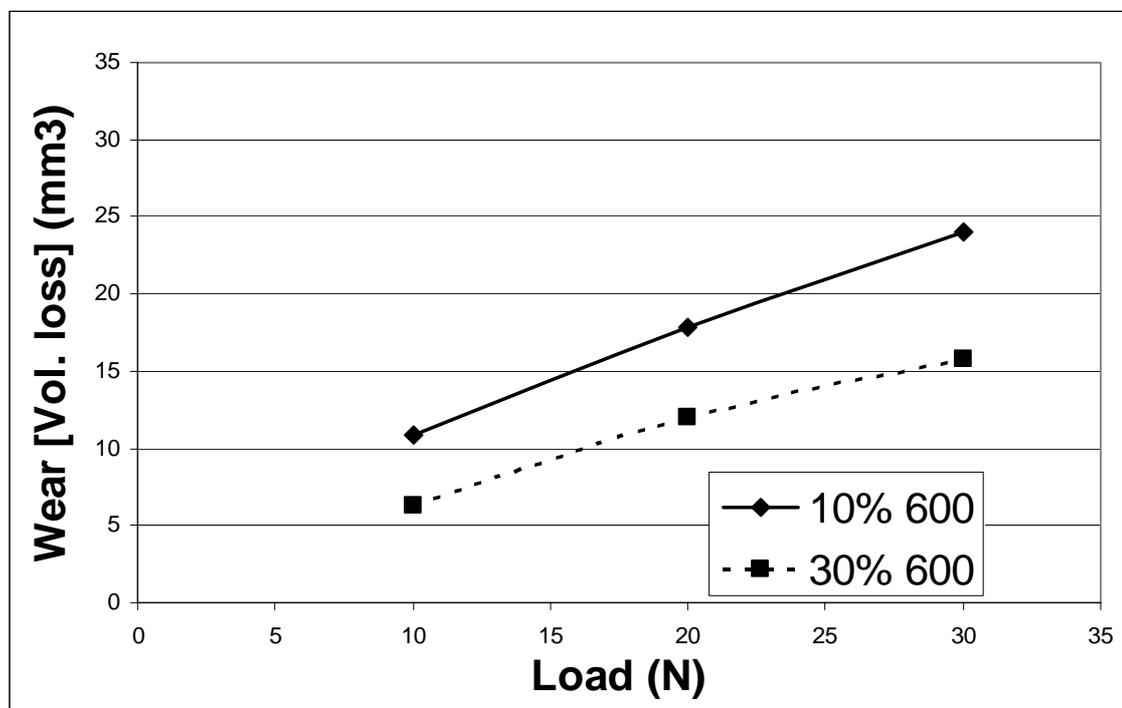


Figura 4.15 - Incremento di resistenza aumentando la percentuale di carica dal 10% al 30%.

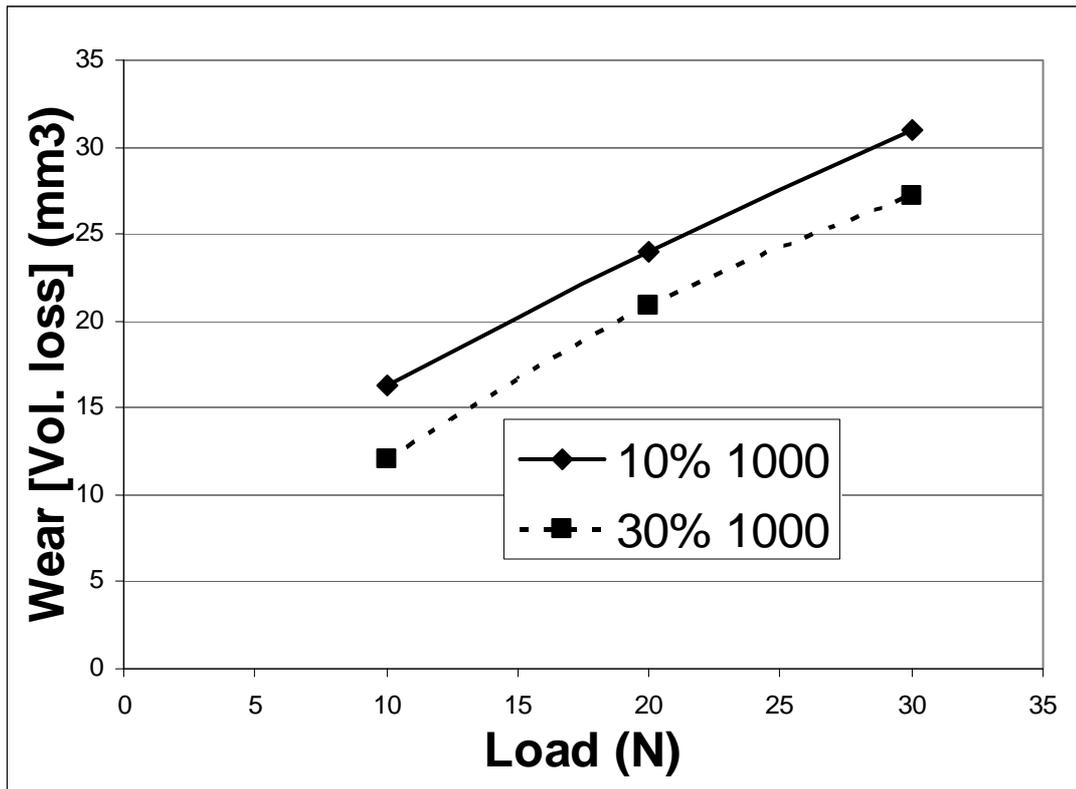


Figura 4.16 - Incremento di resistenza aumentando la percentuale di carica dal 10% al 30%.

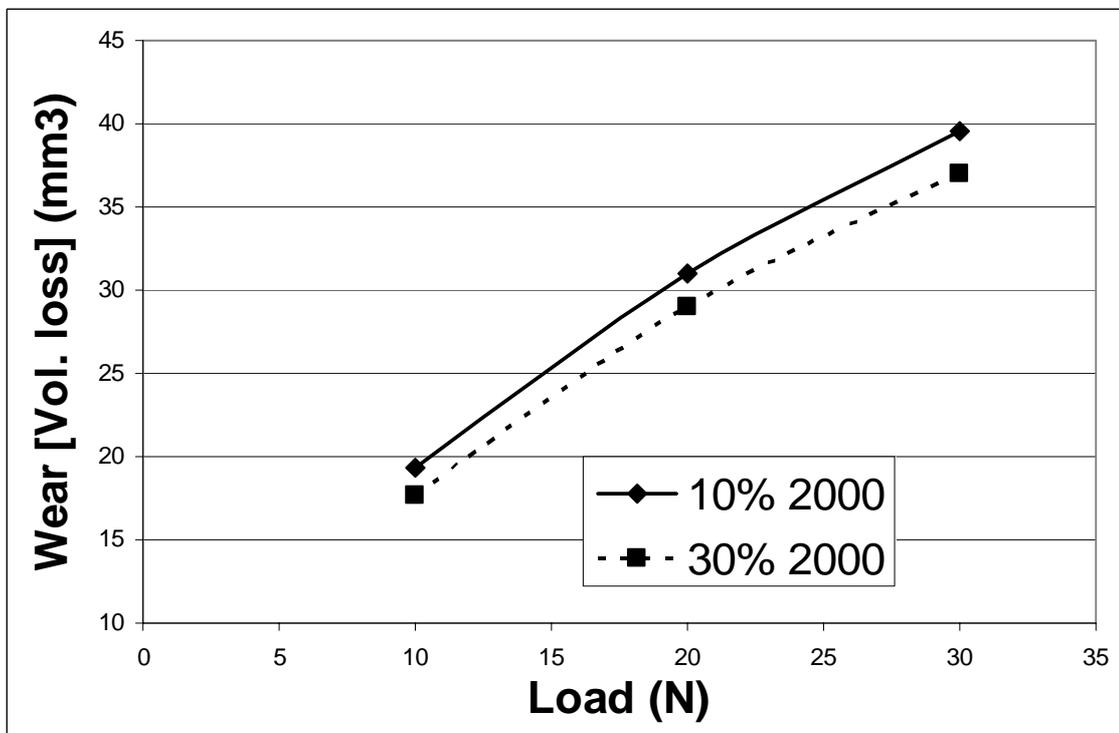


Figura 4.17 - Incremento di resistenza aumentando la percentuale di carica dal 10% al 30%.

Nella stesura della formula [4.3] si è tenuto conto delle percentuali di carica dal 10% al 30%.

Per quello che riguarda le variazioni del carico, invece è doveroso fare le seguenti considerazioni: le asperità delle superficie abrasive, sotto l'effetto del carico normale, penetrano nella matrice epossidica e per effetto del moto relativo, si comportano come un tagliente, generando un truciolo. Si intuisce così come un aumento del carico da 10N a 30N porti le asperità a penetrare maggiormente nella tenera matrice. Il discorso diventa più complesso se si considerano le asperità delle carte abrasive e la presenza delle polveri rinforzanti, con la loro quantità e dimensione. Raddoppiare il carico normale su un provino in contatto con una carta ad elevata rugosità ad esempio ha sicuramente un effetto diverso rispetto al raddoppio del carico su un provino in contatto con una carta a bassa rugosità, in quanto, considerando l'asperità della carta come un utensile in una lavorazione per asportazione di truciolo, è ben noto come la lunghezza di impegno del tagliente sia influenzata dalla lunghezza totale dell'utensile.

Relativamente alle polveri rinforzanti, invece, si consideri che un raddoppio del carico normale, può sortire un effetto diverso su compositi particellari con polveri di rinforzo di grandi dimensioni piuttosto che su compositi con polveri di rinforzo di piccole dimensioni.

CAPITOLO V – II CASO OGGETTO DI STUDIO

5.1 INTRODUZIONE

Sulla base di quanto sperimentalmente rilevato con le prove di cui al precedente capitolo IV, è stato condotto uno studio su un caso reale: l'obiettivo è quello di migliorare la qualità di resine caricate per uso odontoiatrico prodotte dalla KERR Italia.

5.1.1 La Kerr Italia S.p.A.

La *Kerr Italia S.p.A.* è una divisione della statunitense *Kerr Manufacturing Co.*, fondata nel 1881 e leader assoluta a livello mondiale nel campo dei prodotti odontoiatrici; l'azienda, situata a Scafati (SA), fu fondata nel 1959 avviando, con pochi addetti, la distribuzione dei prodotti Kerr in Italia.

Fino a qualche anno fa essa produceva e distribuiva i propri prodotti, nonché quelli acquistati dallo stabilimento americano del gruppo. L'area distributiva si estendeva in tutta Europa, Africa e Medio Oriente con il 75% della produzione destinata all'estero.

Attualmente viene svolta solo l'attività della produzione che viene poi collocata presso un magazzino del gruppo ubicato in Svizzera.

La *Kerr Italia* rappresenta tuttora un esempio di tecnologia avanzata nella fabbricazione di prodotti destinati a impieghi odontotecnici.

Sono stati condotti diversi test sperimentali al fine di mettere a punto una tipologia di prova tale da poter garantire la valutazione del prodotto migliore.

5.1.2 Obiettivi della ricerca

La Kerr Srl produce particolari resine, utilizzate per ricostruzioni dentarie, a base acrilica caricate con filler di vetro:

- con diametri compresi tra gli 0,02 e 0,8mm;
- con percentuale in peso variabile tra il 50 e il 90%.

Nella figura che segue sono riportati due esempi di ricostruzioni effettuate con i materiali Kerr Italia S.p.A.



Figura 5.1 – Esempio di ricostruzione di apparati dentali con resine della Kerr.

5.2 LE PROVE DI SCORRIMENTO

Sono state testate 6 tipologie di resine, differenti tra di loro sia per la percentuale in peso di filler utilizzato (dal 60% al 87%), che per il processo di lavorazione :

- A
- B
- C
- D
- E
- F

Per motivi di copyright si utilizza un'indicazione di tale tipo, ordinando comunque i materiali per percentuale in peso di filler crescente.

È da sottolineare che la prova che si andrà a descrivere ha una fondamentale importanza per quello che sarà l'applicazione del materiale. In particolare per porsi nelle condizioni più gravose e quindi per considerare un confronto tra

materiali in tali condizione si è valutato il comportamento in caso di usura abrasiva severa.

Le prove sono state condotte utilizzando la macchina pin-on-disk precedentemente descritta sulla quale è stato applicato un foglio di carta abrasiva 2000 Mesh.

La scelta di tale valore di grana è stata adottata in conformità ai risultati dei lavori di ricerca riferiti nelle fonti bibliografiche, dai quali si desume che per simulare l'usura abrasiva in fase di masticazione non si richiede l'impiego di carte più abrasive .

Le prove inoltre sono state realizzate:

- a secco;
- in umido

per questo ultimo caso, infatti, i provini sono stati immersi per circa 10 giorni in una soluzione salina in modo tale da simulare l'effetto della saliva.

Le specifiche di prova sono state le seguenti:

- velocità di scorrimento : 16 RPM
- raggio della pista : 90mm
- carico normale: 10-20-30N
- durata prove :10 sec (2 giri di pista).

5.2.1 Prove a secco

Nelle tabelle(5.1 – 5.6) sono riportati i valori medi delle perdite d'usura di ciascun materiale a secco.

