

Domenico Brigante

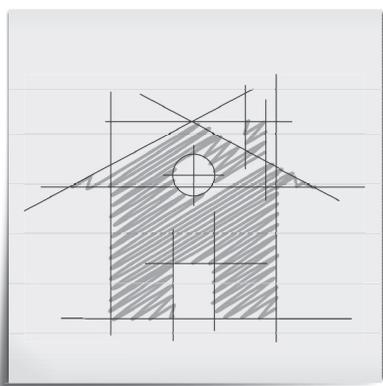
# RINFORZO STRUTTURALE CON MATERIALI COMPOSITI

**LE FIBRE DI CARBONIO E I NUOVI MATERIALI COMPOSITI**

**FRP** (Fiber Reinforced Polymers), **SRP** (Steel Reinforced Polymers),  
**FRG** (Fiber Reinforced Grout), **SRG** (Steel Reinforced Grout)  
e nuovi **materiali biocompatibili**

**SCELTA, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE**

SECONDA EDIZIONE



**SOFTWARE INCLUSO**

FOGLI DI CALCOLO PER IL PREDIMENSIONAMENTO DI UN RINFORZO STRUTTURALE



**GRAFILL**

Domenico Brigante

## RINFORZO STRUTTURALE CON MATERIALI COMPOSITI

ISBN 13 978-88-8207-500-2

EAN 9 788882 075002

Manuali, 133

Seconda edizione, dicembre 2012

Brigante, Domenico <1982->

Rinforzo strutturale con materiali compositi / Domenico Brigante.

– 2. ed. – Palermo : Grafill, 2012.

(Manuali ; 133)

ISBN 978-88-8207-500-2

1. Strutture edilizie – Consolidamento.

690.24 CDD-22

SBN Pal0249313

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di dicembre 2012

presso **Tipolitografia Luxograph S.r.l.** Piazza Bartolomeo Da Messina, 2/e – 90142 Palermo

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

*A Giusi e Francesco*



## SOMMARIO

<b>PREFAZIONE</b> .....	p.	11
<b>1. I MATERIALI COMPOSITI</b> .....	"	13
<b>1.1.</b> <i>I materiali compositi e loro proprietà</i> .....	"	13
<b>1.2.</b> <i>Definizione e caratteristiche</i> .....	"	14
<b>1.3.</b> <i>Le fibre</i> .....	"	15
<b>1.4.</b> <i>Fibre di carbonio</i> .....	"	15
<b>1.5.</b> <i>Fibre di vetro</i> .....	"	16
<b>1.6.</b> <i>Fibre di basalto</i> .....	"	18
<b>1.7.</b> <i>Fibre aramidiche</i> .....	"	19
<b>1.7.1.</b> <i>Produzione</i> .....	"	19
<b>1.8.</b> <i>Fibre di acciaio</i> .....	"	20
<b>1.9.</b> <i>Tessuti ibridi</i> .....	"	21
<b>1.10.</b> <i>Altre tipologie di fibre</i> .....	"	21
<b>1.11.</b> <i>Le matrici</i> .....	"	21
<b>1.12.</b> <i>Matrici plastiche</i> .....	"	21
<b>1.12.1.</b> <i>Resine poliestere</i> .....	"	22
<b>1.12.2.</b> <i>Resine epossidiche</i> .....	"	23
<b>1.12.3.</b> <i>Resine fenoliche</i> .....	"	23
<b>1.12.4.</b> <i>Resine siliconiche</i> .....	"	23
<b>1.13.</b> <i>Matrici a base di malta</i> .....	"	23
<b>1.14.</b> <i>Altre tipologie di matrici</i> .....	"	24
<b>1.14.1.</b> <i>Matrici metalliche</i> .....	"	24
<b>1.14.2.</b> <i>Matrici ceramiche</i> .....	"	24
<b>2. PROCESSI DI FABBRICAZIONE</b> .....	"	25
<b>2.1.</b> <i>Tecnologie di fabbricazione</i> .....	"	25
<b>2.1.1.</b> <i>Processi produttivi dei materiali compositi</i> .....	"	25
<b>2.2.</b> <i>Impregnazione manuale senza applicazione di pressione o vuoto</i> .....	"	26
<b>2.3.</b> <i>Filament Winding</i> .....	"	26
<b>2.3.1.</b> <i>L'avvolgimento</i> .....	"	27
<b>2.3.2.</b> <i>L'impregnazione</i> .....	"	27
<b>2.3.3.</b> <i>Il mandrino</i> .....	"	27
<b>2.3.4.</b> <i>Le macchine</i> .....	"	28

