

Domenico Brigante

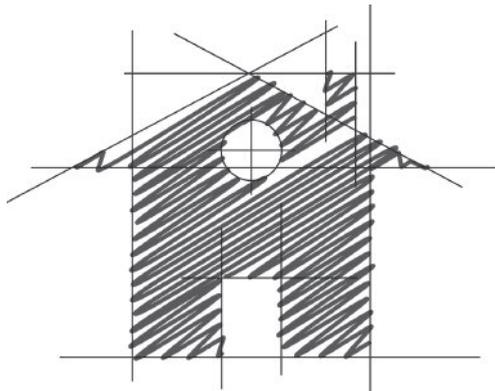
RINFORZO STRUTTURALE CON MATERIALI COMPOSITI

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)

SCELTA, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE



CD-ROM INCLUSO

FOGLI DI CALCOLO PER IL PREDIMENSIONAMENTO DI UN RINFORZO STRUTTURALE


GRAFILL

Domenico Brigante

RINFORZO STRUTTURALE CON MATERIALI COMPOSITI

ISBN 13 978-88-8207-461-6

EAN 9 788882 074616

Manuali, 117

Prima edizione, febbraio 2012

Brigante, Domenico

Rinforzo strutturale con materiali compositi / Domenico Brigante.

– Palermo : Grafill, 2012.

(Manuali ; 117)

ISBN 978-88-8207-461-6

1. Strutture edilizie – Consolidamento.

624.17 CDD-22

SBN Pal0240065

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

Finito di stampare nel mese di febbraio 2012

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

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

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

2.4.1.	Alimentazione del rinforzo.....	p.	29
2.4.2.	Impregnazione	"	30
2.4.3.	Preformatura	"	31
2.4.4.	Formatura e polimerizzazione.....	"	31
2.4.5.	Postformatura	"	33
2.4.6.	Tiro e taglio	"	33
2.4.7.	Controlli	"	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.	Reti in FRP	"	38
3.	SCELTA DEL SISTEMA COMPOSITO	"	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
3.16.	<i>Radiotrasparenza</i>	"	46
4.	NORMATIVA PER IL RINFORZO DI STRUTTURE ESISTENTI	"	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
5.	RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.	"	52
5.1.	<i>Simbologia</i>	"	52
5.2.	<i>Introduzione</i>	"	55

5.2.1.	I coefficienti parziali	p.	55
5.2.2.	Coefficienti parziali γ_m per i materiali ed i prodotti	"	55
5.2.3.	Coefficienti parziali γ_{Rd} per i modelli di resistenza	"	56
5.2.4.	Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale η_a	"	56
5.2.5.	Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata η_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.	<i>Interventi in zona sismica</i>	"	78
6.	RINFORZO DI STRUTTURE IN MURATURA	"	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.....	p.	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	"	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.	CARATTERIZZAZIONE E MONITORAGGIO DEI SISTEMI APPLICATI	"	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.	MODALITÀ E TECNICHE DI APPLICAZIONE	"	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	p.	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	"	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.	ESEMPI DI APPLICAZIONE	"	132
	9.1. <i>Real Albergo dei Poveri – Napoli</i>	"	132
	9.2. <i>Chiesa di Santa Caterina – Caprioli (SA)</i>	"	134
	9.3. <i>Domus Aurea Palazzo Valentini – Roma</i>	"	135
	9.4. <i>Hotel Boscolo Exedra a Nizza (FR)</i>	"	137
	9.5. <i>Complesso Telecom – Pomezia (Roma)</i>	"	138
	9.6. <i>Monumento ai Martiri Napoletani – Napoli</i>	"	139
	9.7. <i>Hotel Boscolo Exedra a Roma</i>	"	141
	9.8. <i>Stazione radio base sito Le Forna – Ponza (LT)</i>	"	144
10.	GUIDA ALL'INSTALLAZIONE E ALL'USO DEL SOFTWARE	"	146
	10.1. <i>Introduzione al software allegato</i>	"	146
	10.2. <i>Requisiti minimi hardware e software</i>	"	146
	10.3. <i>Procedura per la richiesta della password utente</i>	"	146

10.4.	<i>Procedura per l'installazione del software</i>	p.	147
10.5.	<i>Procedura per la registrazione del software</i>	"	147

BIBLIOGRAFIA	"	149
<i>Riferimenti normativi</i>	"	150
<i>Siti Web</i>	"	150

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.

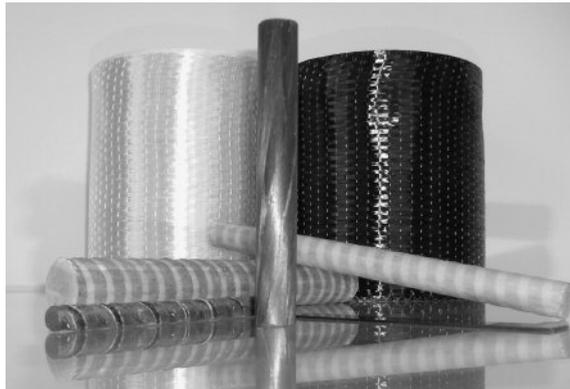


Figura 1.1. *I materiali compositi*

Oggi l'enfasi è posta sullo sviluppo di più moderni compositi con matrici a base di 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.

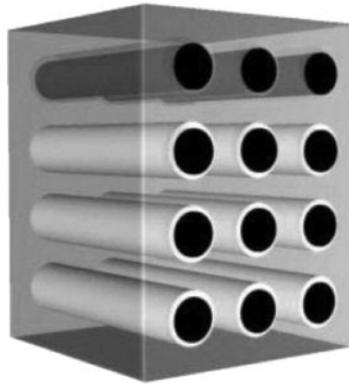


Figura 1.2. Fasi di un materiali composito

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.