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
A	4	10
A	10	20
A	15	30

Tabella.5.1 - Perdita netta di peso per il materiale A

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
B	4	10
B	8	20

B	14	30
---	----	----

Tabella.5.2 - Perdita netta di peso per il materiale B

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
C	4	10
C	8	20
C	12	30

Tabella.5.3 - Perdita netta di peso per il materiale C

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
D	3	10
D	8	20
D	11	30

Tabella.5.4 - Perdita netta di peso per il materiale D

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
E	3	10
E	6	20
E	10	30

Tabella.5.5 - Perdita netta di peso per il materiale E

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
F	4	10
F	6	20
F	9	30

Tabella.5.6 - Perdita netta di peso per il materiale F

Graficamente (fig 5.2)

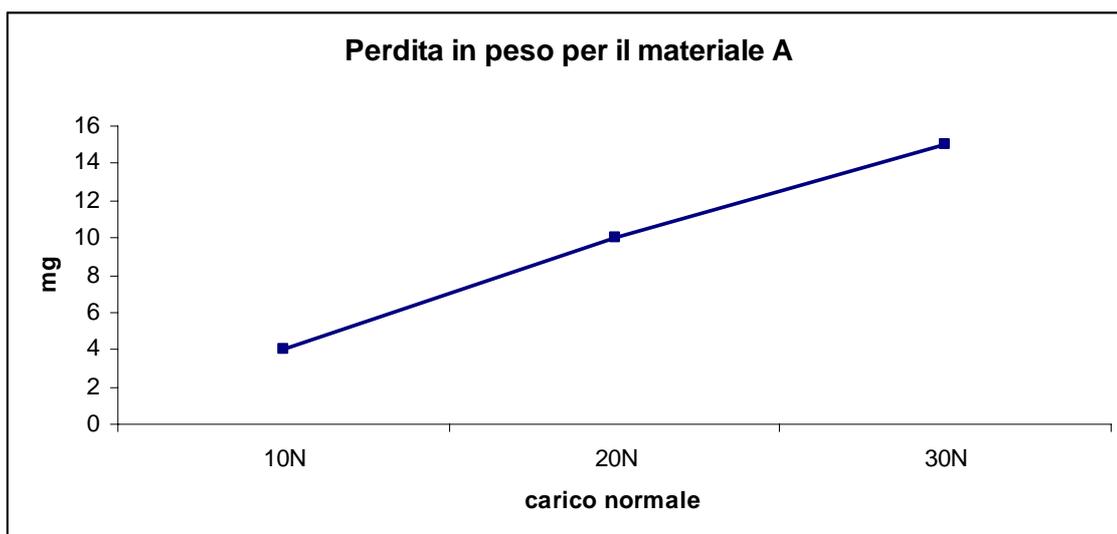


Figura 5.2 - Perdita in peso per il materiale A

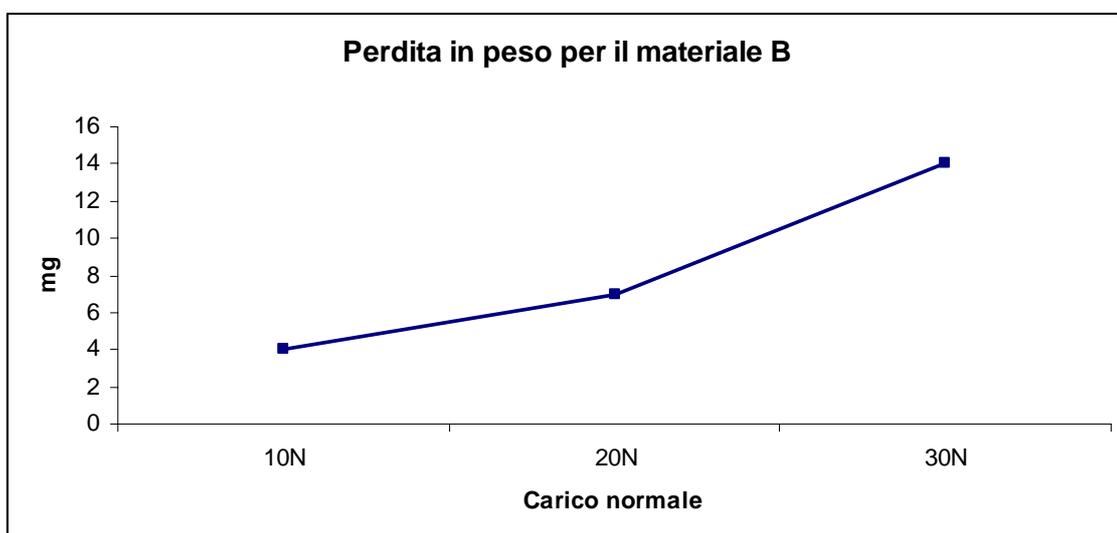


Figura 5.3 - Perdita in peso per il materiale B

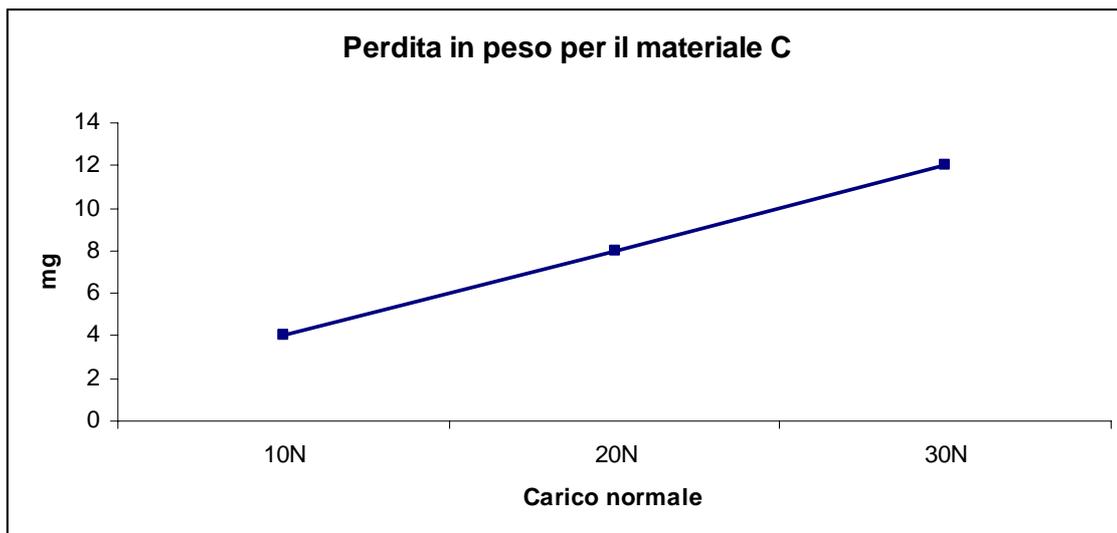


Figura 5.4 - Perdita in peso per il materiale C

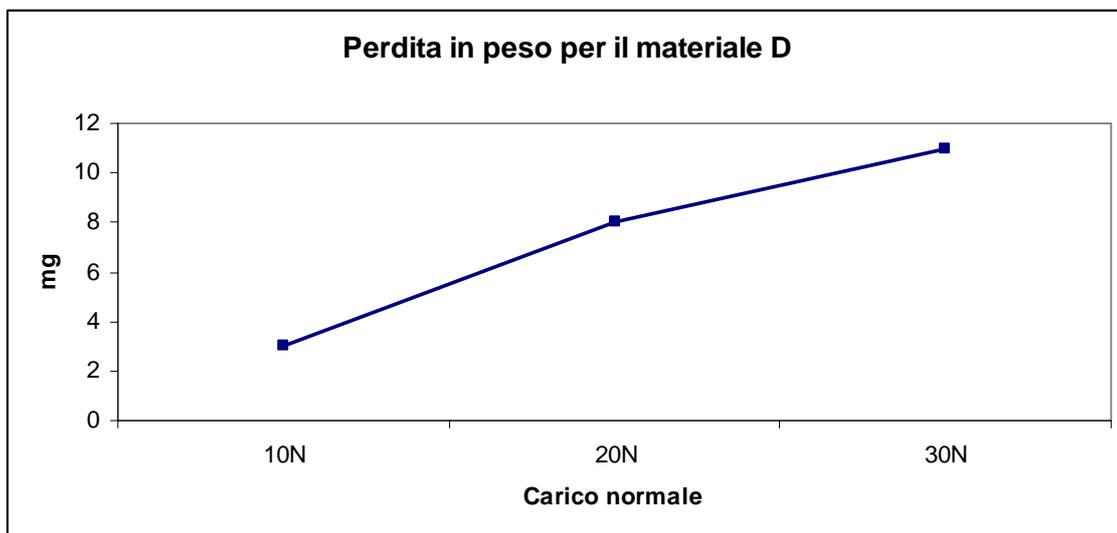


Figura 5.5 - Perdita in peso per il materiale D

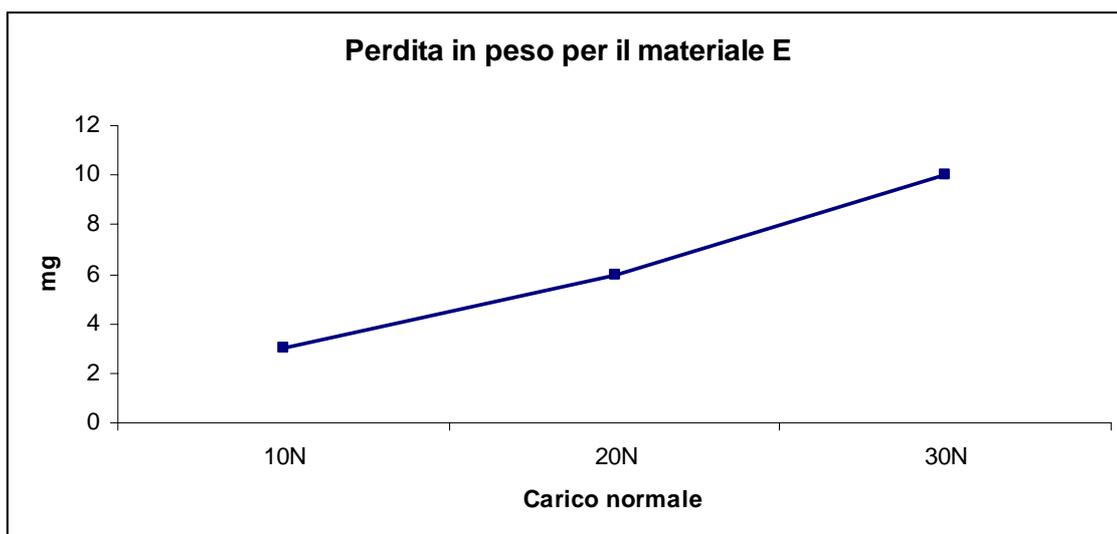


Figura 5.6 - Perdita in peso per il materiale E

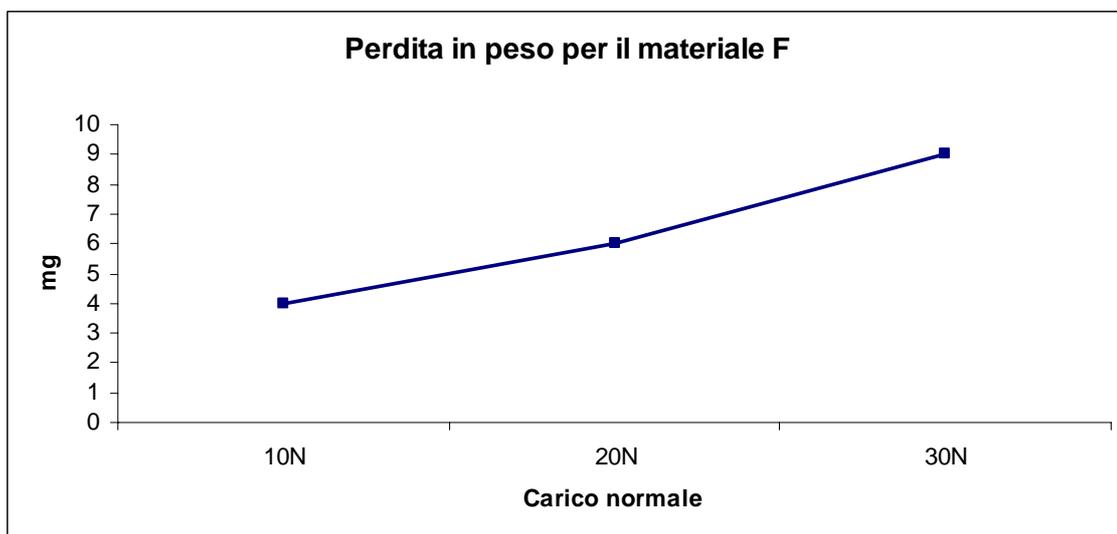


Figura 5.7 - Perdita in peso per il materiale F

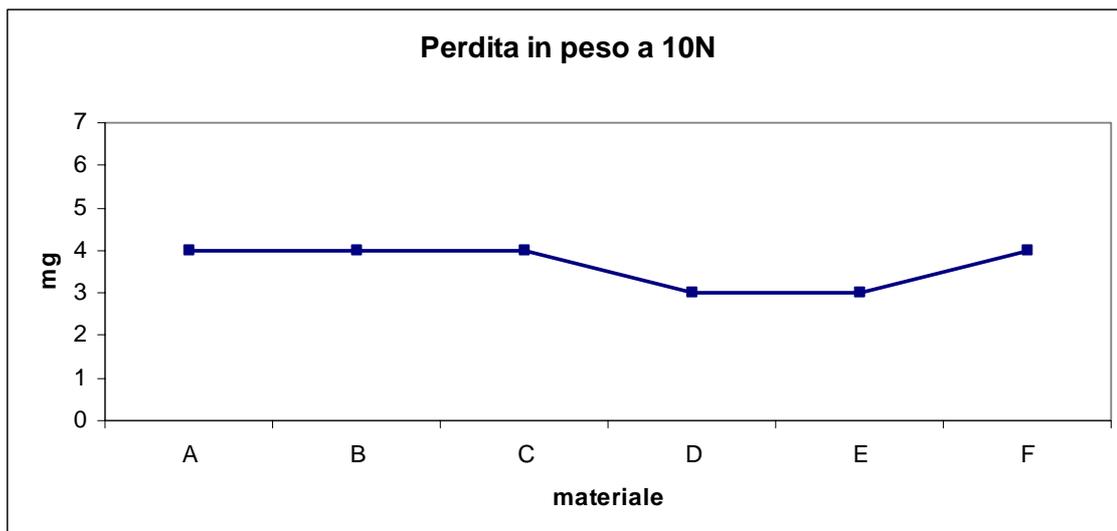


Figura 5.8 - Perdita in peso con carico pari a 10N

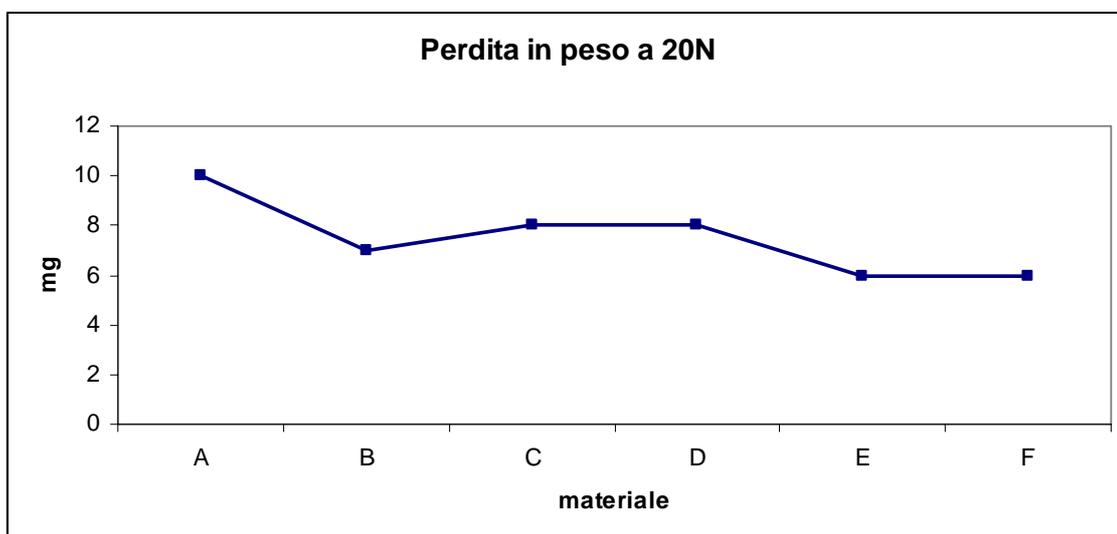


Figura 5.9 - Perdita in peso con carico pari a 20N

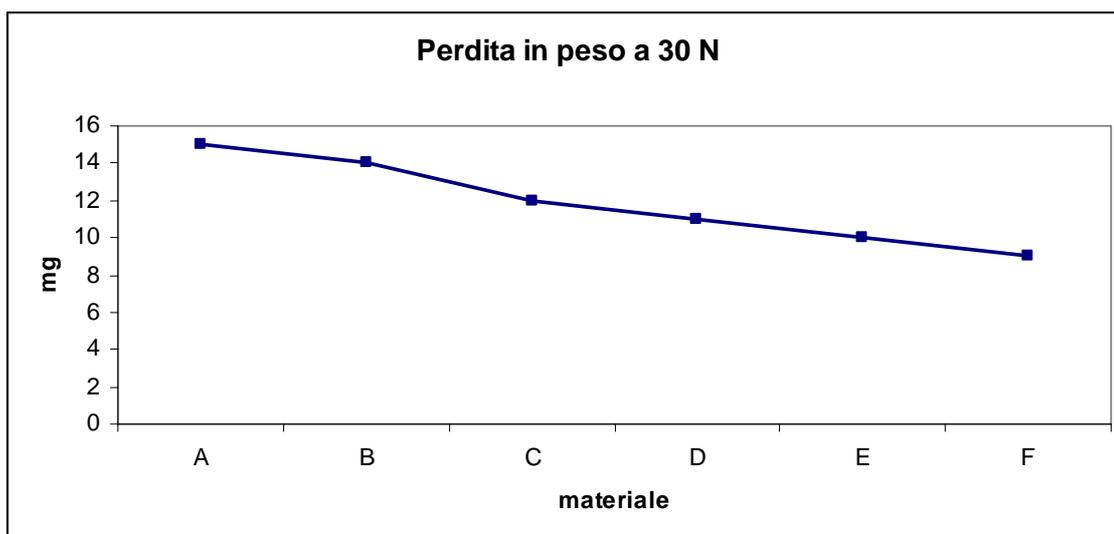


Figura 5.10 - Perdita in peso con carico pari a 30N