2.4.	<i>Pultrusione</i> .....	p.	28
2.4.1.	<i>Alimentazione del rinforzo</i> .....	"	29
2.4.2.	<i>Impregnazione</i> .....	"	30
2.4.3.	<i>Preformatura</i> .....	"	31
2.4.4.	<i>Formatura e polimerizzazione</i> .....	"	31
2.4.5.	<i>Postformatura</i> .....	"	33
2.4.6.	<i>Tiro e taglio</i> .....	"	33
2.4.7.	<i>Controlli</i> .....	"	34
2.5.	<i>Formatura per iniezione di resina (RTM Resin Transfer Molding)</i> .....	"	34
2.6.	<i>Resin Infusion Under Flexible Tooling (RIFT)</i> .....	"	35
2.7.	<i>Formatura in autoclave</i> .....	"	37
2.7.1.	<i>Reti in FRP</i> .....	"	38
<b>3.</b>	<b>SCELTA DEL SISTEMA COMPOSITO</b> .....	"	39
3.1.	<i>Vantaggi dei materiali compositi</i> .....	"	39
3.2.	<i>Progettabilità dei materiali compositi</i> .....	"	41
3.3.	<i>FRP (Fiber Reinforced Polymers)</i> .....	"	41
3.4.	<i>SRP (Steel Reinforced Polymers)</i> .....	"	41
3.5.	<i>FRG (Fiber Reinforced Grout)</i> .....	"	41
3.6.	<i>SRG (Steel Reinforced Grout)</i> .....	"	42
3.7.	<i>Scelta del sistema composito</i> .....	"	42
3.8.	<i>Planarità delle superfici delle strutture da rinforzare</i> .....	"	43
3.9.	<i>Influenza della temperatura</i> .....	"	43
3.10.	<i>Comportamento nei confronti dell'umidità</i> .....	"	43
3.11.	<i>Utilizzo di mano d'opera specializzata</i> .....	"	44
3.12.	<i>Utilizzo dei dispositivi di protezione individuale</i> .....	"	44
3.13.	<i>Degrado totale degli attrezzi di lavoro</i> .....	"	44
3.14.	<i>Resistenza al fuoco</i> .....	"	45
3.15.	<i>Resistenza ai raggi ultravioletti</i> .....	"	45
<b>4.</b>	<b>NORMATIVA PER IL RINFORZO DI STRUTTURE ESISTENTI</b> .....	"	47
4.1.	<i>Quadro normativo nazionale ed internazionale</i> .....	"	47
4.2.	<i>Il documento tecnico italiano CNR-DT 200/04</i> .....	"	48
4.3.	<i>Bozza Linee Guida – Dipartimento Protezione Civile – ReLUIS</i> .....	"	48
4.4.	<i>Linee Guida dell'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP.</i> ...	"	51
<b>5.</b>	<b>RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.</b> .....	"	52
5.1.	<i>Simbologia</i> .....	"	52
5.2.	<i>Introduzione</i> .....	"	55
5.2.1.	<i>I coefficienti parziali</i> .....	"	55
5.2.2.	<i>Coefficienti parziali <math>\gamma_m</math> per i materiali ed i prodotti</i> .....	"	55

5.2.3.	Coefficienti parziali $\gamma_{Rd}$ per i modelli di resistenza .....	p.	56
5.2.4.	Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale $\eta_a$ .....	"	56
5.2.5.	Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_l$ .....	"	57
5.3.	<i>Meccanismi di rottura per delaminazione</i> .....	"	57
5.3.1.	Verifiche di sicurezza nei confronti della delaminazione .....	"	57
5.4.	<i>Rinforzo a flessione</i> .....	"	59
5.4.1.	Analisi del comportamento allo Stato Limite Ultimo.....	"	60
5.4.2.	Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio.....	"	62
5.5.	<i>Rinforzo a taglio</i> .....	"	63
5.5.1.	Resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato con FRP .....	"	64
5.6.	<i>Rinforzo di solai latero-cementizi</i> .....	"	66
5.7.	<i>Rinforzo di pilastri in c.a.</i> .....	"	67
5.7.1.	Determinazione della resistenza di progetto a compressione centrata o con piccola eccentricità dell'elemento confinato.....	"	67
5.7.2.	Sezioni circolari .....	"	69
5.7.3.	Sezioni quadrate e rettangolari.....	"	70
5.7.4.	Duttilità di elementi presso-inflessi confinati con FRP.....	"	71
5.8.	<i>Rinforzo dei nodi trave-pilastro</i> .....	"	71
5.8.1.	Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati.....	"	72
5.9.	Interventi in zona sismica .....	"	78
<b>6.</b>	<b>RINFORZO DI STRUTTURE IN MURATURA</b> .....	"	82
6.1.	<i>Introduzione</i> .....	"	82
6.2.	<i>Obiettivi e criteri di un progetto di rinforzo</i> .....	"	83
6.2.1.	Verifiche di sicurezza .....	"	84
6.3.	<i>Meccanismi di rottura per delaminazione</i> .....	"	86
6.3.1.	Resistenza alla delaminazione radente allo Stato Limite Ultimo .....	"	86
6.4.	<i>Rinforzo di pannelli murari</i> .....	"	88
6.4.1.	Verifiche per azioni fuori dal piano .....	"	88
6.4.2.	Verifica per ribaltamento semplice .....	"	88
6.4.3.	Verifica per flessione della striscia muraria verticale .....	"	89
6.4.4.	Verifica per flessione della striscia orizzontale.....	"	90
6.4.5.	Verifiche per azioni nel piano .....	"	91
6.4.6.	Pressoflessione nel piano .....	"	91
6.4.7.	Taglio.....	"	91
6.5.	<i>Rinforzo di archi e volte in muratura</i> .....	"	92
6.5.1.	Volte a semplice curvatura – Volte a botte.....	"	93
6.5.2.	Volte a doppia curvatura su pianta quadrata .....	"	94
6.6.	<i>Rinforzo di colonne in muratura</i> .....	"	94
6.6.1.	Resistenza di progetto a compressione centrata dell'elemento confinato.....	"	94

