



Università degli Studi di Lecce  
Facoltà di Ingegneria  
Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali

Tesina del corso di  
**Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici**

# Dispositivi frenanti



DOCENTE

Antonio Licciulli

ALLIEVO

Roberto Bianco

## **Indice**

1	Introduzione .....	3
2	Friction materials.....	3
3	Compositi a matrice polimerica (PMC).....	4
3.1	Il materiale.....	4
3.2	Compositi organici con fibre non asbestose.....	4
3.3	Compositi semimetallici o semi-met.....	8
3.4	Proprietà di frizione e di usura.....	9
4	Compositi a matrice metallica (MMC).....	10
4.1	Il materiale.....	10
4.2	Proprietà fisiche.....	12
4.2.1	Espansione termica .....	13
4.2.2	Conducibilità termica.....	13
4.2.3	Proprietà meccaniche .....	13
4.3	Progettazione .....	14
4.4	Proprietà di frizione e usura.....	15
4.5	Rivestimenti per dischi.....	15
4.5.1	Rivestimenti isolanti.....	16
4.5.2	Rivestimenti conduttori.....	16
4.6	Manifattura.....	16
4.7	Applicazioni.....	16
5	Materiali compositi a matrice ceramica.....	18
5.1	Il materiale.....	18
5.2	Compositi ceramico-metallici (CMC) .....	18
6	Conclusioni .....	22

# Dispositivi frenanti

## 1 Introduzione

In senso lato, i dispositivi frenanti sono dei particolari sistemi per rallentare o arrestare completamente il moto di un qualunque oggetto in movimento. Data la genericità di questa definizione, è facile immaginare che dispositivi frenanti sono necessari nelle più svariate applicazioni, dalle navette spaziali ai pattini a rotelle.

I dispositivi frenanti riescono ad esplicare la propria azione di frenatura tramite l'applicazione, sul sistema in moto, di una forza o una coppia in direzione contraria al movimento. In moltissimi casi, per raggiungere questo effetto di frenatura si ricorre a fenomeni di attrito, ponendo in contatto due superfici in moto relativo fra di loro: questi dispositivi, cioè, dissipano l'energia cinetica del mobile convertendola in calore. Per ottenere buone prestazioni in questi dispositivi, diventa fondamentale considerare una nuova classe di materiali destinati ad applicazioni tribologiche: questo gruppo di materiali viene designato con il termine inglese "friction materials".

## 2 Friction materials

L'industria odierna cerca di sostituire i materiali tradizionali impiegati per i freni con dei materiali nuovi, che riescano a soddisfare contemporaneamente due requisiti fondamentali:

- Bassa densità
- Alto coefficiente di attrito

Un materiale a bassa densità consente, a parità di volume, di avere un risparmio sul peso complessivo e quindi una diminuzione del consumo di carburante, mentre un materiale con alto coefficiente di attrito consente una frenata più energica, venendo incontro alle esigenze delle applicazioni più impegnative, come ad esempio treni ed aerei.

I materiali compositi sono quelli che meglio riescono a soddisfare questi requisiti, principalmente perché altamente progettabili.

Anche i materiali compositi per freni vengono comunemente raggruppati in sottoclassi a seconda della matrice usata nel composito:

- Compositi Carbon-Carbon
- Compositi a Matrice Polimerica
- Compositi a Matrice Metallica
- Compositi a Matrice Ceramica

I compositi carbon-carbon sono quelli usati nelle applicazioni più estreme, come ad esempio i freni di aeroplani, e non verranno trattati in questa tesina. Delle altre tre classi parleremo più diffusamente.

### 3 Compositi a matrice polimerica

#### 3.1 Il materiale

Questa classe di materiali viene usata frequentemente per realizzare pastiglie e guarnizioni per freni di automobili, aerei leggeri ed elicotteri. Storicamente, le prime fibre usate in questi compositi sono state le fibre di asbesto, che offrivano buone prestazioni ed erano relativamente economiche. In genere veniva usato il chrysotile, di formula  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , il minerale principale del gruppo del serpentino.



Fig. 1  
Esempio di pastiglie per freni a disco

A partire dalla fine degli anni Settanta, però, è diventato necessario cercare alternative all'utilizzo dell'asbesto, poiché si dimostrò il suo effetto cancerogeno. Si sono trovate quindi due soluzioni diverse:

- compositi organici rinforzati con fibre non asbestose
- materiali semimetallici o metallici "resin bonded" (anche detti "semi-met")

#### 3.2 Compositi organici con fibre non asbestose

La composizione tipica di questi materiali comprende una resina organica come binder in percentuale variabile dal 30% al 40% e la fase fibrosa come rinforzo. Per resistere alle sollecitazioni a cui è sottoposto il freno, il legante organico deve

possedere necessariamente elevata stabilità termica e meccanica, oltre che resistenza all'ossidazione a temperature elevata. Le resine usate più frequentemente sono resine fenoliche o cresiliche.

Le fibre impiegate, invece, possono essere di varia natura, anzi quasi sempre si ha una miscela di fibre diverse nel materiale. Le più comuni sono fibre di vetro, di carbonio, metalliche, ceramiche, aramidiche.

Nella fabbricazione di questi materiali vengono spesso impiegati anche due altri tipi di componenti, detti filler e friction modifier.

I filler, come dice anche il nome, sono dei "riempitori", cioè non hanno alcuna funzione attiva se non quella di abbassare il costo del materiale finale. Sono infatti materiali di scarso pregio come  $\text{CaCO}_3$  o  $\text{BaSO}_4$ , e vengono aggiunti nell'impasto nella misura in cui non provocano un abbassamento delle proprietà del materiale finale.

I friction modifier, invece hanno un ruolo attivo perché modificano le proprietà tribologiche del composito. A seconda dell'azione svolta si dividono in abrasivi e non abrasivi.

