

**Università degli Studi di Lecce
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria dei
Materiali
A.A. 2001 – 2002**

**Corso di
SCIENZA e TECNOLOGIA dei
MATERIALI CERAMICI
Prof. A. Licciulli**

TEMA D' ANNO

Potenza Giancarlo

INDICE :

1. Introduzione.....	pag. 3
2. Tipologie di freni.....	pag. 4
3. Proprietà tribologiche.....	pag. 6
4. Usura dei freni.....	pag. 7
5. Lubrificazione.....	pag. 8
6. Materiali compositi: caratteristiche.....	pag. 9
7. Compositi carbon-carbon	
◆ Proprietà.....	pag. 10
◆ Ossidazione.....	pag. 12
◆ Meccanica di formazione dei detriti.....	pag. 13
◆ Processi tecnologici.....	pag. 17

DISPOSITIVI FRENANTI

Introduzione :

I dispositivi frenanti sono degli organi meccanici che vengono utilizzati per la dissipazione di energia cinetica di parti in movimento. Questi possono essere diversi a secondo del tipo di moto che devono ostacolare, ma quelli che noi tratteremo sono i freni che sono utilizzati per automobili, treni e mezzi di locomozione generale, anche se vedremo quelle che sono le ricerche più avanzate compiute sugli impianti frenanti di aerei e auto da corsa.

In generale i tipi di freni più comuni che possiamo incontrare sono i **freni a disco** (fig. 1) ed i **freni a tamburo** (fig. 2) che differiscono dal modo in cui viene applicato il momento frenante, che è il responsabile del rallentamento o dell' arresto del moto. Nel primo caso il momento frenante si ottiene accostando il ferodo al pattino tramite l' accoppiamento dei due dischi, mentre nel secondo caso c'è un ceppo che tramite l' applicazione di una coppia si chiude sul tamburo esercitando le forze di attrito che sono responsabili dell' arresto della ruota in movimento.

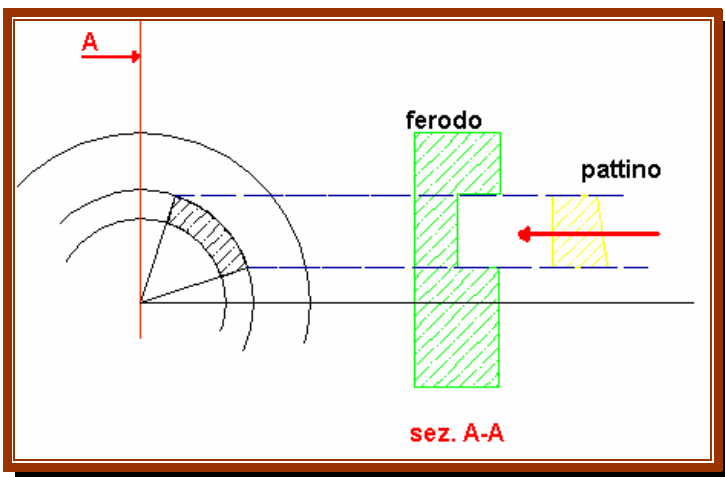


fig.1 (freno a disco)

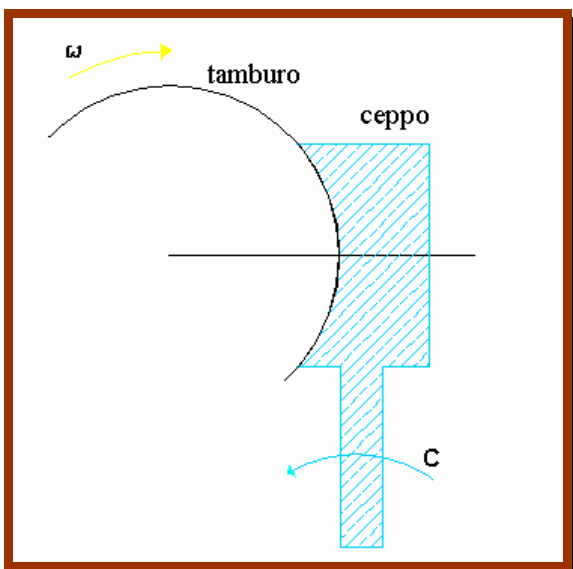
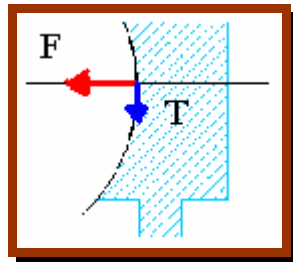


fig.2 (freno a ceppo o tamburo)

In entrambi i casi l' elemento frenante trasmette alla ruota una forza risultante, o meglio ancora una pressione, che si tradurrà in una componente tangente alla superficie della ruota che tenderà ad opporsi al moto di quest' ultima:



$$T = F * \mu$$

fig. 3

Da questa relazione si osserva come la componente T sia quella responsabile dell' effetto frenante ed il suo valore è legato a quello di F ed al valore del coefficiente di attrito. L' azione frenante non è però legata solo a questi parametri, ma c'è ne sono molti altri di cui bisogna tener conto come possono essere usura, temperatura e via dicendo che molto spesso sono collegati tra loro.