È interessante notare come l'aumento della percentuale delle polveri comporti un notevole miglioramento delle proprietà a usura delle resine comportando un miglioramento in termini percentuali fino a circa il 30%. È inoltre possibile notare come per alcuni materiali la perdita in peso sia una funzione quasi lineare del carico, è il caso in particolare dei materiali A e C. Bisogna infine a giungere che non si riscontrano di differenze significative tra i materiali per le prove a 10 N

5.2.2 Prove "in umido"

Nelle tabelle che seguono sono invece riportati gli andamenti rilevati per i diversi materiali a seguito delle prove di scorrimento:

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
A	12	10
A	14	20
A	20	30

Tabella.5.7 - Perdita netta di peso per il materiale A

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
B	8	10
B	13	20

B	17	30
---	----	----

Tabella.5.8 - Perdita netta di peso per il materiale B

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
C	6	10
C	10	20
C	14	30

Tabella.5.9 - Perdita netta di peso per il materiale C

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
D	6	10
D	9	20
D	11	30

Tabella.5.10 - Perdita netta di peso per il materiale D

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
E	6	10
E	8	20
E	12	30

Tabella.5.11 - Perdita netta di peso per il materiale E

Materiale	Perdita media netta [mg]	Carico normale [N]
F	5	10
F	8	20
F	10	30

Tabella 5.12 - Perdita netta di peso per il materiale F

Graficamente:

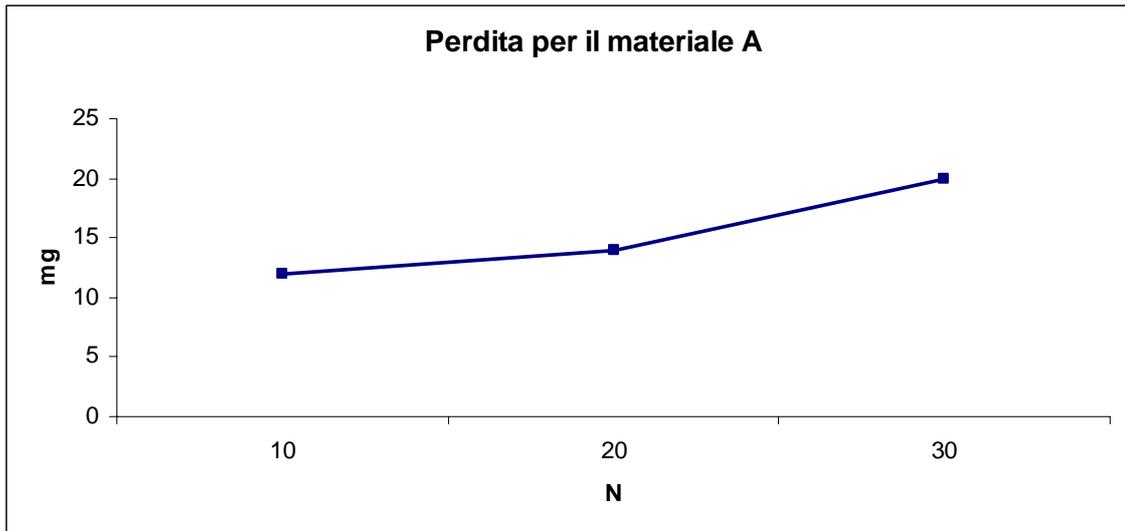


Figura 5.11 - Perdita in peso per il materiale A dopo di prove “in umido”

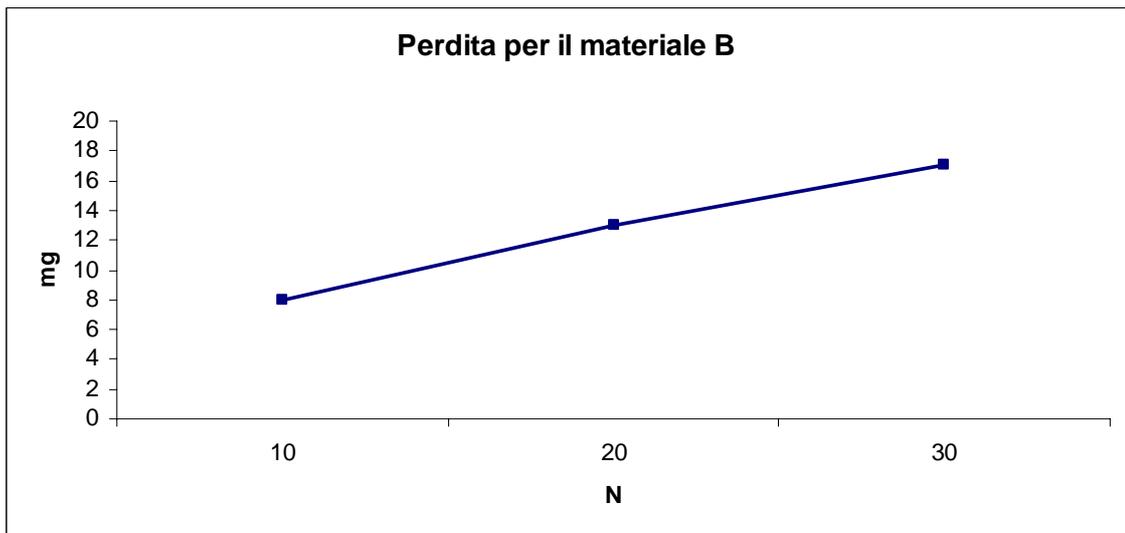


Figura 5.12 - Perdita in peso per il materiale B dopo di prove “in umido”

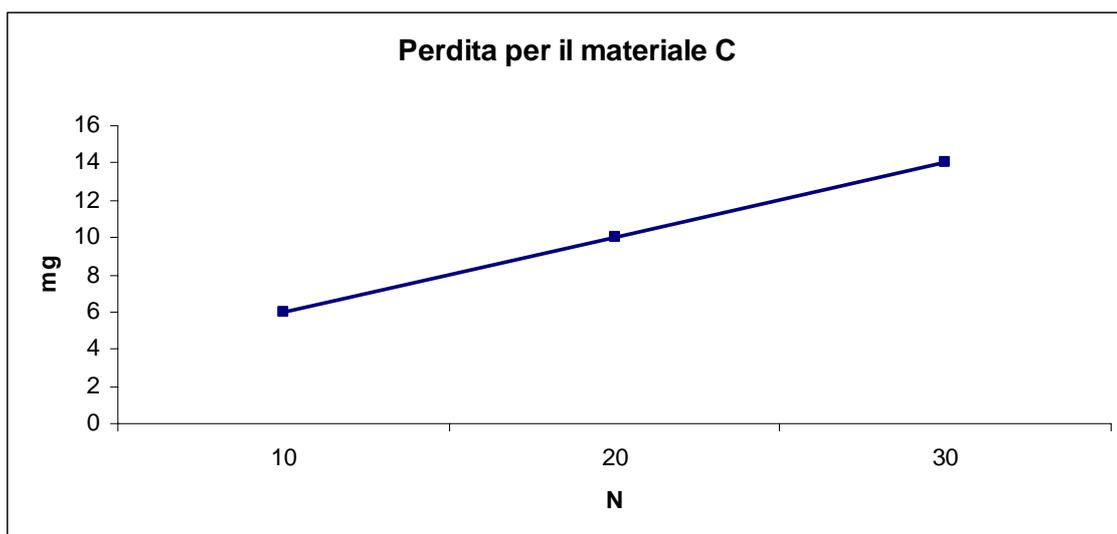


Figura 5.13 - Perdita in peso per il materiale C dopo di prove “in umido”

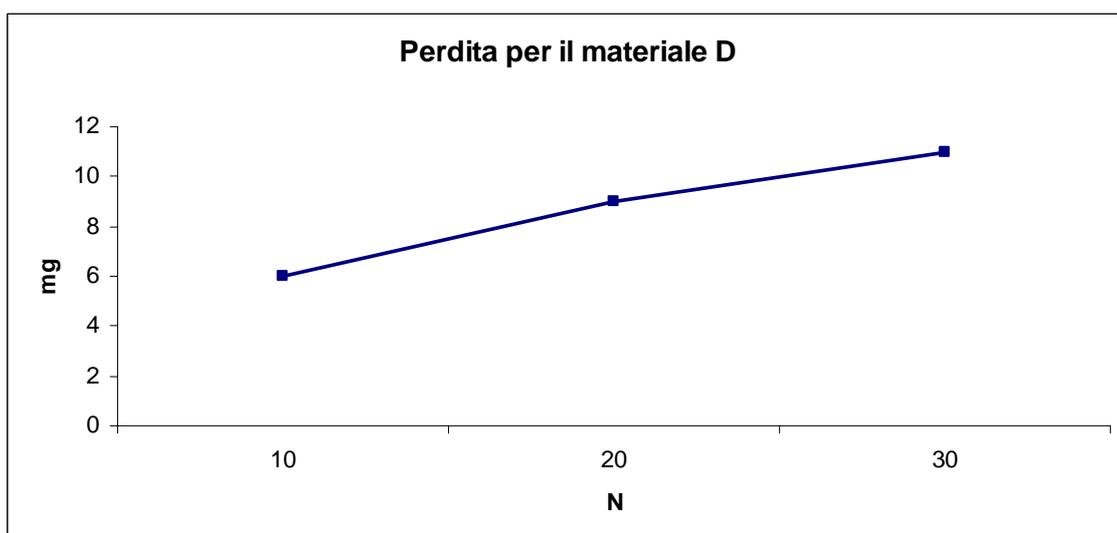


Figura 5.14 - Perdita in peso per il materiale D dopo di prove “in umido”

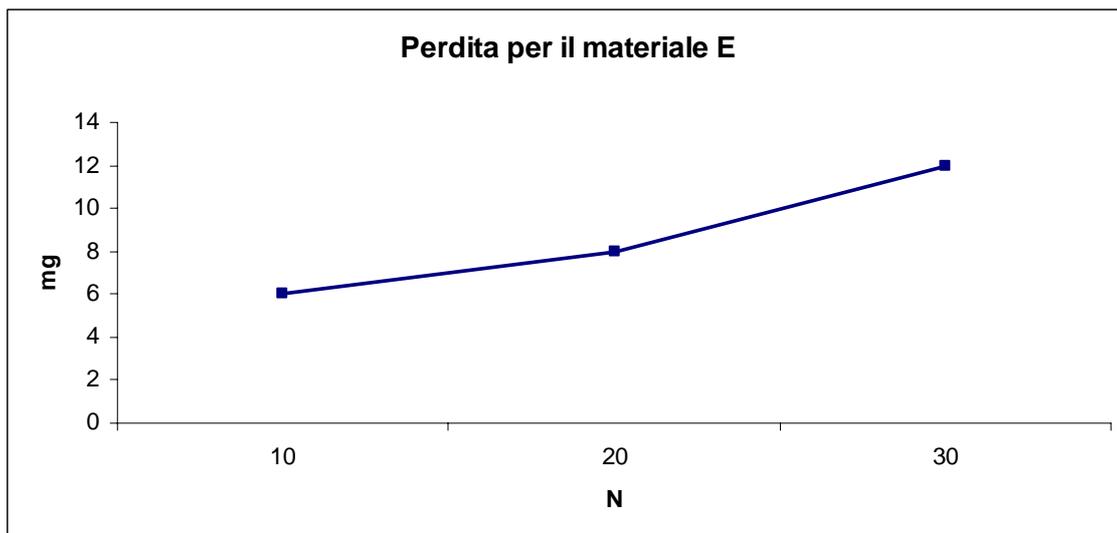


Figura 5.15 - Perdita in peso per il materiale D dopo di prove "in umido"

