

Claudio Ciavattini

Rinforzo travi in legno

PROGETTO DEGLI INTERVENTI DI RINFORZO CON FRP

- **Analisi dello stato attuale non rinforzato**
- **Scelta del tipo di rinforzo**
- **Analisi elastica lineare**
- **Analisi non lineare agli S.L.U.**

- **RINFORZO TRAVI IN LEGNO CON FRP**
Software per la progettazione di interventi di rinforzo
 - ↳ analisi e combinazione dei carichi
 - ↳ analisi elastica della sezione non rinforzata e rinforzata
 - ↳ analisi agli S.L.U. per flessione semplice
 - ↳ verifica di deformabilità

Claudio Ciavattini

RINFORZO TRAVI IN LEGNO

PROGETTO DEGLI INTERVENTI DI RINFORZO CON FRP

ISBN 13 978-88-8207-538-5

EAN 9 788882 075385

Software, 70

Prima edizione, febbraio 2014

Ciavattini, Claudio <1961->

Rinforzo travi in legno : progetto degli interventi di rinforzo con FRP /
Claudio Ciavattini. – Palermo : Grafill, 2014.

(Software; 70)

ISBN 978-88-8207-538-5

1. Travi in legno – Consolidamento.

624.184 CDD-22

SBN Pal0266543

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

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.

Indice

1. INTRODUZIONE	p.	5
2. I MATERIALI	"	7
2.1. Legno	"	7
2.2. FRP	"	13
2.3. Resistenze dei materiali e criteri di verifica.....	"	15
2.3.1. Legno.....	"	15
2.3.2. Fibra di carbonio	"	17
2.3.3. Verifiche di resistenza per elementi in legno.....	"	17
2.3.4. Esempio	"	20
3. I SISTEMI DI RINFORZO PER LE TRAVI INFLESSE	"	28
3.1. Analisi dello stato attuale.....	"	28
3.2. Progetto del rinforzo	"	31
3.2.1. Fasi operative di cantiere	"	35
4. ANALISI ELASTICA LINEARE	"	37
4.1. Applicazione del rinforzo con la trave sollecitata dai carichi permanenti	"	37
4.1.1. Rinforzo solo in zona tesa	"	38
4.1.2. Rinforzo in zona tesa e in zona compressa	"	40
4.2. Rinforzo con trave scarica	"	42
4.3. Verifica con sezione fessurata	"	42
4.4. Verifica di deformabilità	"	44
5. ANALISI NON LINEARE AGLI STATI LIMITE ULTIMI	"	52
5.1. Modello di Bazan.....	"	53
5.2. Modello elastico perfettamente plastico	"	56
5.2.1. Ipotesi di rottura campo 2	"	58
5.2.2. Ipotesi di rottura campo 3	"	60
5.2.3. Ipotesi di rottura campo 4	"	62
5.3. Ipotesi di rottura: legno teso oltre il limite elastico	"	63
5.3.1. Ipotesi di rottura nel campo 5.....	"	65
5.3.2. Ipotesi di rottura nel campo 6.....	"	66
5.4. Ipotesi di rottura: legno non resistente a trazione	"	68

5.4.1.	Ipotesi di rottura nel campo 5.....	p.	69
5.4.2.	Ipotesi di rottura nel campo 6.....	"	71
6.	ESEMPI DI CALCOLO	"	73
	Esempio 1 – trasformazione di solaio di sottotetto in solaio abitabile – analisi elastica	"	73
	Esempio 2 – analisi allo S.L.U.	"	81
	Esempio 3 – analisi S.L.U. – sezione fessurata	"	85
	Esempio 4 – analisi S.L.U. – sezione interamente reagente.....	"	90
	Esempio 5 – analisi S.L.U. – lamelle applicate all'intradosso della trave	"	101
7.	ESEMPI APPLICATIVI	"	107
7.1.	Rinforzo trave all'intradosso – sezione fessurata	"	107
7.2.	Rinforzo travi di copertura.....	"	109
7.3.	Rinforzo con FRP e sostituzione di parte di trave	"	111
7.4.	Rinforzo di travi con FRP in un edificio storico	"	114
8.	INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO	"	118
8.1.	Introduzione.....	"	118
8.2.	Requisiti minimi hardware e software	"	118
8.3.	Download del software e richiesta della password di attivazione	"	118
8.4.	Installazione e attivazione del software	"	119
9.	USO DEL SOFTWARE	"	121
9.1.	Legno-FRP_verifica elastica.....	"	122
	Analisi dei carichi	"	122
	Analisi elastica lineare	"	122
	Verifica di deformabilità	"	123
	Profili resistenti.....	"	123
9.2.	Legno-FRP_verifica agli SLU	"	124
	Stato attuale ante rinforzo	"	124
	Sez. interamente reagente	"	125
	Legno teso fessurato	"	125
	Sez. parzializzata	"	125
	Profili resistenti.....	"	125
10.	BIBLIOGRAFIA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO	"	126

Capitolo 1

Introduzione

Il legno può definirsi per sua natura, un materiale composito naturale, in quanto costituito da una matrice (la *lignina*) in cui sono disposte le fibre che conferiscono alta resistenza a trazione (*microfibrille*); queste ultime sono disposte, in larga maggioranza, parallelamente all'asse del tronco ed è quindi in questa direzione (parallela al tronco) che si sviluppa la massima resistenza a trazione.