	6.6.2. Confinamento di colonne circolari.....	p.	96
	6.6.3. Confinamento di colonne quadrate o rettangolari .....	"	96
6.7.	<i>Sistemi di pretensionamento</i> .....	"	97
	6.7.1. Sistema di tensionamento per SRG – SRP .....	"	100
6.8.	<i>Sistemi di ancoraggio</i> .....	"	102
6.9.	<i>Preparazione del substrato</i> .....	"	102
7.	<b>CARATTERIZZAZIONE E MONITORAGGIO</b>		
	<b>DEI SISTEMI APPLICATI</b> .....	"	104
7.1.	<i>Introduzione</i> .....	"	104
7.2.	<i>I materiali</i> .....	"	104
	7.2.1. Laminati pultrusi .....	"	105
	7.2.2. Laminati prodotti in situ.....	"	106
	7.2.3. Controlli di produzione .....	"	106
7.3.	<i>Prove sperimentali</i> .....	"	106
7.4.	<i>Il collaudo delle opere</i> .....	"	107
	7.4.1. Prove semi-distruttive .....	"	108
	7.4.2. Prova di strappo normale .....	"	108
	7.4.3. Prova di strappo a taglio .....	"	108
	7.4.4. Prove non distruttive .....	"	108
	7.4.5. Prove di tipo acustico stimolato.....	"	108
	7.4.6. Prove ultrasoniche ad alta frequenza .....	"	109
	7.4.7. Prove termografiche .....	"	109
	7.4.8. Prove in emissione acustica .....	"	109
	7.4.9. Prove a collasso su elementi, travi e pilastri rinforzati.....	"	109
7.5.	<i>Gli operatori per l'esecuzione delle prove</i> .....	"	109
8.	<b>MODALITÀ E TECNICHE DI APPLICAZIONE</b> .....	"	111
8.1.	<i>Introduzione</i> .....	"	111
8.2.	<i>Rinforzo di solai latero-cementizi</i> .....	"	111
	8.2.1. Vantaggi del rinforzo di solai latero-cementizi.....	"	112
	8.2.2. Principi generali .....	"	112
	8.2.3. Particolari costruttivi.....	"	112
	8.2.4. Modalità di applicazione .....	"	113
8.3.	<i>Rinforzo di solai con travi in acciaio</i> .....	"	113
	8.3.1. Vantaggi del rinforzo di solai con travi in acciaio.....	"	114
	8.3.2. Principi generali .....	"	114
	8.3.3. Particolari costruttivi.....	"	114
	8.3.4. Modalità di applicazione .....	"	115
8.4.	<i>Rinforzo di pilastri in c.a.</i> .....	"	115
	8.4.1. Vantaggi del rinforzo di pilastri in c.a. ....	"	116
	8.4.2. Principi generali .....	"	116

	8.4.3. Particolari costruttivi .....	p.	116
	8.4.4. Modalità di applicazione .....	"	117
8.5.	<i>Rinforzo a taglio e flessione di travi in c.a.</i> .....	"	118
	8.5.1. Vantaggi del rinforzo a taglio e flessione di travi in c.a. ....	"	118
	8.5.2. Principi generali .....	"	118
	8.5.3. Particolari costruttivi .....	"	119
	8.5.4. Modalità di applicazione .....	"	120
8.6.	<i>Rinforzo di strutture in muratura</i> .....	"	121
	8.6.1. Vantaggi del rinforzo di strutture in muratura .....	"	122
	8.6.2. Principi generali .....	"	122
	8.6.3. Particolari costruttivi .....	"	123
	8.6.4. Modalità di applicazione .....	"	124
8.7.	<i>Rinforzo di archi e volte in muratura</i> .....	"	126
	8.7.1. Vantaggi del rinforzo di archi e volte in muratura .....	"	127
	8.7.2. Principi generali .....	"	127
	8.7.3. Particolari costruttivi .....	"	127
	8.7.4. Modalità di applicazione .....	"	129
8.8.	<i>Rinforzo di strutture portanti in legno</i> .....	"	129
	8.8.1. Vantaggi del rinforzo di strutture portanti in legno .....	"	130
	8.8.2. Particolari costruttivi .....	"	130
	8.8.3. Principi generali .....	"	130
	8.8.4. Modalità di applicazione .....	"	131
9.	<b>ESEMPI DI CALCOLO</b> .....	"	132
9.1.	<i>Introduzione</i> .....	"	132
9.2.	<i>Rinforzo di una struttura di copertura in c.a.</i> .....	"	132
	9.2.1. Normativa di riferimento .....	"	132
	9.2.2. Schema strutturale .....	"	133
	9.2.3. Materiali .....	"	134
	9.2.4. Analisi dei carichi .....	"	135
	9.2.5. Combinazioni di carico .....	"	137
	9.2.6. Verifica allo Stato Limite Ultimo .....	"	138
	9.2.7. Valutazione della resistenza a delaminazione del rinforzo in CFRP .....	"	142
	9.2.8. Valutazione del rinforzo con piastre di acciaio .....	"	144
	9.2.9. Verifiche allo SLU della struttura rinforzata .....	"	146
9.3.	<i>Rinforzo di una struttura in c.a.p. soggetta a incendio</i> .....	"	146
	9.3.1. Normativa di riferimento .....	"	147
	9.3.2. Geometria e materiali esistenti .....	"	147
	9.3.3. Resistenza al fuoco della struttura .....	"	150
	9.3.4. Valutazione della riduzione delle caratteristiche meccaniche .....	"	151
	9.3.5. Materiali impiegati per la riparazione .....	"	160
	9.3.6. Calcolo e verifica degli elementi strutturali .....	"	161

