

Sulla risposta sismica di strutture in PFRP: il caso della copertura della Chiesa di S.M. Paganica all'Aquila - Parte I: il materiale

S. Russo¹ ■

Sommario

Lo studio illustra le prestazioni meccaniche del composito fibrorinforzato prodotto a mezzo di pultrusione, considerando quanto presente in letteratura, nelle raccomandazioni tecniche e nelle normative già disponibili. L'inquadramento - Parte I dedicata al materiale FRP pultruso - ha carattere preliminare e introduttivo rispetto alla Parte II che presenta il calcolo di una struttura in

PFRP (pultruded fiber reinforced polymer) già realizzata in zona sismica. Il presente lavoro evidenzia il comportamento dei profili pultrusi in campo statico e dinamico e le principali caratteristiche prestazionali quali il ridotto peso proprio, elevate resistenze e durabilità, facilità di assemblaggio; la non trascurabile deformabilità e l'elevato periodo di vibrazione a fronte di un comportamento elastico-lineare sino a collasso.

1. Il materiale composito fibrorinforzato pultruso

L'impiego dei materiali FRP sia per rinforzo sia per nuove costruzioni rappresenta ormai una realtà consolidata dell'ingegneria civile sia da un punto di vista del calcolo sia da un punto di vista delle costruzioni realizzate, sia, infine, con riferimento alle normative e raccomandazioni tecniche già disponibili, per quanto sussistono alcune limitazioni nell'impiego per nuove costruzioni in zona sismica a causa del loro comportamento elasto - fragile.

Ad oggi non è ancora possibile una standardizzazione del materiale strutturale pultruso nonostante le normative disponibili abbiano comunque allineato le tipologie di prova ed i limiti prestazionali di impiego, (UNI EN 2003). Ciò è dovuto all'impossibilità di definire identiche procedure di pultrusione e percentuali in volume di fibra e matrice che possano delimitare le prestazioni indipendentemente dalla provenienza del materiale pultruso e dalla ditta di pultrusione. In fase di progettazione e calcolo si può ovviare facendo ricorso al *design by testing* di volta in volta connesso al lotto di produzione dei pultrusi da utilizzare per la struttura. Limitatamente al comportamento in campo statico sono disponibili raccomandazioni tecniche emanate dal CNR, (DT 205/2007).

Gli elementi strutturali FRP pultrusi vengono oggi prodotti perlopiù con rinforzo in fibra di vetro (fra il 30% e il 50% in volume) e matrice in vinilestere o poliestere; le loro sezioni riprendono in

substanza quanto già disponibile nel settore della carpenteria metallica - si veda la figura 1 relativa ad alcune sezioni - mentre sarebbe auspicabile l'ideazione di forme strutturali che sappiano altresì tenere conto delle specifiche tecniche di fabbricazione degli FRP e sfruttare al meglio la possibilità di orientare nel modo più efficace le fibre, sia negli elementi monodimensionali sia in quelli bidimensionali. Per confronto rispetto all'acciaio da figura 1 si rileva come il profilo a doppio T abbia spessore dell'anima diverso rispetto alle flange; ciò è dovuto sia al fatto che nell'anima viene inserita una minore percentuale di fibra rispetto alle flange - che assorbono le tensioni normali indotte da flessione - sia al ridotto valore di G che rende più vulnerabile il profilo rispetto a fenomeni del secondo ordine di tipo flesso-torsionale. Il tema è di particolare complessità e pur tuttavia i tempi per la definizione di una produzione autonoma, che si distacchi anche dai criteri di assemblaggio e di risposta meccanica del materiale acciaio, sembrano essere maturi.

Ad oggi sono reperibili sul mercato italiano e internazionale elementi in PFRP monodimensionali a sezione aperta o chiusa di distinte geometrie e spessore ed elementi bidimensionali, pannelli, rispetto ai quali è possibile operare una progettazione che inizia sin dal materiale con la scelta dei più idonei componenti fibra e matrice in funzione delle specifiche strutturali richieste. Il comportamento meccanico del materiale pultruso è condizionato dalla presenza dei componenti,

¹ Professore associato di Tecnica delle Costruzioni, Università Iuav di Venezia - ✉ russo@iuav.it

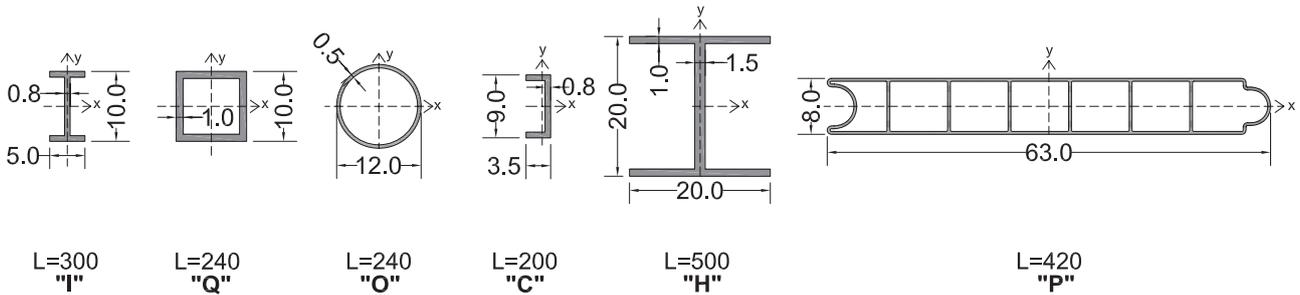
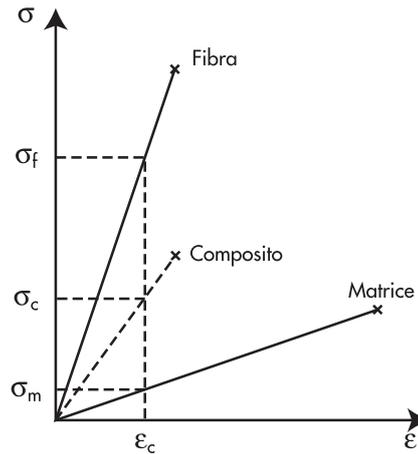


Fig. 1
Sezioni strutturali standard in FRP pultruso (misure in cm).

Fig. 2
Comportamento medio a trazione.



come evidenziato in figura 2 che illustra in forma schematizzata il comportamento medio a trazione del composito rispetto alle prestazioni di fibra e matrice. Gli elementi strutturali pultrusi in FRP possono avere sezioni standard, del tutto simili a quelle in acciaio, o rispondere alle richieste puntuali del progettista per cui gli stampi di pultrusione vengono ideati ad hoc. Le connessioni possono essere realizzate a mezzo di incollaggio o bullonatura, o effettuate entrambe in presenza di particolari esigenze di irrigidimento, mentre la saldatura è inibita dalla presenza della matrice. Da un punto di vista della legge costitutiva il materiale FRP pultruso ha un comportamento elastico - fragile ed è anisotropo trasversalmente isotropo in quanto è condizionato dalla tecnica di fabbricazione di pultrusione che determina una notevole differenza prestazionale tra direzione longitudinale di giacitura delle fibre, roving, asse meccanico dominante (asse z di Fig. 3), e le direzioni trasversali (assi x e y di Fig. 3), mat.