Gli abrasivi hanno il compito di aumentare il coefficiente di attrito del materiale. Compiono questa azione benefica sia metalli in polvere come rame, ferro, alluminio e zinco, sia alcuni ossidi come allumina e silice.

I non abrasivi invece abbassano il coefficiente d'attrito, e sono materiali facilmente sfaldabili come la grafite o la mica.

Nella foto seguente vediamo come si presenta al microscopio un composito organico fibrorinforzato.

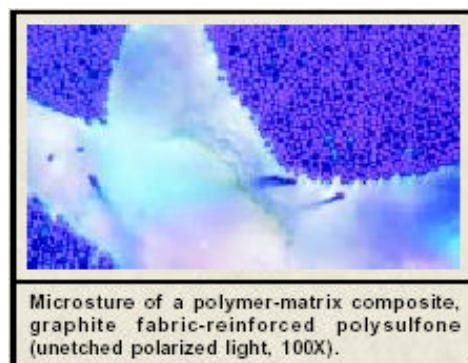


Fig. 2

Data la varietà degli ingredienti, è facile capire perché siano stati creati numerosi materiali di questo tipo. Le ditte produttrici, comunque, rivelano raramente la composizione dei materiali da loro ideati, perché le formulazioni degli impasti sono di loro proprietà e la loro divulgazione darebbe un vantaggio alle ditte concorrenti.

A titolo di esempio riportiamo le caratteristiche di alcuni materiali sviluppati dalla ditta "Great Lakes Friction Products Inc".

	<b>GL 121-119</b>	<b>GL 144-516</b>
<b>Descrizione</b>	Materiale non asbestoso semicurato, flessibile, frizione media	Materiale non asbestoso, rigido, a base aramidica, frizione medio-alta
<b>Proprietà meccaniche</b>		
Resistenza a trazione	<b>4,1 MPa</b>	<b>24 MPa</b>
Resistenza a flessione	<b>Flessibile</b>	<b>10 MPa</b>
Resistenza a compressione	<b>31 MPa</b>	<b>17 MPa</b>
Tensione operativa max.	<b>1 MPa</b>	<b>1,4 MPa</b>
Velocità di frizione max.	<b>1000 m/min</b>	<b>1500 m/min</b>
<b>Proprietà di frizione</b>		
Coeff. di attrito dinamico	<b>Normale 0,41 A caldo 0,39</b>	<b>Normale 0,48 A caldo 0,46</b>
Coeff. di attrito statico	<b>0,50</b>	<b>0,48</b>
Velocità di usura/HP ora	<b>0,065 cm<sup>3</sup></b>	<b>0,098 cm<sup>3</sup></b>
<b>Proprietà termiche</b>		
Max temperatura di utilizzo	<b>260° C</b>	<b>260° C</b>
<b>Proprietà fisiche</b>		
Densità	<b>1,98 g/cm<sup>3</sup></b>	<b>1,7 g/cm<sup>3</sup></b>
Durezza D Shore	<b>38-42</b>	<b>70-80</b>

Tab. 1

Confrontando i dati dei due materiali si nota che la presenza di fibre aramidiche nel GL 144-516 migliora le sue proprietà tribologiche (aumento del coefficiente di attrito), e rende possibile una velocità relativa tra pastiglia e rotore più alta del 50%. Le caratteristiche del materiale vengono molto influenzate anche dal grado di cura della resina (ad es. la resistenza a flessione: il GL 121-119 è flessibile), mentre la temperatura di utilizzo non può superare comunque i 250°C, perché a quella temperatura le resine polimeriche degradano. Per applicazioni più impegnative la stessa ditta propone un altro materiale, il GL 483-115 con le seguenti caratteristiche:

<b>GL 483-115</b>	
Max resistenza a compressione	<b>12 MPa</b>
Max pressione operativa	<b>12 MPa</b>
Max input energetico	<b>0,71 HP/cm<sup>2</sup></b>
Velocità di usura	<b>1,97*10<sup>-6</sup> cm<sup>3</sup>/HP ora</b>
Max temperatura di utilizzo	<b>320° C</b>
Max picco di temperatura	<b>400° C</b>

Tab. 2

Le migliori caratteristiche di questo materiale si spiegano se teniamo presente la sua composizione. Esso è costituito al suo interno da particelle di carbonio estremamente resistenti all'usura stratificate su un "mat" (su un tessuto, cioè) di Kevlar. Anche la resina è particolare, essendo una resina fenolica ad alta resistenza termica e meccanica. Il risultato finale è un aumento della temperatura di utilizzo del materiale dai classici 200-250°C fino a 320°C, e come temperatura di picco un valore di

400°C. Comparata con quella dei materiali precedenti, l'usura diminuisce di quattro ordini di grandezza grazie all'azione delle particelle di carbonio.

Questi pochi esempi fatti stanno a testimoniare la varietà dei risultati a cui può giungere la ricerca. L'impiego finale di questi materiali sono ad esempio questi ferodi, prodotti sempre dalla Great Lakes Inc. .



Fig. 3



Fig. 4

Anche la manifattura dei freni è studiata in modo da migliorare le loro prestazioni. Particolare attenzione viene posta alla superficie del ferodo che deve scorrere sul rotore, perché essa determina la performance dell'intero sistema di frenata: se si riuscisse, infatti, ad aumentare il coefficiente di attrito di questa parte del freno, si potrebbero avere frenate ancora migliori.

