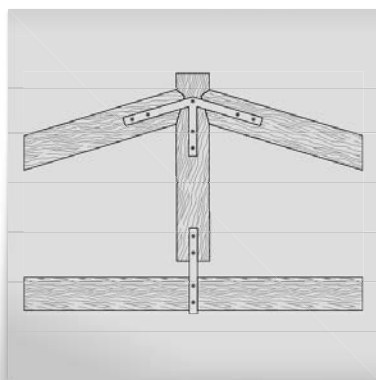


Domenico Brigante

STRUTTURE IN LEGNO RINFORZATE CON FRP

**RINFORZO DI TRAVI, CAPRIATE
E STRUTTURE LIGNEE CON MATERIALI COMPOSITI**
FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS)
SCELTA, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE



SOFTWARE INCLUSO

FOGLIO DI CALCOLO PER IL DIMENSIONAMENTO DI TRAVI LIGNEE RINFORZATE CON SISTEMI FRP




GRAFILL

Domenico Brigante

STRUTTURE IN LEGNO RINFORZATE CON FRP

RINFORZO DI TRAVI, CAPRIATE E STRUTTURE LIGNEE CON MATERIALI COMPOSITI

ISBN 13 978-88-8207-515-6

EAN 9 788882 075156

Manuali, 138

Prima edizione, maggio 2013

Brigante, Domenico <1982->

Strutture in legno rinforzate con FRP : rinforzo di travi, capriate e strutture lignee con materiali compositi / Domenico Brigante. – Palermo : Grafill, 2013.

(Manuali ; 138)

ISBN 978-88-8207-515-7

1. Strutture in legno.

624.184 CDD-22

SBN Pal0255121

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 maggio 2013

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.

SOMMARIO

PREFAZIONE	p.	7
1. I MATERIALI COMPOSITI	"	11
1.1. Introduzione	"	11
1.2. Definizione e caratteristiche dei materiali compositi.....	"	11
1.3. Le fibre	"	12
1.4. Fibre di carbonio	"	12
1.5. Fibre di vetro	"	13
1.6. Fibre di basalto.....	"	15
1.7. Fibre aramidiche	"	16
1.8. Fibre di acciaio.....	"	17
1.9. Tessuti ibridi	"	18
1.10. Fibre naturali.....	"	18
1.11. Le matrici.....	"	19
1.12. Matrici plastiche	"	19
1.12.1. Resine poliestere	"	20
1.12.2. Resine epossidiche	"	21
1.12.3. Resine fenoliche.....	"	21
1.12.4. Resine siliconiche.....	"	21
1.13. Matrici naturali	"	21
1.14. Matrici termoplastiche	"	21
2. IL LEGNO, COMPOSITO NATURALE	"	23
2.1. Introduzione	"	23
2.2. Definizione e caratteristiche.....	"	23
2.3. Difetti del legno	"	24
2.3.1. Difetti naturali	"	24
2.3.2. Difetti indotti dalla lavorazione	"	25
2.4. Le specie legnose.....	"	25
2.5. Il legno lamellare, materiale composito assemblato.....	"	26
3. PROCESSI DI FABBRICAZIONE	"	27
3.1. Introduzione alle tecnologie.....	"	27
3.2. Tecnologie a stampo aperto	"	28