Margini di miglioramento del comportamento deformativo - riconducibile per certi versi a fenomeni di duttilità, anche se il termine è comunque improprio - intervengono, come indicato nella Parte II, nel passaggio dal materiale alla struttura pultrusa in FRP nella quale venga operato un adeguato assemblaggio dell'insieme in grado di minimizzare gli effetti derivati dai limiti imposti dall'assenza di plasticità. Il peso del materiale

FRP pultruso varia in funzione della percentuale di fibra presente ed è comunque compreso fra 1600-1800 kg/m³; presenta valori medi di resistenza assimilabili all'acciaio mentre il comportamento a compressione è condizionato in modo sensibile dall'elevata deformabilità - il valore del modulo elastico medio a compressione longitudinale si attesta intorno ai 25.000-30.000 MPa - e dalla facilità di innesco di fenomeni del secondo ordine. Aspetti di verifica del valore del carico critico di instabilità in elementi compressi possono essere ben valutati assimilando le flange al comportamento di lastre ortotrope variamente vincolate, (Cosenza et al., 1996). Il materiale pultruso contiene fillers inorganici e catalizzatori chimici ritardanti rispetto al rischio di incendio e di produzione di fumi tossici ed è resistente ai campi elettromagnetici ed ai raggi ultravioletti, con prestazioni molto elevate i termini di durabilità complessiva. Rispetto a tutti gli altri materiali strutturali quello pultruso in FRP può essere sensibilmente modificato e dunque progettato in fase di scelta dei componenti. È sufficiente in tal senso rammentare come la pultrusione consenta di definire tipologia, quantità e giacitura della fibra di rinforzo in percentuale, così come per le caratteristiche della matrice, in funzione dell'impiego strutturale richiesto. In presenza ad esempio di elementi monodimensionali pultrusi con sezione ad "I" impiegati con funzione di trave, alcune

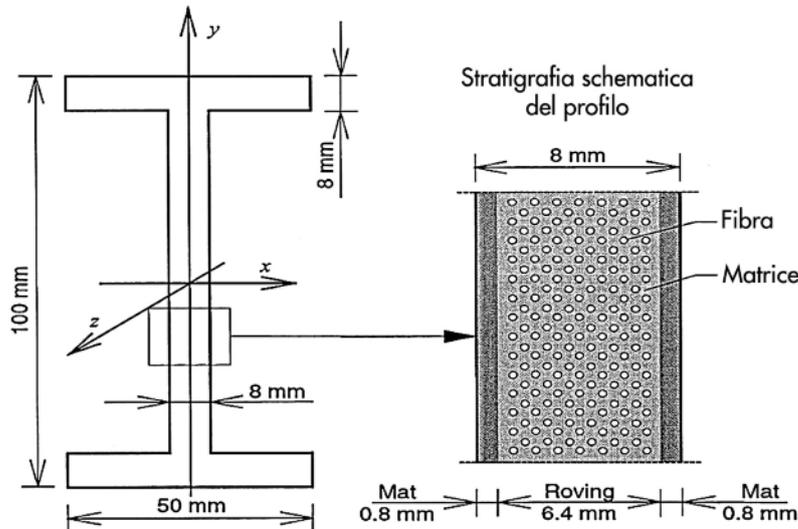


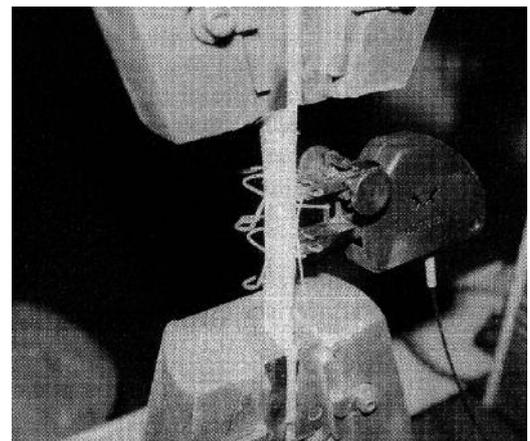
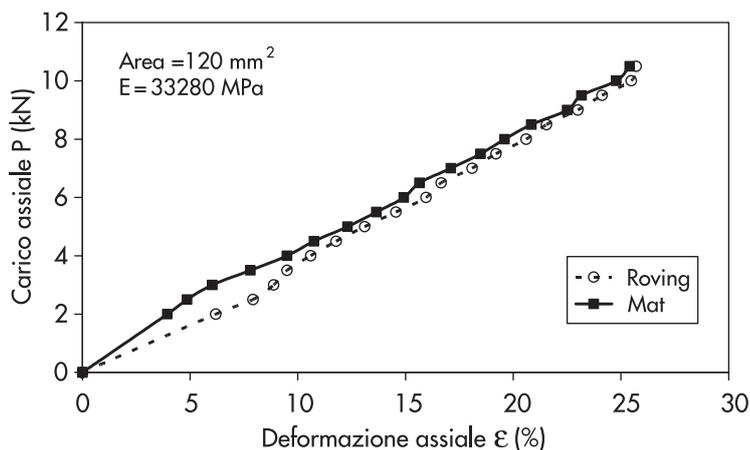
Fig. 3
Schema della distribuzione delle fibre nei profili pultrusi rispetto assi x - y - z.

prove hanno evidenziato come le prestazioni meccaniche disaccoppiate delle flange rispetto all'anima di uno stesso profilo siano discoste, a favore delle flange, in quanto in esse più rinforzo in fibra viene inserito in fase di pultrusione al fine di meglio rispondere agli stati tensionali di trazione e compressione indotti dagli sforzi normali di flessione (Russo, 2007). Altre tecniche di fabbricazione di elementi strutturali in FRP quali il filament winding (tecnica di avvolgimento) e lo stampaggio consentono rispettivamente di dare vita ad elementi tubolari o scatolari cavi nei quali l'avvolgimento delle fibre di rinforzo segue il criterio di efficienza meccanica della cerchiatura, e di creare per sovrapposizione di strati di fibra elementi utilmente impiegabili quali piatti, piastre, elementi di raccordo nelle connessioni o elementi bidimensionali con sezioni piane o curve. La necessità di comprendere il comportamento prestazionale meccanico del composito rispetto ai componenti impiegati e dichiarati dai produttori è comunque affrontata in modo chiaro e attendibile attraverso un approccio micro-mec-

canico con la Teoria delle miscele (Agarwal et al., 1990), che propone una sostanziale omogeneizzazione dei due componenti attraverso i corrispondenti parametri meccanici ipotizzando altresì la perfetta aderenza tra fibra e matrice, come peraltro confermato dal diagramma sperimentale di figura 4. Un approccio più complesso, di tipo macromeccanico, più preciso in termini di definizione delle prestazioni del composito, è possibile con l'uso della teoria dei laminati, (Agarwal et al., 1990).

Il materiale pultruso può essere impiegato in accoppiamento a calcestruzzo, come già evidenziato da diverse applicazioni sia per creare elementi trave che riprendono il funzionamento delle sezioni composte acciaio-calcestruzzo, sia per creare elementi pilastro prevedendo il getto di calcestruzzo all'interno di sezioni cave in FRP (Di Tommaso et al., 1999). Da un punto di vista delle valutazioni delle caratteristiche del materiale FRP pultruso rispetto ai parametri dell'ingegneria dinamica, il lavoro evidenzia alcuni risultati a carattere sperimentale relativi alla determi-

Fig. 4
Andamento della curva carico-deformazione a trazione di mat e roving.



nazione del periodo di vibrazione, del modo fondamentale e del coefficiente di smorzamento. Il materiale pultruso FRP è caratterizzato da una ridotta capacità di dissipazione a fronte però di

una massa molto contenuta che accoppiata ad una elevata deformabilità consente una riduzione degli effetti dell'azione sismica in termini soprattutto di sollecitazioni taglianti, (Parte II).