Il legno strutturale è annoverato nella normativa tecnica fra i materiali da costruzione idonei ad assolvere funzioni portanti per un tempo indefinito ed ha una lunga storia applicativa testimoniata dall'elevata durabilità delle strutture adeguatamente progettate e realizzate.

Nella gran parte delle città italiane sono numerosi gli esempi di edifici con coperture e solai di legno secolari, ancora perfettamente efficienti a fronte della sola manutenzione ordinaria.



Figura 1.1. Solaio in legno, con travi, travicelli e scempiato in mezzane (o pianelle):
a) mezzeria della trave; b) appoggio

Tuttavia è nota anche la vulnerabilità del materiale legno: attacchi di insetti, infiltrazioni d'acqua a causa di una manutenzione scarsa delle coperture, possono provocare danneggiamenti nel materiale che, alle volte si limitano a zone circoscritte, altre volte si estendono invece pericolosamente sull'elemento strutturale, pregiudicandone quindi le capacità di resistenza.

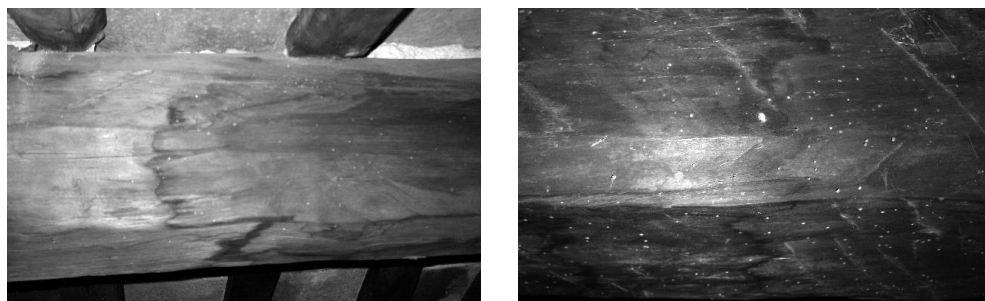


Figura 1.2. Degrado del legno: a) tracce di infiltrazioni di acqua; b) attacco insetti

Spesso molte delle strutture dei solai o delle coperture, sono nascoste alla vista da controsoffitti, come i tipici “cannicciati” toscani; è quindi impossibile, in molti casi, controllare nel tempo lo stato di salute delle travi in legno. Solo quando il committente decide di intraprendere lavori di ristrutturazione allora, spesso con l’esigenza estetica di portare le travi in vista, si rimuovono i controsoffitti e si trovano magari le travi in legno in avanzato stato di degrado a causa di infiltrazioni pregresse. Quindi la necessità di rinforzare le travi o meglio di reintegrare la capacità resistente, soprattutto flessionale di tali elementi strutturali, ha indirizzato l’attività progettuale verso la ricerca di soluzioni che potessero conferire nuova resistenza alle travi di legno senza peraltro sminuire la loro “dignità” di elemento strutturale storico.

In questo senso, l’uso dei materiali compositi, principalmente a base di fibre di carbonio, rappresenta una validissima soluzione per conferire maggiore resistenza al legno; esso si accosta in maniera discreta alla struttura in opera, quasi senza farsi notare anche perché leggerissimo e di piccole dimensioni, interviene quando serve collaborando con la restante parte della struttura.

A differenza di altre tecniche tradizionali, quali l’uso di profilati metallici o piatti in acciaio per placcare le travi o solette collaboranti ecc., l’uso dei materiali FRP non comporta aumento di peso; questa caratteristica rende l’intervento pienamente compatibile con la struttura di legno che, tra le sue principali prerogative, ha appunto quella di essere leggera e resistente.

L’uso di tali materiali compositi non è però legato solo al rinforzo di travi in legno danneggiate ma anche per quelle strutture che, per effetto di mutate esigenze d’uso, hanno necessità di fornire prestazioni superiori a quelle che da sole potrebbero fornire. È il caso per esempio del riuso a fini abitativi dei sottotetti, inizialmente non abitabili; in questo caso i maggiori carichi variabili previsti dalle norme vigenti, impongono appunto la riprogettazione delle travi dei solai, inizialmente poste in opera senza richieste particolari di resistenza se non per i carichi permanenti.