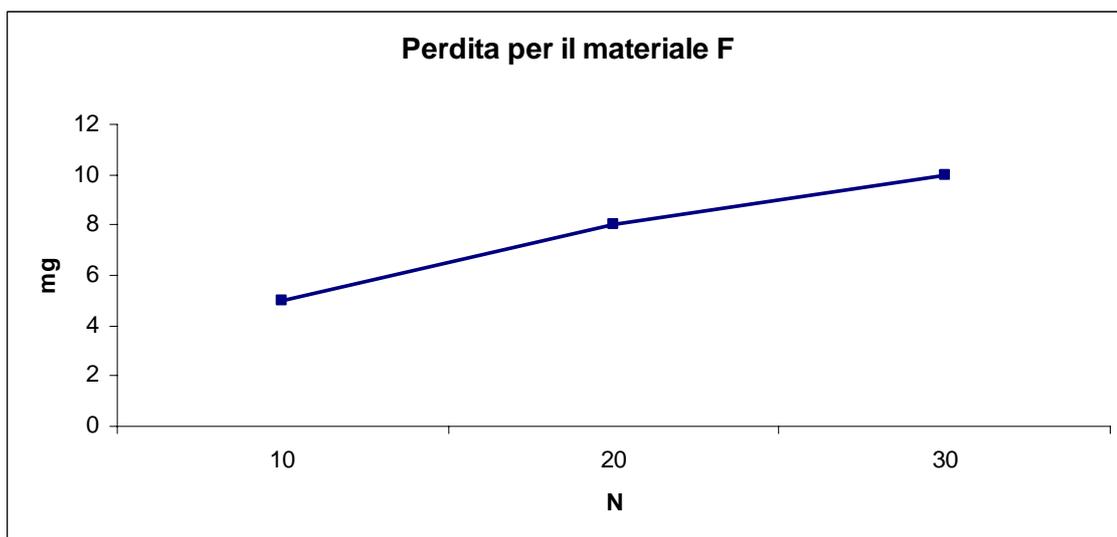


Figura 5.16 - Perdita in peso per il materiale F dopo di prove "in umido"

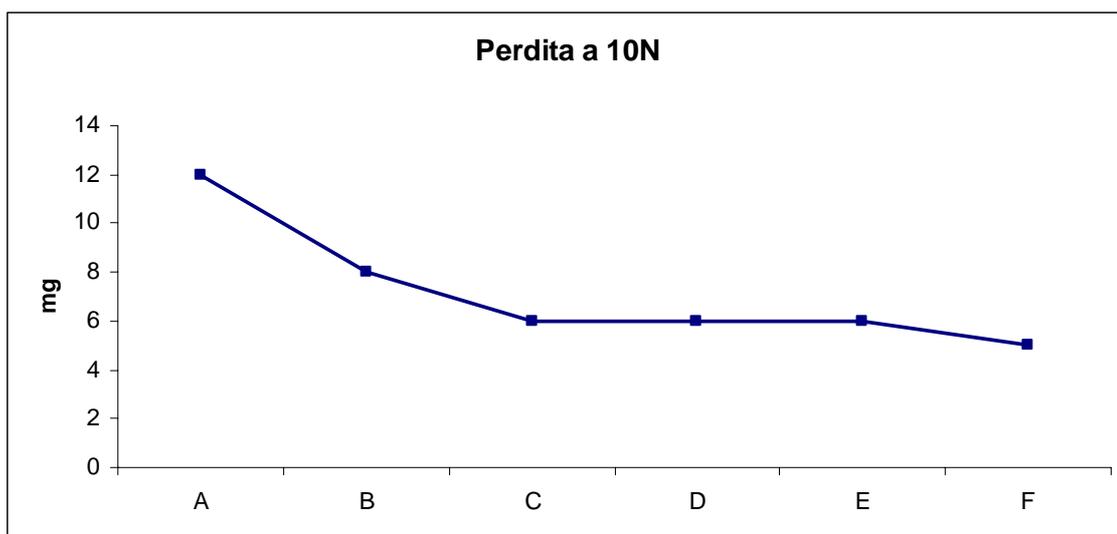


Figura 5.17 - Perdita in peso con carico pari a 10N a seguito di prove “in umido”

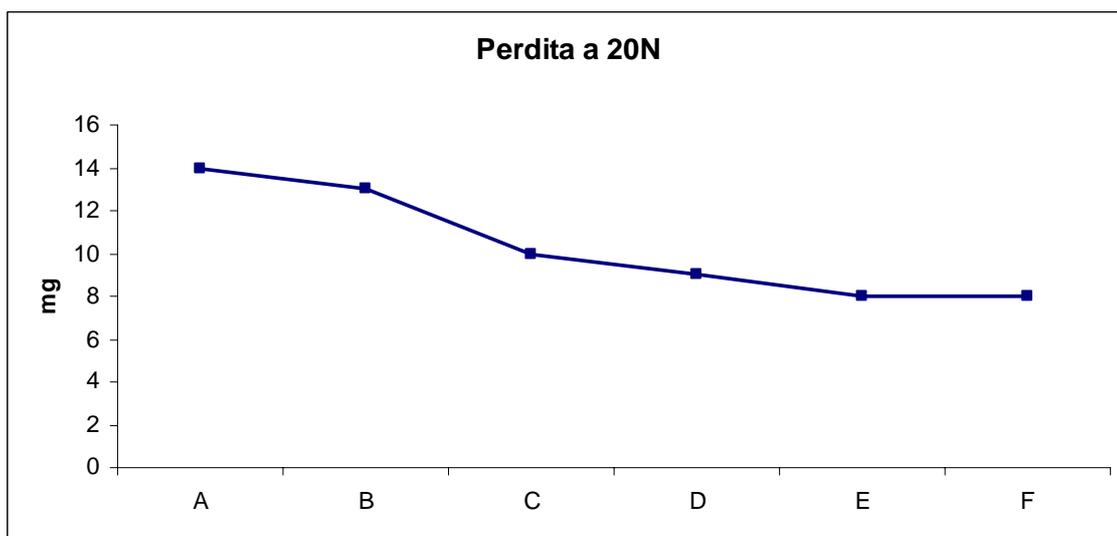


Figura 5.18 - Perdita in peso con carico pari a 20N a seguito di prove “in umido”

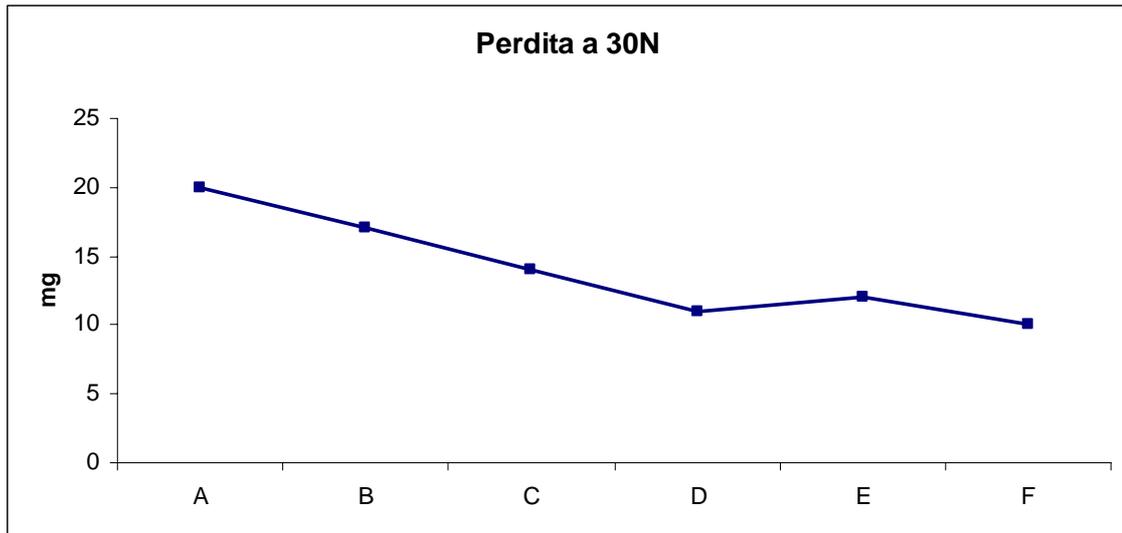


Figura 5.19 - Perdita in peso con carico pari a 30N a seguito di prove "in umido"

Anche in questo caso, come si evince facilmente dai dati riportati, l'aumento della percentuale di trited filler ha comportato un notevole miglioramento della resistenza ad usura.

Di seguito si riporta un confronto grafico tra le prove a secco e quelle "in umido" (fig. 5.20 – 5.22).

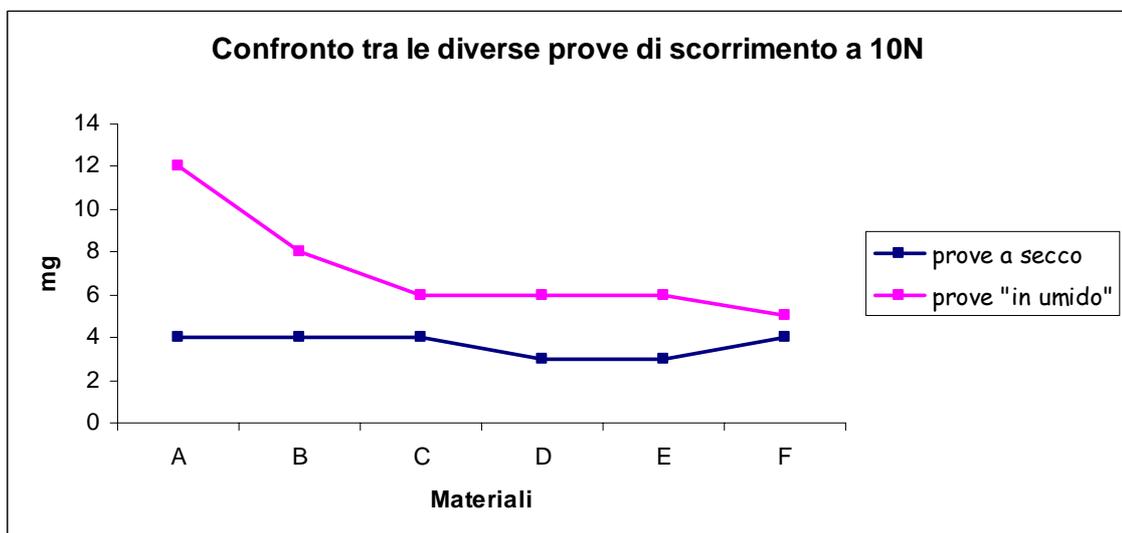


Figura 5.20 - Confronto tra le perdite in peso nelle diverse prove di scorrimento

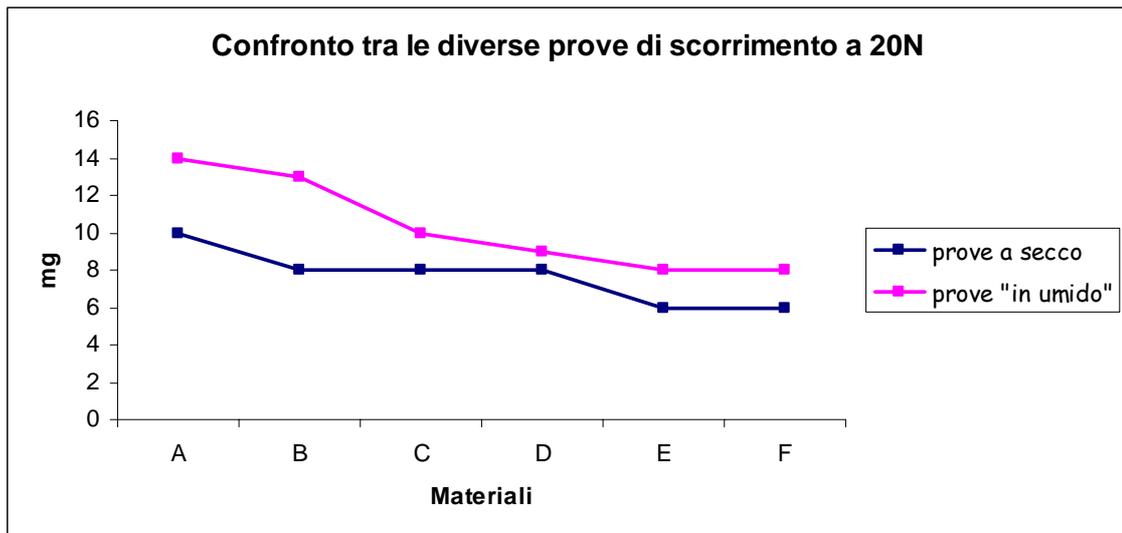


Figura 5.21 - Confronto tra le perdite in peso nelle diverse prove di scorrimento

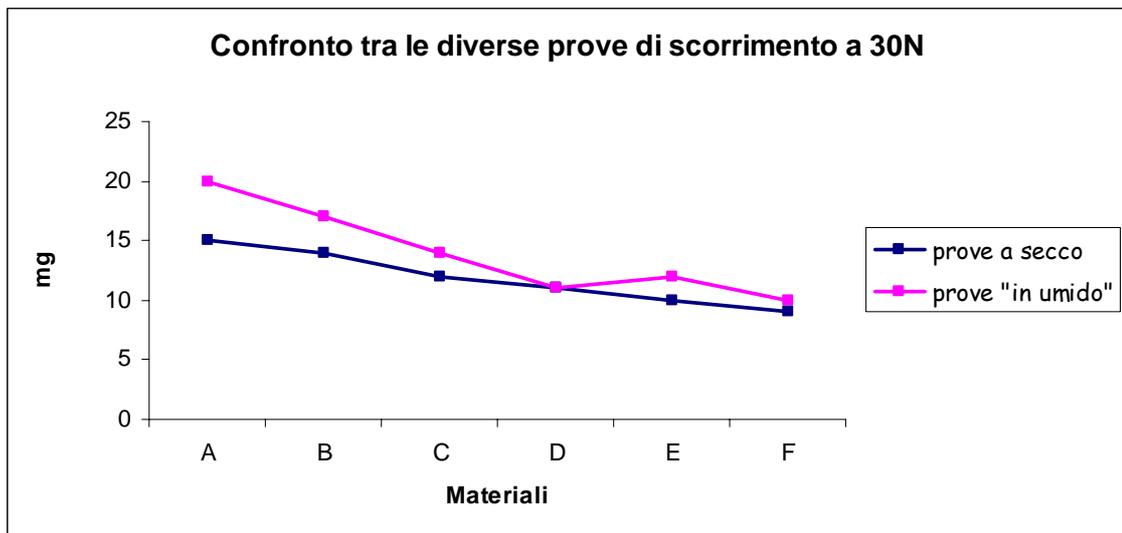


Figura 5.22 - Confronto tra le perdite in peso nelle diverse prove di scorrimento

Come si può notare le prove “in umido” presentano dei valori maggiori di usura rispetto a quelli per le prove a secco; ciò può essere motivato dalla diminuzione delle forze di legame tra le macromolecole della resina, e di adesione tra vetro e resina per l’inserimento di liquido tra le macromolecole stesse.

È inoltre da notare come questa differenza vada diminuendo con l’aumentare della percentuale in peso delle polveri dure. Il vetro, quindi, potrebbe fungere da ostacolo all’assorbimento della soluzione o comunque far valere le proprie caratteristiche laddove è presente in maggiore percentuale.

5.3 ANALISI DEI MATERIALI UTILIZZATI DURANTE LA LAVORAZIONE DELLE RESINE CARICATE

5.3.1 Introduzione

Per la realizzazione delle paste dentali, di cui al precedente paragrafo, la Kerr Italia S.p.A. utilizza degli speciali miscelatori, con due pale elicoidali ed un cestello (planetario) rivestito di materiale opportuno.