<b>10. COMPOSITI NATURALI</b> .....	p.	167
<b>10.1. Le fibre naturali</b> .....	"	167
<b>10.2. Fibre naturali vegetali</b> .....	"	167
<b>10.2.1. Classificazione delle fibre</b> .....	"	168
<b>10.3. Caratterizzazione delle fibre</b> .....	"	169
<b>10.4. Principali tipologie di fibre</b> .....	"	170
<b>10.4.1. Il cotone</b> .....	"	170
<b>10.4.2. Fibre di lino</b> .....	"	173
<b>10.4.3. Fibre di juta</b> .....	"	175
<b>10.4.4. Fibre di agave</b> .....	"	176
<b>10.4.5. Fibre di canapa</b> .....	"	177
<b>11. ESEMPI DI APPLICAZIONE</b> .....	"	180
<b>11.1. Real Albergo dei Poveri – Napoli</b> .....	"	180
<b>11.2. Chiesa di Santa Caterina – Caprioli (SA)</b> .....	"	182
<b>11.3. Domus Aurea Palazzo Valentini – Roma</b> .....	"	183
<b>11.4. Hotel Boscolo Exedra a Nizza (FR)</b> .....	"	185
<b>11.5. Complesso Telecom – Pomezia (Roma)</b> .....	"	186
<b>11.6. Monumento ai Martiri Napoletani – Napoli</b> .....	"	187
<b>11.7. Hotel Boscolo Exedra a Roma</b> .....	"	189
<b>11.8. Stazione radio base sito Le Forna – Ponza (LT)</b> .....	"	192
<b>12. IL SOFTWARE INCLUSO</b> .....	"	194
<b>12.1. Introduzione al software incluso</b> .....	"	194
<b>12.2. Requisiti minimi hardware e software</b> .....	"	194
<b>12.3. Download del software e richiesta della password di attivazione</b> .....	"	194
<b>12.4. Procedura per l'installazione e l'attivazione del software</b> .....	"	195
<b>12.5. Utilizzo del software</b> .....	"	195
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	"	197
<i>Riferimenti normativi</i> .....	"	198
<i>Siti Web</i> .....	"	198
<b>LICENZA D'USO</b> .....	"	199
<b>DOWNLOAD DEL SOFTWARE E RICHIESTA DELLA PASSWORD DI ATTIVAZIONE</b> .....	"	200

## PREFAZIONE

Con grande piacere ho avuto conoscenza della realizzazione dell'opera "*Rinforzo strutturale con materiali compositi*" messa a punto da Domenico Brigante, che dimostra come non sempre gli insegnamenti rivolti ai propri studenti durante gli studi universitari vengono poi nel tempo trascurati o abbandonati. Viceversa, nel caso di Brigante, la pubblicazione del testo afferma invece la validità e l'importanza di trasmettere conoscenze tecniche e scientifiche nel tentativo di realizzare una continuità nel tempo dello sviluppo di avvenimenti innovativi, come nel caso specifico dei materiali compositi, al fine di produrre miglioramenti nella vita sociale e tecnica di ogni giorno.

Il testo infatti riguarda argomenti strettamente legati alle applicazioni dei Compositi nelle costruzioni civili e di architettura, settore che riguarda da vicino noi, e che dopo anni di tentennamento è ora decisamente interessato alle enormi potenzialità dei Compositi.

Di particolare rilevanza e a differenza con altri minori testi tecnici che affrontano problematiche costruttive, il testo si sofferma lungamente nella descrizione delle caratteristiche delle tecnologie adoperate per la realizzazione di manufatti o per interventi di ripristino strutturale in monumenti particolari o in semplici strutture comuni.

Questo aspetto, infatti, è di particolare importanza nell'uso dei materiali compositi a differenza dell'uso di materiali più tradizionali, in quanto le proprietà finali ottenibili dal manufatto o dall'intervento sono in questo caso fortemente dipendenti dal modo stesso con cui si applica il materiale, che può efficacemente essere progettato e distribuito secondo le migliori e più efficienti modalità, prevedibili dal progettista solo con una accurata e profonda conoscenza delle tecnologie di applicazione. Ciò vale indifferentemente per l'uso dei Compositi su strutture in legno, come in acciaio, e in calcestruzzo, e le diverse modalità vengono infatti descritte con dovizia nel testo.

Gli esempi riportati e le descrizioni di modalità di collaudo e monitoraggio degli interventi completano il testo, che diviene così un valido strumento per il Progettista ma anche per l'utilizzatore finale.

*Ignazio Crivelli Visconti*



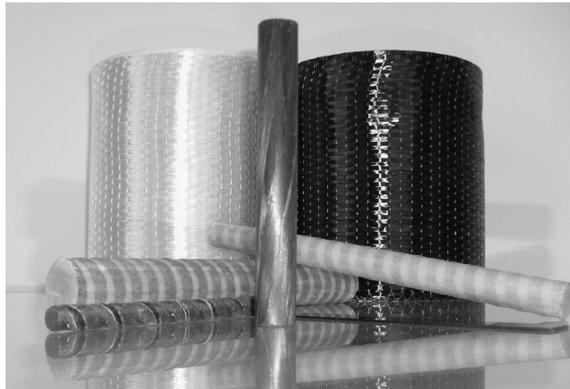
## I MATERIALI COMPOSITI

### ▼ 1.1. I materiali compositi e loro proprietà

I materiali compositi rappresentano l'evoluzione della scienza e delle tecnologie dei materiali fondendo al loro interno le migliori caratteristiche di più materiali, prodotti con tecnologie innovative che ne determinano le elevatissime caratteristiche fisico-meccaniche. Lo studio dei compositi è una filosofia di progetto di materiali che si propone di ottimizzare nello stesso tempo la composizione del materiale con il progetto di ottimizzazione strutturale in un processo convergente ed interattivo. È una scienza e una tecnologia che richiede la stretta interazione di diverse discipline come progetto ed analisi strutturale, analisi dei materiali, meccanica dei materiali ed ingegneria di processo.