Lo stato dell’arte in questo settore è in continua evoluzione perché l’applicazione di tali tecnologie è ancora in fase di sviluppo; anche le indicazioni riportate sullo stesso documento CNR DT201/2005 premettono che *“Il lavoro svolto rappresenta solo un primo passo verso il rilascio di Istruzioni progettuali, che potrà avvenire in un prossimo futuro, quando gli studi teorici e sperimentali, attualmente in corso in campo internazionale, consentiranno di raggiungere una conoscenza più completa dell’argomento ed universalmente condivisa”*.

Si tratta quindi di un settore in pieno sviluppo, dove però si registrano già numerose applicazioni e un interesse sempre crescente verso tale tecnologia di rinforzo delle travi in legno.

Capitolo 2

I materiali

› 2.1. LEGNO

Il legno strutturale è presente in molti edifici esistenti per la realizzazione soprattutto di solai e coperture, elementi costruttivi ricorrenti che vengono presi in considerazione nel presente testo.

Si tratta quindi di travi inflesse, spesso semplicemente appoggiate su un'unica campata, costituite da legnami di varia natura.

Il primo problema a affrontare è pertanto l'individuazione del tipo di legno su cui dobbiamo intervenire e poi delle sue caratteristiche meccaniche. Maestranze esperte nel campo del restauro architettonico, sono in grado di individuare il tipo di legno, già dal suo aspetto esteriore; in mancanza di ciò, si possono svolgere indagini non distruttive o parzialmente distruttive (prelievo di piccoli campioni) per determinare il tipo di legno e le sue caratteristiche. Individuato il tipo di legno, lo si può classificare secondo quanto riportato dalle norme vigenti.

Esistono due tipi di classificazione, a "vista" o a "macchina". La norma UNI 11035/2003 fissa le regole per la classificazione a vista. La norma europea UNI EN 338:2004 definisce invece le classi di resistenza e i profili resistenti unificati a livello europeo.

Tuttavia, il legno non è un materiale omogeneo: presenta difetti più o meno estesi che spesso sono difficili da valutare, soprattutto quando si ha a che fare con legno "vecchio", quindi occorre molta prudenza nello stimare le caratteristiche meccaniche del legno perché, la presenza appunto di difetti, le renderebbe non veritiere.

Occorre poi individuare l'effettiva geometria resistente della trave, che potrebbe non essere quella che a prima vista sembrerebbe, proprio perché la presenza di difetti interni, possono generare cavità nel materiale (non visibili dall'esterno) che riducono localmente la sezione. È pertanto necessaria una ispezione accurata della trave in tutta la sua lunghezza, anche preliminarmente con tecniche tradizionali come la battitura e l'ascolto del suono per scongiurare situazioni che potrebbero rendere vano il progetto di rinforzo.

Esiste quindi una sostanziale differenza tra le caratteristiche meccaniche del materiale legno (cosiddetto legno netto) e quelle dell'elemento strutturale in situ.

L'importanza dello studio preliminare, volto al raggiungimento di un'esauriente conoscenza dello stato attuale delle strutture di legno, è rimarcato anche nell'appendice D del documento CNR DT 206/2007 che contiene le Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno:

"L'identificazione dei parametri fisici e meccanici degli elementi lignei in opera ed un attento esame del loro stato di conservazione sono dati indispensabili per la elaborazione di un corretto progetto di riabilitazione delle strutture. Per quanto riguarda l'analisi dello

stato di conservazione e la classificazione degli elementi lignei in opera ci si dovrà riferire a quanto riportato nei seguenti documenti:

- 1) UNI 11118 (2004) “Beni culturali – Manufatti lignei – Criteri per l’identificazione delle specie legnose”;
- 2) UNI 11119 (2004) “Beni culturali – Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera”;
- 3) UNI 11130 (2004) “Beni culturali – Manufatti lignei – Terminologia del degradamento del legno”.

Per quanto riguarda i criteri generali per l’esecuzione di eventuali prove di carico su strutture lignee esistenti ci si dovrà riferire a quanto riportato nel seguente documento:

- 1) UNI EN 380 (1994) “Strutture di legno – Metodi di prova – Principi generali per le prove con carico statico”.

Di seguito si riportano le tabelle delle classi di resistenza delle varie specie.

Proprietà	Abete / Nord			Abete / Centro Sud			Larice / Nord			Douglasia / Italia			Altre Conifere / Italia		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2/S3	S1	S2	S3	
Resistenze [MPa] - 1 MPa = 1 N/mm²															
Flessione	29	23	17	32	28	21	42	32	26	40	23	33	26	22	
Trazione parallela alla fibratura	17	14	10	19	17	13	25	19	16	24	14	20	16	13	
Trazione perpendicolare alla fibratura	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	
Compressione parallela alla fibratura	23	20	18	24	22	20	27	24	22	26	20	24	22	20	
Compressione perpendicolare alla fibratura	2,9	2,9	2,9	2,1	2,1	2,1	4,0	4,0	4,0	2,6	2,6	4,0	4,0	4,0	
Taglio	3,0	2,5	1,9	3,2	2,9	2,3	4,0	3,2	2,7	4,0	3,4	3,3	2,7	2,4	
Modulo elastico [GPa] - 1 GPa = 1 KN/mm²															
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura	12	10,5	9,5	11	10	9,5	13	12	11,5	14	12,5	12,3	11,4	10,5	
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura	8	7	6,4	7,4	6,7	6,4	8,7	8	7,7	9,4	8,4	8,2	7,6	7	
Modulo di elasticità perpendicolare alla fibratura	4	3,5	3,2	3,7	3,3	3,2	4,3	4	3,8	4,7	4,2	4,1	3,8	3,5	
Modulo di taglio	7,5	6,6	5,9	6,9	6,3	5,9	8,1	7,5	7,2	8,8	7,8	7,7	7,1	6,6	
Massa volumica [kg/m³]															
Massa volumica	380	380	380	280	280	280	550	550	550	400	420	530	530	530	
Massa volumica	415	415	415	305	305	305	600	600	600	435	455	575	575	575	