3.2.1.	Impregnazione manuale senza applicazione di pressione o vuoto	p.	29
3.2.2.	Formatura per contatto a spruzzo	"	29
3.2.3.	Centrifugal Casting	"	29
3.3.	Tecnologie a stampo chiuso	"	30
3.3.1.	Produzione per pultrusione	"	30
3.3.2.	Filament Winding	"	36
3.3.3.	RTM – Resin Transfer Molding	"	37
3.3.4.	RIFT – Resin Infusion Under Flexible Tooling	"	38
3.4.	Formatura in autoclave	"	40
4.	VANTAGGI E SCELTA DEI SISTEMI DI RINFORZO	"	41
4.1.	Introduzione	"	41
4.2.	Vantaggi dei materiali compositi	"	41
4.3.	Rinforzo esterno all'elemento strutturale	"	43
4.4.	Rinforzo interno all'elemento strutturale	"	43
4.5.	Scelta dei materiali di rinforzo	"	44
4.6.	Preparazione e trattamento delle superfici lignee	"	45
4.7.	Influenza della temperatura sulla posa in opera	"	45
4.8.	Comportamento nei confronti dell'umidità	"	46
4.9.	Utilizzo di mano d'opera specializzata	"	46
4.10.	Utilizzo dei dispositivi di protezione individuale	"	46
4.11.	Degrado degli attrezzi di lavoro	"	47
4.12.	Resistenza al fuoco	"	47
4.13.	Resistenza ai raggi ultravioletti	"	48
4.14.	Radiotrasparenza	"	48
5.	NORMATIVE DI RIFERIMENTO	"	49
5.1.	Simbologia	"	49
5.2.	Quadro normativo nazionale ed internazionale	"	50
5.3.	CNR-DT 200/04	"	50
5.4.	CNR-DT 201/05	"	51
5.4.1.	Introduzione	"	51
5.4.2.	Applicazioni	"	51
5.4.3.	Corretta installazione dei rinforzi	"	54
5.5.	CNR-DT 206/07	"	54
6.	CARATTERIZZAZIONE E MONITORAGGIO DEI SISTEMI APPLICATI	"	61
6.1.	Introduzione	"	61
6.2.	I materiali	"	61
6.2.1.	Laminati pultrusi	"	62
6.2.2.	Laminati prodotti in situ	"	62

6.2.3.	Controlli di Produzione	p.	63
6.3.	Prove sperimentali	"	63
6.4.	Il collaudo delle opere.....	"	64
6.4.1.	Prove semi-distruttive	"	64
6.4.2.	Prova di strappo normale	"	64
6.4.3.	Prova di strappo a taglio	"	65
6.4.4.	Prove non distruttive	"	65
6.4.5.	Prove di tipo acustico stimolato	"	65
6.4.6.	Prove ultrasoniche ad alta frequenza.....	"	65
6.4.7.	Prove termografiche	"	65
6.4.8.	Prove in emissione acustica	"	65
6.4.9.	Prove a collasso su elementi, travi e pilastri rinforzati	"	66
6.5.	Gli operatori per l'esecuzione delle prove.....	"	66
7.	RINFORZO DI STRUTTURE IN LEGNO	"	67
7.1.	Progettazione dei sistemi di rinforzo	"	67
7.1.1.	Solidarizzazione FRP – Legno.....	"	68
7.1.2.	Connettori meccanici	"	68
7.2.	Rinforzo a flessione, tenso e pressoflessione.....	"	69
7.2.1.	SLU per pressoflessione retta.....	"	71
7.2.2.	Espressioni di N1 e M1 per le diverse regioni limite.....	"	73
7.3.	Rinforzo di solai e controventi per azioni nel piano.....	"	76
7.4.	Rinforzo delle giunzioni lignee esistenti	"	79
8.	SISTEMI E TECNOLOGIE	"	81
8.1.	Tecniche di applicazione.....	"	81
8.2.	Rinforzo di elementi tesi e solai in legno	"	81
8.2.1.	Rinforzo di travi in legno prevalentemente inflesse con tessuti esterni	"	81
8.2.2.	Rinforzo di travi in legno prevalentemente inflesse con trefoli interni longitudinali	"	83
8.2.3.	Rinforzo di travi in legno prevalentemente inflesse con barre pultruse interne longitudinali	"	85
8.3.	Rinforzo di testate di travi ammalorate	"	87
8.3.1.	Rinforzo di testate ammalorate con integrazione di elementi lignei connessi con barre in FRP	"	87
9.	ESEMPI DI APPLICAZIONI.....	"	90
9.1.	Introduzione	"	90
9.2.	Rinforzo di capriate lignee – Hotel Exedra – Roma.....	"	91
9.3.	Rinforzo di solai in legno con tessuti esterni alle travi.....	"	94
9.4.	Rinforzo di solai con trefoli interni alle travi	"	95
9.5.	Rinforzo di testate ammalorate – Chiesa di San Gaetano – Bitonto (BA)	"	96

10. INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO	p.	99
10.1. Introduzione	"	99
10.2. Requisiti minimi hardware e software	"	99
10.3. Download del software e richiesta della password di attivazione	"	99
10.4. Installazione e attivazione del software	"	100
BIBLIOGRAFIA.....	"	103
Riferimenti Normativi	"	107
Siti web.....	"	109
LICENZA D'USO	"	111
CODICI PER IL DOWNLOAD DEL SOFTWARE		
E PER LA RICHIESTA DELLA PASSWORD DI ATTIVAZIONE	"	112

PREFAZIONE

I primi composti fibrosi, come la vetroresina, fecero una prima apparizione in ambito nautico negli anni quaranta del Novecento; le fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza videro prime le reali applicazioni all'incirca vent'anni dopo, mentre per il brevetto delle fibre aramidiche bisognerà attendere, ad esempio, sino al 1973. Eppure fu solo negli anni Novanta, con il deciso impulso che la produzione industriale, dall'aeronautica all'astronautica, diede alla ricerca sulle qualità e gli usi di queste tecnologie, che se ne realizzò la graduale estensione ad altri settori, fra i quali il consolidamento strutturale che – prima in Giappone e negli USA – poi in Italia, diventò, tutto sommato velocemente, una realtà consolidata in un vasto campo di applicazioni, dalle costruzioni civili alle industriali sino ai patrimoni architettonici storicizzati, particolarmente, in virtù delle esperienze maturate in un'ampia casistica di tipologie strutturali di diverse cronologia e costituzione materico-strutturale (murature, volte, cupole, legno strutturale), soprattutto dopo gli eventi sismici del 1997 e, a maggior ragione, dopo quelli d'Abruzzo e d'Emilia. Allargandone l'uso al recupero edilizio *tout court*, l'industria è stata così gradualmente in grado di abbattere significativamente i costi di tali manufatti, fino ad allora, piuttosto sostenuti sia per la produzione sia per la gestione, innescando un processo che – come già in altri settori merceologici riferibili alla conservazione di materiali e strutture – ha realizzato una crescita costante esponenziale sia della varietà di prodotti consimili sia dei protocolli realizzativi conformi, fenomeni però non sempre accompagnati da procedure e controlli accuratamente vagliati e di lunga sperimentazione.

I vantaggi offerti dai materiali fibrorinforzati come rinforzi/supporti di componenti strutturali storicizzate e ammalorate ne hanno largamente favorito l'impiego nel restauro statico – disciplina, però, che, è bene ricordarlo, nell'impostazione teorica e metodologica è del tutto affine al restauro *tout court*. Tali qualità sono state, quasi unanimemente, riconosciute soprattutto al riguardo degli interventi condotti in zone ad alta sismicità – come può facilmente rilevarsi confrontando i tanti episodi di consolidamento di archi, volte e cupole approntati secondo queste procedure. Gli effetti positivi che hanno favorito l'applicazione dei cosiddetti FRP su larga scala sono, comunque, diversi e, sotto molti punti di vista, alquanto importanti. Primi fra tutti è la leggerezza di questi elementi – in generale, a parità di peso, le fibre FRP recano infatti moduli di resistenza anche fino a 10 volte superiori all'acciaio. Anche la flessibilità ne è una prestazione di grande peso – per esempio, i nastri realizzati in stabilimento possono raggiungere lunghezze anche di 50 m senza bisogno di saldature, con tutti gli effetti migliorativi che, anche solo nella gestione del cantiere, tali qualità indubbiamente comportano. Alla flessibilità è legata, poi, anche la maneggevolezza di questi presidi, che recano tempi, attrezzature e modalità di posa in opera, senz'altro, ben ridotti e semplificati rispetto ad altre metodologie di simili impieghi. L'enorme versatilità che caratterizza questi sistemi comprende, inoltre, la possibilità di operare sia internamente sia, e spesso con maggior vantaggio specie nel restauro, esternamente all'elemento da rinforzare, con enormi incrementi sul piano dell'adattabilità che il presidio realizza rispetto alla situazione vigente e, dunque, per la salvaguardia e la trasmissione al futuro della materia fabbricata storicizzata nella sua interezza.