2. Le prestazioni dei componenti (fibra e matrice) e del materiale pultruso

Le tabelle 1 e 2 riportano rispettivamente le caratteristiche meccaniche delle fibre di rinforzo e delle matrici di maggior impiego per la realizzazione di profili pultrusi. I valori indicati sono medi. Nella tabella 3 è indicato il quadro delle caratteristiche meccaniche del materiale

composito pultruso. Il coefficiente di sicurezza relativo ai profili in PFRP impiegati nella struttura (parte II) è pari a 2, considerando la sezione trasversale al netto delle forature; il criterio segue in parte l'approccio alla carpenteria metallica per impieghi assimilabili, in parte le risultanze sperimentali di alcuni test e l'approccio del DT CNR 205/2007 sui profili in PFRP.

Tabella 1 - Caratteristiche meccaniche e prestazionali delle fibre di rinforzo

Fibra	Resistenza a Trazione (MPa)	Modulo elastico (GPa)	Deformazione a rottura (per mille)	Coefficiente dilataz. Termica Longitudinale (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
Carbonio	2400-5700	290-400	3-18	-1,6-0,1
Vetro	2400-3150	62-142	15-44	60
Aramide	3300-4500	72-87	48-50	3-5
PVA	870-1350	8-28	90-170	/

Tabella 2 - Caratteristiche meccaniche e prestazionali delle matrici

Matrice	Modulo long. Trazione GPa	Resistenza Trazione MPa	Densità γ g/cm ³	Modulo Fless. GPa	Coeff. Esp. Term. 10 ⁻⁶ °C	Assorbimento acqua %
Poliestere	2,0-4,5	40-105	1,2-1,4	/	50-100	0,14-0,7
Epossidica	2,5-4,50	50-135	1,1-1,3	/	40-65	0,10-0,15
Poliamidica	/	110-120	1,4	3,0-4,0	90	0,2-0,3
Fenolica	/	50-60	1,3	/	40-120	0,1-0,2

Tabella 3 - Caratteristiche meccaniche dei materiali composito pultruso

Composito	Densità γ kg/m ³	Resistenza Trazione MPa	Modulo long. GPa	Deformazione a rottura (per mille)	Coefficiente dilataz. Term. Long. (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
GFRP (glass fiber reinforced polymer)	1500-1800	600-700	30-42	14-20	10
CFRP(carbon fiber reinforced polymer)	1500-1800	1200-3000	110-160	12-15	0
AFRP(aramid fiber reinforced polymer)	1500-1800	1000-1800	46-72	25-40	-6

3. Le caratteristiche meccaniche del materiale PFRP

3.1 Campo statico

I profili pultrusi presentano una elevata deformabilità che richiede la messa in conto della deformabilità a taglio sia nel calcolo delle frecce di elementi inflessi sia nella valutazione dei carichi critici per instabilità di elementi compressi

e/o inflessi. Per quanto riguarda il calcolo delle frecce, una valutazione attendibile può essere ottenuta impiegando la (1), che riprende il modello di trave di Timoshenko, per una trave appoggiata con carico concentrato in mezzera:

$$\eta = \frac{PL^3}{48E_{LT}J_x} + \frac{\chi PL}{4G_{LT}A_v} \tag{1}$$

Il diagramma carico-freccia di figura 5 evidenzia sia la legge costitutiva sino a collasso, sia margini, seppur contenuti, di riduzione del grado di fragilità con caratteristiche strettamente influenzate dal rapporto geometrico luce/altezza e dalla diversa deformabilità a taglio.

Le modalità di buckling per elementi compressi con prevalenza di effetti di tipo globale e di tipo locale sono illustrate nelle figure 6 e 7, con particolare riferimento, in figura 7, alla presenza di fenomeni di instabilità distorsionali locali evidenti. Il calcolo dei carichi critici può essere determinato

nel primo caso facendo ricorso alla formula di Eulero con un modulo di elasticità mediato fra comportamento a trazione e compressione (Di Tommaso et al., 2002). Nel secondo caso utilizzando le rigidità flessionali di piastre ortotrope opportunamente vincolate e assumendo quale riferimento il valore di schiacciamento sperimentale (DT CNR 205/2007). Il diagramma di figura 8 evidenzia l'entità della freccia residua dopo una prova a lungo termine, (Russo, 2007) con valore di carico applicato pari a metà del carico di collasso predeterminato per via sperimentale.

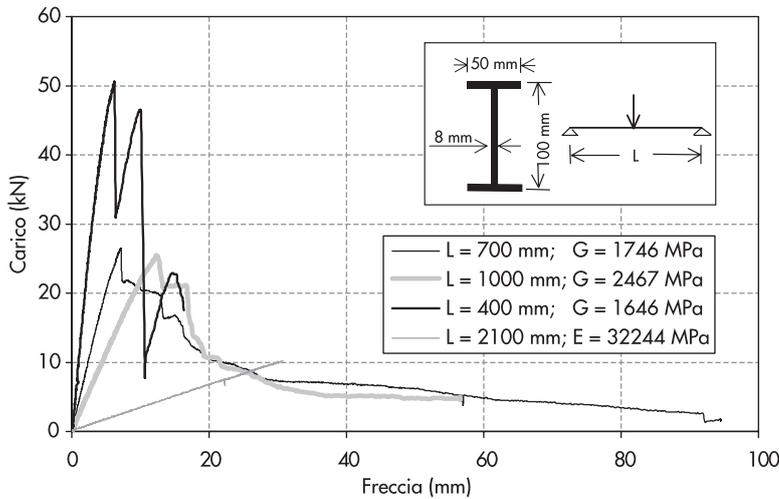


Fig. 5
Diagramma carico-freccia di travi in PFRP di luce variabile.

Fig. 6
Diagramma carico-accorciamento-spostamento laterale di colonna in PFRP con sezione ad "I".

Fig. 7
Diagramma carico-accorciamento-spostamento laterale di colonna in PFRP con sezione ad "H".