Tabella 2.1. Classi di resistenza secondo EN 11035, per specie legnose di provenienza italiana (continua a p. 10)

Proprietà	Castagno / Italia		Querce caducifoglie / Italia		Pioppo e Ontano / Italia		Altre Latifoglie / Italia	
	S	S	S	S	S	S	S	S
Resistenze [MPa] - 1 MPa = 1 N/mm²								
Flessione	fm,k	28	42	26	27			
Trazione parallela alla fibratura	ft,0,k	17	25	16	16			
Trazione perpendicolare alla fibratura	ft,90,k	0,5	0,8	0,4	0,4			0,5
Compressione parallela alla fibratura	fc,0,k	22	27	22	22			22
Compressione perpendi-colare alla fibratura	fc,90,k	3,8	5,7	3,2	3,2			3,9
Taglio	fv,k	2,0	4,0	2,7	2,7			2,0
Modulo elastico [GPa] - 1 GPa = 1 KN/mm²								
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura	E0,mean	11	12	8	11,5			
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura	E0,05	8	10,1	6,7	8,4			
Modulo di elasticità perpen dicolare alla fibratura	E90,mean	7,3	800	5,3	7,7			
Modulo di taglio	Gmean	9,5	750	5	7,2			
Massa volumica [kg/m³]								
Massa volumica	ρk	465	760	420	515			
Massa volumica	ρmean	550	825	460	560			

Tabella 2.1. Classi di resistenza secondo EN 11035, per specie legnose di provenienza italiana (continua da p. 10)

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	
Resistenze [MPa] - 1 MPa = 1 N/mm²													
flessione	f _{m,k}	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
trazione parallela alla fibratura	f _{t,0,k}	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
trazione perpendicolare alla fibratura	f _{t,90,k}	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
compressione parallela alla fibratura	f _{c,0,k}	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
compressione perpendicolare alla fibratura	f _{c,90,k}	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
taglio	f _{v,k}	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Modulo elastico [GPa] - 1 GPa = 1 KN/mm²													
modulo elastico medio parallelo alle fibre	E _{0,mean}	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	E _{0,05}	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	E _{90,mean}	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
modulo di taglio medio	G _{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volumica [kg/m³]													
massa volumica caratteristica	ρ _k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
massa volumica media	ρ _m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabella 2.2. Classi di resistenza secondo EN 338, per legno di conifere e di pioppo

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Resistenze [MPa] - 1 MPa = 1 N/mm ²							
flessione	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
taglio	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Modulo elastico [GPa] - 1 GPa = 1 KN/mm ²							
modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
modulo di taglio medio	G_{mean}	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Massa volumica [kg/m ³]							
massa volumica caratteristica	ρ_k	530	560	590	650	700	900
massa volumica media	ρ_m	640	670	700	780	840	1080

Tabella 2.3. Classi di resistenza secondo EN 338, per legno di latifoglie (escluso pioppo)

2.2. FRP

I materiali compositi comunemente denominati FRP, acronimo di *Fyber Reinforced Polymers*, sono costituiti da *matrici* polimeriche e da *fibre* lunghe continue di carbonio, vetro o aramide. Recentemente sono state introdotte anche matrici a base cementizia, che però non vengono trattate nel presente testo. In tale sistema, la fibra costituisce l'effettivo rinforzo, essendo dotata di elevata resistenza a trazione e notevole rigidità assiale, mentre la matrice ha la funzione di ripartire gli sforzi sulle fibre e di trasferire gli sforzi dal supporto (struttura da rinforzare) alle fibre.

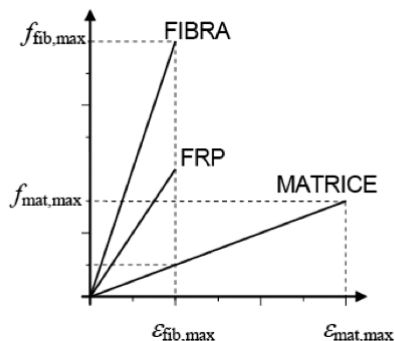


Figura 2.1. Legami costitutivi di fibra, matrice e composito (FRP)

La resistenza del composito è pertanto inferiore alla resistenza della fibra in quanto risente dell'elemento debole matrice.