Questo si riesce in effetti a conseguire bruciando alla fiamma un lato del ferodo, perché così la parte organica, che non ha buone proprietà di frizione, viene eliminata dalla superficie del composito, che rimane più ricca in fibre: la maggiore concentrazione di fibre induce in superficie un attrito maggiore. Questo procedimento viene usato frequentemente, ma ha lo svantaggio di creare una superficie irregolare proprio in corrispondenza dell'accoppiamento, provocando fastidiose vibrazioni e rumori durante la frenata. Per eliminare questi inconvenienti è stato brevettato ultimamente un nuovo materiale, che consente prestazioni pari a quelle di un materiale bruciato alla fiamma, ma senza i suoi difetti.



1 Back plate in Al      2 Materiale composito di supporto  
3 Materiale ad alto attrito, resina fenolica 5%

Fig. 5

Come indicato in fig. 5, questo materiale è costituito da due strati, di cui il primo, di supporto, è un normale composito a matrice fenolica. Su questi poi si fa aderire, dopo levigatura delle superfici e tramite opportuni trattamenti termici, un altro strato spesso da 1 a 3 mm, avente una percentuale di resina non superiore al 5%. Questa lamina, ottenuta tramite i normali metodi di conformatura, non presenta irregolarità superficiali macroscopiche, ma al tempo stesso conferisce un alto coefficiente di attrito alla superficie del freno.

### 3.3 Compositi semimetallici o semi-met

I semi-met sono compositi organici che si ottengono miscelando una resina, generalmente fenolica, con materiali metallici sotto forma di lana o di polvere. La quantità di metallo varia dal 50 al 65 % del volume complessivo del materiale. Altri ingredienti usati possono essere polveri ceramiche, particelle di gomma e grafite sintetica.

A differenza dei compositi organici, questo tipo di materiali ha un interesse limitato perché non ha trovato impiego al di fuori dell'industria dei freni automobilistici.

A titolo d'esempio riportiamo le caratteristiche di alcuni compositi semimetallici prodotti dalla "Champion Friction".

	<b>AFT 200</b>	<b>AFT 610</b>	<b>AFT 1202</b>
Densità	1,7 g/cm <sup>3</sup>	2,55 g/cm <sup>3</sup>	2,05 g/cm <sup>3</sup>
Res. a trazione	49 MPa	8,5 Mpa	18 Mpa
Modulo elastico	6,4 Gpa	6,6 Gpa	13,4 Gpa
Allungamento max	1,4 %	0,15 %	0,13%
Res. a flessione	141 Mpa	28 Mpa	43Mpa
Coeff. d'attrito	Normale 0,42	Normale 0,36	Normale 0,54
	A caldo 0,36	A caldo 0,34	A caldo 0,50
	Tipico 200°C 0,45	Tipico 200°C 0,36	Tipico 200°C 0,52
Velocità di usura	0,069 cm <sup>3</sup> /HP hr	0,057 cm <sup>3</sup> /HP hr	0,090 cm <sup>3</sup> /HP hr
Velocità superficiale max	1500 m/min	1500 m/min	1500 m/min
Temp. di utilizzo	260° C	290 ° C	290 ° C
Temp. di picco	320° C	340 ° C	340 ° C

Tab. 3

I tre materiali sono ottenuti con modi e composizioni diverse. L'AFT 200 è una miscela di resina fenolica e fili di ottone rinforzato con fibre aramidiche, che sottoposta a pressione e ad adeguati trattamenti termici, dà luogo ad un composito denso e resistente. L'AFT 610 è basato esclusivamente su polveri di ferro, mentre l'AFT 1202 comprende allo stesso tempo una parte ferrosa ed una di ottone, insieme ad altri elementi stabilizzanti (di cui però non si rivela la natura).



### **3.4 Proprietà di frizione e di usura**

Come abbiamo visto, nella realizzazione di un composito organico per freni è possibile combinare gli ingredienti in mille modi diversi, e se da un lato questo amplia le possibilità investigative verso nuovi materiali, dall'altro è difficile prevedere in anticipo quale comportamento avrà un materiale di data composizione. In effetti, nella progettazione di questi compositi si ricorre più spesso all'esperienza che alla conoscenza, e solitamente il cammino dei ricercatori che operano in questo campo è un percorso "per prove ed errori". I motivi di questo paradosso sono molteplici.

Innanzitutto, allo stato attuale delle cose non esistono informazioni sufficienti sui singoli componenti degli impasti, almeno dal punto di vista tribologico. A colmare parzialmente questa lacuna è intervenuta, alla fine degli anni Novanta, l'opera di Crosa e Baumvol, che hanno eseguito una serie di test tribologici su compositi fenolici rinforzati da un solo tipo di fibra. Variando il tipo di fibra, Crosa e Baumvol sono riusciti ad evidenziare quali caratteristiche induce nel materiale finale ciascun tipo di fibra.

Questi risultati, per quanto importanti, non consentono comunque un approccio deterministico nella progettazione dei materiali: nella prassi industriale infatti, vengono usati diversi tipi di fibre contemporaneamente, e quindi l'effetto sinergico dovuto alla compresenza di rinforzi differenti rimane tuttora non studiato e imprevedibile.

Purtuttavia, il lavoro dei due studiosi consente di redigere delle "liste", in cui ciascun tipo di fibra viene classificato in base alla maggiore o minore propensione ad avere un certo effetto nel composito finale. Ad esempio, le fibre che provocano nei test di Crosa e Baumvol il coefficiente di attrito più alto sono le fibre minerali, seguite dalle fibre ceramiche, fibre di acciaio, di vetro e aramidiche. L'usura del fero do è massima se le fibre usate sono di acciaio, e sempre minore se le fibre sono rispettivamente di vetro, minerali, ceramiche o di carbonio. Le fibre di acciaio inducono un'alta usura anche nel rotore, seguite dalle fibre acriliche e le fibre ceramiche, mentre gli altri tipi di fibra non hanno effetto rilevante sull'usura del rotore.