Tipologie di freni

1. Freni a disco :

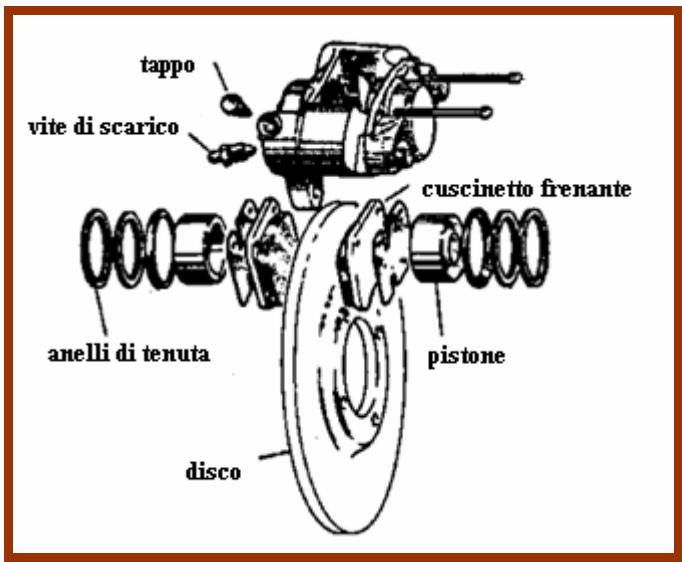


fig.4

Nella fig. 4 notiamo l' assemblamento di un freno a disco in cui possiamo distinguere il disco, che è solidale con la ruota, su cui agisce l' elemento frenante tramite l' azione di una pressione normale esercitata da un pistone idraulico di comando. L' applicazione simmetrica della forza evita le distorsioni del disco che invece sono presenti nei comuni freni a tamburo.

2 Freni a tamburo :

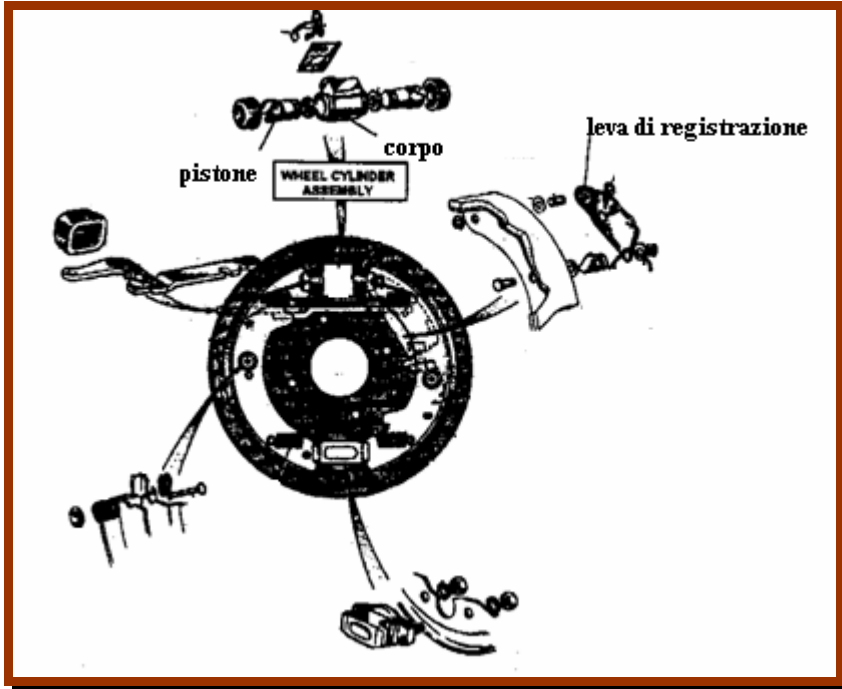


fig.5

In fig. 5 osserviamo la schematizzazione di un freno a tamburo, in cui si mette in evidenza come questo sia più complesso di quello a disco e per questo meno efficace visto l' elevato numero di parti meccaniche ed i seguenti attriti che devono essere vinti. Questi tipi di freni hanno il vantaggio di essere economici però sono maggiormente soggetti ad infiltrazione da parte di acqua o polveri, vista l' elevata distanza tra le superfici di contatto. Questo può determinare, in seguito all' applicazione della forza, deformazioni permanenti del disco o comunque variazioni del coefficiente di attrito che li rendono meno performanti.

Proprietà tribologiche :

Per vedere quello che è il comportamento dei materiali e capire così quali siano i migliori bisogna fare un' analisi microscopica del fenomeno.

Quello che si osserva è che le superfici reali si discostano di molto da quelle ideali come mostrato in fig. 6 secondo cui possiamo dividere i difetti in microscopici e macroscopici.