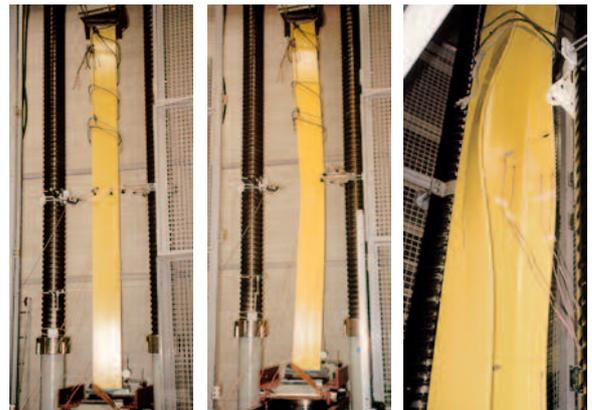
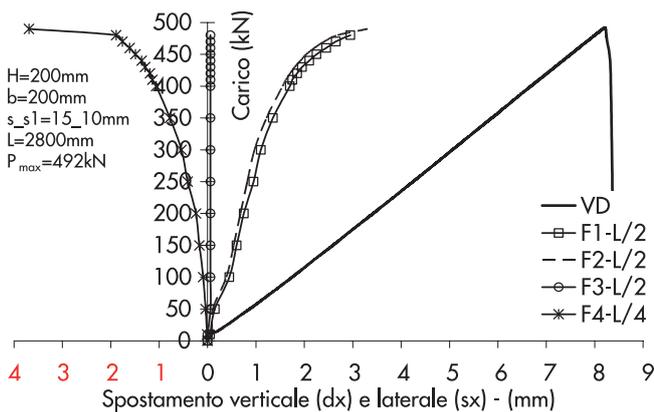
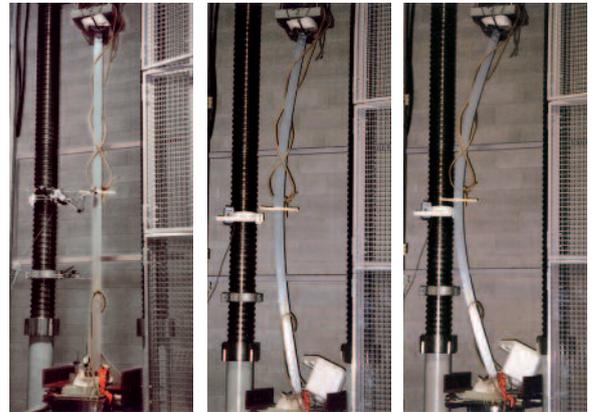
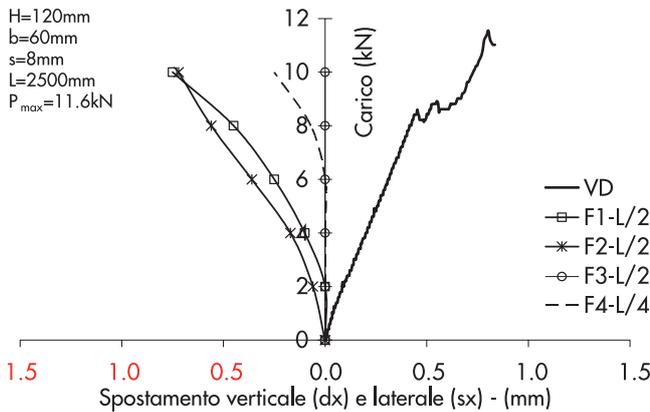
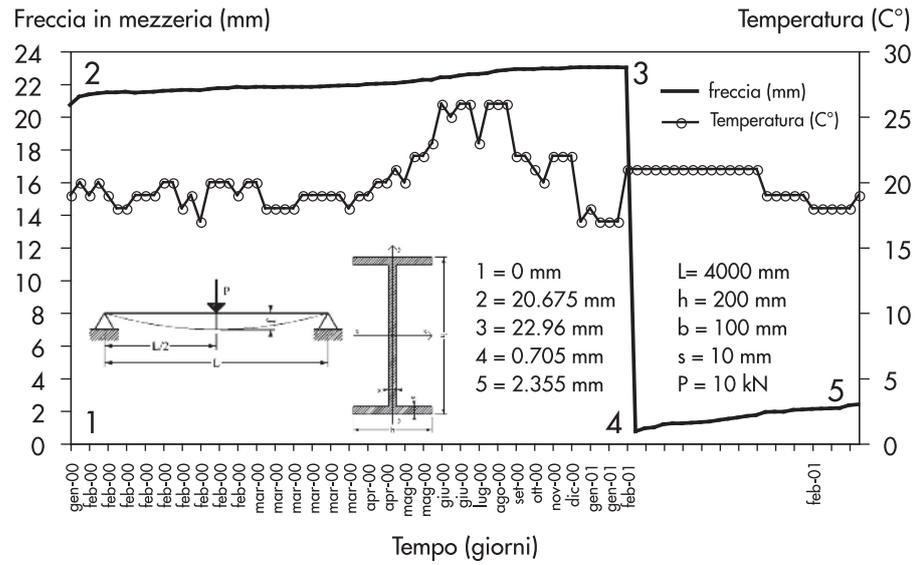


Fig. 8
Diagramma carico freccia,
prova a lungo termine.



3.2 Campo dinamico

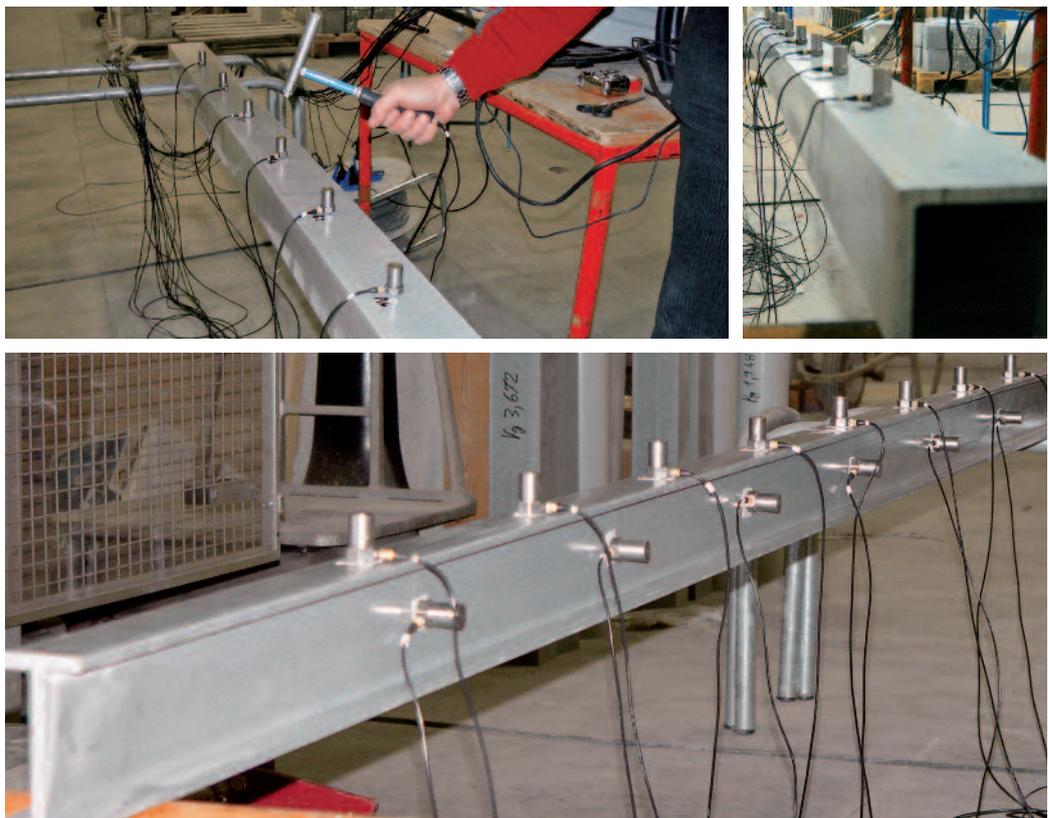
Con riferimento ai profili indicati in figura 1 si è condotta una campagna di prove volta ad evidenziare per via sperimentale le caratteristiche dinamiche in presenza di vibrazioni libere e per condizioni al contorno di semplice appoggio, (Fig. 9); i tests si riferiscono a profili aventi pari caratteristiche rispetto a quelli impiegati per la realizzazione della struttura illustrata nella Parte II.

Con riferimento all'elemento bidimensionale - pan-

nello i risultati illustrati nella figura 10 evidenziano le frequenze corrispondenti ai modi di vibrare rilevati per via sperimentale.

La risposta nel dominio di frequenza relativa a tutte le sezioni con indicazioni del primo modo è illustrata nella figura 11 per i profili appoggiati e in figura 12 per i profili incastrati alle estremità; il dettaglio dei modi di vibrare e dei corrispondenti spostamenti è indicato nelle figure 13, 14, 15 e 16 per le sezioni strutturali più significative (Russo, 2007).

Fig. 9
Test vibrazionali.