Dal punto di vista storico il concetto di rinforzo con fibra è assai vecchio. Ci sono addirittura nella bibbia riferimenti al rinforzo di laterizi con paglia nell'antico Egitto. Barrette di ferro erano usate per rinforzare le murature nel XIX secolo e questo portò allo sviluppo del cemento armato. Resine fenoliche rinforzate con amianto furono introdotte nel XX secolo. La prima barca in vetroresina fu realizzata nel 1942 e dello stesso periodo sono le plastiche rinforzate per l'impiego aeronautico e per componenti di apparecchiature elettriche. Elementi avvolti furono inventati nel 1946 ed usati in applicazione nel campo missilistico negli anni '50. Le prime fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza furono introdotte nei primi anni '60 con l'applicazione di compositi avanzati per componenti aeronautici. Compositi con matrici metalliche come boro/alluminio furono introdotte nel 1970. La Dupont sviluppò fibre aramidiche nel 1973.

A partire dagli ultimi anni '70 le applicazioni dei compositi si espansero fortemente in campo aeronautico, automobilistico, per articoli sportivi e per applicazioni in industrie biomediche. Gli anni '80 portarono ad un significativo sviluppo nell'utilizzo di fibre ad alto modulo di elasticità.

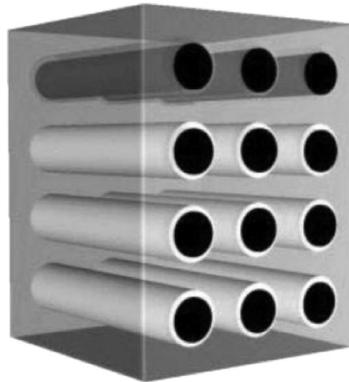


**Figura 1.1.** *I materiali compositi*

Oggi l'enfasi è posta sullo sviluppo di più moderni compositi con matrici a base i malte e matrici ibride con malta e resina epossidica per le applicazioni ad alta temperatura. Si hanno innumerevoli applicazioni: tubi interrati, container, barche, veicoli di terra, strutture aeronautiche e spaziali, applicazioni nell'edilizia civile, componenti per automobili, attrezzi sportivi, prodotti biomedici e moltissimi altri prodotti progettati per avere alte prestazioni meccaniche e/o stabilità dimensionale nei diversi ambienti accoppiati e bassi pesi.

## ▼ 1.2. Definizione e caratteristiche

Si definisce materiale composito un sistema costituito da due o più fasi, le cui proprietà e prestazioni sono progettate in modo tale da essere superiori a quelle dei materiali costituenti che agiscono indipendentemente. Normalmente una delle due fasi è discontinua, più rigida e più forte ed è chiamata "rinforzo", mentre la fase meno rigida e più debole, è continua ed è chiamata "matrice". Talvolta a causa di interazioni chimiche od altri effetti, esiste una fase aggiuntiva, chiamata "interfase", tra rinforzo e matrice.



**Figura 1.2.** Fasi di un materiale composito

Le proprietà di un composito dipendono dalle proprietà dei costituenti, dalla geometria e distribuzione delle fasi. Uno dei parametri più importanti è il volume (o il peso) della frazione di rinforzo o il rapporto di volume delle fibre. La distribuzione del rinforzo determina le caratteristiche del sistema. Meno è uniforme il rinforzo, più è eterogeneo il materiale e più alta è la probabilità di rottura nelle aree più deboli. La geometria e l'orientamento del rinforzo, invece, influiscono sull'anisotropia del sistema.

Le fasi del composito hanno ruoli differenti che dipendono dal tipo e dalla messa in opera del composito. Nel caso di compositi con prestazioni basse o medie, il rinforzo, usualmente fibre corte o particelle, dà un certo irrigidimento ma rinforza solo localmente il materiale. La matrice d'altra parte, è il costituente principale per reggere i carichi e definisce le proprietà meccaniche del materiale.

Nel caso di compositi ad alte prestazioni strutturali, il rinforzo è normalmente costituito da fibra continua e forma lo scheletro del materiale, determinando la rigidità e la resistenza nella direzione della fibra. La fase matrice procura la protezione, il sostegno per le fibre ed il trasferimen-

to degli sforzi locali da una fibra all'altra. L'interfase, anche se di piccola dimensione, può giocare un ruolo importante nel controllo del meccanismo di rottura, nella resistenza alla frattura e, soprattutto, nel comportamento sforzi/deformazioni del materiale.

### ▼ 1.3. Le fibre

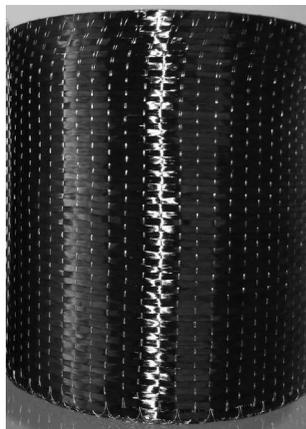
Come accennato, grazie alle loro dimensioni limitate, le fibre presentano una perfezione strutturale fuori del comune; questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicura ad esse:

- resistenza meccanica elevata;
- modulo elastico molto alto;
- peso specifico molto basso;
- comportamento elastico lineare fino alla rottura.

Le fibre più importanti per uso in compositi possono essere di vetro, carbonio, organiche e minerali. Esse si trovano nei compositi o sotto forma di fibre continue disposte parallelamente in un piano, o sotto forma di fibre tagliate e disposte in un piano con orientazione casuale (MAT) o, infine, possono essere tessute secondo una configurazione trama-ordito e disposte in un piano.

### ▼ 1.4. Fibre di carbonio

Per lungo tempo le fibre più usate in applicazioni di compositi strutturali sono state quelle di vetro. Sebbene abbiano buone caratteristiche di resistenza e bassa densità, presentano un modulo di elasticità relativamente basso. Per questo motivo, circa 25 anni fa, si iniziò a sperimentare e convertire compositi organici in fibre e tessuti di carbonio e grafite.