Sistemi preformati	Modulo di elasticità normale [GPa]		Tensione di rottura [Mpa]		Deformazione a rottura [%]	
	FRP E_f	Fibre E_{fib}	FRP f_f	Fibre f_{fib}	FRP ϵ_{fu}	Fibre $\epsilon_{fib,u}$
CFRP (basso modulo)	160	210-230	2800	3500-4800	1.6	1.4-2.0
CFRP (alto modulo)	300	350-500	1500	2500-3100	0.5	0.4-0.9

Tabella 2.4. Confronto tra proprietà meccaniche di un prodotto preformato con quelle delle corrispondenti fibre

Nel presente testo si trattano essenzialmente i compositi con fibre di carbonio: in questo caso si parla più propriamente di CFRP.

I materiali compositi hanno avuto il loro forte sviluppo prima nei settori aeronautico meccanico e navale e poi successivamente, visti gli ottimi risultati, tale tecnologia si è sviluppata anche nel settore dell'edilizia; in particolare in Italia l'impulso maggiore all'uso di tale sistema di rinforzo, si è avuto a partire dal 1997 dopo il sisma che colpì l'Umbria e le Marche, a cui seguì la pubblicazione del "Manuale per la ricostruzione post sismica" della regione

Umbria. Esistono pertanto ad oggi numerose applicazioni che confermano non solo l'efficacia del sistema di rinforzo ma anche assicurano sulle condizioni di durabilità dello stesso.

Dal punto di vista costitutivo, tali materiali possono definirsi eterogenei ed anisotropi e presentano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino a rottura.

I compositi per il rinforzo strutturale sono disponibili in diverse geometrie: dalle lamine pultruse (dette anche lamelle), di spessore superiore a 1 mm, caratterizzate da una disposizione unidirezionale delle fibre ed utilizzate preferibilmente per placcare superfici regolari, ai tessuti mono o bidirezionali, di spessore inferiore a 1 mm, facilmente adattabili alla forma dell'elemento strutturale da rinforzare. Esistono inoltre barre, sempre pultruse, spesso utilizzate per ancoraggi, connettori oppure anche (ma più raramente) come barre di armatura di strutture in calcestruzzo. Completano la gamma le reti e i dispositivi per ancoraggio.

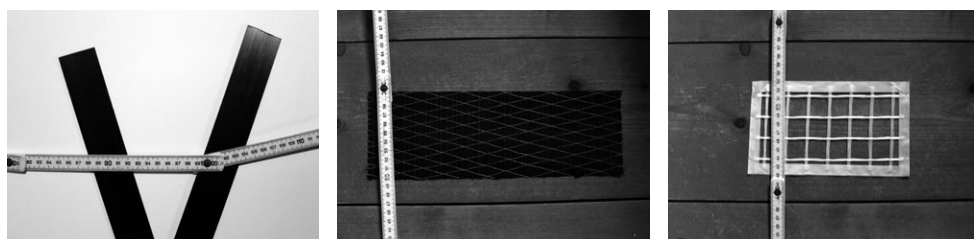


Figura 2.1. Esempi di prodotti in fibra di carbonio: lamine, tessuto, rete

Le caratteristiche meccaniche dei prodotti si desumono dalle schede tecniche dei vari produttori. Si riportano di seguito le caratteristiche di alcuni prodotti.

Prodotto in fibra di carbonio	Modulo elastico (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Spessore (mm)	Larghezza (mm)
Tessuto unidirezionale	240	3800	> 1,5	0,18 (330 g/m ²) 0,28 (500 g/m ²)	10-20-50
Tessuto unidirezionale ad alto modulo	640	2600	> 0,4	0,19	30
Lamelle	150	2500	> 1,5	1,2 – 1,4	50-80-100-120
Lamelle ad alto modulo	200	2500	> 1,3	1,4	50-80-100-120
Barre	150	2300	> 1,5	Φ 10	

Tabella 2.5.

Per quanto riguarda la morfologia del sistema di rinforzo si osserva che mentre la lamella costituisce già di per sé materiale composito che viene poi solidarizzato alla struttura da rin-

forzare mediante apposite resine epossidiche (sistema preformato), i nastri o i tessuti invece diventano compositi in situ, ossia al momento dell'applicazione, in quanto sono costituiti solo da fibre longitudinali che vengono impregnati (matrice) ed incollati sul posto con resine epossidiche alla struttura da rinforzare (sistema impregnato in situ).

Gli spessori in gioco sono piccoli: questo è uno dei vantaggi del sistema di rinforzo, che non comporta aumento di peso e opera con la minima invasività, risultando il più delle volte reversibile e quindi proponibile nel settore dei beni culturali per il rinforzo e la protezione del patrimonio monumentale esistente.