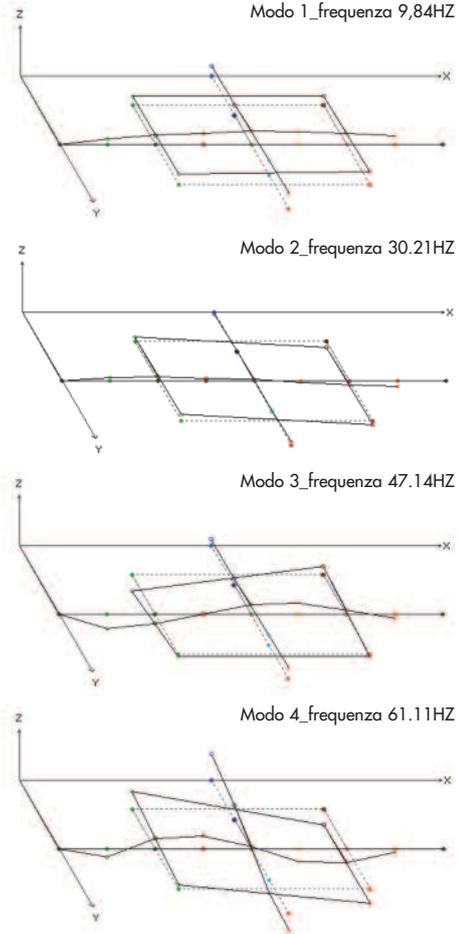


Fig. 10
Pannello in FRFP, test
vibrazionale e modi di
vibrare.

Fig. 11
Risposta nel dominio di
frequenza; elementi in FRFP
semplicemente appoggiati.

Fig. 12
Risposta nel dominio di
frequenza; elementi in FRFP
incastrati.

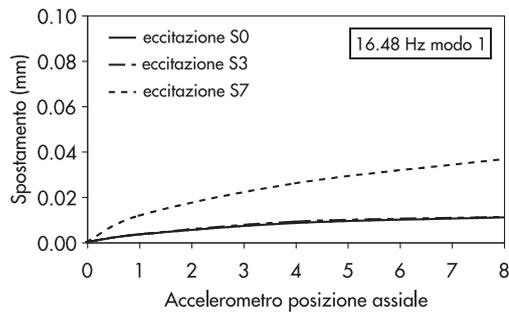
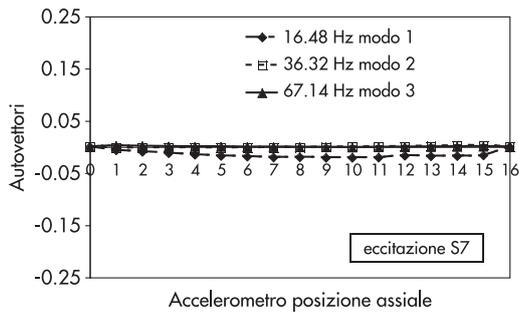
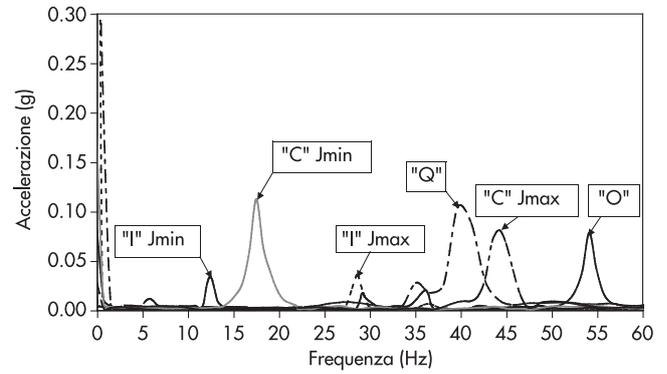
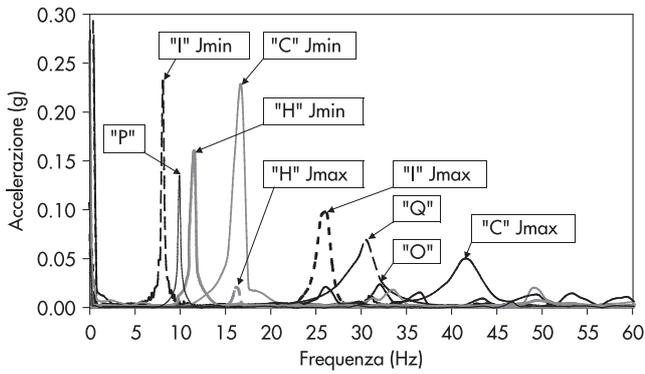
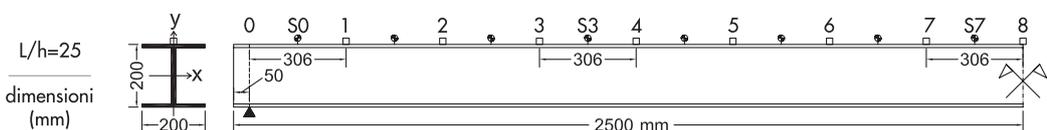


Fig. 13
Modo di vibrare e
spostamenti.



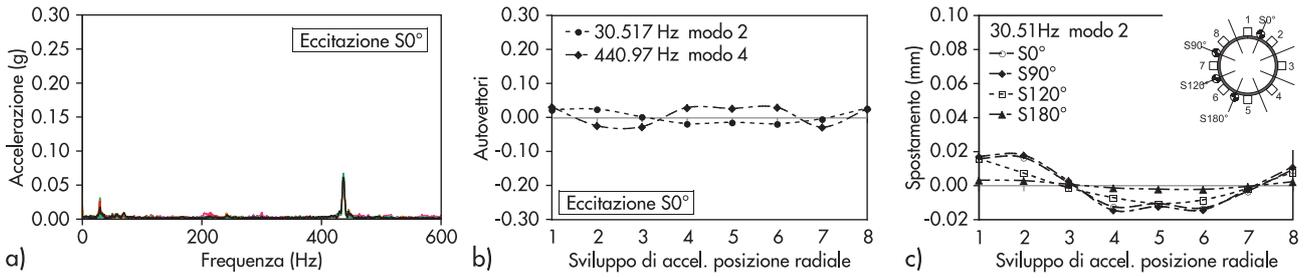


Fig. 14
 Modo di vibrare e spostamenti.