Molti ricercatori annoverano tra i vantaggi di queste metodiche anche la maggiore reversibilità, unitamente alla più affidabile durabilità degli effetti imposti nel breve e medio periodo, sebbene, proprio a tale ultimo riguardo, diverse siano le perplessità che, già da qualche tempo invero, alcuni studiosi evidenziano. Almeno in linea teorica, infatti, le applicazioni così connotate e approntate presenterebbero un altissimo livello di reversibilità – prestazione questa, spesso, tutta da verificare nel concreto dell'intervento realizzato, a ragione delle alte temperature necessarie alla rimozione delle matrici. Identicamente, la durabilità dell'intervento sebbene, di certo, significativamente più elevata di molti altri sistemi di pari finalità funzionale – se viene valutata unicamente in laboratorio o anche secondo esperimenti *in situ*, ma di durata ridotta – risulta sì maggiore sotto l'aspetto fisico-chimico e della resistenza meccanica del materiale ma, come ha, per esempio, dimostrato nel tempo l'inserimento in fabbriche murarie tradizionali di elementi e strutture in c.a., soltanto una verifica a lungo termine sul campo può effettivamente rappresentare un modello di monitoraggio efficace, eliminando – o almeno prevenendo con sufficiente anticipo – l'insorgere di più o meno gravi e incontrollabili fenomeni di incompatibilità e dando, quindi, risposte più circostanziate e durature sul soddisfacimento dei requisiti di reversibilità, efficacia, durabilità e compatibilità che un intervento approntato oggi su un bene culturale deve sempre necessariamente verificare.

Senza dimenticare altre questioni comunque dirimenti circa l'incondizionata applicabilità degli FRP – in primis quella riguardo ai costi, che pure ancora rappresentano ostacoli importanti per un'applicazione su larga scala in campo conservativo – è necessario quindi prestare particolare attenzione alla verifica e al controllo nel tempo dell'effettiva durabilità ed efficacia dell'intervento approntato, attraverso un monitoraggio attento ed esteso, soprattutto, in riferimento alle escursioni termiche ambientali e all'irraggiamento. Anche la scelta della tipologia del materiale composito da impiegare – oltre che, naturalmente, della morfologia della sua costituzione più adatta alla soluzione dello specifico caso – rappresentano un tema di necessario approfondimento, anche in campo conservativo. Date le ripercussioni che, immediatamente e/o nel tempo, possono verificarsi sul piano soprattutto della compatibilità con le strutture storiche, la scelta delle soluzioni da approntare non può semplicemente ridursi alla consultazione di manuali operativi e normative tecniche, per quanto analitici e aggiornati. In ragione delle peculiarità che il manufatto di valore culturale, a vario titolo, realizza, le scelte progettuali devono, infatti, *in toto* discendere, oltre che da un buon bagaglio tecnico-informativo del professionista, specificatamente da una lettura analitica metodologicamente condotta della consistenza materica attuale dell'intera compagine edilizia storicizzata come del suo contesto, al fine di comprendere l'esatta individuazione della fenomenologia dei comportamenti assunti oggi dalla fabbrica, specie quando anomali e problematici, e poter quindi pervenire all'interpretazione dei fenomeni, degli eventi e delle cause che tali dissesti e degenerazioni hanno prodotto. Non basta, insomma, affermare che la fibra di carbonio dovrebbe adattarsi meglio al rinforzo strutturale del calcestruzzo in ragione dell'elevato modulo elastico, per sceglierla perentoriamente come un'unica soluzione possibile in questi casi. Né, per le ragioni opposte, basta affermare che quella di aramide sarebbe la più adeguata al miglioramento di elementi in muratura e in legno, senza testare e valutare, secondo un confronto basato anche su costi e benefici e, di certo, anche immateriali, tutte le eventuali alternative. Pur essendo vero, infatti, che è meglio impiegare fibre con moduli elastici minori, proprio perché meno rigide e, quindi, almeno in teoria, più compatibili con il comportamento dei materiali costruttivi tradizionali, va sempre ricordato ciò che anche i più lontani padri del restauro hanno ripetutamente sottolineato.