La scelta dei materiali di rivestimento dei contenitori, con i quali il prodotto in lavorazione viene a contatto durante la sua lavorazione, rappresenta un parametro critico per la riuscita del processo.

Per la natura dei materiali in lavorazione e soprattutto per quello che sarà il loro utilizzo finale è di estrema importanza che le resine non vengano in nessun modo alterate e inquinate. La contaminazione ovviamente deve essere scongiurata a tutti i livelli e in particolare anche da un punto di vista cromatico, in quanto le resine prodotte hanno un utilizzo anche di carattere estetico. È quindi necessaria la scelta di un materiale di rivestimento che abbia sicuramente caratteristiche di antiaderenza, ma che contemporaneamente non presenti la minima tossicità. La Kerr utilizza generalmente teflon opportunamente caricati con colorazioni tendenti al bianco. La lavorazione avviene in miscelatori (fig. 5.23) di varia portata opportunamente rivestiti.

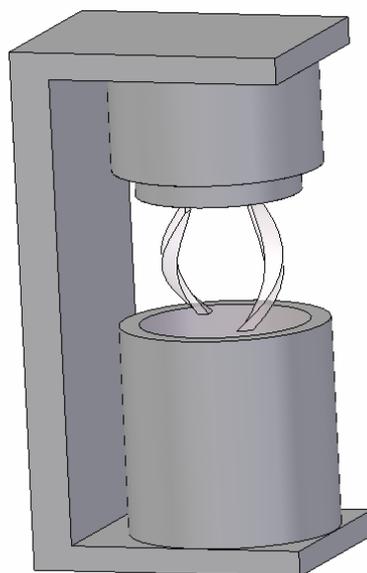


Figura 5.23 - Schematizzazione dei miscelatori attualmente usati in KERR

5.3.2 Valutazione delle proprietà meccaniche di teflon® caricati

Al fine di evitare l'inquinamento del prodotto finito è di fondamentale importanza che il materiale di rivestimento abbia caratteristiche:

- Antiaderenza;
- Atossicità (approvato FDA)

Il materiale che soddisfa pienamente i requisiti è sicuramente il teflon (polietrafluoroetilene, PTFE) in quanto presenta:

- la completa inerzia chimica per cui non viene aggredito dalla quasi totalità dei composti chimici;
- ottime proprietà di scorrevolezza superficiale: il coefficiente di attrito risulta il più basso tra i prodotti industriali;
- antiaderenza: la superficie non è incollabile non è noto alcun adesivo capace di incollare il PTFE.

Attualmente la KERR utilizza un particolare tipo di *teflon*® appartenente alla categoria dell'ETFE per rivestire sia le pale che i planetari; scopo della seguente ricerca è confrontare le caratteristiche meccaniche del materiale ora in uso con altri 11 tipi di *teflon*® resi disponibili in forma di:

Piastrine metalliche rivestite:

PMR_1

PMR_1 N

PMR_2

PMR_2T*

PMR_3

PMR_4

Semplici piastrine di teflon

Teflon marrone**

Teflon nero

Teflon blu

Teflon grigio

Teflon bianco

È inoltre di particolare interesse verificare se possa rappresentare una scelta ottimale utilizzare materiali differenti per il rivestimento di pale e planetari.

Al fine di valutare le prestazioni dei vari rivestimenti a disposizione sono state condotte prove di:

**Per quanto concerne poi i due PMR_2, la lettera T sta significare che quel materiale è stato dotato di un topcoat ovvero di uno strato ulteriormente lubrificante.*

***Per le ultime tipologie di teflon è stata utilizzata una indicazione esclusivamente cromatica per motivi di copyright.*

Scorrimento

Release

Microdurezza.

5.3.3 Scorrimento

Queste prove sono state sempre condotte con l'ausilio della macchina *pin-on-disk* schematizzata in precedenza. Per la realizzazione di queste prove si è deciso di far scorrere il provino sulla piastrina rivestita, opportunamente bloccata attraverso un opportuno sistema di fissaggio composto da quattro profili ad L in legno, solidali al disco, che hanno reso completamente isostatica la piastrina impedendole qualsiasi movimento che avrebbe potuto invalidare la prova.

Le prove sono state condotte utilizzando due tipi di provini:

sfere di vetro di diametro 2cm (fig 5.24)

resina di forma emisferica (fig 5.25),

entrambi opportunamente incollati su pin metallici.



Figura 5.24 - Sfere di vetro utilizzate per le prove di scorrimento

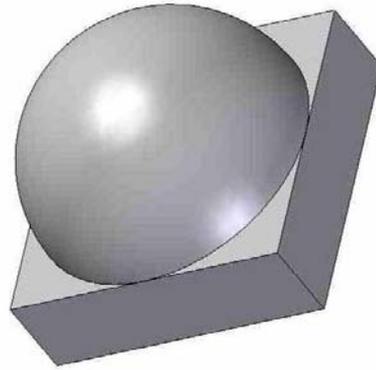


Figura 5.25 - Provini a testa semisferica utilizzati per le prove di scorrimento

Per la preparazione dei provini in resina si è proceduto come segue:

allo scopo di ottenere una superficie di contatto puntuale si è proceduto alla creazione di opportune forme di silicone ottenute con il seguente procedimento:

- 1 si sono procurati pin metallici dotati di calotta sferica, con diametro 1 cm, idonei a plasmare la forma;
- 2 sono state preparate resine siliconiche miscelate con l'apposito catalizzatore in proporzioni rispettivamente di uno a dieci; le quantità destinate alla preparazione sono state verificate con progressive pesate e curando che da 1 pound di catalizzatore si ottenessero 25 pollici cubici di preparato;
- 3 ottenuto il preparato sono stati applicati i pin, fissandoli con sigillante, per scongiurare possibili movimenti degli stessi, che avrebbero potuto causare una non uniformità della forma o addirittura il fallimento della prova.

Una volta pronta la forma, sono state applicate in essa le resine, trattate preliminarmente con un particolare apparecchio fotopolimerizzante noto come *OPTILUX 380* puntato a distanza molto ravvicinata, attraverso 2 cicli di durata di un minuto ciascuno, uno su ogni faccia del provino.

Dopo questo trattamento i provini sono stati estratti dalle forme e trattati in forno a 100° per una durata di 24 ore.

Le specifiche di prova sono state differenti per i due tipi di provini; precisamente:

- nel caso di sfere di vetro:

- velocità di scorrimento : 16 RPM
- raggio della pista : 35mm
- carico normale (forza di chiusura) : 20N

- durata prove :20 min.
- nel caso di provini in resina:
 - velocità di scorrimento : 16 RPM
 - raggio della pista : 40mm
 - carico normale (forza di chiusura) : 20N
 - durata prove : 40 min.

L'usura è stata quindi rilevata con l'ausilio di un rugosimetro attraverso il quale sono state misurate la larghezza e la profondità massima delle piste lasciate dal passaggio del provino.

I risultati delle misurazioni sono riportati nelle tabelle che seguono

PMR_2 T	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	950	42
Prove con sfere di vetro	700	7

Tabella 5.13 - Larghezza e profondità della pista per l'PMR_2T

PMR_2	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	1000	35
Prove con sfere di vetro	1000	23

Tabella 5.14 - Larghezza e profondità della pista per l'PMR_2

PMR_1 N	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	400	10
Prove con sfere di vetro	400	4

Tabella 5.15 - Larghezza e profondità della pista per l'PMR_1N

PMR_3	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale	900	25

Kerr		
Prove con sfere di vetro	900	5

Tabella 5.16 - Larghezza e profondità della pista per l'PMR_3

Teflon nero	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	800	7
Prove con sfere di vetro	220	3

Tabella 5.17 - Larghezza e profondità della pista per il teflon nero

Teflon Marrone	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	700	40
Prove con sfere di vetro	950	20

Tabella 5.18 - Larghezza e profondità della pista per il teflon marrone

Teflon Blu	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	600	7,5
Prove con sfere di vetro	200	4

Tabella 5.19 - Larghezza e profondità della pista per il teflon blu

Teflon Grigio	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	500	4
Prove con sfere di vetro	500	3

Tabella 5.20 - Larghezza e profondità della pista per il teflon grigio

PMR_4	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	650	30
Prove con sfere di vetro	1000	8

Tabella 5.21 - Larghezza e profondità della pista per il PMR_4 attualmente utilizzato in Kerr

Etf	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	700	15
Prove con sfere di vetro	750	17

Tabella 5.22 - Larghezza e profondità della pista per l'ETFE

PMR_1	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	700	13
Prove con sfere di vetro	700	10

Tabella 5.23 - Larghezza e profondità della pista per l'PMR_1

Teflon Bianco	Larghezza	Profondità [μm]
Prove con materiale Kerr	700	40
Prove con sfere di vetro	1200	16

Tabella 5.24 - Larghezza e profondità della pista per il teflon bianco

Gli stessi risultati sono messi graficamente a confronto per i differenti materiali, nelle figure seguenti (fig. 5.26 – 5.29).

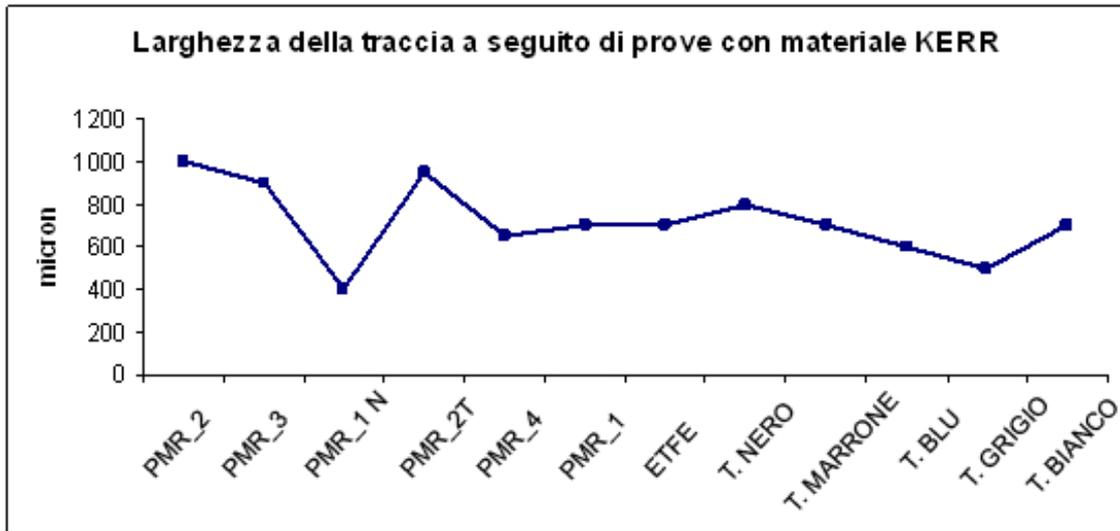


Figura 5.26 - Larghezza della pista a seguito di prove di scorrimento con materiale KERR

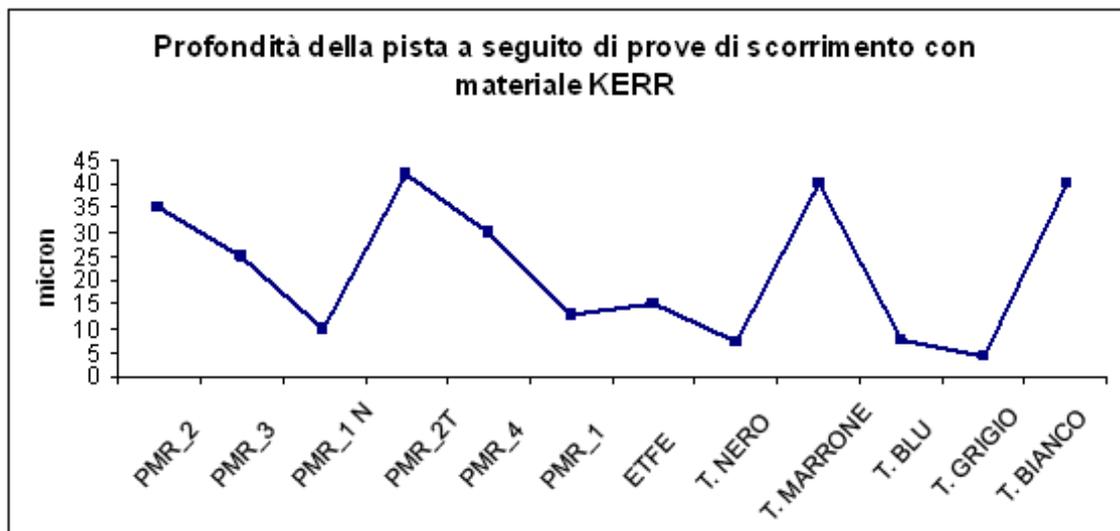


Figura 5.27 - Profondità della pista a seguito di prove di scorrimento con materiale KERR



Figura 5.28 - Larghezza della pista a seguito di prove di scorrimento con sfere di vetro



Figura 5.29 - Larghezza della pista a seguito di prove di scorrimento con sfere di vetro

Come si può facilmente evincere dai grafici l'PMR_1N il *teflon grigio* e il *teflon nero* hanno mostrato un'ottima resistenza ad usura riportando piste di profondità e larghezza molto ridotte. Il PMR_4 attualmente utilizzato in Kerr ha invece fatto misurare valori tra i più alti nelle prove con sfere di vetro, con una netta inversione di tendenza per quel che riguarda le prove con resine caricate.

Di seguito si riportano i diagrammi delle forze di attrito rilevate durante le prove con sfere di vetro (fig.5.30- 5.32) e con le resine (fig. 5.33 - 5.37)

In figura 5.30 in particolare sono riportati gli andamenti della forza di attrito del:

- *teflon grigio*

- *teflon blu*
- *teflon bianco*
- *teflon marrone*

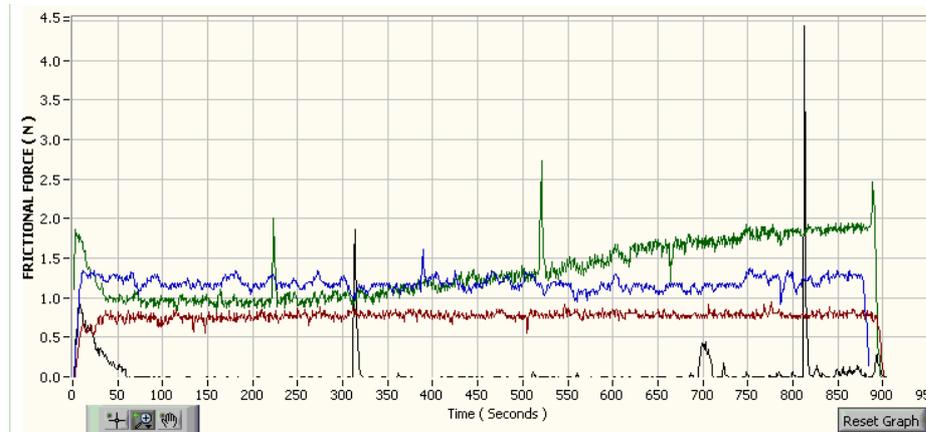


Figura 5.30 - Forza di attrito misurati durante le prove di scorrimento con sfere di vetro

Come si evince dal diagramma il *teflon marrone* ha riportato il miglior comportamento con un forza di attrito prossima allo zero; molto particolare è invece l'andamento del *teflon bianco* che mostra una forza d'attrito crescente con un andamento approssimabile quasi a quello lineare. Questo comportamento può essere giustificato se si tiene conto che con il passare del tempo la sfera di vetro sia in un certo senso andata a scavare sempre più in profondità causando quindi un aumento della sezione del teflon a contatto con il provino.