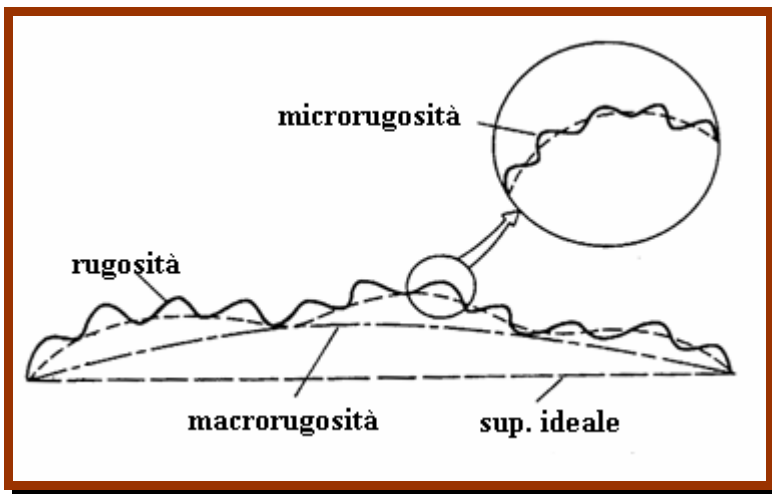


fig. 6

La presenza di picchi e valli fa in modo che il contatto tra le due superfici sia ristretto ad un numero limitato di punti. Da cui osserviamo che tanto più le superfici sono rugose tanto maggiore sarà il valore dell' attrito e questo determina forti influenze sull' usura delle superfici, che aumenta fortemente se il profilo è vuoto rispetto ad un profilo pieno, dove con profilo vuoto intendiamo un profilo in cui si ha la predominanza di picchi rispetto alle valli.

Le forze di attrito che si vengono a generare possono essere distinte in **forze di adesione** e **forze di deformazione**.

Le prime sono dovute ai deboli legami che si vengono a creare tra particelle e molecole costituenti la superficie in corrispondenza dei punti di giunzione e per questo possiamo dire che aumentando la pressione superficiale aumenta il numero di zone a contatto e quindi il valore di quel contributo. Nel secondo caso si verifica che, sotto l' azione della pressione esterna, i picchi tendono ad incunarsi nella superficie sottostante e per far scorrere le due parti bisogna che il picco deformi la superficie aumentando così il contributo resistente molto più del primo termine visto.

Usura dei freni :

Nella progettazione di un elemento frenante non è sufficiente però tener conto solo del coefficiente di attrito per la scelta del materiale ma bisogna tener conto di altri fattori primo fra tutti l' usura delle superfici a contatto visto che bisogna garantire funzionalità per un certo intervallo di tempo. Il problema dell' usura è complicato dal fatto che esistono differenti meccanismi con cui avviene e spesso sono combinati tra loro aumentando notevolmente la velocità di deterioramento delle superfici a contatto. Le tipologie con cui avviene l' usura possono essere riassunte come segue:

- ✓ **Adesione** : dovuto ai legami superficiali che si vengono a formare e che, sotto l' azione di uno sforzo di taglio, possono provocare l' asportazione dalla superficie delle particelle con cui il legame è avvenuto.
- ✓ **Abrasione** : dovuto alle deformazioni indotte in esercizio dai picchi, che incuneandosi nella superficie sottostante, generano dei solchi con relativa asportazione di materiale.
- ✓ **Erosione** : dovuto all' impatto di particelle di liquido o di solido sulla superficie che ne generano l' erosione. Questo termine è influenzato fortemente dall' angolo con cui tale impatto avviene e sono inversamente proporzionali.
- ✓ **Delaminazione** : dovuta all' applicazione ciclica di carichi abrasivi ed adesivi che tendono a generare, in corrispondenza di difetti esistenti, delle cricche al di sotto della superficie che crescendo genereranno la delaminazione .
- ✓ **Fatica** : dovuto all' applicazione di carichi ciclici, simile a quella che avviene in tutti gli elementi strutturali.
- ✓ **Ossidazione** : dovuto alla formazione di strati superficiali di ossido in seguito all' aumento di temperatura che si ha durante la dissipazione di energia. Lo strato di ossido che si viene a formare da un lato ci varia quelle che sono le caratteristiche della superficie, ma dall' altro può risultare benefico poiché tale strato isola quelli sottostanti azzerando la quantità di materiale coinvolta nella reazione.
- ✓ **Corrosione** : dovuta alla presenza di un ambiente corrosivo che può assottigliare gli elementi frenanti.
- ✓ **Fretting** : dovuto alla presenza di parti in moto relativo tra loro con piccole ampiezze di vibrazione .

Lubrificazione :

L' utilizzo di lubrificanti è il rimedio più frequentemente usato per limitare la velocità di degradazione delle parti frenanti. Si possono dividere in diverse categorie in base al loro stato fisico ed essenzialmente sono materiali con una resistenza a taglio più bassa di quella dei due materiali costituenti la superficie. Possiamo vedere la lubrificazione idrodinamica in cui il film fluido ha uno spessore tale da riempire le asperità superficiali, la lubrificazione elasto-idrodinamica dove si generano elevate deformazioni elastiche in seguito ad uno strato di lubrificante poco spesso. Con i lubrificanti solidi possiamo avere lubrificanti superficiali formati da film solidi su cui si hanno adesione e deformazione e lubrificanti solidi caratterizzati da elevati spessori di film con bassa resistenza a taglio che scorrono sulle superfici una volta applicato il carico trasversale.

Chiaramente se da un lato diminuisce la velocità con cui il materiale si usura, dall' altra si hanno delle perdite in performance dell' elemento frenante visto che sostanzialmente diminuisce il coefficiente di attrito. Da questa semplice analisi ci si rende conto di come sia fondamentale sviluppare materiali innovativi che tendano a massimizzare i due aspetti che nella trattazione generale sono contrapposti.