Ogni restauro è sempre un "caso a sé", come peculiari sono le vicende che ne hanno storicamente determinato la fabbrica; identicamente, sono allora specifiche anche le soluzioni necessarie a risolvere o, almeno, a limitare i fenomeni e i comportamenti che oggi ne pregiudicano la durata. L'unicità, o più spesso, la rarità delle testimonianze culturali – tanto più nel caso di un'architettura

storica, per sua natura, artigianale nei mezzi e nei modi del concepimento e della trasformazione storica – ne rendono intrinsecamente impossibile qualsivoglia generalizzazione e standardizzazione, che non sia una mera schematizzazione funzionale, al più, al solo studio di un aspetto della complessità stratificata nel manufatto. Ogni intervento su queste fabbriche per poter essere allora “metodologicamente corretto” deve necessariamente partire, insomma, da un approfondito processo di conoscenza e interpretazione di ogni sua specifica realtà costruita.

Tali considerazioni, se è possibile, sono ancor più stringenti nel caso delle membrature e degli elementi cosiddetti “poveri” delle costruzioni tradizionali, come le strutture lignee e le finiture, non a caso spesso considerati “strati ed elementi di sacrificio”, mettendone così in dubbio ogni valore culturale e storico di cui sono testimonianza materiale. Proprio nel restauro, persino quando armati di buone intenzioni, spesso si è invece assistito a pesanti manomissioni di solai e coperture lignee tradizionali – ancora oggi, troppo spesso anche integralmente sostituiti. Nel recupero dell’edilizia storica dei centri antichi, così come di consimili fabbriche danneggiate dagli eventi tellurici, queste procedure hanno rappresentato anzi – e, a volte, rappresentano ancora – la prassi d’intervento più comune, anche a causa di ceti professionali, in verità, non in grado di comprendere, per manifesta ignoranza, significati e reali prestazioni di molti dei più tipici elementi della nostra tradizione costruttiva. Insomma, all’intervento di rinforzo di travi e coperture lignee – a parte qualche esperienza di integrazione realizzata in legno, ma con carattere per lo più provvisoriale – storicamente si è quasi sempre preferita la sostituzione, completa o parziale, degli elementi come delle connessioni più o meno ammalorati e/o staticamente insufficienti.

Le tecnologie basate sull’uso di fibre resistenti a trazione inserite in un getto di resina sintetica con speciali caratteristiche di adesione alle fibre e al supporto – tecniche perfezionate prima nel consolidamento murario – da diversi anni hanno dimostrato utilità e versatilità di utilizzo anche nel settore del legno strutturale. D’altronde, lo stesso legno lamellare adotta le resine per ottenere la coesione delle tavole, per cui è quasi automatico aver concepito la possibilità di una reale ed efficace coazione dei due componenti. I materiali fibrorinforzati, quindi, nel consolidamento di strutture lignee possono utilmente predisporre per interventi localizzati e/o per l’integrazione di singoli elementi non più idonei, benché, quando si interviene su una struttura tradizionale e, più in generale, monumentale, si tenga però sempre nel debito conto che l’obiettivo da perseguire deve essere la conservazione e la trasmissione al futuro della materia storicizzata nel suo stato attuale, nel rispetto dei requisiti che l’intervento conservativo contemporaneo deve realizzare: reversibilità dell’opera; compatibilità dei materiali e delle tecniche adoperate; linguaggio autenticamente contemporaneo delle parti aggiunte di nuova concezione; distinguibilità delle membrature e dei volumi di nuova introduzione; efficacia, anche nel tempo, dell’intervento realizzato riguardo agli specifici problemi sui quali si è inteso intervenire; durabilità dell’opera approntata; rispetto del principio operativo del “minimo intervento”, inteso come riduzione massima delle realizzazioni, da farsi esclusivamente secondo quanto strettamente necessario; sostenibilità ambientale dei materiali, dei mezzi e delle procedure adottate per l’intervento.