In figura 5.31 sono invece riportati gli andamenti di:

- **PMR_1N**
- **PMR_2**
- **PMR_2T**
- **PMR_3**

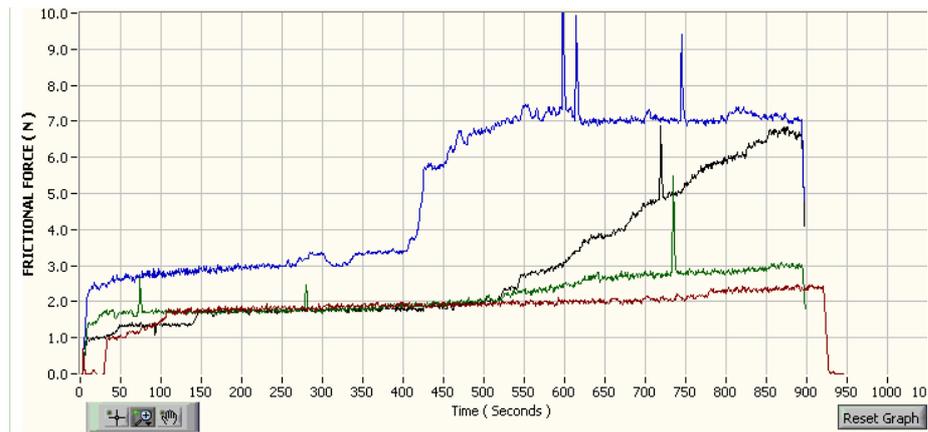


Figura 5.31 - Forza di attrito misurati durante le prove di scorrimento con sfere di vetro

In questo caso si può subito notare un trend crescente per i diversi materiali, giustificabile con la progressiva penetrazione della sfera di vetro nel materiale. La crescita della forza di attrito che invece si nota nella parte finale del diagramma del PMR_2T può invece essere imputata all'esaurirsi dell'effetto del topcoat, completamente asportato dalla sfera di vetro.

In figura 5.32 sono ancora riportati gli andamenti per il :

- PMR_4 KERR
- Teflon nero
- PMR_1
- ETFE

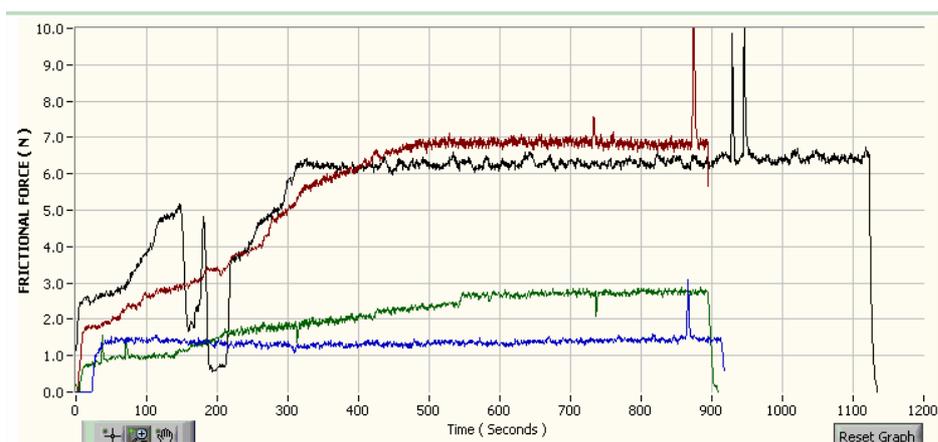


Figura 5.32 - Forza di attrito misurati durante le prove di scorrimento con sfere di vetro

È interessante notare come il PMR_4 e l'ETFE presentino valori di forza d'attrito molto simile, rendendo da questo punto di vista il PMR_4 attualmente utilizzato

in KERR del tutto simile a quello proposto come possibile sostituto; è inoltre da sottolineare nei comportamenti dell'PMR_1N e dell'PMR_1, che presentano un andamento pressoché uguale.

In tabella 5.25 si riportano i valori medi delle forza di attrito per i diversi materiali a seguito delle prove con sfere di vetro.

Materiale	Forza di attrito [N]
Teflon grigio	0,8
Teflon blu	1,2
Teflon bianco	1,5
Teflon marrone	0,1
PMR_1N	1,9
PMR_2	5
PMR_2T	2,3
PMR_3	3,6
PMR_4	4,8
Teflon nero	1,5
ETFE	5
PMR_1	2

Tabella 5.25 - Forze di attrito medie misurate durante le prove di scorrimento con sfere di vetro

Esaminando i valori per i diversi materiali si può subito notare come l'utilizzo del topcoat per l'PMR_2 comporti una notevole diminuzione della forza d'attrito portandola da un valore di 5 N a 2,3 N.

In figura 5.33 sono riportati gli andamenti per il

- teflon grigio
- teflon blu
- teflon marrone

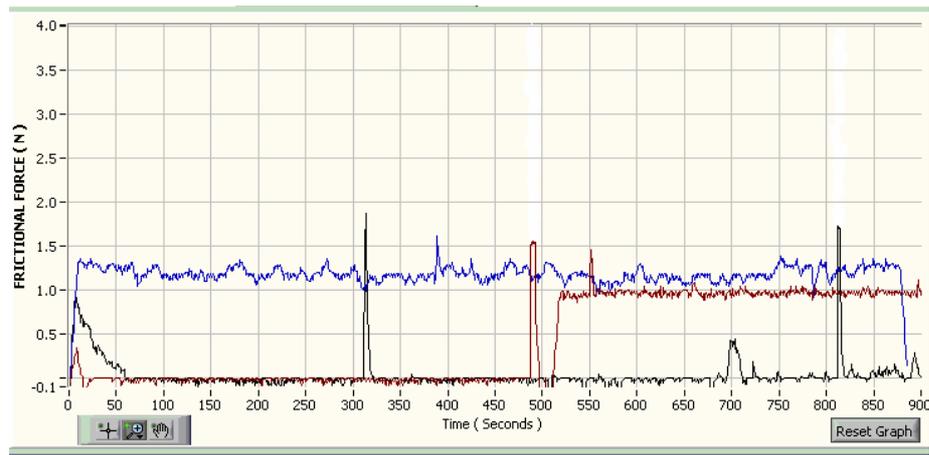
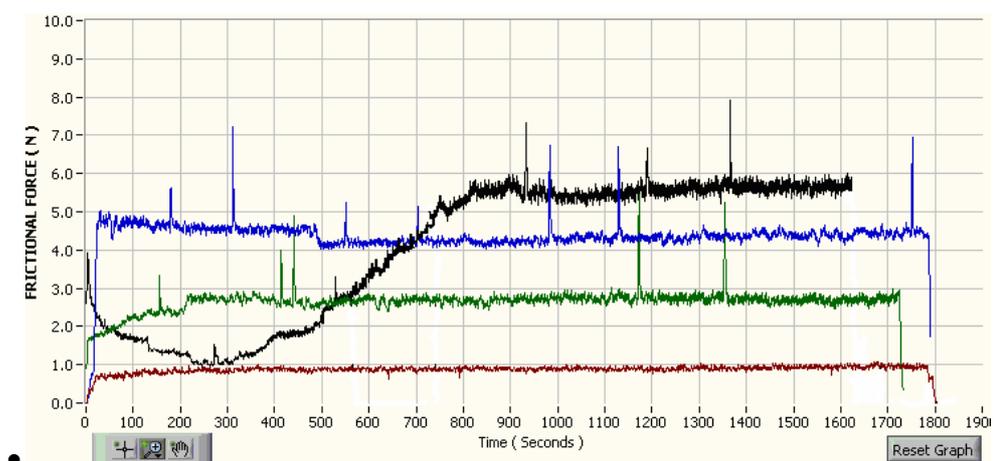


Figura 5.33 - Forza di attrito misurati durante le prove di scorrimento con resine Kerr

Si può subito notare come il teflon blu e quello marrone mostrino degli andamenti praticamente uguali a quelli mostrati in precedenza assestandosi rispettivamente a 1,2 e 0,1 N. Per il teflon grigio invece è possibile riscontrare una diminuzione della forza di attrito mediamente misurata, di contro si rileva un'improvvisa inversione di tendenza del diagramma, con la forza che si porta da valori prossimi allo zero, a circa 1N.

In figura 5.35 sono invece riportati gli andamenti per il:

- PMR_1N
- PMR_2
- PMR_2T
- PMR_3



PMR_3

Figura 5.36 - Forza di attrito misurati durante le prove di scorrimento con materiale Kerr

Anche in questo caso è da sottolineare come l'utilizzo del topcoat abbia un effetto benefico, riducendo la forza di attrito da 4,5 a 3N. Ancora una volta è eccellente il comportamento dell'PMR_1N per cui è stata misurata una forza di attrito ridotta e totalmente costante nell'intervallo di osservazione. Particolare è invece l'andamento dell'PMR_3 che dopo un primo transitorio si assesta a valori intorno ai 6N.

Infine in figura 5.37 sono riportati i diagrammi di

- PMR_4
- Teflon nero
- PMR_1
- ETFE

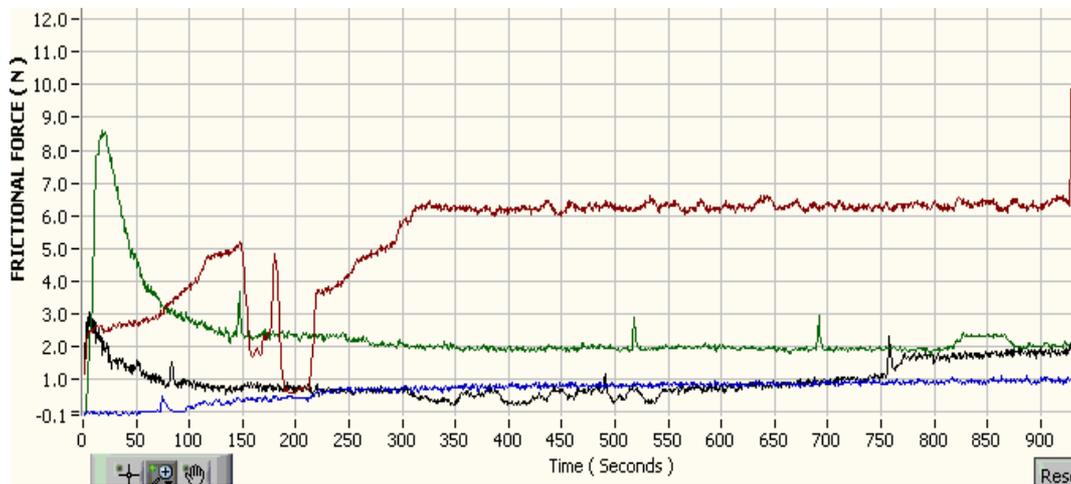


Figura 5.37 - Forza di attrito misurata durante le prove di scorrimento con resine Kerr

Dal diagramma si evince come questa volta il PMR_4 e l'ETFE abbiano dei comportamenti molto diversi infatti mentre il PMR_4 Kerr dopo un primo transitorio si assesta intorno a valori compresi tra i 6 e i 7N, l'ETFE si mantiene più o meno costante nell'intervallo di osservazione mantenendosi intorno ai 2N. È da sottolineare inoltre il comportamento del teflon nero che invece durante tutta la durata della prova non super mai l'unità.

In tabella 5.26 sono inoltre riportati i valori medi della forza di attrito per le differenti tipologie di teflon:

Materiale	Forza di attrito [N]
Teflon grigio	0,5
Teflon blu	1,2
Teflon marrone	0,1
PMR_1N	0,9
PMR_2	4,5
PMR_2T	3
PMR_3	5
PMR_4	4,8
Teflon nero	1,5
ETFE	5
PMR_1	2

Tabella 5.26 - Forze di attrito medie misurate durante le prove di scorrimento con teste semisferiche

Parallelamente alle prove di scorrimento su teflon è stata anche condotta una prova sulla stessa resina Kerr, fatta opportunamente polimerizzare su di una piastrina di acciaio con le stesse specifiche di prova utilizzate per le prove su teflon. In particolare sono stati rilevati i seguenti valori:

<i>Resina su Resina</i>	<i>Larghezza</i>	<i>Profondità [m]</i>
Prove con materiale Kerr	650	30
Prove con sfere di vetro	1000	8

Tabella 5.27 - Larghezza e profondità della pista prove di scorrimento resina su resina

Al termine delle prove è stata quindi condotta un'analisi qualitativa esaminando le piste con l'ausilio di un microscopio elettronico, di seguito si riportano alcune foto delle piastrine esaminate (fig. 5.38 – 5.41). In particolare dalla figura 5.38 si

possono notare le rilevanti dimensioni delle particelle caricanti il teflon, che forniscono all'PMR_1N una maggiore resistenza all'abrasione.