**Figura 1.3.** *Fibre di carbonio*

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più la struttura cristallina è elevata, tanto più il materiale possiede caratteristiche elevate.

Un cristallo di grafite ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio. I legami fra gli stessi atomi dello stesso piano sono forti (legami covalenti) mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli (legami *Van der Waals*): è evidente come i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e sarà compito del processo di fabbricazione disporre la struttura cristallina nella direzione voluta.

Naturalmente ciò non è facile: praticamente non si riesce mai ad ottenere cristalli perfetti e precisione nell'orientamento, per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche.

Le fibre di carbonio sono ottenute grafitizzando in atmosfera inerte, a oltre 2.000 °C, delle fibre organiche tessili di rayon o poliacrilonitrile (PAN). Le fibre di partenza prendono il nome di precursori. Durante il processo di grafitizzazione le fibre sono sottoposte a trazione, quanto maggiore è lo sforzo di trazione esercitato, tanto più alto risulta il modulo di Young del prodotto.

D'altra parte l'aumento del modulo viene bilanciato da una diminuzione di resistenza. Esistono così in commercio sia fibre di carbonio ad alto modulo, penalizzate nella resistenza, sia a basso modulo e alta resistenza. I due tipi sono detti rispettivamente C1 e C3 o, con terminologia anglosassone, HM («*High Modulus*», cioè alto modulo) e HS («*High Strength*», cioè alta resistenza a trazione) o anche in italiano HR.

Rispetto alle fibre di vetro, quelle di carbonio presentano tre vantaggi sostanziali:

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

Esse perciò stanno soppiantando le fibre di vetro in tutti quei campi in cui sono richieste, oltre a un basso peso, un'alta rigidità (strutture aeronautiche, attrezzi sportivi ecc.) o una notevole stabilità dimensionale al variare della temperatura (dispositivi ottici, radar ecc.).

I costi di produzione delle fibre di carbonio sono notevolmente più elevati rispetto alle fibre di vetro ma la loro forte diffusione è giustificata dalle elevate proprietà meccaniche.

### ▼ 1.5. Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono prodotte nella forma standard come vetro E, noto essenzialmente per applicazioni elettriche. Una fibra più resistente è il vetro S: la sua resistenza a trazione è, infatti, circa il 33% più grande del vetro E.

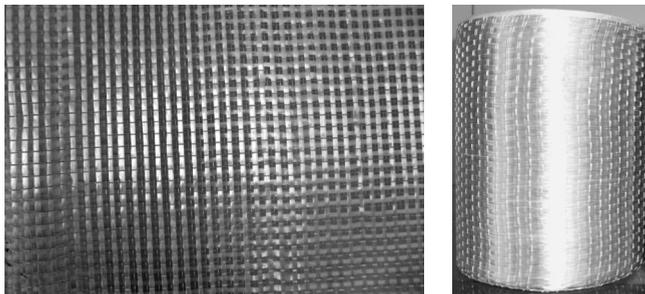


Figura 1.4. Fibre di vetro

Un altro tipo di fibra di vetro è ottenuto con vetro ad alto contenuto di alcali: essa ha una buona resistenza chimica ma presenta proprietà elettriche modeste, vetro C. Altri tipi di vetro sono il vetro D, con ottime caratteristiche elettriche, e quello L, che per il suo contenuto in piombo, realizza una buona protezione alle radiazioni e può essere usato come traccia per il controllo ai raggi x dell'allineamento delle fibre.

In tabella è riportato, a seconda dell'impiego, il tipo di vetro più idoneo.

**Tabella 1.1.** *Tipo di vetro usato a seconda dello scopo  
(Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici)*

Impiego	Tipo di vetro
Fibre multiscopo	E
Fibre resistenti agli acidi	A, C, CR
Fibre resistenti agli alcali	R, S
Fibre alta resistenza meccanica	R, S
Fibre alte caratteristiche dielettriche	D

Tutti i vetri hanno un rapporto resistenza su peso molto alto, sebbene le fibre di vetro siano fra le fibre inorganiche sintetiche a densità più alta.

Il vetro mantiene le sue proprietà meccaniche, fino al 50% delle sue capacità di resistenza, ad una temperatura di 375 °C, e fino al 25% a 538 °C.

I vantaggi delle fibre di vetro, in particolare della fibra "E" rispetto ad altri materiali, sono:

- *Rapporto tra alta resistenza alla trazione ed alta resistenza al peso:* a parità di peso, la fibra di vetro è due volte più resistente di un filo d'acciaio.
- *Stabilità dimensionale:* il vetro non si accorcerà o non si allungherà in relazione alle variazioni atmosferiche. Le fibre di vetro mostrano un allungamento massimo del 3% a rottura.
- *Alta resistenza al calore:* le fibre di vetro si comportano bene in applicazioni dove devono essere tollerate alte temperature. Esse hanno ancora il 50% della resistenza a trazione, alla temperatura di 340 °C.
- *Basso assorbimento di umidità:* il vetro è un materiale acellulare per cui l'umidità non può penetrare nella superficie dei filamenti.
- *Notevoli proprietà elettriche:* il vetro possiede una bassa costante dielettrica e delle buone capacità isolanti.
- *Alta resistenza alla fiamma:* il vetro non brucia oppure brucia senza dar luogo a fiamma.