Sono questi i requisiti fondamentali che deve poter sempre verificare la messa in opera su un manufatto di valore culturale di un intervento conservativo che voglia dirsi “corretto”. Ovviamente – com’è d’obbligo nella conservazione del patrimonio culturale *tout court* – è identicamente essenziale la scelta di prodotti e tecniche applicative idonee al caso specifico, anche in relazione alle qualità e ai dis-valori, spesso ben troppo presenti, riferibili al contesto nel quale la fabbrica si colloca. Mentre la produzione industriale basa i suoi sviluppi su continue e protocollate sperimentazioni delle procedure di produzione e applicazione delle proprie specialità, nel cantiere conservativo nulla o quasi può dirsi standardizzato, ragione per cui le modalità di controllo e monitoraggio dei materiali di nuova introduzione, specie quando “innovativi”, e di pratiche operative, soprattutto se di “nuova conce-

zione” o quando applicate in nuovi contesti e supporti, devono essere sempre attentamente vagliate in relazione al caso specifico, evitando così comode e, comunque, comprensibili schematizzazioni, derivanti dall’effettiva similarità di conformazioni tipologiche e soluzioni strutturali, nonché da consimili condizioni al contorno.

Oltre agli indubbi vantaggi applicativi e alla versatilità che i prodotti in questione ovviamente rivelano, occorre considerare, insomma, altri importanti fattori connaturati alle intrinseche caratteristiche di tali presidi. Come si diceva, il problema ancora presenta dei costi elevati – dovuti in genere all’uso di strumentazioni e di know-how tecnologico che solo le grandi aziende possono garantire e che, però, limita di fatto il ricorso a tali lavorazioni ai soli casi maggiori. Per di più, la continua ricerca nella produzione di questi materiali, se da un lato configura un indubbio vantaggio d’ordine generale, dall’altro ne rallenta una reale efficace sperimentazione, soprattutto per quanto riguarda gli effetti a lungo termine di eventuali danni collaterali, specie per il comportamento delle resine alle alte temperature. A tale proposito, anzi, oltre alle già espresse perplessità circa la generalizzata reversibilità di questi interventi – requisito fondante per un consolidamento che voglia dirsi “migliorativo” – altrettanto fondamentale è la considerazione circa un altro dei requisiti prima elencati, vale a dire, la necessaria compatibilità che tali materiali devono dimostrare nei confronti del legno, in relazione all’imprescindibile e continuo adattamento di quest’ultimo alle condizioni ambientali che, considerando anche le modificazioni dal punto di vista dimensionale che nel tempo si realizzano, comporterebbe la necessità di una flessibilità anche da parte delle resine, non sempre però facilmente perseguibile. Ben vengano, quindi, come efficacemente documentato in questo volume, gli studi scientifici, per ora ancora non numerosi, che, nel quadro aggiornato più generale delle produzioni di materiali siffatti oggi reperibili sul mercato e delle modalità circa le loro distinte realizzazioni, all’interno del dettagliato quadro normativo di riferimento, affrontano il tema dell’applicabilità di tali sistemi in strutture lignee di differente tipologia e significanza culturale, mettendone in luce altresì prestazioni, vantaggi e significati delle varie tipologie di rinforzo. D’altrettanto interesse è, inoltre, lo spazio che gli autori riservano all’approfondimento degli aspetti tecnico-progettuali, soprattutto perché, anziché limitarsi alle sole fasi realizzative delle singole opere, ne allargano la trattazione agli aspetti relativi alle successive caratterizzazioni meccaniche e al monitoraggio dei sistemi approntati, nell’ottica cioè di quel maggiore controllo ex-post, che poc’anzi si è annoverato tra i principali fattori di limite ad un’applicazione su larga scala di simili presidi nel campo del restauro.