Dai dati appena trattati si può immediatamente osservare come il lavoro della ricerca sia molto complicato e costoso perciò i progressi sono registrabili in una ristretta serie di applicazioni (price insensitive applications) come possono essere gli impianti frenanti di aerei e macchine da formula 1. Nella realizzazione dei dischi frenanti dobbiamo utilizzare materiali che offrano un elevato coefficiente di attrito, specie ad alte temperature, valori ristretti di usura e grande capacità di trasferire carichi termici all'esterno, che altrimenti potrebbero influire negativamente sulle sue performance. Per far fronte a questa richiesta molto impegnativa si sono rivelati molto utili i materiali compositi specie quelli a matrice ceramica, metallica e polimerica.

Materiali compositi: caratteristiche

I materiali compositi devono il loro grande sviluppo nell'industria degli impianti frenanti (specie in campo aerospaziale) visto che riescono ad unire grandi performance con una sensibile riduzione dei pesi in gioco, anche se sono elementi molto costosi e vengono usati solo per un numero limitato di applicazioni. La riduzione dei pesi dei sistemi frenanti permette inoltre di diminuire il contributo di inerzia dell'intera ruota, riducendo così la forza giroscopica che si viene a generare che rende il veicolo meno maneggevole. Oltre ad essere caratterizzati da elevate proprietà meccaniche questi materiali devono resistere anche ad elevate temperature (si pensi ai freni degli aerei o a quelli dei treni ad alta velocità che devono dissipare grandi potenze termiche). Tipicamente gli statori dei treni sono in grado di resistere a temperature prossime ai 350 °C anche se si ottengono grandi risultati con compositi a matrice metallica rinforzati con alluminio. Oltre ad avere grandi resistenze a temperature elevate è essenziale per questi materiali la capacità di trasmissione del calore sprigionato durante la frenata. Proprio per questo motivo la maggior parte dei dischi frenanti è montata su dei supporti metallici (in genere titanio) che vengono prodotti per garantire il 100% di affidabilità e la maggior resistenza possibile.

	Densità [kg/m ³]	Modulo di Young [GN/m ²]	Conducibilità termica [W/(m K)]	Coeff. di espansione term.[ppm/K]	Calore specifico [J/(kgK)]	Punto di fusione [°C]
Ghisa grigia	7250	200	42	12.1	511	1200
Alluminio	2600	68.3	209.4	23.8	904	658
Rame	8800	124	384	16.5	394	1083
SiC	3120	420	15.2	4.3	670	/
Al/SiC MMC*	2800	99	180	16	840	/

*compositi a matrice metallica rinforzati con Al e SiC

Da questa tabella si nota quante siano le variabili di cui bisogna tener conto nella progettazione degli statori e dei rotori.

Compositi Carbon – Carbon:

◆ Proprietà

Il carbonio è uno degli elementi maggiormente utilizzati nella produzione dei dischi frenanti per una serie di proprietà che ne rendono uniche le sue caratteristiche. La prima cosa che bisogna notare è che il carbonio può assumere arrangiamenti diversi, a seconda dei trattamenti ricevuti ed assumere quindi proprietà molto variabili, pur mantenendo la stessa composizione. Il carbonio tende ad organizzarsi in strutture cristalline o quasi- cristalline formando geometrie planari con legami doppi nei piani, mentre sono deboli legami tipo Van der Waals che tengono uniti i vari piani cristallini non conferendo quindi proprietà meccaniche accettabili, anche se bisogna registrare una bassa densità e buone proprietà termiche. Per ovviare all' inconveniente si utilizza il carbonio sottoforma di fibre (non grafitizzate) e immerso in una matrice grafitica, il che permette di giovare delle proprietà del carbonio e,allo stesso tempo, di avere delle ottime proprietà meccaniche come si può notare dalla tabella comparativa.

	Grafite ad alta resistenza	Carbon - carbon
Densità (kg/m³)	1.82	1.6
Rigidezza a flessione (MN/m²)	55	100
Resistenza a compressione (MN/m²)	125	300
Conducibilità termica (W/mK)	85	30 (perpendicolare) 100 (parallele)

A differenza di tutti gli altri materiali frenanti i dischi in carbonio hanno il vantaggio di essere molto più leggeri (peso minore del 60% rispetto ai materiali comuni) e sono in grado di resistere alle alte temperature (2000°C).

In figura 7 si vede come i compositi carbon-carbon siano dotati di grandi performances strutturali anche a temperature elevate , a differenza di molti altri materiali, che venivano utilizzati precedentemente. Nella figura successiva è mostrato l' assemblaggio di un freno carbon-carbon prodotto dalla LAMB

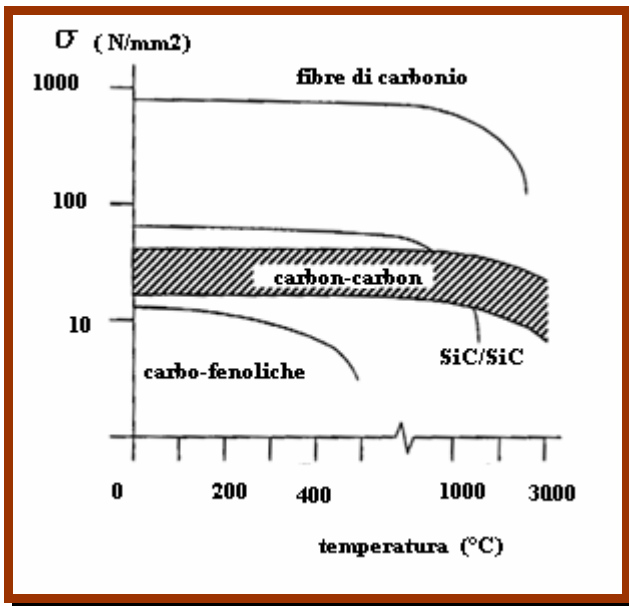


fig. 7



fig. 8

Le grandi proprietà meccaniche ad elevate temperature, l'elevata resistenza agli shock termici, la grande conducibilità termica e il basso coefficiente di espansione termica rendono questo materiale ideale per azione frenante ad elevata energia.