Risultato di quanto sopra esposto, è un prodotto in cui sono combinate diverse proprietà fisiche, che non possono essere ottenute con fibre organiche. La resistenza delle fibre di vetro dipende dalle condizioni di formazione, come pure dal sistema di rivestimento impiegato per trattare la superficie della fibra di vetro.

La fase di copertura ha un significativo effetto sulla resistenza delle fibre di vetro e sulle loro proprietà di superficie. L'effetto del trattamento chimico di superficie ha dimostrato di migliorare la resistenza delle fibre di vetro fino al 20%.

Il sistema di copertura (trattamento chimico) consiste in un rivestimento organico che viene applicato alle fibre di vetro immediatamente sotto il rivestimento isolante e prima che i filamenti siano tirati insieme a formare un unico capo. I rivestimenti, sono applicati allo scopo di proteggere le fibre di vetro durante il successivo processo di lavorazione e per ottenere un optimum di compatibilità con le resine da rinforzare. Gli ingredienti impiegati nella copertura delle fibre dipendono dalle specifiche applicazioni: essi sono brevettati e classificati in una o più categorie.

Gli agenti accoppianti, come il loro nome suggerisce, hanno la funzione principale di accoppiare le fibre di vetro alla matrice oppure ad altri ingredienti di copertura, i quali a loro volta interagiscono con la matrice.

Quando tra le fibre di vetro e la matrice si è formato un legame chimico, i compositi in vetro rinforzati divengono un materiale molto resistente impiegabile in campo ingegneristico, come conseguenza di un efficiente trasferimento di sollecitazioni da una matrice relativamente debole a fibre di vetro molto resistenti.

Per facilitare il processo di lavorazione e di composizione sono necessari i lubrificanti: le fibre di vetro essendo materiale fragile sono facilmente abrase quando vengono a contatto con altri materiali, compreso lo stesso vetro. Durante il processo di lavorazione si determina una rottura dei filamenti, che dà luogo a lanugine di vetro che si disperde nell'aria. Un'adeguata selezione dei lubrificanti può ridurre tale fenomeno.

Il processo di fabbricazione delle fibre di vetro ha inizio con il pesare con cura i componenti del vetro per poi miscelarli in una massa omogenea di composizione predefinita. Il tutto viene posto in un forno ed esposto a temperatura sufficiente (1.400 °C circa) a convertire i carbonati e la sabbia in ossidi liquidi, i quali devono possedere una sufficiente viscosità e flusso per produrre un'adeguata omogeneità. Il vetro fuso viene poi raffreddato a temperature più basse (1.100 °C) in modo da renderlo idoneo alle successive fasi lavorative: per produrre vetri con minimi difetti e di alta qualità, sono indispensabili condizioni operative ottimali e forni correttamente progettati.

La massa fusa di vetro d'alta qualità è poi tirata attraverso dei fori praticati in una piastra di platino, e ridotta a fibre di diametro voluto. La piastra riscaldata elettricamente, è dotata d'ugelli che variano in genere da 200 a 4.000. Immediatamente al di sotto della piastra viene applicato ai filamenti una copertura o rivestimento organico.

I filamenti possono essere raccolti in vario numero in fasci mediante un pettine o un ceppo di raccolta. Ad esempio quando viene impiegata una piastra con 400 ugelli ed un ceppo di raccolta con fessure a due vie si produrranno due fasci di 200 filamenti ciascuna, che verranno poi avvolti su un pettine. Il risultato finale sarà la formazione di una matassa. Per evitare che i fasci non giacciano paralleli gli uni agli altri e possano essere dipanati senza difficoltà, viene utilizzata una linea trasversale o spirale onde imprimere un movimento a zig-zag dei capi appena essi si avvicinano alla superficie dell'organo.

I pacchi che vengono realizzati sono posti nel forno per rimuovere l'acqua e assicurare la copertura della superficie del vetro. Successivamente essi vengono messi in una rastrelliera e riuniti in fasci a formare gomitolì.

## ▼ 1.6. Fibre di basalto

Negli ultimi anni la ricerca di nuove tipologie di fibre, da adottare nel settore dell'edilizia civile, si è indirizzata verso lo studio delle fibre di basalto.

Le fibre di basalto sono fibre molto sottili di basalto, roccia vulcanica composta di plagioclasti, pirosseni e olivine. Le fibre di basalto hanno tipicamente un diametro tra 9 e 13  $\mu\text{m}$ ; sono un ottimo sostituto delle fibre di amianto in quanto il loro diametro è molto superiore al limite di respirabilità (circa 5  $\mu\text{m}$ ). Le fibre di basalto sono ottimi isolanti termici e acustici, mantengono le proprietà meccaniche anche ad alte temperature e sono molto stabili chimicamente (sia in ambiente acido che alcalino).

Costituito dalla fusione di un “unica” materia prima, le fibre di basalto sono superiori alle altre fibre in termini di stabilità al calore, per proprietà di isolamento termico e sonoro, durabilità e resistenza alle vibrazioni.

Le fibre di basalto sono un prodotto economico di caratteristiche superiori ai materiali consimili oggi usati, come la fibra di vetro. A riguardo della conduzione del calore, gli articoli realizzati con la fibra di basalto sono tre volte più efficienti di quelli realizzati con l’asbesto, e superiori al vetro e alle fibre minerali. La temperatura di applicazione di articoli fabbricati con la fibra di basalto è notevolmente più elevata (da  $-260^\circ$  a  $900^\circ$ ).

Grazie alla loro elasticità a livello di micro e macrostruttura, le fibre di basalto sono resistenti alle vibrazioni se confrontate con prodotti simili. Questa caratteristica è particolarmente importante nelle costruzioni meccaniche e nell’ingegneria civile.