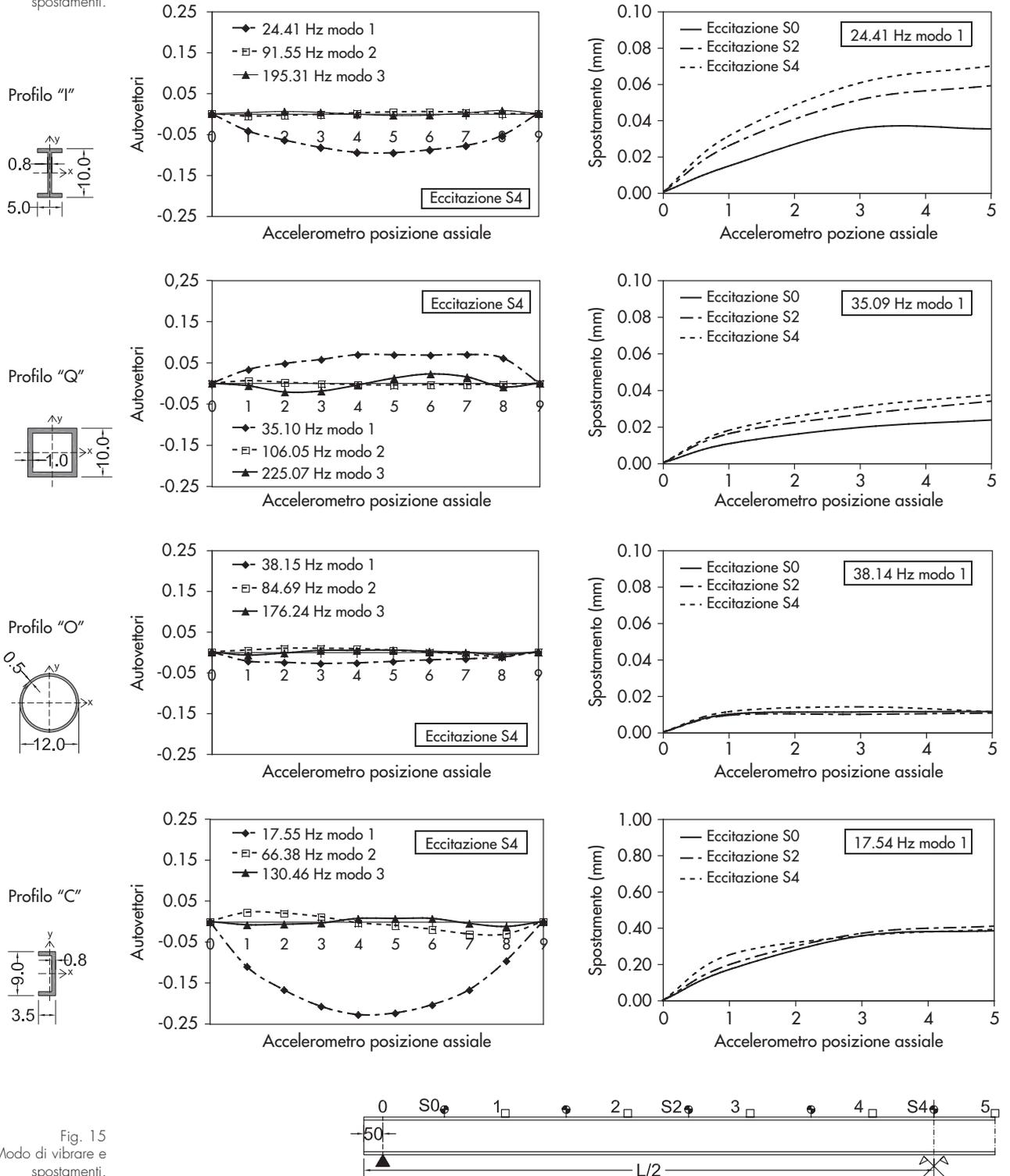
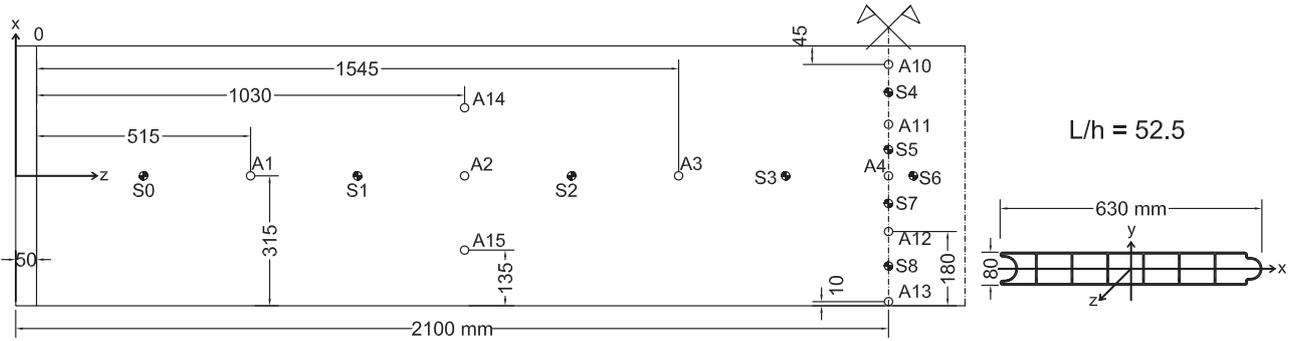
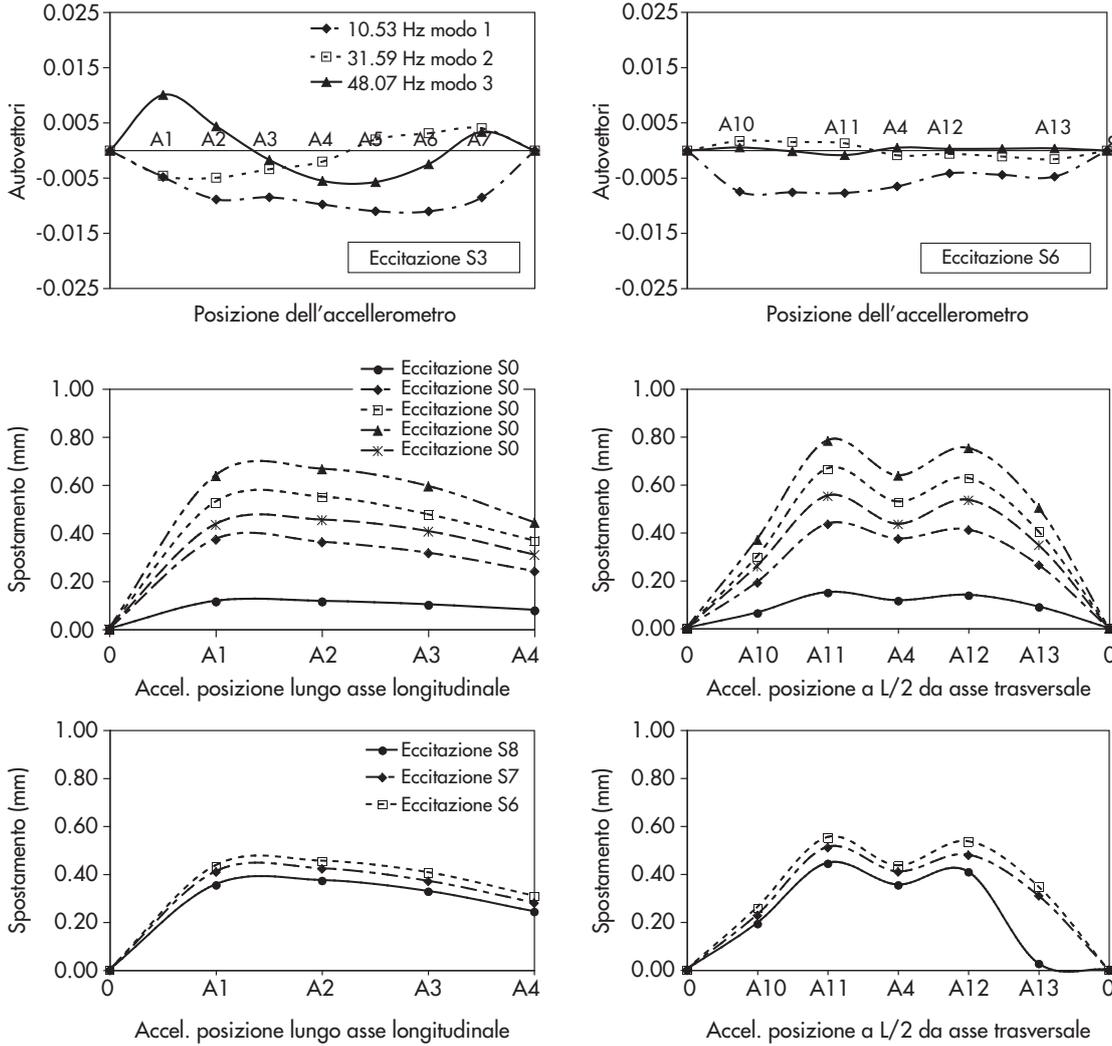


Fig. 15
 Modo di vibrare e spostamenti.

Fig. 16
 Modo di vibrare
 e spostamenti.



3.2.1 Valutazione del coefficiente di smorzamento

Considerando ora le caratteristiche del materiale si è poi determinato, sempre in presenza di vibrazioni libere e per i profili pultrusi di figura 1 - con le condizioni di semplice appoggio - il coefficiente di smorzamento ξ con il metodo del decremento logaritmico, per cui si ottiene:

$$\delta = \frac{1}{cn} \ln \frac{x_0}{x_{cn}} \quad (2)$$

In cui, δ = decremento logaritmico; cn = numero dei cicli; x_0 = ampiezza iniziale; x_{cn} = ampiezza finale.