In conclusione, avendo scelto di indagare l’applicazione di più tipologie di materiali compositi in una casistica variegata di situazioni strutturali – con solai e coperture lignei di diversa qualità, consistenza e problematica strutturale – l’intero lavoro raccoglie e compendia una pratica guida all’utilizzo di questi presidi, particolarmente vantaggiosa nei casi in cui risultino meno complesse e stratificate le questioni d’ordine conservativo, ma lasciando comunque intendere all’operatore attento che gli strumenti di base necessari ad affrontare problematiche similari in complessi edilizi di più articolata formazione e storicità, avendo a che fare con la conservazione e la trasmissione al futuro di testimonianze materiali di cultura caratterizzate da peculiari fragilità, necessitano sempre e inderogabilmente di competenze e conoscenze specifiche.

CAPITOLO 1

I MATERIALI COMPOSITI**▼ 1.1 Introduzione**

Le nuove tecnologie e le più grandi scoperte della scienza, spesso altro non sono che studio e ricostruzione di ciò che è sempre stato davanti ai nostri occhi, nelle più “semplici” strutture della natura. Anche nel caso dei materiali compositi la natura ha preceduto di migliaia di anni i nostri studi con materiali come il legno, costituito principalmente da cellulosa dispersa in lignina o anche le ossa, costituite da collagene e apatite.

Il legno è stato sostituito negli anni in alcune particolari applicazioni con materiali compositi innovativi come ad esempio nel caso delle imbarcazioni che a partire dagli anni '40 sono state costruite in larga parte in vetroresina e successivamente in casi specifici in carboresina.

Negli ultimi anni però la nuova frontiera dei materiali compositi è sicuramente la produzione di “biocompositi”, realizzati principalmente mediante l'utilizzo di fibre naturali, ciò ha riportato alla ribalta l'utilizzo del legno che a sua volta può costituire da base per altri materiali compositi, quale ad esempio il compensato, il legno truciolare ed altre numerose variabili.



Figura 1.1 – *I materiali compositi* (www.gurit.com)

▼ 1.2 Definizione e caratteristiche dei materiali compositi

Un composito è un sistema che consiste di 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.

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 trasferimento 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.

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 2000 °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.



Figura 1.2 – *Fibre di carbonio*

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 1.3 – *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.

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

Tabella 1.1 – *Tipo di vetro usato a seconda dello scopo (Linee Guida del CSLPP)*

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 (1400 °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 (1100 °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 4000. 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'argano.

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 µm; sono un ottimo sostituto delle fibre di amianto in quanto il loro diametro è molto superiore al limite di respirabilità (circa 5 µm). 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° a 900°).



Figura 1.4 – *Fibre di basalto*

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.

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°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 $300-400^{\circ}\text{C}$.

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.

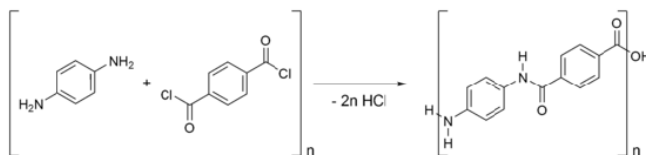


Figura 1.5 – Legame chimico delle fibre aramidiche

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.



Figura 1.6 – Fibre aramidiche

▼ 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;
- resistenza al fuoco in caso di utilizzo di matrice cementizia;
- resistenza alla corrosione, con conseguente durabilità nel tempo.

In edilizia storica si ottengono notevoli vantaggi grazie alla possibilità di impregnare il tessuto con malta garantendo così un materiale di rinforzo assolutamente compatibile con il substrato, facilmente removibile, ma avente sempre elevate proprietà fisico-meccaniche. Grazie, inoltre, alla loro tenacia ed alla loro elevata resistenza a taglio, tali materiali si rivelano particolarmente indicati per essere pretesi mediante opportuni sistemi di pretensionamento ed ancorati tramite sistemi tradizionali senza doversi preoccupare di recidere la fibra.

I tessuti in fibra di acciaio sono caratterizzati da un rivestimento metallico di ottone o da un rivestimento costituito da uno strato di zinco galvanizzato. Entrambi i rivestimenti hanno lo scopo di garantire un'ottima resistenza a corrosione rendendolo un materiale estremamente durevole nel tempo. La scelta del rivestimento è funzione dell'esposizione a cui può essere soggetto il materiale durante le condizioni di esercizio della struttura.