Sono stati studiati anche i meccanismi con cui le fibre provocano un aumento dell'attrito nei compositi. Osservazioni al microscopio hanno dimostrato che le fibre di vetro durante la frenata si spezzano, generando polveri che aumentano sia l'attrito sia l'usura del freno. Le fibre di acciaio invece, essendo duttili, non si spezzano ma escono dalla matrice incidendo fero do e rotore: si spiega così l'alto coefficiente d'attrito di questi compositi, ma anche l'elevata usura del freno e del rotore. Le fibre aramidiche invece provocano bassa usura nei freni, e questo viene attribuito alle loro proprietà meccaniche intrinseche.

## 4 Compositi a matrice metallica (MMC)

### 4.1 Il materiale

Questi materiali sono costituiti da una matrice metallica rinforzata da fibre o particelle, e vengono impiegati prevalentemente nella costruzione di dischi (rotori). La tecnologia dei materiali compositi in questo campo è fondamentale, perché consente di impiegare in applicazioni tribologiche materiali normalmente improponibili: esiste infatti un certo numero di metalli e leghe con proprietà specifiche migliori di quelle dell'acciaio, ma questi materiali in genere sono teneri, per cui usati come rotore di un freno avrebbero un'usura troppo elevata. Un materiale composito a matrice metallica, invece, possiede sia resistenza che rigidità, grazie all'effetto rinforzante svolto dalle fibre. I materiali ottenuti comunque hanno temperature di utilizzo inferiori a quelle dei materiali ferrosi, per cui il loro campo di applicazione è quello dei materiali leggeri ma non eccessivamente refrattari. Esempi tipici sono rotori per freni di auto e motociclette sportive, e dischi per treni.



Fig. 7

Freno a disco per motocicletta

I metalli usati per le matrici di MMC sono molti, ferro, rame, alluminio, nickel, titanio, ad esempio, ma per i dispositivi frenanti, il metallo che si è imposto sugli altri è l'alluminio. Esso presenta infatti una serie di caratteristiche positive che lo rendono il materiale più adatto per queste applicazioni:

- basso costo
- alto grado di isotropia
- facilmente colabile
- buone proprietà specifiche
- proprietà termiche, fisiche e meccaniche ideali per un materiale da frizione.

Le fibre usate invece sono fibre di carbonio, di carburo di silicio, di tungsteno e di allumina. La composizione tipica di un composito con matrice metallica per freni è una lega di alluminio con il 20% in volume di carburo di silicio.

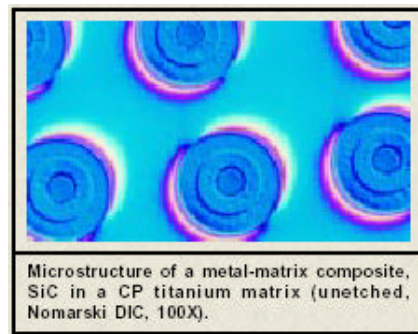


Fig.8

Spesso si aggiunge al fuso di alluminio anche una piccola quantità di silicio perché rende la lega più colabile.

Dalla figura seguente è possibile capire quale vantaggio si ha nell'utilizzare un materiale composito rispetto ad uno tradizionale: lo stesso componente di un freno a disco (caliper), è stato realizzato in ghisa a sinistra e in composito a destra. Il composito pesa circa la metà del pezzo in ghisa.

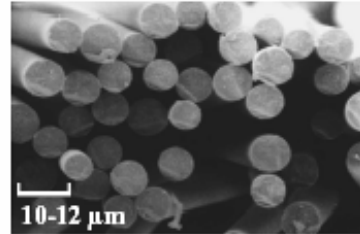


Fig. 9

C'è un notevole interesse intorno a questi nuovi materiali perché il loro mercato non è ristretto solo all'ambito tribologico.

La ditta 3M ha sviluppato appositamente per compositi in alluminio un nuovo tipo di fibra, ribattezzato "Nextel 610". Le fibre Nextel sono fibre di allumina nanocristallina ad alta purezza con le seguenti caratteristiche:

Property	Value
Composition	>99% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Mean Tensile Strength (for 2.54 cm length)	3.25 GPa
Weibull Modulus	22
Modulus of Elasticity	380 – 400 GPa
Density	3.90 – 3.95 g/cm <sup>3</sup>
Diameter	10 – 12 μm
Filaments per Tow	420, 780
Average CTE (20–500 C)	7 x 10 <sup>-6</sup> /°C
Maximum Temperature	900 °C (creep limit)



Nextel™ Ceramic Oxide Fiber 610

La stessa ditta si è occupata anche del processo di fabbricazione di questi compositi. Per prima cosa, tramite un'analisi agli elementi finiti (FEA) si scoprono i punti del pezzo maggiormente sollecitati, che verranno poi rinforzati: questo consente di usare la quantità di fibre strettamente necessaria per la tenuta del pezzo. Si crea poi una preforma ceramica che accoglierà le fibre solo nelle zone evidenziate dall' FEA, ed infine si procede alla colata dell'alluminio liquido.

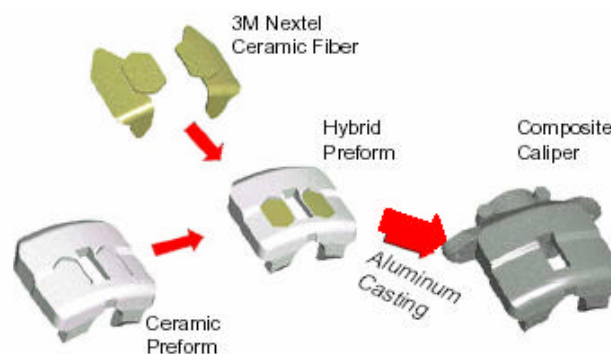


Fig. 10

La colata può avvenire anche sotto pressione in atmosfera inerte, per avere una maggiore bagnabilità delle fibre di allumina nei confronti del metallo liquido.