Per il tessuto impregnato in situ, lo spessore di calcolo è quello relativo alle sole fibre presenti; esso si determina quindi con il rapporto tra il peso delle fibre presenti in una certa direzione su unità di superficie e il peso specifico delle fibre:

$$t_f = p_{fibre} / \gamma_{fibre} \quad \text{spessore di calcolo (nominale) del tessuto}$$

Dove:

p_{fibre} = peso delle fibre in g/m^2

γ_{fibre} = peso specifico delle fibre di carbonio = $1,8 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$

Quindi, ad esempio, per un tessuto unidirezionale di grammatura pari a 300 g/m^2 si ha:

$$t_f = 300 / (1,8 \cdot 10^6) = 0,000167 \text{ m} = 0,167 \text{ mm}$$

Gli FRP risultano competitivi in tutti quei casi in cui sia necessario limitare l'impatto estetico sulla struttura originaria o garantire un'adeguata reversibilità dell'intervento (edifici di interesse storico o artistico), ovvero quando la limitatezza dello spazio a disposizione renderebbe difficile il ricorso a tecniche tradizionali.

2.3. RESISTENZE DEI MATERIALI E CRITERI DI VERIFICA

2.3.1. Legno

La resistenza di calcolo $f_{m,d}$ a flessione si calcola con:

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

Dove:

k_{mod} = coefficiente legato alla durata del carico e all'umidità dell'ambiente (classe di servizio) dove si trova la trave (tab. 1); nel caso di combinazioni di carico che prevedono azioni con diverse durate, si sceglie il coefficiente che appartiene all'azione di minor durata;

k_h = coefficiente maggiorativo (variabile tra 1 e 1,3) da usarsi per sezioni con altezza inferiore a 150 mm, secondo la seguente formula:

k_h = minimo valore tra $(150 / h)^{0,2}$ e 1,3 (l'altezza "h" della sezione, in mm);

$k_h = 1$ per sezioni con altezza maggiore di 15 cm;

γ_M = coefficiente parziale di sicurezza del materiale, che per legno massiccio vale 1,5;

$f_{m,k}$ = resistenza caratteristica a flessione.

Materiale	Classe di servizio	Classe di durata del carico				
		Permanente (più di 10 anni)	Lunga (6 mesi – 10 anni)	Media (1 settimana – 6 mesi)	Breve (meno di una settimana)	Istantanea
Legno massiccio	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tabella 2.6. Valori del coefficiente k_{mod}

Classe di servizio 1	È caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20 °C e un'umidità relativa dell'aria circostante che non superi il 65% se non per poche settimane all'anno. Ad esempio, strutture in ambienti chiusi e asciutti.
Classe di servizio 2	È caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20 °C e un'umidità relativa dell'aria circostante che superi il 85% solo per poche settimane all'anno. Ad esempio, strutture all'aperto ma riparate dagli agenti atmosferici
Classe di servizio 3	È caratterizzata da umidità più elevata di quella della classe di servizio 2. Ad esempio, strutture all'aperto esposte agli agenti atmosferici o all'acqua.

Tabella 2.7. Classi di servizio

Per quanto riguarda la classe di durata del carico, si può generalmente assumere:

Classe di durata	Tipologia di carico
Permanente (più di 10 anni)	Il peso proprio e i pesi permanenti non rimovibili durante il normale uso della struttura
Lunga (6 mesi – 10 anni)	I pesi permanenti suscettibili di sostituzioni durante il normale uso della struttura; sovraccarichi variabili relativi a magazzini e depositi
Media (1 settimana – 6 mesi)	I carichi di esercizio in funzione della destinazione d'uso
Breve (meno di una settimana)	Alcune tipologie di carico, ad esempio un carico neve in funzione del sito
Istantanea	Vento e altre azioni istantanee

Tabella 2.8. Classi di durata del carico

2.3.2. Fibra di carbonio

La resistenza di calcolo a trazione vale:

$$f_{td} = \eta_a \cdot f_{tk} / \gamma_f$$

dove:

η_a = fattore di conversione ambientale che dipende dalle condizioni di esposizione.

Per fibra in carbonio e resina epossidica si ha:

Condizione di esposizione	η_a
Interna	0,95
Esterna	0,85
Ambiente aggressivo	0,85

Tabella 2.9. Fattore di conversione ambientale per fibra di carbonio e resina epossidica

f_{tk} = resistenza caratteristica a trazione del materiale FRP

γ_f = coefficiente parziale di sicurezza del composito fibroso, che dipende dalle modalità di collasso:

Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Valore
Rottura	γ_f	1,10
Delaminazione	$\gamma_{f,d}$	1,20 – 1,50

Tabella 2.10. Coefficienti parziali di sicurezza

Per il solo Stato Limite Ultimo di distacco dal supporto (delaminazione) sono invece suggeriti valori di $\gamma_{f,d}$ variabili, a giudizio del progettista, da 1,20 a 1,50 in funzione della maggiore o minore possibilità di prevedere, per la specifica applicazione, l'effettivo comportamento del composito nei riguardi del distacco dal supporto. A tal riguardo possono contribuire i risultati di indagini sperimentali condotte dal Produttore e/o dal Fornitore, ovvero appositamente e preventivamente eseguite nell'ambito della specifica applicazione.