	Acciaio	Grafite	Carbon-Carbon
Densità (g/ cm³)	7.85	1.7	1.8
Resistenza a trazione (Mpa)			
a temp. Ambiente	410	15	<70
a 1300 k	10	20	
Calore specifico (J/gK)			
a temp. Ambiente	0.45	0.71	0.71
a 1300 K	0.4	1.9	
Conducibilità termica (W/mK)	50	150	80-300
Coeff. di espansione termica (10⁻⁶/K)	16	4	0.8
Punto di fusione (K)	1800	>3300	>3000

◆ Ossidazione:

L'unico problema di questo materiale è relativo alla sua ossidazione a temperature che vanno da 450 ai 650°C che ne aumenta notevolmente l'usura, visto che il carbonio tende a legarsi con l'ossigeno per dar luogo a CO₂. Per evitare questo si eseguono dei trattamenti antiossidanti visto che oltre ad aumentare l'usura si ha anche una notevole variazione delle proprietà tribologiche. L'elemento più utilizzato come antiossidante è MoSi che conferisce elevato coeff. di attrito e bassa usura anche a temperature limitate visto che questi due parametri dipendono dalle forze di interfaccia tra la fibra e le matrici e dalla porosità. Si possono usare anche delle fasi vetrose penetranti per bloccare i siti attivi.

Se osserviamo in maniera completa il fenomeno ci rendiamo conto di come la presenza di fibre e matrici, che hanno un diverso comportamento, renda molto complessa una sua analisi. Dalle micrografie, infatti, si può osservare come l'ossidazione, che riguarda principalmente la matrice, determini variazioni rilevanti sull'interfaccia del disco. Ma è proprio questo il grande vantaggio del carbon-carbon visto che le particelle di ossido e i detriti, che normalmente si formano, generano dei film interfacciali, in seguito alla rottura di porzioni superficiali della matrice, (come si può chiaramente osservare dalle micrografie fig. 9 e fig. 10) ad elevato valore del coeff. di attrito (0.6) che conferiscono all'elemento frenante elevate performances. Infatti il coeff. di attrito di un disco carbon-carbon, a temperatura ambiente, è molto basso (0.4) ed il freno non sarebbe in grado di espletare il momento frenante, per questo le F1 portano i freni a temperatura e sempre per lo stesso motivo non vengono usate per le automobili comuni visto che, in questo caso, non si raggiungerebbero temperature superiori ai 600 °C, oltre che per motivi economici.

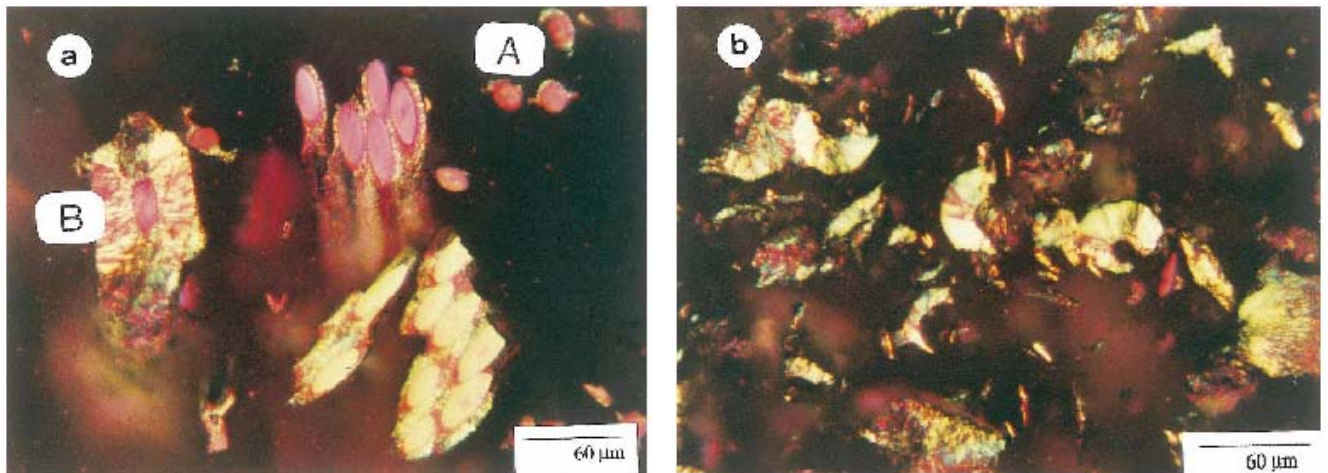


fig.9



fig.10

◆ Meccanica di formazione dei detriti :



Nella figura (a) notiamo particelle detritiche con densità di 1.95 gr/cm^3 distinguendo: A frammenti di fibra e B frammenti di matrice grafitica CVI. Nella figura (b) sono evidenziate le stesse particelle però con densità di 2.20 gr/cm^3 .