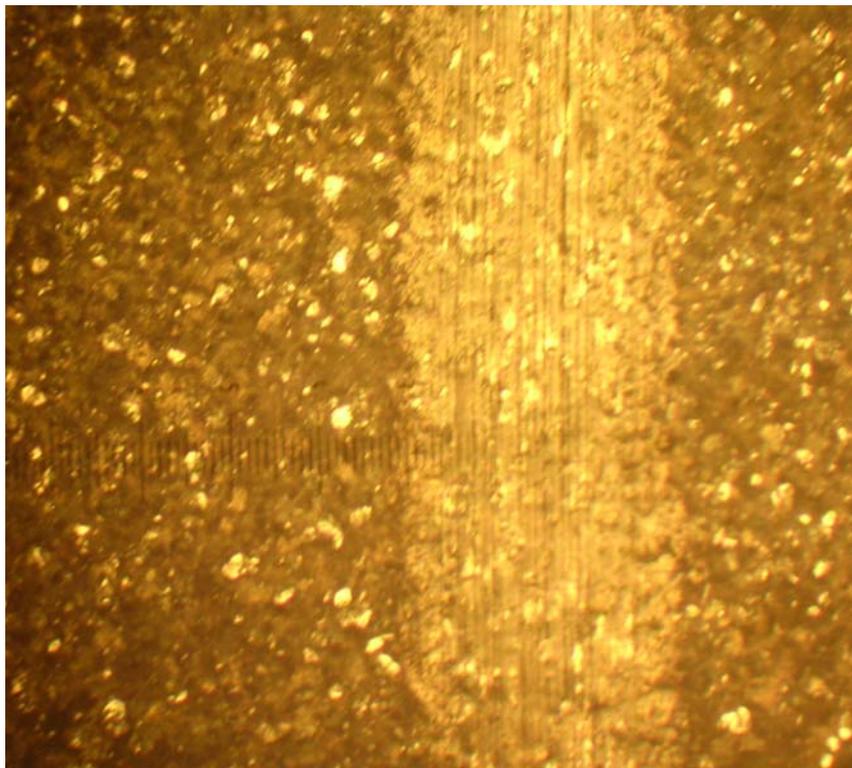


Figura 5.38 - Pista di usura sull'PMR_1N vista al microscopio

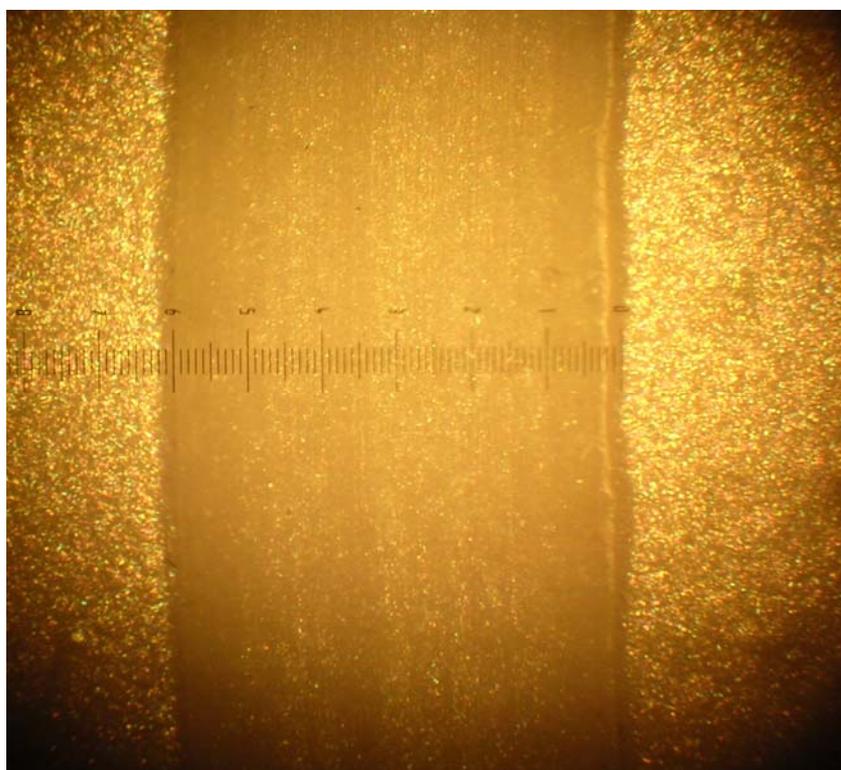


Figura 5.39 - Pista di usura sull'PMR_2 vista al microscopio

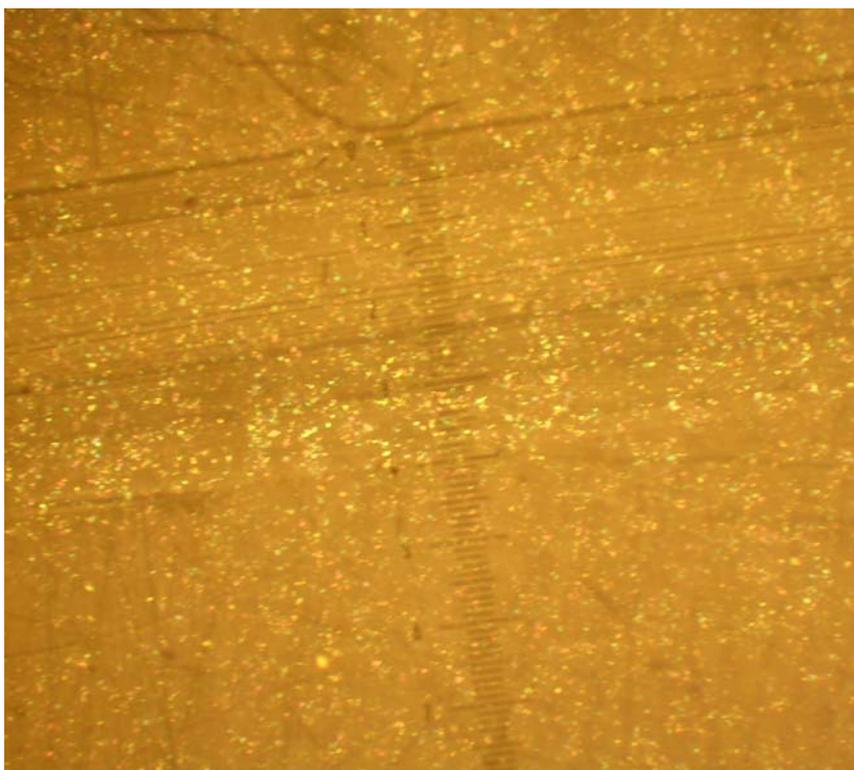


Figura 5.40 - Pista di usura sull'PMR_2T vista al microscopio

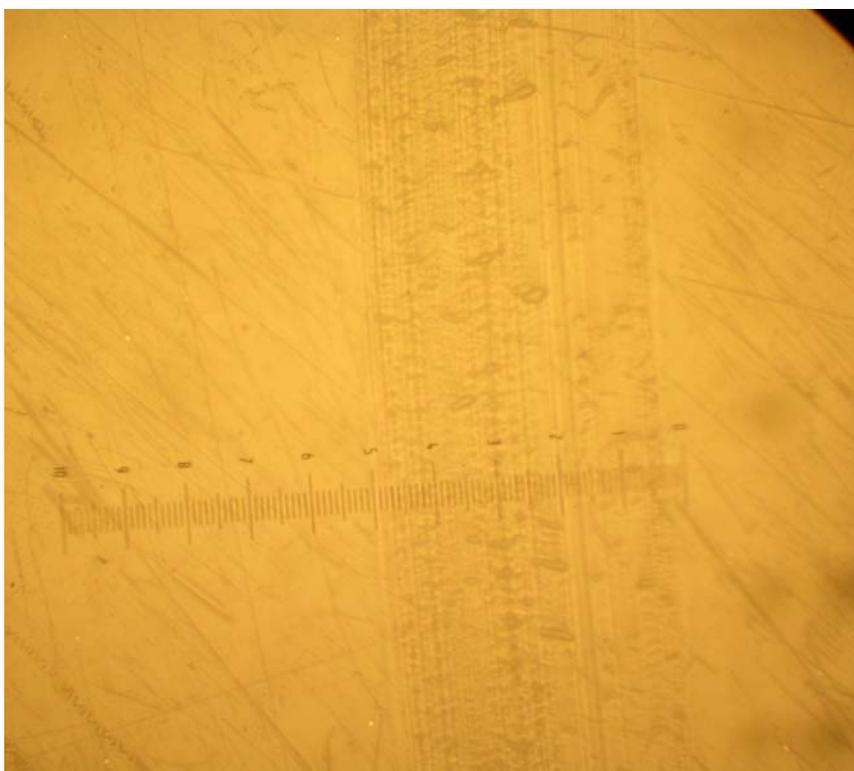


Figura 5.41 - Pista di usura sull'PMR_3 vista al microscopio

5.3.4 Release

Attraverso tali prove ci si è proposti di valutare e quantificare la forza di adesione al teflon delle resine non ancora polimerizzate.

Le prove sono state svolte con l'utilizzo di una rete polimerica a maglie fitte posta tra il teflon e la resina non ancora polimerizzata; tra la rete e la resina è stato inoltre posto un film di materiale plastico sul quale è stato precedentemente realizzato una incisione a sezione quadrata di 3cm^2 , in modo da rendere la superficie di contatto uniforme per tutte le prove. Successivamente si è proceduto all'applicazione di un carico normale di circa 100N in modo da far penetrare la resina attraverso la rete e farla aderire alla piastrina di teflon (fig. 5.42). Dopo aver quindi fissato la parte libera della rete nella morsa di afferraggio della *pin-on-disk* è stata applicata una sollecitazione di trazione che attraverso la pressione esercitata dal braccio porta-provino sulla cella di carico ha permesso la lettura della forza applicata.

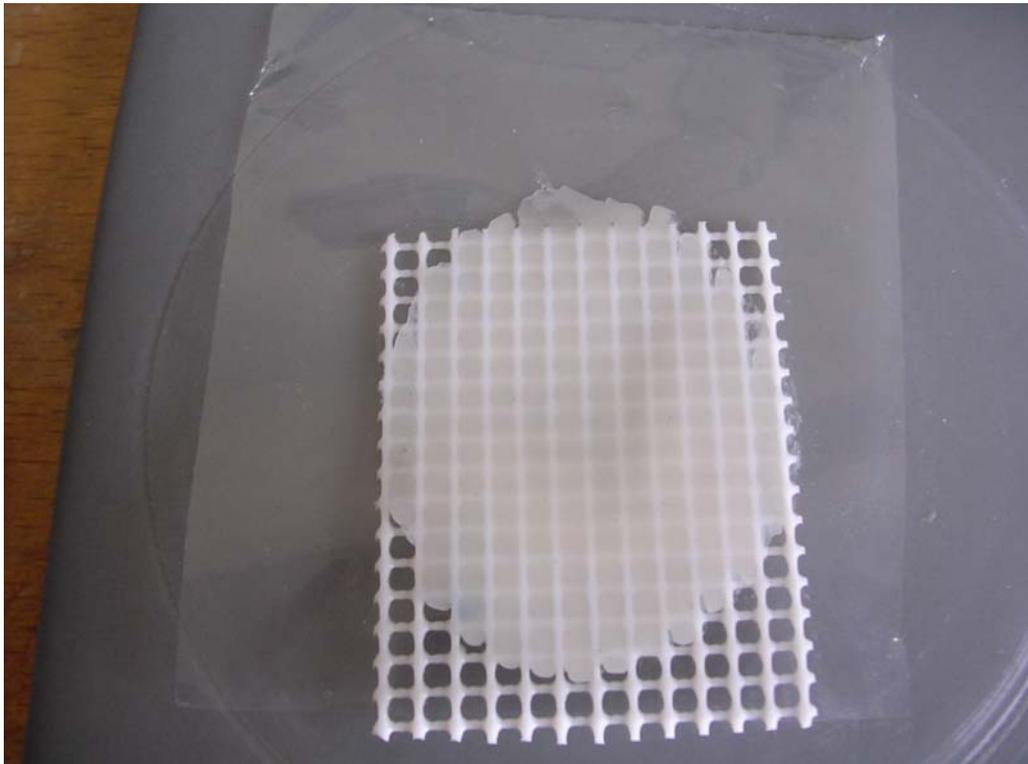


Figura 5.42 - Preparazione per la prove di release

In tabella 5.28 sono riportati i risultati riscontrati:

Materiale	Carico [N]
PMR_2T	18
PMR_2	22
PMR_1N	26
PMR_3	16
PMR_1	24
PMR_4	>50
Teflon grigio	>50
ETFE Smaltiriva	24

Tabella 5.28 - Risultati delle prove di release

Graficamente :

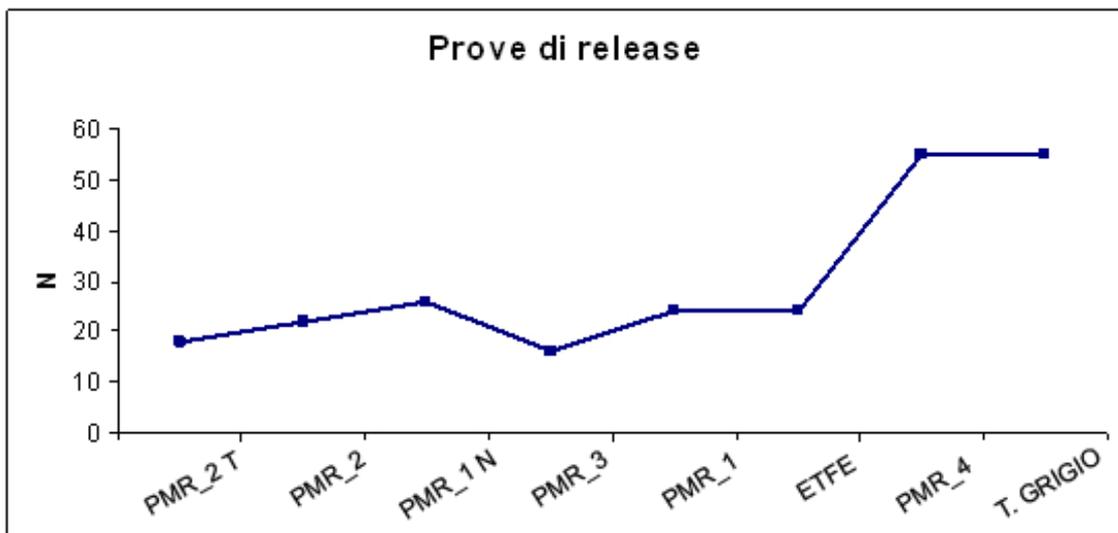


Figura 5.43 - Prove di release: carico applicato in funzione del teflon utilizzato

I risultati ottenuti mostrano un buon comportamento da parte dell' PMR_3 che presenta il più basso valore di forza. È inoltre possibile notare come l'utilizzo del topcoat produca anche in questo caso notevoli benefici, rendendo il teflon meno adesivo. Nella figura che segue è inoltre riportata la traccia lasciata dalla resina sulla piastrina in seguito alla prova.



Figura 5.44 - Traccia lasciata sulla piastrina rivestita a seguito della prova di release.

5.3.5 Microdurezza

Sono infine state condotte delle prove di microdurezza Vickers che hanno fornito i seguenti risultati (Tab. 5.29; fig. 5.45):

Materiale	HV
PMR_2T	6,8
PMR_2	7
PMR_3	3,8
PMR_1N	50
ETFE	5,5
PMR_1	5,3
PMR_4	5,7
Teflon Marrone	4,8
Teflon Nero	40,9
Teflon Grigio	25
Teflon Blu	9
Teflon Bianco	2,6

Tabella 5.29 – Risultati delle prove di microdurezza Vickers.