▼ 1.9 Tessuti ibridi

I tessuti ibridi hanno come obiettivo il rapporto ottimale tra prestazioni dei tessuti e costi. È infatti possibile disporre all'interno di uno stesso tessuto, fibre aventi differenti grammature, natura chimica o caratteristiche meccaniche progettando un composito che garantisca le proprietà fisico meccaniche necessarie nelle diverse direzioni di sollecitazione evitando sprechi dal punto di vista economico. Si possono ad esempio combinare in trama e ordito fibre aramidiche e fibre di carbonio, ottenendo un composito con differente risposta elastica nelle due direzioni principali di sollecitazione.

▼ 1.10 Fibre naturali

Le fibre naturali sono quelle già presenti in natura e ricavabili con procedimenti diversi, meccanici e chimici. Possono essere classificate indicativamente, tenendo conto della propria origine in: fibre vegetali, che sono tutte quelle fibre di natura ligno-cellulosica, fibre animali (lana, seta), fibre minerali (amianto).

La prima definizione, necessariamente indispensabile al fine di una migliore comprensione dell'argomento, è quella di fibra vegetale. Con tale dizione si intende la singola cellula che, avendo contribuito all'accrescimento della pianta da cui viene estratta, ha ormai cessato le sue funzioni vitali.

Il rinforzo vegetale assume successivamente e definitivamente aspetti diversificati e opportunamente scelto a seconda dell'utilizzo che se ne intende fare, ad esempio se utilizzato in esperienze di laboratorio oppure nella realizzazione pratica del prodotto composito.

È noto che le fibre da utilizzare nella realizzazione dei compositi naturali sono costituite da particelle macroscopiche (ordine del millimetro) ovvero caratterizzate da dimensioni facilmente misurabili ed ottenute con procedimenti immutati nel tempo quali tritatura del materiale legnoso selezionato oppure da filamenti molto lunghi (ordine del metro) ottenuti dalle foglie piuttosto robuste e spesse di alcune piante che vivono nella regione tropicale del globo terrestre. Esiste una terza possibilità per ottenere le fibre ed è quella di ricorrere a trattamenti chimici più o meno severi della matrice vegetale dalla quale si intende estrarre le stesse.

▼ 1.11 Le matrici

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

▼ 1.12 Matrici plastiche

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

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

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

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



Figura 1.7 – Resine

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

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

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

Di seguito si riportano le proprietà delle principali matrici termoindurenti.

Proprietà	Modulo elastico E (MPa)	Resistenza a trazione σ_r (MPa)	Massa volumica ρ (g/cm ³)	Allungam. a rottura (%)	Coeff. di dilat. termica α (10 ⁻⁶ /°C)
Tipo					
Poliestere	4900	70	1,22	1,8	60
Epossidica	3800	70	1,20	2,9	60
Fenolica	7500	45	1,39	0,6	/
Siliconica	5000	25	1,90	0,5	/

Tabella 1.2 – Principali matrici termoindurenti

1.12.1 Resine poliestere

Presentano buone caratteristiche, basso costo, sono facilmente lavorabili, induriscono a temperatura ambiente. Grazie alla loro facile reticolazione, che riduce notevolmente i costi delle tecnologie di produzione, queste resine sono largamente usate nel campo della nautica da diporto e dell’edilizia. Il rischio legato all’attività più conosciuto nell’industria di trasformazione delle resine poliestere è l’esposizione allo stirene. In queste applicazioni sono impiegate prevalentemente in unione con fibre di vetro. Tale esposizione avviene principalmente attraverso l’inalazione di vapori di stirene. Poiché lo stirene è una sostanza che produce effetti neurotossici, devono essere prese misure di protezione per minimizzare il livello di esposizione.

Nelle tecnologie a stampo aperto come la laminazione manuale, il taglio e spruzzo ed il filament winding, la concentrazione di stirene può superare facilmente la concentrazione massima permessa. Quando la ventilazione sul posto di lavoro risulta insufficiente (ciò può essere misurato utilizzando gli opportuni strumenti oggi disponibili), dovranno allora essere utilizzati i dispositivi di protezione per le vie respiratorie.