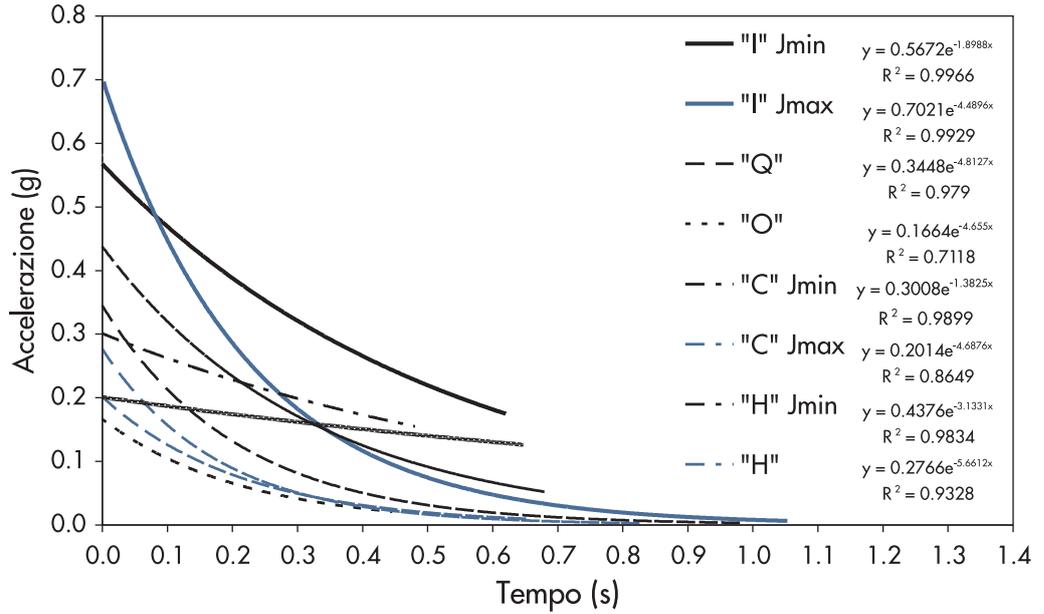
Il coefficiente di smorzamento (ξ) è dunque determinato mediante la seguente formulazione:

$$\xi = 1 + \left(\frac{4\pi^2}{\delta^2} \right)^{-0.5} \quad (3)$$

La formulazione (3) può peraltro essere semplificata per piccoli valori di ξ per cui quando $(1 - \xi^2)^{0.5}$ è prossimo ad 1, si avrà:

$$\xi \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (4)$$

Fig. 17. Confronto della risposta di distinti profili in PFRP.



I valori finali del coefficiente di smorzamento calcolati per le sezioni di figura 1 sono indicati nella tabella 4.

Tabella 4 - Coefficiente di smorzamento ξ

Elemento strutturale	ξ (%)
"I", J _{min}	0.96 (20 cycles)
"I", J _{max}	2.59 (28 cycles)
"Q"	2.72 (28 cycles)
"O"	2.26 (16 cycles)
"C", J _{min}	1.45 (7 cycles)
"H", J _{min}	1.18 (30 cycles)
"H", J _{max}	3.4 (27 cycles)
"P"	0.97 (35 cycles)

Il diagramma di figura 17 mette in evidenza per confronto le risposte dei profili in PFRP analizzati con una indicazione evdiente delle distinte caratteristiche di dissipazione.

I dati di figura 17 sono frutto dell'interpolazione effettuata attraverso la seguente relazione:

$$y = g \cdot e^{-\xi \omega t} \tag{5}$$

Avendo indicato con g = accelerazione; ω = frequenza angolare; t = tempo.

3.2.2 Confronto numerico

Al fine di proporre un confronto fra risultati sperimentali e approccio numerico, sono state considerate le formulazioni oggi disponibili in presenza di vibrazioni flessionali. Per la valutazione della frequenza propria per le condizioni di semplice appoggio (f_{n-s}) viene utilizzata la seguente formulazione:

$$f_{n-s} = n^2 \frac{\pi}{2} \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{E_z J_{ag}}{A \gamma}} \tag{6}$$

In cui n = numero dei modi di vibrare; L = lunghezza dell'elemento strutturale; E_z = modulo elastico longitudinale; J = momento d'inerzia; ag = accelerazione di gravità, A = sezione trasversale; γ = densità del materiale.

Le caratteristiche del materiale pultruso ed in particolare l'elevata deformabilità complessiva con valori di G particolarmente contenuti ed una evidente vulnerabilità rispetto alla torsione, richiedono tuttavia una trattazione più accurata che non si limiti alla sola messa in conto della risposta flessionale. In tal senso viene proposta la seguente formulazione (Boscato e Russo, 2009):

$$\left(\sqrt{\frac{E_z J_{ag}}{A \gamma}} \right)^2 \frac{\pi^4 n^4}{L^4} - (\omega)^2 - \frac{n^2 \pi^2 \rho^2}{L^2} \left(1 + \frac{E_z}{k G_{ZX, ZY}} \right) (\omega)^2 + \left(\frac{\rho^2 \gamma}{k a g G_{ZX, ZY}} \right) (\omega)^4 = 0 \tag{7}$$

In cui ρ = inerzia torsionale; $G_{ZX, ZY}$ = modulo a taglio; mentre il coefficiente (k), che dipende direttamente dalla forma della sezione, viene assunto pari a:

$$k = \frac{J b_0}{S_0 A} \tag{8}$$

In cui b_0 = larghezza della sezione trasversale; S_0 = momento statico
L'effetto della deformabilità a taglio e dell'inerzia torsionale indicati nella (7) integrano dunque

Tabella 5 - Confronto teorico-sperimentale relativo al primo modo di vibrare

Sezione	FEA (Hz)	(Hz) formula (6)	(Hz) formula (9)	(Hz) sperimentale
"I", J _{min}	7.07	7.01	6.54	7.02
"I", J _{max}	24.38	24.59	22.81	24.41
"Q"	37.66	38.34	34.71	35.09
"O"	41.48	42.21	38.46	38.14
"C", J _{min}	15.14	14.37	13.52	14.49
"H", J _{min}	9.97	10.21	9.75	10.5
"H", J _{max}	18.80	18.39	17.54	16.47
"P"	11.93	10.74	10.22	11.9

la (6) di riferimento che assumerà la seguente forma finale:

$$f_{n-s} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_z J_{ag}}{A_Y}} \frac{n^2}{L^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{2} \pi^2 \rho^2 \frac{n^2}{L^2} \right) \left(1 + \frac{E_z}{k G_{ZX, ZY}} \right) \right] \quad (9)$$

Il confronto conclusivo relativamente al primo modo di vibrare determinato per via sperimentale e per via numerica è illustrato nella tabella 5.

3.2.3 Confronto con materiali strutturali tradizionali
Appare opportuno condurre un primo confronto prestazionale fra le caratteristiche dinamiche

dei profili compositi fibrorinforzati prodotti a mezzo di pultrusione e materiali strutturali tradizionali, confrontabili per tipologia e caratteristiche di impiego, quali l'acciaio e l'alluminio. Il confronto è stato condotto limitatamente alla determinazione delle frequenze fondamentali, impiegando la formulazione (6), immaginando sezioni equivalenti a quelle di figura 1, per la sola condizione di trave appoggiata. Le caratteristiche dei materiali di confronto sono indicate nella tabella 6, mentre i risultati prestazionali vengono riportati nelle tabelle 7 e 8 nelle quali si è indicato con DL il peso proprio del singolo materiale; la tabella 9, infine, riporta per confronto i valori delle frequenze fondamentali.