## 4.2 Proprietà fisiche

Come detto, in un composito a matrice metallica la matrice conferisce al materiale resistenza meccanica, mentre le fibre danno al composito rigidità. La presenza del rinforzo comunque modera o accentua alcune proprietà del composito. Vediamone alcune.

### **4.2.1 Espansione termica**

I metalli hanno in genere un alto coefficiente di espansione termica, per cui cambi di temperatura provocano facilmente nel materiale stress termici. I compositi per freni in particolare, sono soggetti a gradienti termici durante la frenata, con conseguente formazione di punti caldi. I materiali ceramici usati come rinforzo hanno invece un'espansione termica più limitata, per cui diminuiscono l'espansione complessiva del materiale. Questo effetto positivo è controbilanciato dal fatto che la differente espansione di fibra e matrice provoca alla loro interfaccia delle tensioni che provocano deformazioni plastiche localizzate. Come risultato si hanno nel materiale dei cicli di fatica che portano alla formazione di cricche e vuoti con diminuzione delle proprietà meccaniche del materiale.

### **4.2.2 Conducibilità termica**

Un'alta conducibilità termica in un rotore è una proprietà gradita perché agevola lo smaltimento di calore durante la frenata abbassando la temperatura del materiale. La presenza di una fase ceramica però abbassa inevitabilmente la conducibilità termica del composito. L'alluminio presenta comunque una conducibilità termica molto elevata, e poiché per frenate molto forti la temperatura del materiale è determinata principalmente dalla capacità di condurre calore, i freni in alluminio mantengono in ogni caso temperature più basse rispetto a quelli in ghisa.

### **4.2.3 Proprietà meccaniche**

Il rinforzo ceramico aumenta il modulo di Young del composito, che in alcuni casi può diventare anche il doppio di quello del metallo monolitico. In genere l'aumento della rigidità cresce proporzionalmente alla quantità di fibra presente nel composito. Queste buone proprietà meccaniche si manifestano ancora di più quando esaminiamo il comportamento del materiale a temperatura: l'alluminio puro infatti perde presto la sua capacità di resistere alle sollecitazioni, mentre il composito la mantiene ancora ad un livello significativo (v. fig. 11).

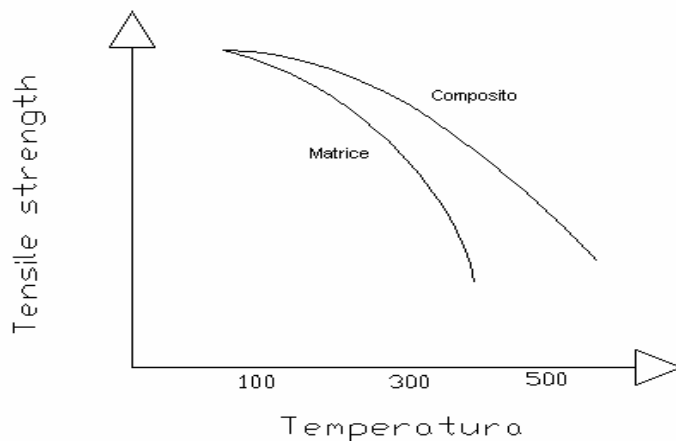


Fig. 11

E' essenziale per la resistenza del composito anche un buon legame tra fibra e matrice, che eventualmente può essere rinforzato rivestendo le fibre (con boro ad esempio). Questa operazione, oltre ad aumentare il legame interfacciale, impedisce eventuali reazioni tra fibra e matrice quando il materiale viene portato a temperatura.

### 4.3 Progettazione

I compositi a base di alluminio sono stati utilizzati a lungo come semplici sostituenti dei materiali tradizionali. Questo approccio non consente di sfruttare a pieno le possibilità di questi materiali, che per dare le migliori prestazioni hanno bisogno di una adeguata progettazione: le proprietà termiche dell'alluminio sono infatti molto diverse da quelle della ghisa. La ghisa disperde la maggior parte del calore per irraggiamento, mentre nell'alluminio questo meccanismo di trasporto di calore è pressoché irrilevante, in quanto l'alluminio non può raggiungere le elevate temperature della ghisa. L'alluminio presenta invece un'alta conducibilità termica, ed i freni che lo contengono dissipano il calore principalmente per conduzione e convezione: a differenza dei freni in ghisa, è importante quindi che i freni in alluminio vengano sufficientemente areati, ad esempio costellando di fori il disco per aumentare il flusso d'aria.

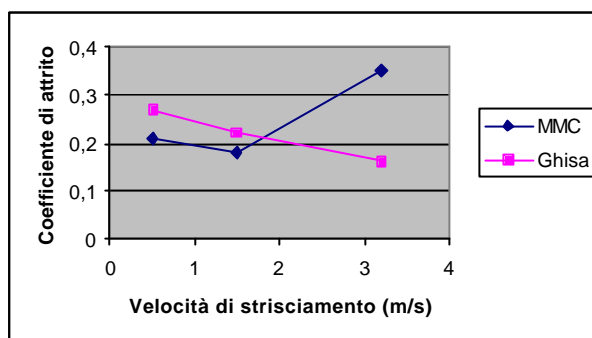
Un altro accorgimento riguarda le dimensioni dei freni. Data la bassa densità dell'alluminio rispetto ai materiali ferrosi, è possibile aumentare le dimensioni dei freni senza incorrere in sostanziali aumenti di peso: è possibile cioè, applicare la stessa coppia frenante facendo uno sforzo minore, semplicemente aumentando il

braccio della forza. I dischi in composito di alluminio possono essere quindi sensibilmente più grandi di quelli in ghisa.