2.3.3. Verifiche di resistenza per elementi in legno

Le NTC 2008 prevedono la possibilità di applicare la norma anche per la verifica di strutture in legno esistenti, purché si provveda ad una corretta valutazione delle effettive caratteristiche del legno, in particolare con riferimento agli eventuali stati di degrado (punto 4.4 NTC 2008). È quindi essenziale una valutazione sullo stato attuale dell'elemento strutturale, come indicato al successivo punto 3.1. La valutazione della sicurezza deve essere svolta secondo il metodo degli stati limite, ultimi (in genere per le verifiche di resistenza) o di esercizio (in genere per le verifiche di deformabilità) in base al tipo di verifica. L'analisi della struttura può essere svolta assumendo un comportamento elastico lineare del materiale. Le azioni caratteristiche da prendere in considerazione sono quelle riportate al cap. 3 delle NTC 2008 e devono essere cumulate secondo combinazioni tali da determinare le condizioni di carico più sfavorevoli per la singola verifica, in accordo con le norme tecniche vigenti.

Verifica a Flessione

Per quanto riguarda la verifica di resistenza alla flessione semplice (nel caso generale della flessione deviata), occorre calcolare le tensioni normali agenti nei due piani principali della sezione, secondo le seguenti formule (fig. 2.3):

$$\sigma_{m,x,d} = M_{x,d} / W_x \quad \sigma_{m,y,d} = M_{y,d} / W_y$$

Dove $M_{x,d}$ è il momento provocato dal carico P_y , mentre il momento $M_{y,d}$ è provocato dal carico P_x , mentre:

$$W_x = b \cdot h^2 / 6 \quad e \quad W_y = h \cdot b^2 / 6$$

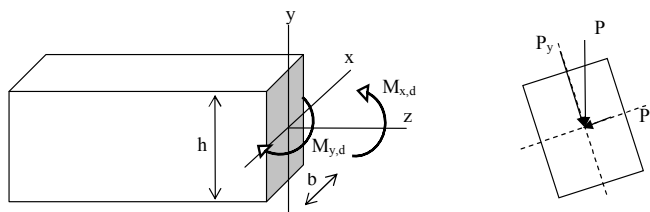


Figura 2.2. Carichi e sollecitazioni

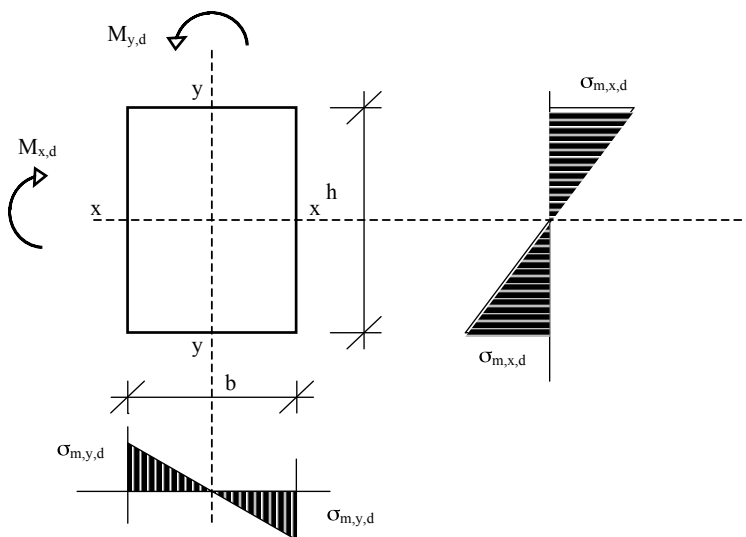


Figura 2.3. Tensioni normali dovute alla flessione

Affinché la trave risulti verificata, devono essere soddisfatte entrambe le condizioni:

$$K_m \cdot \sigma_{m,x,d} / f_{m,x,d} + \sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} < 1$$

$$\sigma_{m,x,d} / f_{m,x,d} + K_m \cdot \sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d} < 1$$

Dove:

$\sigma_{m,x,d}$ e $\sigma_{m,y,d}$ sono le tensioni di calcolo massime per flessione attorno agli assi principali, calcolate come visto in precedenza assumendo una distribuzione elastico-lineare delle tensioni sulla sezione trasversale della trave;

$f_{m,x,d}$ e $f_{m,y,d}$ sono invece le corrispondenti resistenze di calcolo a flessione, calcolate tenendo anche conto della dimensione trasversale della sezione mediante il coefficiente $K_{h,z}$, già visto al punto 2.3.1.;

K_m è invece un coefficiente che tiene conto della redistribuzione delle tensioni e della disomogeneità del materiale nella sezione trasversale e vale 0,7 per sezioni rettangolari e 1,0 per altre sezioni.