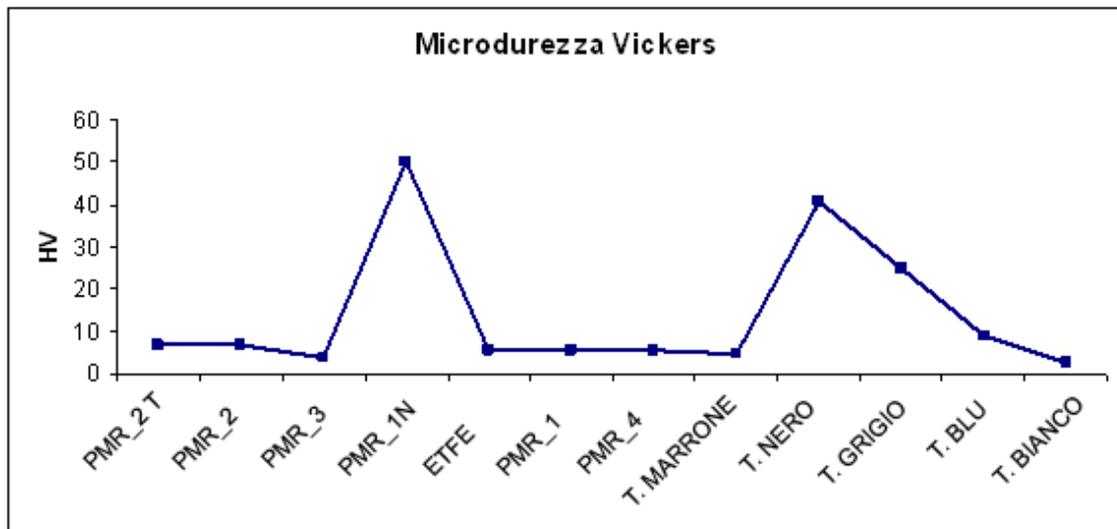


Figura 5.45 - Microdurezze Vickers misurate per i diversi materiali

È da notare il comportamento dell' PMR_1N, del teflon nero e del teflon grigio che presentano dei valori molto maggiori rispetto a tutti gli altri tipi di teflon che invece si assestano intorno a valori compresi tra 4 e 8.

5.3.6 Esame dei risultati

Dall'analisi dei risultati è possibile trarre conclusioni su ogni tipo di materiale testato:

- L'PMR_2 a seguito delle prove di scorrimento effettuate con resine KERR e sfere di vetro presenta un'usura molto elevata associata anche ad una forza di attrito che risulta essere la più alta riscontrata. Questo tipo di comportamento può essere imputato alla scarsa durezza del materiale che ne ha causato un vero e proprio spostamento.
- L'utilizzo del topcoat per l'PMR_2 presenta un sensibile miglioramento di quelle che sono le proprietà di adesione e di scorrimento con sfere di vetro per il materiale, presentando un coefficiente di attrito quasi dimezzato. Per quanto riguarda le prestazioni con resine Kerr invece presenta un usura maggiore dovuta al fatto che avendo la resina caratteristiche più abrasive rispetto alle sfere di vetro riesce facilmente a portare via il topcoat, lasciando subito scoperto il materiale sottostante.

- L'PMR_1N manifesta un ottimo comportamento nelle prove di scorrimento presentando un'usura pressoché minima unita ad una forza di attrito tra le più basse rilevate. Per le prove di *release* invece il valore è molto alto, ma questo aspetto, essendo la durezza Vickers molto elevata, risulta ininfluente ai fini dell'usura. Tali proprietà possono essere giustificate dalla notevole presenza di particelle dure (visibili in figura 5.45).
- L'PMR_3 invece si pone come una via di mezzo tra quelle che sono le caratteristiche dell'PMR_2 e dell'PMR_1N presentando una buona resistenza ad usura unita ad un valore della forza di attrito relativamente basso. Inoltre le prove di *release* hanno fornito un valore inferiore a tutti gli altri, che integra la scarsa durezza rilevata.
- Il PMR_4 e l'ETFE presentano i medesimi comportamenti per quanto riguarda durezza forza di attrito, presentando invece notevoli differenze nella profondità delle piste riscontrate a seguito delle prove di scorrimento.
- L'PMR_1 nonostante la sua colorazione bianca che da questo punto di vista lo renderebbe una scelta ottimale e una buona resistenza ad usura, presenta valori abbastanza alti di *release* che mal si conciliano con la scarsa durezza Vickers.
- Il teflon marrone presenta dei valori ideali di forza di attrito addirittura prossimi allo zero che però inaspettatamente presentano dei valori disastrosi dal punto di vista dell'usura. Questo aspetto è facilmente giustificabile tenendo conto degli scarsi valori riscontrati in termini di microdurezza.
- I teflon grigio blu e nero hanno invece mostrato un comportamento tra di loro molto simile e altamente performante, in virtù della loro alta microdurezza e dei bassi valori di usura e forza di attrito.
- Il teflon bianco infine, nonostante la bassa forza di attrito mostrata, ha comunque riportato una usura molto elevata unita a bassi valori di durezza che lo rendono fortemente inadeguato a questo tipo di lavorazione.

CONCLUSIONI

Con il presente studio si è cercato di incrementare le proprietà di resistenza ad usura di un materiale composito, agendo unicamente sulla fase di contenimento, incrementandone la resistenza al graffio mediante la carica con polveri di materiale duro e metallico, come ad esempio il Carburo di Silicio (SiC).

Per comprendere gli effetti da esse prodotte, sono stati realizzati provini in resina epossidica caricata con polveri SiC in diverse percentuali volumetriche e con diverse granulometrie. Sono state, dunque, condotte una serie di prove di usura abrasiva utilizzando macchinario del tipo pin-on-disc, utilizzando provini con diverse percentuali volumetriche di polveri di rinforzo ed applicando sul disco mobile, contropacche in carta abrasiva con diversi valori della rugosità; le prove sono state condotte in diversi regimi di carico e con diverse distanze di percorrenza.

Dalle prove svolte è emerso che l'usura, valutata sui diversi provini al termine di ogni prova, è dipendente dal rapporto tra le dimensioni delle particelle rinforzanti e quelle abrasive. Molto importante è anche la percentuale volumetrica di particelle rinforzanti con cui si carica la matrice polimerica.

Ne consegue che in ogni caso si ottiene un miglioramento della resistenza ad usura della matrice epossidica, caricando la stessa con polveri di materiale duro e metallico. I provini che hanno mostrato il maggiore incremento prestazionale sono quelli con elevata percentuale volumetrica e con le maggiori dimensioni delle particelle rinforzanti (SiC 30% 600#); i miglioramenti sono divenuti più modesti al diminuire dei due parametri, fino ad avere il minore incremento di resistenza ad usura, con provini con bassa percentuale volumetrica e con le minime dimensioni delle particelle rinforzanti (SiC 10% 2000#).

Inoltre, è stato studiato una reale applicazione del rinforzo di matrici con riempitivi di materiale duro (*filler*), al fine di migliorare la qualità delle resine caricate per uso odontoiatrico prodotte dalla KERR Italia. Sono stati condotti diversi test sperimentali al fine confrontare le caratteristiche di resistenza ad usura abrasiva di sei matrici caricate in modo diverso.

Le prove di scorrimento hanno permesso una più completa valutazione rendendo possibile evidenziare le maggiori differenze tra le diverse resine

caricate, mostrando quindi come la maggiore concentrazione di polveri dure nelle resine comporti una maggiore resistenza ad usura. Il materiale, identificato con F per motivi di copyright, infatti, con valori delle percentuali di polveri dure che si avvicinano all'80%, ha mostrato un comportamento sensibilmente migliore sia per le prove a secco che per quelle "in umido".

Indispensabile per il miglioramento della qualità del prodotto finito è sicuramente evitare l'inquinamento del semilavorato nelle diverse fasi del processo. Da questo punto di vista molto critica si presenta la fase di miscelazione tra la pasta polimerica, costituita dalla combinazione di diverse macromolecole, con le polveri di vetro. La miscela che ne viene fuori, per le sue elevate proprietà abrasive, produce un'usura del recipiente e delle palette dei miscelatori, che va così ad inquinare le paste stesse. Da qui la necessità di rivestire attraverso materiale certificato FDA, resistente e antiaderente, le parti del miscelatore a contatto con il materiale in lavorazione. A tale scopo sono state condotte prove di scorrimento, release, e microdurezza dalle quali è risultato che il PMR1_N presenta un ottimale *mix* di proprietà (durezza elevata, ottima resistenza ad usura, unita però anche ad elevate forze di adesione) che lo renderebbero la scelta ideale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Crivelli Visconti I., Paesano A., “ Quali compositi per l’industria meccanica? “, in *meccanica oggi*, n° 11, Ott. 1990.
- [2] D’Agostino Vincenzo, “ Fondamenti di tribologia “, vol. 1, ed. CUEN Napoli, 1988.
- [3] WEAR CONTROL HANBOOK, Edited by M.B. Peterson and W. O. Winer, ed. ASME, 1980.
- [4] Crivelli Visconti I., “ Materiali compositi, tecnologie e progettazione “, Tamburini ed., Milano, 1975.
- [5] Crivelli Visconti I., “ Appunti dalle lezioni di Tecnologia dei Materiali non Convenzionali “.
- [6] H. M. Hawthorne, “ Wear in hybrid carbon/glass fiber epoxy composite materials “, in (Ed. K.C. Ludema) *Proc. Int. Conf. On wear of materials*, (1983), pp 576-582.
- [7] J. K. Lankaster, in *Friction and wear of composite materials*, ed. Fredrich K., Elsevier, Amsterdam, 1986, chapter 8.
- [8] M. Clerico, V. Patierno, in *wear* 53, (1979), pp 279.
- [9] M. Cirino, R. B. Pipes, K. Friedrich, “ The abrasive wear behaviour of continuous fiber polymer composites “, *J. Mater. Sci.* 22, (1987), pp 2481-2492.
- [10] M. Cirino, K. Friedrich, R. B. Pipes, “Evaluation of polymer composites for sliding and abrasive wear applications “, in *composites*, vol. 19, n° 5, Butterworth & Co. Ltd, 1988.
- [11] M. Vazir, R. T. Spurr, F. H. Stott, “ An investigation of the wear of polymeric materials “, in *wear* 122, (1989), pp 197-205.

- [12] B. Vishwanath, A. P. Verma, C.V. S. K. Rao, “Wear study of glass woven roving composite “ in wear 131, (1989), pp 197-205.
- [13] R. Ramesch, G. K. Rao, Kishore,” Dry studies on glass fiber-reinforced epox composites “, in wear 89, (1983), pp 131-136.
- [14] B. Vishwanath, A. P. Verma, C.V. S. K. Rao, “ Friction and wear of glass woven roving/modified phenolic composite “, in composites, vol. 21, n° 6, Butterworth-Heineman Ltd, 1990.
- [15] C. Lhymn, K. E. Tempelmeyer, P. K. Davis, “ The abrasive wear of short fibre composites “, in composites, vol. 16, n° 2, Butterworth & Co. Ltd, 1985.
- [16] A. Wang, H. J. Rack, “ Abrasive wear of silicon carbide particulate- and whisker-reinforced 7091 aluminum matrix composites “, in wear 146, (1991), pp 337-348.
- [17] I. Crivelli Visconti, A. Langella, M. Durante, “ The wear behaviour of GFRP with matrix filled with hard powder “, III° Convegno AITEM, Salerno, 1999, pp 337-349.
- [18] A. A. Katbab, F. Abbasi, A. Shojaei, “ Effect of thermoelastic parameter of polymer-based composite friction materials on their thermomechanical behaviour “, proceeding in ECCM 9, del 2000.
- [19] G. Righes, P. M. Calderale, “ Thermal transient analysis of automotive disk brakes and cylinder liners “, in ATA, vol. 52, n° 11/12, 1999.
- [20] G. A. Iranpoor, F. Abbasi, A. Shojaei, A. A. Katbab, “ Interaction between polymer-based composite friction materials and counterface“, proceeding in ECCM 9, del 2000.
- [21] N. H. Sung, N. P. Suh, “ Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composites “, in wear 53, (1979), pp 129-141.

- [22] J.C. Roberts, “ Evaluation of a double lap composite clamped joint “, *J. Composite Mater* 19, (1985), pp 376-389.
- [23] P. D. Herrington, M. Sabbaghian, “ Factors affecting the friction coefficients between metallic washers and composite surfaces “, in *composites*, vol. 22, n° 6, Butterworth-Heinemann Ltd, 1991.
- [24] H. Voss, K. Friedrich, “ Wear performance of a bulk liquid crystal polymer and its short fiber composites “, in *Tribol. Int.* 19, (1986), pp 145-156.
- [25] H. Voss, K. Friedrich, “ On the wear behaviour of short fibre reinforced PEEK composites “ in *wear* 116, (1987), pp 1-18.
- [26] K. Friedrich, “ Friction and wear of polymer composites “, in Elsevier Scientific Publisher, Amsterdam, 1986.
- [27] M. Vaziri, R. T. Spurr, F. H. Stott, “ An investigation of the wear of polymeric materials “, in *wear* 122, (1988), pp 329-342.
- [28] S. B. Ratner, I. I. Farbera, O. V. Radjuckerich, in James D. J. (Ed.) *Abraison of Rubber*, McLaren, Londra, 1964, pp 145, cited in J. K. Lankaster, *Tribology*, 4 (1971), 82.
- [29] Zygmunt, Rymura, “ Predicting wear in miniature steel-polymer journal bearings “, in *wear* 137, (1990), pp 211-249.
- [30] J. A. Catherall, K. E. Kortegas, *Metal finishing J.*, 18 (205), pp 40-43, 1972.
- [31] G. Muller, D. W. Baudrand, “ Plating on plastics “, pp 18-19, R. Draper, 1979.
- [32] Gun Y. Lee, C. K. H. Dharan, R. O. Ritchie, “A physically-based abrasive wear model for composite materials”, in *Wear* 252, (2002), pp 322-324.

[33] B. K. Yen, C. K. H. Dharan, “A model for the abrasive wear of fiber-reinforced polymer composites”, in *Wear*, (1996), pp 123-124.

[34] J. M. Durand, M. Vardavoulias, M. Jeandin, “Role of reinforcing ceramic particles in the wear behaviour of polymer-based model composites”, in *Wear* (1995), pp 833-834 e 838-839.

[35] X. S. Xing, R. K. Y. Li, “Wear behaviour of epoxy matrix composited filled with uniform sized sub-micron spherical silica particles, in *Wear* (2004), pp 21-22 e 26.

[36] J.K. Lancaster, in *Friction and wear of composite materials*, ed. Friederich K., Elsevier, Amsterdam, 1986, chapter 8.

[37] N. Axen, K.H. Zum-Gahr, Abrasive wear of TiC–steel composite clad layers on tool steel, *Wear* 157 (1992) 189–201.

[38] Web-site: K.C. Abrasive Company - <http://www.kcabrasive.com> –
Address: <http://www.kcabrasive.com/projects/gritpowdersizing.pdf>

[39] K.H. Zum-Gahr, Abrasive wear of two-phase metallic materials with a coarse microstructure, in: K.C. Ludema (Ed.), *International Conference on Wear of Materials*, American Society of Material Engineering, Vancouver, 1985, p. 793.