#### 4.4 Proprietà di frizione e usura

Sono stati fatti vari test per valutare le caratteristiche frenanti di questi materiali, accoppiandoli sia con pad organici tradizionali, sia con pad disegnati specificamente per compositi a base di alluminio.

Se si fa scorrere a bassa velocità un pad organico per ghisa contro un composito con silicio di carburo al 20%, si trova un coefficiente d'attrito inferiore rispetto alla ghisa; l'attrito sviluppato dal composito supera però quello generato da un rotore in ghisa quando usiamo velocità più elevate (v. graf. 1).



graf. 1

Come detto l'uso di alluminio non rinforzato con un pad organico provoca un buon coefficiente d'attrito, ma l'usura del disco è troppo elevata; l'alluminio rinforzato accoppiato con pad organici dà invece buone prestazioni.

E' stata verificata anche la possibilità di usare pad semimetallici (v. § 3.3) per ghisa con rotori in composito di alluminio, ma il risultato è stato un coefficiente d'attrito non costante durante la frenata, e quindi questo accoppiamento si è dimostrato inaccettabile. L'industria ha sviluppato perciò un nuovo tipo di pad semimetallico adatto a compositi in alluminio, contenente allumina e con una bassa percentuale di ferro: questa materiale dà buone performance ed ha anche il gradito effetto di aumentare il coefficiente d'attrito aumentando la forza di frenata.

#### 4.5 Rivestimenti per dischi

Per quanto i compositi in alluminio abbiano ottime proprietà tribologiche, hanno comunque una bassa temperatura di utilizzo. Per migliorare lo smaltimento di calore nei dischi si usano dei rivestimenti che possono essere isolanti o conduttori.

### **4.5.1 Rivestimenti isolanti**

I rivestimenti isolanti si applicano alla superficie del disco destinata alla frizione con la pastiglia del freno. Sono costituiti da materiali ceramici, affinché la loro bassa conducibilità termica preservi il nucleo del disco in alluminio da temperature eccessive. Lo strato ceramico tollera invece agevolmente temperature elevate e disperde il calore accumulato raffreddandosi all'aria. Un rivestimento sviluppato recentemente è a base di carburo di silicio e zirconio. Ovviamente se usiamo un rivestimento isolante le proprietà di frizione dipendono dalle caratteristiche del ceramico usato e non più dal composito in alluminio.

### **4.5.2 Rivestimenti conduttori**

Al contrario dei rivestimenti isolanti, i rivestimenti conduttori cercano di distribuire uniformemente su tutta la superficie del disco il calore sviluppato durante la frenata: il calore prodotto viene poi smaltito normalmente. Un esempio di questo tipo di rivestimento è il composito rame-carburo di silicio.

## **4.6 *Manifattura***

Il metodo di produzione di questi materiali non differisce sostanzialmente dalle normali tecniche sviluppate per leghe di alluminio, anche se negli ultimi anni si sono sviluppati metodi appositi per compositi.

Il metodo più comune è il "mixed casting", che consiste nel versare nel fuso di alluminio le fibre di rinforzo. In alcuni casi questa operazione può avvenire sotto pressione (high pressure die casting). Le fibre rendono il composito duro da lavorare, per questo le operazioni di finitura possono essere compiute solo con utensili al diamante.

I rivestimenti invece vengono eseguiti tramite "plasma spray deposition".

## **4.7 *Applicazioni***

Il campo di applicazioni dei compositi a matrice metallica riguarda principalmente i veicoli in cui è importante un risparmio in peso di tutti i componenti, e cioè soprattutto i veicoli elettrici e le motociclette. Le ditte Honda, Suzuki e Ducati hanno sperimentato con successo questi freni nel campionato mondiale di motociclismo conseguendo ottimi risultati: le prestazioni ottenute sono infatti simili a quelle dei freni in carbonio ma alla metà del costo.





Fig. 12 disco in composito per motocicletta

I compositi in metallo sono stati usati anche nei treni ad alta velocità in Germania, consentendo un risparmio di peso notevole: mentre infatti un disco in ghisa pesa 135 Kg, uno in composito pesa solo 70 Kg, riducendo il peso complessivo del treno di circa 13 tonnellate.

## 5 Materiali compositi a matrice ceramica

### 5.1 Il materiale

I materiali ceramici avanzati hanno delle proprietà che li rendono estremamente utili in applicazioni tribologiche, come elevata durezza, resistenza a compressione, refrattarietà, inerzia chimica, bassa densità. Sono però materiali fragili, e per essere usati in applicazioni strutturali devono essere necessariamente rinforzati con fibre.

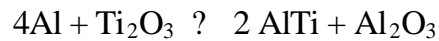
Il costo finale di questi materiali è alto perché i trattamenti termici per la loro fabbricazione richiedono alte temperature. Anche i rinforzi usati ovviamente devono resistere ad alte temperature, per cui anche essi devono essere di natura ceramica come allumina, carburo di silicio e nitruro di silicio. Tutti questi impedimenti fanno sì che i compositi ceramici siano ancora in fase di studio, e per questo motivo sono stati pubblicati ancora pochi dati al loro riguardo.

Al momento, l'industria che spinge più per la produzione di freni ceramici è l'industria ferroviaria, che vede un loro eventuale utilizzo nei treni ad alta velocità. Buoni risultati ha dato a tal proposito un materiale ceramico rinforzato con fibre di carbonio (CFRC). I compositi ceramici normali non hanno infatti i requisiti di bassa usura e attrito costante necessari per applicazioni tribologiche, mentre i CFRC abbinati ad un pad ceramico hanno dimostrato di mantenere le loro proprietà meccaniche fino a 1300° C, presentando al contempo un bassissimo creep ed una bassa espansione termica. Questi materiali si rivelano quindi molto interessanti per gli sviluppi futuri della ricerca.