Quando si ha a che fare con solai piani, con travi disposte quindi con l'asse "y" verticale, siamo in presenza allora di flessione semplice retta e quindi la formula di verifica diventa:

$$\sigma_{m,x,d} / f_{m,x,d} < 1$$

Verifica di instabilità allo svergolamento

La verifica a flessione si completa poi con la verifica di instabilità allo svergolamento (flesso-torsionale) che consiste nel controllare che la trave in flessa (di solito nel piano verticale zy – forte) non svergoli nel piano debole (piano orizzontale xz).

La verifica consiste nel controllare che:

$$\sigma_{m,d} / (f_{m,d} \cdot K_{crit,m}) < 1$$

Dove:

$\sigma_{m,d}$ = tensione di calcolo massima per flessione, agente nel tratto di trave compreso tra due successivi ritegni torsionali;

$f_{m,d}$ = resistenza di calcolo a flessione, calcolata tenendo anche conto della dimensione trasversale della sezione mediante il coefficiente $K_{h,z}$, già visto al punto 2.3.1;

$K_{crit,m}$ = coefficiente riduttivo della tensione critica per instabilità dovuta allo sbandamento della trave, determinabile con $K_{crit,m} = \sigma_{m,crit} / f_{m,d}$.

Per travi aventi una deviazione laterale iniziale rispetto alla rettilineità nei limiti di accettabilità del prodotto, si possono assumere i seguenti valori per il coefficiente $K_{crit,m}$:

$$K_{crit,m} = \begin{cases} 1 & \text{per } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} & \text{per } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ 1 / \lambda_{rel,m}^2 & \text{per } 1,4 < \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

Dove $\lambda_{rel,m}$ viene definita snellezza relativa di trave a flessione:

$$\lambda_{rel,m} = (f_{m,k} / \sigma_{m,crit})^{0,5}$$

con $f_{m,k}$ resistenza caratteristica a flessione e $\sigma_{m,crit}$ tensione critica per flessione calcolabile con la formula di Prandtl-Michell, assumendo per i valori di rigidezza quelli corrispondenti al frattile 5%:

$$\sigma_{m,crit} = M_{x,crit} / W_x = \pi \cdot (E_{0,05} \cdot J_y \cdot G_{0,05} \cdot J_t)^{0,5} / (l_{ef} W_x)$$

Dove:

$E_{0,05}$ è il valore del modulo elastico normale parallelo alle fibre, riferito al frattile 5%;

$G_{0,05}$ è il valore del modulo elastico tangenziale parallelo alle fibre, riferito al frattile 5%;

poiché questo valore non è riportato nei profili caratteristici (par. 2.1) si può assumere:

$$G_{0,05} = E_{0,05} \cdot (G_{mean} / E_{0,mean});$$

$J_y = h \cdot b^3 / 12$ è il momento d'inerzia della sezione attorno all'asse debole "y";

$J_t = b^3 \cdot h / [3 \cdot (1 + 0,6 \cdot b / h)]$ è il momento d'inerzia torsionale della sezione;

l_{ef} è la lunghezza efficace della trave, che tiene conto sia delle condizioni di carico che di quelle di vincolo;

$W_x = b \cdot h^2 / 6$ è il modulo di resistenza della sezione attorno all'asse forte "x".

Per quanto riguarda la lunghezza efficace, questa si può determinare in maniera semplificata, utilizzando la tabella seguente, riportata nel DT206/2006, valida per travi con rotazione impedita agli appoggi:

Condizioni di vincolo	Tipo di carico o sollecitazione	l_{ef}
Semplice appoggio	Momento flettente costante nel tratto L	1,0·L
	Carico uniformemente distribuito	0,9·L
	Forza concentrata in mezzzeria	0,8·L
Incastro ad un estremo (mensola)	Carico uniformemente distribuito	0,5·L
	Forza concentrata all'estremo libero	0,8·L

Tabella 2.11. Valori della lunghezza efficace

Verifica a Taglio

Per quanto riguarda la verifica a taglio, deve essere soddisfatta la relazione:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

Dove:

τ_d è la tensione tangenziale massima valutata con la teoria di Jourawski;

$f_{v,d}$ è la corrispondente resistenza di calcolo a taglio

Per sezioni rettangolari si ha:

$$\tau_d = 1,5 \cdot T_d / A$$

con T_d = sollecitazione di taglio agente sulla sezione di area A.

2.3.4. Esempio

Si vogliono verificare le travi in legno (conifera C30) di un solaio per civile abitazione, di sezione rettangolare cm² 20x27h. Le travi hanno una luce netta di 4,80 m e interasse pari a 1,50m. Il solaio è costituito, oltre alle travi principali, da travicelli interasse 30 cm di sezione 9x9 cm² con scempiato in mezzane da 3 cm e sovrastante sottofondo in malta di 5 cm e pa-