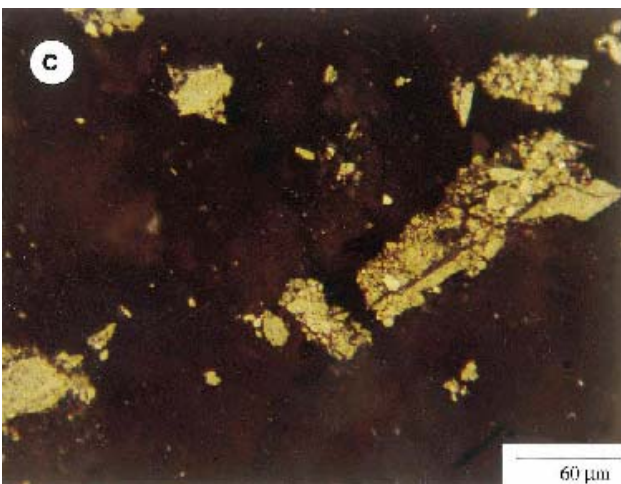
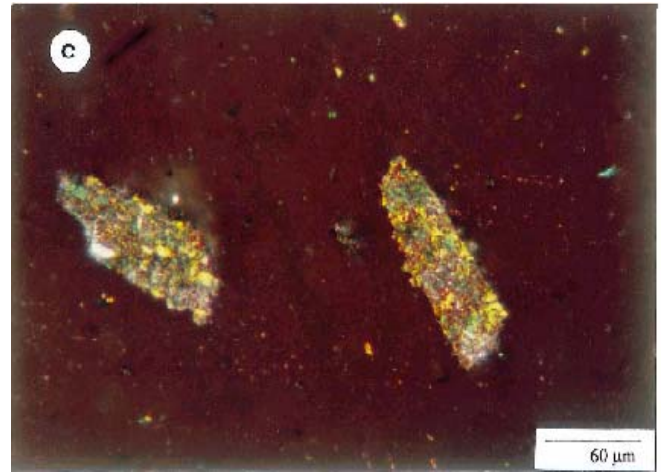
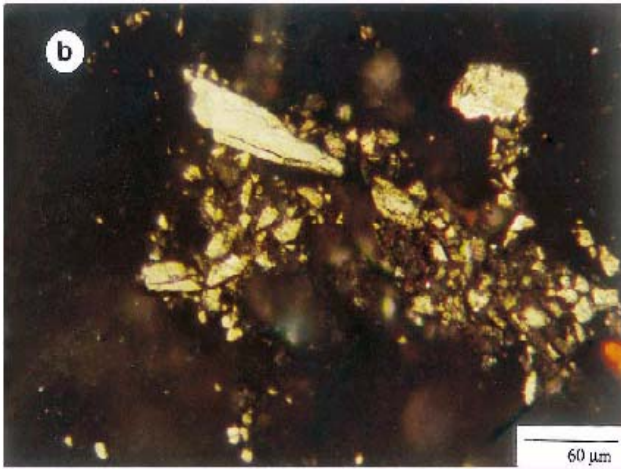
Nella tabella seguente diamo delle informazioni numeriche riguardo questa tendenza del carbon-carbon relative a manovre diverse compiute da un Boeing 747 che generano diverse temperature di esercizio.

Manovra del velivolo	Misure del disco	Dischi frenanti	
		acciaio	Carbon-carbon
Atterraggio	Carico (KJ/Kg)	390	900
	Temperatura (°C)	600	700
	Coeff. di attrito	0.23	0.54
Decollo abortito	Carico (KJ/Kg)	900	2700
	Temperatura (°C)	1050	1400
	Coeff. di attrito	0.15	0.65