### 5.2 Compositi ceramico-metallici (CMC)

Ultimamente i ricercatori si sono serviti di materiali ceramici per realizzare dei compositi ibridi, contenenti contemporaneamente una fase ceramica e una metallica. Questi materiali vengono realizzati in modi diversi, ed al momento sembrano avere buone prospettive.

Uno di questi materiali usa come ceramico di partenza polveri di  $TiO_2$  e di almeno un materiale contenente boro o carbonio. Queste polveri, legate da un legante organico, formano un green destinato a trattamento termico ad una temperatura tra 900° C e 1900° C: durante questa fase, delle reazioni di scambio tra il materiale e il  $TiO_2$  portano alla creazione di composti tipo  $TiB_x$  e  $TiC_x$ . A questo punto il green presenta una notevole porosità, per questo lo si pone in un bagno di polveri di alluminio che viene portato ad una temperatura superiore ai 1000° C: l'alluminio fonde e viene assorbito dal corpo ceramico. In questa fase avvengono reazioni tra l'alluminio e la fase ceramica che si possono schematizzare con una formula del tipo:



La fase metallica reagisce anche con la parte ceramica del green, generando un composito ceramico-metallico che contiene nella fase ceramica composti appartenenti al gruppo  $\text{TiB}_x$ ,  $\text{TiC}_x$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e nella fase metallica un composto intermetallico di titanio e alluminio. La particolare struttura di questo materiale lo rende adatto ad applicazione tribologiche perché la fase ceramica consente un innalzamento della temperatura di utilizzo.

Altri brevetti che riguardano compositi ceramico-metallici usano questi materiali non per costruire parti strutturali di un componente di freno, ma per realizzare elementi da aggiungere nella sola zona di frizione.

Uno di questi brevetti propone un componente di freno con una percentuale di composito ceramico-metallico non inferiore al 5%, in cui il CMC ha una fase ceramica cristallina interconnessa, mentre la fase metallica è dispersa nella fase ceramica. La percentuale di fase ceramica nel CMC varia nel range 85-98 % in volume, mentre le inclusioni metalliche hanno dimensioni medie tra 0,25 e 30 micron, e nel complesso non rappresentano più del 15% del peso del materiale. Questo composito, se usato come materiale di frizione, presenta elevata durezza e un coefficiente d'attrito stabile ed elevato. La fase metallica può essere costituita da magnesio, titanio, vanadio, cromo, ma il metallo consigliato è l'alluminio con le sue leghe. La fase ceramica è costituita invece da boruri, carburi, ossidi, nitruri e loro combinazioni: il ceramico consigliato è il carburo di boro. I metodi per produrre questo materiale sono due:

- infiltrazione di metallo liquido in un ceramico poroso
- densificazione di un green contenente particelle metalliche e ceramiche.

Il processo di infiltrazione deve avvenire ad una temperatura in cui il metallo è fuso, ma non può essere troppo elevata perché il metallo potrebbe volatilizzarsi con eccessiva facilità. La temperatura consigliata è tra 900° C e 1100° C.

La densificazione può avvenire con uno dei meccanismi di sinterizzazione noti (sotto vuoto, hot pressed, isostatica), la temperatura da usare è almeno il 75 % della temperatura di fusione del metallo, ma come sopra non può essere eccessiva per evitare volatilizzazione del metallo.

Un altro brevetto sempre degli stessi ricercatori propone un CMC come materiale da frizione da porre sotto forma di lamina su un substrato metallico.

In questo CMC la fase ceramica costituisce almeno il 20 % del volume totale del composito e contiene i prodotti della reazione tra la fase ceramica iniziale e la fase metallica. I materiali usati sono quelli del composito precedente, ma differenza di questo ora le due fasi devono essere disperse una nell'altra. Il substrato metallico è invece un qualunque metallo convenzionale. Il materiale da frizione è laminato su una porzione del substrato che va dal 10 % al 100 % della superficie totale del substrato. Lo spessore della lamina varia da 1 mm a 10 mm, e viene fatta aderire al

substrato tramite saldatura, bullonatura o tramite un collante organico (resine fenoliche, epossidiche etc.).

Compositi alluminio-ceramici vengono usati anche per produrre i back plate, cioè quelle parti delle pastiglie destinate a sorreggere il materiale di frizione.

Nella figura seguente vediamo come è fatto un back plate. Esso è costituito in genere da una tavoletta di alluminio o in composito su cui si incolla il materiale di frizione.

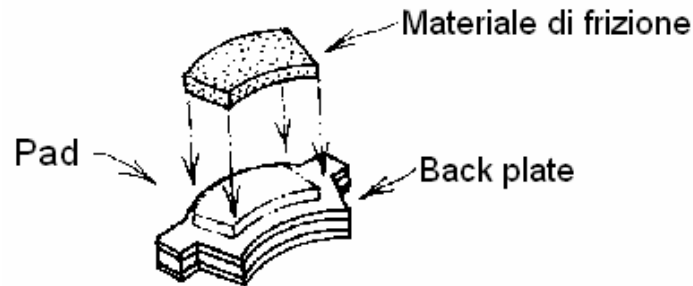


Fig. 13

Nella successiva invece vediamo come il tutto viene assemblato in un freno a disco.