Ad esempio quando costruzioni civili sono erette in prossimità di autostrade, ferrovie e metropolitane, mentre gli ammortizzatori di materie minerali o fibra di vetro, sottoposti a vibrazioni sono soggetti a danneggiamenti ed infine alla rottura, le lastre di basalto sono resistenti alla vibrazione e quindi più durevoli.

Riguardo alle proprietà chimiche, le fibre di basalto sono più resistenti, agli ambienti aggressivi (ad esempio acidi e basici). A causa di ciò le tubazioni in fibra di basalto possono essere usate negli impianti chimici per il trasporto di acidi caldi, nella realizzazione di sistemi fognari, nel trasporto di liquidi e gas aggressivi, materiali sciolti, ecc.

Le proprietà elettriche dei compositi plastica-basalto, in particolare la resistenza volumica delle fibre di basalto sono di 1 o 2 ordini di grandezza maggiori di quelle della fibra di vetro.

Le tecnologie di processo della fibra di basalto sono simili alle tradizionali tecnologie per la produzione della fibra di vetro (tessuti, fili, fiocchi, GFRP). Grazie alle loro eccellenti proprietà le fibre di basalto possono essere usate nella realizzazione di articoli resistenti al calore e agli alcali (contenitori, tubi, GFRP, materiali per l’isolamento termico).

## ▼ 1.7. Fibre aramidiche

Le fibre aramidiche sono fibre sintetiche sulla base di poliammide aromatici. Nei materiali compositi la fibra commercialmente più importante è la fibra ad alto modulo, la quale è stato introdotto nei primi anni '70 dalla Du Pont. Lo scopo originale dello sviluppo delle fibre aramidiche era la sostituzione dei fili d’acciaio nei pneumatici radiali. Il vantaggio era nel risparmio di peso in combinazione ad una resistenza e durata maggiore.

### 1.7.1. Produzione

La produzione è simile ad altre fibre sintetiche: polimerizzazione, estrusione, stiramento. Il polimero viene sciolto in un liquido ed estruso ad una temperatura di circa  $200^\circ\text{C}$  mentre evapora il

solvente. L'estrusione può avvenire soltanto dalla soluzione in quanto il punto di fusione della fibra è molto più alto della temperatura di decomposizione. Il prodotto di questa fase ha soltanto circa il 15% della resistenza e il 2% della rigidità della fibra finale. Il polimero ha una struttura a bastoncini con poco orientamento rispetto all'asse longitudinale della fibra. Si ottiene una cristallizzazione e l'orientamento della struttura stirando la fibra a 300-400 °C.

Nonostante l'aramide appartenga alla famiglia dei poliammide, l'adesione della matrice (resina) risulta molto più difficile che non sul PA 6 (Nylon). Per migliorare il comportamento la fibra viene trattato con preparati di finissaggio. Ciononostante la resistenza a compressione raggiunge solamente il 25% di quella a trazione.

Nel corso degli anni, questo tipo di fibra sintetica ha ricevuto miglioramenti notevoli in termini di resistenza meccanica. Fin dall'inizio essa si dimostrò promettente, con una resistenza di oltre 2 volte rispetto all'acciaio, a parità di massa. Questo era un risultato notevole per i tempi, e ben presto comparvero materiali leggeri per giubbotti di protezione individuale dei soldati in Vietnam e per i velivoli.

Con il tempo si è arrivati a prodotti ancora più resistenti, che offrono un rapporto di almeno 5:1 sull'acciaio. Queste prestazioni sono riferite alla resistenza meccanica, ma non al logorio né tanto meno alla temperatura: non esistono ingranaggi in *kevlar*, o parti di motore in tal materiale. Inoltre, la resistenza alla penetrazione, quando usato per protezione, è valida contro i proiettili, meno contro le baionette e i coltelli (per quanto la cosa possa sorprendere) cosicché i giubbotti attuali utilizzano inserti con pannelli di titanio per coprire tutte le minacce. La combinazione *kevlar*-leghe leggere alluminio o titanio che siano, è presente anche a bordo di molte macchine volanti, specie dove il peso sia da limitarsi al massimo. Per cui fibre sintetiche come il *kevlar*, il meno famoso *nomex*, fibre di carbonio, leghe leggere di alluminio, magnesio e titanio sono le principali utilizzate per gli elicotteri moderni.

I principali vantaggi delle fibre aramidiche sono: alta tenacità, buona inerzia chimica ed elettromagnetica, basso peso specifico, elevata resistenza e modulo elastico.

## ▼ 1.8. Fibre di acciaio

Le fibre di acciaio al carbonio rappresentano un'altra tipologia di fibre che da pochi anni viene utilizzata per la realizzazione di materiali compositi a matrice polimerica SRP (*Steel Reinforced Polymer*) o a base di malta SRG (*Steel Reinforced Grout*). I tessuti in fibre di acciaio ad alta resistenza per il rinforzo strutturale sono composti da filamenti di acciaio, caratterizzato da elevatissima resistenza meccanica.

I tessuti in fibra di acciaio si trovano attualmente in commercio unicamente in geometria monoassiale date le dimensioni elevate dei filamenti che rendono difficile la realizzazione di tessuti con trama e ordito composti da filamenti in acciaio.

Le caratteristiche di tale sistema risultano essere:

- elevata resistenza;
- estrema duttilità (si adatta a qualsiasi tipologia di profilo) ed aumento di duttilità dell'elemento rinforzato;
- possibilità di mantenere inalterata la geometria dell'elemento rinforzato;
- spessore ridotto e leggerezza;
- maneggevolezza e facilità di applicazione;
- semplifica le problematiche relative alle connessioni ed agli ancoraggi;