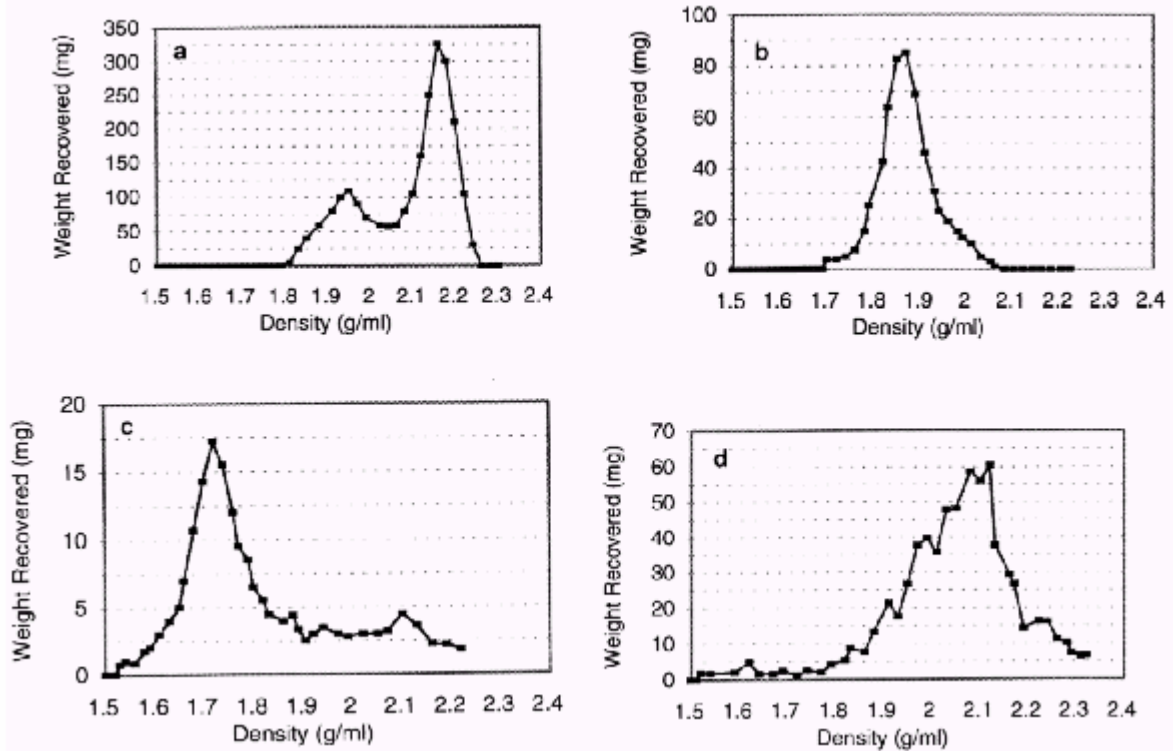
Molto diversa dagli altri materiali è anche l' usura che avviene con diverse metodologie a seconda del trattamento termico che il materiale ha ricevuto. Se il materiale è stato trattato ad alte temperature, si genererà all' interfaccia, in condizioni di esercizio, uno strato superficiale che rallenta il fenomeno dell' usura e aumenta il valore del coefficiente di attrito. Se invece il materiale ha subito trattamenti a freddo, in condizioni di esercizio si vengono a formare dei detriti sferoidali che vengono assorbiti dalle asperità superficiali, che non influiscono quindi sul coefficiente di attrito e permettono elevate velocità di usura. In base a quanto visto si può quindi dire che l' usura dei freni in carbon-carbon è molto più marcata nelle applicazioni a bassa dispersione di energia rispetto al caso in cui l' energia da dissipare è alta (applicazioni richieste).

Numerosi studi microstrutturali, riguardo la formazione di detriti di carbonio nei freni a disco degli aeroplani, sotto diverse condizioni, sono stati compiuti tramite l' ausilio della diffrazione ai raggi X, SEM e microscopio ottico.

In condizioni cold taxiing si formano dei detriti particellari che contengono frammenti di fibre all' interno di una fase grafitica disordinata. La fase disordinata è prodotta principalmente dalla deformazione subita dalla matrice grafitica ottenuta per CVI, visto che è la parte più sensibile agli sforzi di taglio. Sotto condizioni di landing i detriti vengono parzialmente trasformati dagli sforzi di taglio in un film superficiale ad alto coefficiente di attrito con una struttura disordinata molto simile alla precedente. La formazione del film si verifica in seguito ad una più alta densità delle polveri formatesi e ai valori di temperatura più elevati. Nel caso di temperature ancora più elevate, come nel caso di un rejected take-off, si verifica la grafitizzazione del film, formando una struttura simile a quella della matrice di partenza



Nella figura (b) vengono mostrati i frammenti che si ottengono dopo landing condensità di 1.63 gr/cm^3 . Nella micrografia (c) i detriti con densità di 2.12 gr/cm^3 che si ottengono in seguito ad un rejected take-off, mentre qui a lato sono mostrati i detriti che si ottengono dopo una manovra di cold taxiing con una densità di 1.79 gr/cm^3



In figura a vediamo il gradiente di concentrazione dei detriti che si ottengono da un disco carbon-carbon. Anche le figure b, c, d rappresentano lo stesso gradiente, solo che nella figura b i detriti si ottengono in seguito ad una manovra di cold taxiing, nella figura c di landing e nella figura d rejected take off.

◆ Processi tecnologici :

Nella pratica comune ci sono tre tipologie principali con cui vengono progettati i compositi carbon-carbon per la fabbricazione dei freni a disco, come illustrato in figura 11.