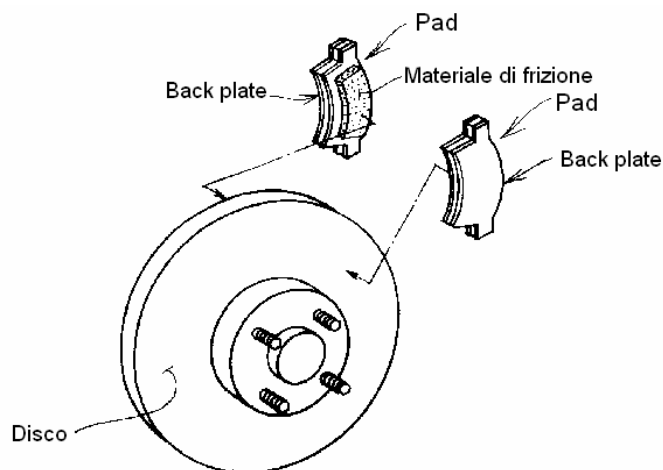


Fig. 14

Il processo di produzione comporta, similmente ai casi precedenti, l'infiltrazione di alluminio fuso nel ceramico; prima di questa fase però, il componente ceramico a base di ossidi viene trattato con nitrato di magnesio per aumentare la sua bagnabilità da parte dell'alluminio fuso. Il materiale ottenuto viene estruso con un rapporto di estrusione variabile tra 10 e 100, che viene scelto a seconda delle esigenze: un rapporto basso infatti consente al materiale di conservare una resistenza meccanica costante, ma d'altra parte un rapporto di estrusione alto consente una maggiore produttività. Il valore di 100 non può essere superato perché in questo caso la forza richiesta per l'estrusione sarebbe troppo elevata, e quindi sarebbe necessario un equipaggiamento apposito.

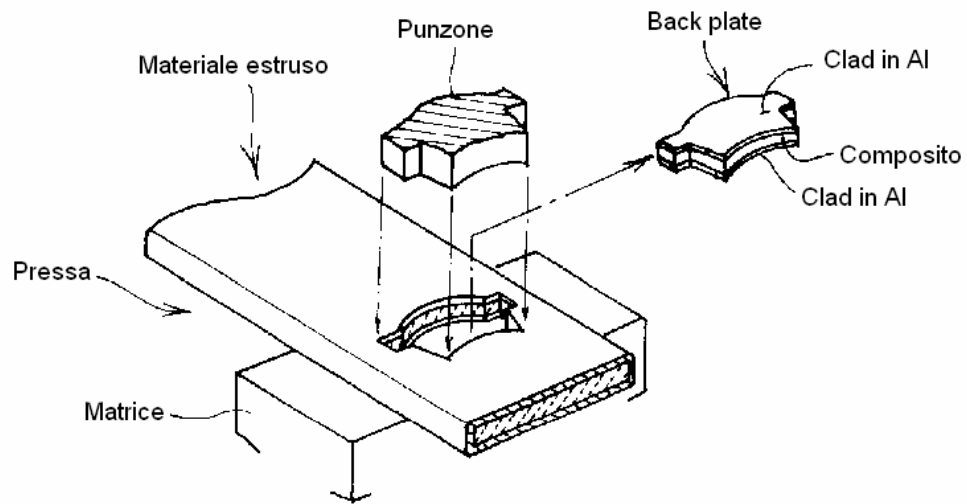


Fig. 15

La barra estrusa viene poi fatta passare sotto un punzone che fornisce il back plate. Per facilitare la punzonatura la barra viene rivestita precedentemente con un sottile strato di lega di alluminio (non inferiore a 0,2 mm) perché l'alluminio puro offre al punzone minore attrito rispetto al composito, che è un materiale da frizione, e quindi consente una minore usura dello stampo (v. figura).

## 6 Conclusioni

Da questa breve trattazione è possibile rendersi conto delle numerose alternative che l'industria odierna offre nel campo delle applicazioni tribologiche. I progressi compiuti in questo ambito della scienza dei materiali non riducono comunque l'interesse per questi compositi: c'è infatti un'esigenza sempre maggiore di materiali leggeri e performanti, che porterà nei prossimi anni alla produzione di nuovi compositi. D'altra parte anche alcuni tra i materiali presentati in questo saggio necessitano tuttora di un'investigazione più completa, come ad esempio i compositi ceramici, per cui lo studio di questi materiali ha ancora forte impulso.

Perché la ricerca segua un percorso più agevole però, sarebbe necessario, almeno in alcuni campi, procedere ad un riordino sistematico delle conoscenze, acquisite molto spesso in modo fortuito: proseguire nella ricerca affidandosi esclusivamente alla propria esperienza (e quindi, anche alla buona sorte) consente sì in alcuni casi di raggiungere dei risultati, ma impedisce la comprensione profonda dei fenomeni studiati. Senza questo approccio è impossibile ad esempio formulare previsioni ragionevoli su come possa comportarsi un certo materiale, o capire quali accorgimenti possano indurre nel materiale studiato le caratteristiche richieste: in altre parole proseguire in una ricerca "attiva" e non spettatrice passiva.

Questa sistematizzazione delle conoscenze richiede tuttavia uno sforzo notevole, e in ogni caso l'ambito dei materiali da frizione rimane un campo di ricerca fortemente applicativo: questo vuol dire che le imprese sono in forte concorrenza l'una con l'altra e non hanno nessun interesse a scambiarsi le informazioni di cui dispongono, essendo interessate principalmente a raggiungere un prodotto da immettere sul mercato. Tutto questo lascia supporre che una conoscenza completa sui materiali da frizione, seppure si potrà conseguire un giorno, non si avrà in tempi brevi.

## 7 Bibliografia

- The composite performance & design programme– Composite materials in transport friction applications, 12 July 1999
- [www3.interscience.wiley.com](http://www3.interscience.wiley.com)
- [www.3M.com](http://www.3M.com)
- [www.championfriction.com](http://www.championfriction.com)
- [www.gflp.com](http://www.gflp.com)
- [www.buehler.com](http://www.buehler.com)
- [www.cyclebrakes.com](http://www.cyclebrakes.com)

I brevetti consultati sono

- United States Patent 5878849
- United States Patent 5957251
- United States Patent 5080969
- United States Patent 5878849
- United States Patent 6271162
- United States Patent 6303236