Tabella 6 - Caratteristiche dei materiali acciaio e alluminio

Materiale	E (MPa)	G (MPa)	ν	γ (kg/m ³)
Acciaio	210000	80000	0.25	7850
Alluminio	69000	25862	0.334	2700

Tabella 7 - Confronto acciaio-PFRP

Sezione	Dimensioni trasversali (cm)	L (cm)	J _{max} (cm ⁴)	A _S (cm ²)	DL _S (kg)	DL _S /DL _{GFRP} (%)
"I"	5.75x2.9x0.46	300	22.89	4.87	11.46	132
"H"	11.5x11.5x0.86x0.58	500	475.5	22.17	87	140
"Q"	5.75x5.75x0.575	240	53.88	11.91	22.44	150
"P"	36.2x4.6x0.23	420	88.56	24.59	81.06	139

Tabella 8 - Confronto alluminio-PFRP

Elemento	Dimensioni	L (cm)	J _{max} (cm ⁴)	A _A (cm ²)	DL _A (kg)	DL _A /DL _{GFRP} (%)
"I"	7.6x3.8x0.6	300	69.69	8.49	6.87	79
"H"	15.2x15.2x1.1x0.76	500	1447.2	38.68	52.2	84
"Q"	7.6x7.6x0.76	240	163.99	20.78	13.46	90
"P"	48x6x0.3	420	269.54	43.05	48.8	84

Tabella 9 - Confronto frequenze fondamentali

Sezione	Materiale	Frequenza fondamentale (Hz)
"V", J _{max}	GFRP	24.41
	Alluminio	26.79
	Acciaio	20.72
"H", J _{max}	GFRP	16.47
	Alluminio	20.04
	Acciaio	15.5
"Q"	GFRP	35.09
	Alluminio	41.77
	Acciaio	32.31
"P"	GFRP	11.9
	Alluminio	11.7
	Acciaio	9.07

4. Osservazioni conclusive sulle caratteristiche dinamiche del materiale PFRP

La caratterizzazione dinamica di elementi monodimensionali in FRP pultrusi evidenzia per distinte condizioni di vincolo elevati periodi di vibrazione. La caratterizzazione dinamica è stata condotta in presenza di elementi in PFRP assoggettati alle sole vibrazioni libere per cui il campo delle osservazioni esposte di seguito non coinvolge la legge costitutiva del materiale PFRP, di tipo elasto - fragile, che avrebbe invece sensibile influenza sia nella risposta di strutture - come illustrato nella parte II dello studio - sia in presenza di forzanti. Con riferimento ai risultati delle analisi e delle sperimentazioni esposte nella ricerca, la ridotta capacità dissipativa che risulterebbe derivare sulla base dei risultati ottenuti è parzialmente bilanciata dai benefici derivanti dal ridotto peso proprio a fronte di buoni valori di resistenza. Si rileva, in particolare, come la geometria dei profili in PFRP oggetto d'indagine, in particolare nel passaggio dalle sezioni aperte a quelle chiuse, incida sensibilmente sulla risposta dinamica con un incremento delle frequenze a favore delle sezioni scatolari; nel caso specifico dell'elemento bidimensionale pannello tipo 'sandwich', (si veda Tab. 9) i risul-

tati mettono in evidenza valori tra loro assimilabili anche al variare del materiale. Appare inoltre evidente dai risultati esposti come in presenza di elementi prodotti per pultrusione, caratterizzati da un asse meccanico dominante, sia proprio il tipo di sezione ed il tipo di unione fra le parti a consentire un potenziale miglioramento della risposta in campo dinamico capace di bilanciare le ridotte prestazioni che caratterizzano le direzioni trasversali. Gli algoritmi di calcolo e le usuali teorie disponibili in letteratura bene si applicano agli elementi strutturali in PFRP. In tal senso appare opportuno mettere sempre in conto gli effetti derivati dalla deformabilità a taglio abitualmente trascurata nell'impiego di elementi in acciaio. I test hanno evidenziato una buona risposta del materiale in PFRP in termini di omogeneità meccanica pur in presenza di una distribuzione non perfettamente uniforme dei componenti fibra e matrice nella sezione. Per quanto riguarda la valutazione sperimentale del coefficiente di smorzamento in presenza di vibrazioni libere, esso varia fra 1% e 3% e risulta sensibilmente più elevato negli elementi a sezione chiusa con valori finali non discosti rispetto a sezioni equivalenti di materiali strutturali tradizionali.

5. I materiali impiegati per la struttura di copertura della Chiesa di S.M. Paganica

I profili in composito fibrorinforzato pultruso utilizzati per la realizzazione della copertura della Chiesa di S.M. Paganica all'Aquila - la cui progettazione sismica viene illustrata in dettaglio nella Parte II - hanno le caratteristiche indicate nella tabella 3, corrispondenti alla sigla GFRP, e possiedono il 40% di fibra di vetro, tipo E, in volume. Per quanto riguarda la matrice, essa è

assimilabile a quella in poliestere i cui valori prestazionali medi sono indicati nella tabella 2. I piatti in FRP sono prodotti per stampaggio sempre con i medesimi componenti utilizzati nei profili pultrusi (ma solo con fibre tipo mat e non roving); le caratteristiche dei piatti sono sensibilmente condizionate dalla tecnica di stampaggio, alcuni dati sono illustrati nella tabella 10. I bulloni sono in acciaio zincato classe 8.8, di tipo semi filettato.

Tabella 10 - Caratteristiche meccaniche dei piatti di collegamento in FRP prodotti per stampaggio

Resistenza flessione perpendicolare stratificazioni (MPa)	Modulo flessione (MPa)	Resistenza compressione perpendicolare stratificazioni (MPa)	Resistenza all'urto parallelo stratificazioni (KJ/M ²)	Resistenza trazione (MPa)	Resistenza sfaldamento (N)
130	8000	200	35	70	4000

Bibliografia

Agarwal B.D., Broutman L.J. (1990) - Analysis and performances of Fiber Composites, Second Edition, John Wiley & Sons, INC.

Boscato G., Russo S. (2009) - Free Vibration of Pultruded FRP elements: Mechanical Characterization, Analysis and Applications, ASCE Journal of Composites for Construction, Vol. 13, N. 6, nov/dec 2009, pp. 565-574.

Cosenza E., Lazzaro F., Pecce M. (1996) - Instabilità locale di travi in plastica fibrorinforzata, Congresso CTE, Napoli.

CNR-DT (205/2007) - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il Controllo di Strutture realizzate con profili Sottili pultrusi di materiale composito fibrorinforzato (FRP).

Di Tommaso A., Russo S. (1999) - Sul comportamento

strutturale di travi composte GFRP-Calcestruzzo ad elevate prestazioni, AICAP '99, Torino, 4-6 Novembre, pp. 227-238.

Di Tommaso A., Russo S. (1998) - Indagine sperimentale sul comportamento a collasso di travi pultruse di luce variabile, Congresso CTE, 1998, Padova.

Di Tommaso A., Russo S. (2003) - Shape influence in buckling of GFRP pultruded columns, Mechanics of Composite Materials Journal, Vol. 39.

Di Tommaso A., Arduini M., Focacci F., Russo S. (2002) - Le strutture in materiale composito, in Ingegneria delle Strutture a cura di E. Giangreco, UTET.

Russo S. (2007) - Strutture in composito - Sperimentazione, teoria e applicazioni, Hoepli.

UNI EN 13706, (2003) - Compositi plastici fibrorinforzati - specifiche per profili pultrusi.