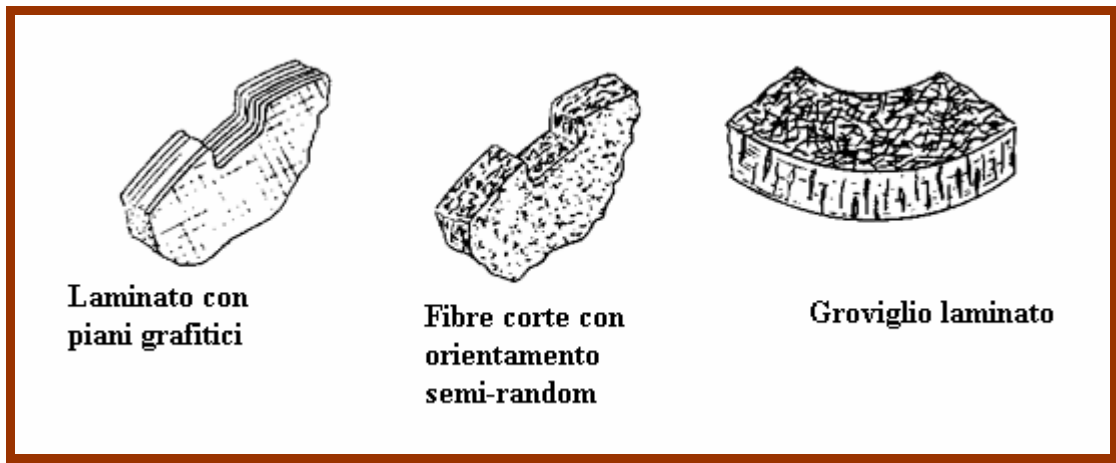


fig.11

Gli ultimi due sono quelli maggiormente utilizzati e sono prodotti rispettivamente dalla Hitco e dalla SEP. Il motivo che rende queste ultime due tipologie di freni maggiormente utilizzate è legato all' orientamento delle fibre che devono essere disposte in modo tale da condurre il calore sia radialmente che dalla superficie verso l' interno del corpo ed inoltre deve esser tale da garantire performance strutturali. Possiamo osservare in figura 12 la metodologia con cui vengono arrangiate le fibre in un disco.

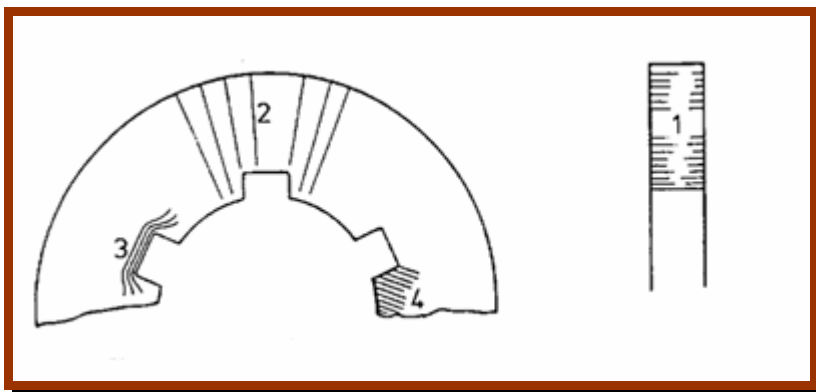
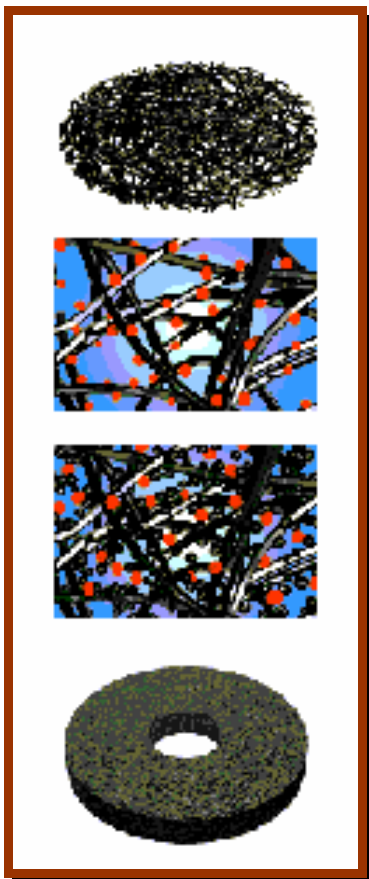


fig. 12

Le fibre vengono disposte in maniera normale alla superficie (tipologia 1) per favorire il flusso termico dalla superficie all' interno del materiale, radicalmente alla superficie (tipologia 2) per la conduzione radiale, si devono accumulare in corrispondenza degli spigoli (tipologia 3) che sono i punti di intensificazione degli sforzi ed infine, vengono disposte a $\pm 45^\circ$ (tipologia 4) per conferire la necessaria resistenza al taglio.

Una volta determinata la configurazione delle fibre resta da definire la modalità con cui applicare la matrice. Tipicamente la matrice viene aggiunta tramite CVI o CVD a seconda che sia formata da carbonio pirolitico o da una combinazione di carbonio pirolitico e vetroso. Il carbonio vetroso è ottenuto dalla carbonizzazione di resine ad elevato tenore di carbonio, generalmente fenoliche. Le resine vengono usate per dar forma ai dischi di fibre preparati o per la densificazione di dischi porosi tramite impregnazione. In seguito i dischi subiscono trattamenti termici e trattamenti antiossidanti prima di essere assemblati.

Un processo produttivo può esser descritto in maniera schematica in figura 13



Creazione della preforma

Trattamento di infiltrazione del carbonio pirolitico in forno a 1000°C

Ciclo di 500 - 800 ore per avere completa densificazione

Prodotto finito

BIBLIOGRAFIA :

[1] Carbon- carbon composites © 1993 G. Savage

[2]

[3] T.J. Hutton, B. Mac Enaney, J.C. Crelling Structural studies of wear debris from carbon-carbon composites aircraft brakes 1999/ 907-916

[4] S.J. Park, M.K. Seo, J.R. Lee Effect of oxidation inhibitor on the low energy tribological behavior of carbon-carbon composites 2002/ 835-843

[5] Immagini dal sito della HITCO, LAMB e AMERICAN CARBON SOCIETY