

Università Iuav di Venezia

Dottorato in Architettura, Città e Design
Curriculum: Innovazione per il costruire e per il patrimonio culturale
XXXIV Ciclo

Comportamento nel medio e lungo periodo di strutture in FRP

Ileana Ippolito

Relatore Prof. Salvatore Russo

A.A. 2021/2022

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI VENEZIA

Dottorato di ricerca in “Innovazione per il costruire e per il patrimonio culturale”

Comportamento meccanico nel medio e lungo periodo di strutture in FRP.

Ciclo XXIV

Relatore Prof. Ing. Salvatore Russo

Commissione esaminatrice: Prof.ssa Cecchi Antonella

Prof. Rosario Ceravolo

Prof. Alberto Meda

“Ogni volta che descrivo una città dico qualcosa di Venezia.

Per distinguere le qualità delle altre,
devo partire da una prima città che resta implicita.

Per me è Venezia.”

Italo Calvino, *Le città invisibili*, 1972

Ringraziamenti

Ringrazio sinceramente il mio Relatore, il Prof. Salvatore Russo, per l'opportunità che mi ha concesso e per la fiducia che ha avuto in me. È stata una guida in questo percorso. Assieme a lui ed ai miei colleghi abbiamo avuto delle esperienze di ricerca uniche e rare.

Un ringraziamento al Labsco, senza il quale questa ricerca non poteva essere portata al termine.

Ringrazio i miei genitori per avermi insegnato ad essere libera e continuare il mio percorso lavorativo nonostante le difficoltà che potessi incontrare. Grazie per avermi regalato Antonio e Tea.

Ringrazio Carlo e Paola, Olga, Tommaso e Riccardo per avermi fatto integrare ed avermi fatto sentire sempre a casa.

Ringrazio Emanuele per essermi sempre vicino.

Ringrazio Rosaria, inizialmente una collega ora un'amica sincera.

Ringrazio Gaia Annalisa e Ilaria, sperando di avervi dato il mio appoggio nonostante la mia lontananza.

Ringrazio tutti quelli che mi sono stati vicini nonostante la lontananza, in questi tre anni, ciascuno di loro mi ha arricchito.

Ringrazio i miei nuovi colleghi e la mia nuova responsabile, spero di riuscire al meglio in questo nuovo percorso e non deludere le sue aspettative.

Ringrazio me stessa per aver concluso, nonostante le difficoltà, questa bellissima ricerca.

INDICE

Introduzione.....	11
1. Fiber Reinforced Polymer	13
1.1 Caratteristiche del materiale.....	13
1.2 Caratteristiche meccaniche	19
1.3 Il quadro Normativo.....	26
1.4 I pultrusi e il ruolo nell'architettura.....	31
1.5 Manutenzione e LCA nell' FRP.....	33
1.5.1 Metodo multicriterio	33
1.5.2 Metodi di valutazione sintetici	35
1.5.3 Attività di ricerca.....	38
1.5.4 Quadro normativo	42
1.6 La durabilità nei materiali compositi.....	44
1.6.1 Il fenomeno del creep	45
1.6.2 Modelli viscoelastici elementari	48
1.6.3 Viscosità non lineare.....	54
2. Sperimentazione sul materiale	58
2.1 Prove di durabilità.....	60
2.2 Valutazione del danno tramite la tecnica dell'AE	72
2.3 Conclusioni	84
3. Test oligociclici su strutture in FRP.....	86
3.1 Set-up prove oligocicliche.....	92
3.2 Analisi dei risultati.....	97
3.3 Confronto tra Modellazione numerica e modello sperimentale	122
3.4 Conclusioni	129
4. Manutenzione e ceck strutturale: il caso della Glass House.....	132
4.1 Manutenzione e controllo delle chiusure a secco.....	138
4.2 Risultati attesi.....	143
4.3 Conclusioni	146
5. Considerazioni finali	149
Bibliografia.....	152
Allegato 1 - Codice rielaborato in Matlab R2018	158
Allegato 2 – L'uso dell'FRP in Architettura	159

Introduzione

Gli edifici sono direttamente ed indirettamente responsabili di circa il 32%-35% dell'uso globale di energia e del 19%-40% delle emissioni globali di gas serra legate all'energia[1][2]. Mitigare il potenziale di riscaldamento globale (GWP) causato dagli edifici è quindi importante per raggiungere gli obiettivi climatici definiti durante la Cop26 di Glasgow¹. Recenti casi studio indicano una crescente importanza del contributo relativo ai materiali da costruzione nel GWP rispetto all'uso operativo dell'energia, a causa, per esempio, di un aumento delle prestazioni energetiche degli edifici e di una decarbonizzazione dell'approvvigionamento energetico[3][4].

A tal proposito, la valutazione del ciclo di vita (LCA) è stata usata fin dagli anni '80, e solo intorno agli anni '90 la valutazione inizia ad essere standardizzata con riferimento agli edifici [5]. Nonostante gli sforzi verso la standardizzazione e un numero crescente di casi studio, rimangono una serie di questioni metodologiche sulla costruzione dell'LCA. Una di queste è l'importanza legata alla formulazione di ipotesi sulla futura manutenzione e sostituzione dei materiali da costruzione.

La *manutenzione* e i *processi di sostituzione* durante il ciclo di vita di un edificio sono responsabili di una grande parte del GWP, quindi è importante accertarsi che siano assunte ipotesi appropriate in merito alla frequenza e alla portata questi processi.

In tal senso, se la ricerca si inserisce nell'ambito della valutazione delle prestazioni strutturali e in termini di durabilità di costruzioni interamente realizzate in composito fibrorinforzato pultruso (FRP- Fiber Reinforced Polymer).

Attualmente, largo uso del materiale fibrorinforzato, sia sottoforma di reti, di profili pultrusi, di barre e lamine, si riscontra nella riqualificazione edilizia e nelle nuove costruzioni.

Si tratta, in generale, di un argomento di grande attualità a livello internazionale, nell'ambito dell'International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB), nonché nell'ambito dell'International Standardization Organization (ISO).

Obiettivo della ricerca è dunque, l'implementazione di metodi e strumenti di valutazione della durabilità attraverso la sperimentazione su materiali e componenti edilizi innovativi.

¹ Il 12 novembre 2021 si è conclusa, a Glasgow, la XXVI Conferenza delle Parti (COP26) della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti climatici (UNFCCC).

E' possibile suddividere la tesi in quattro parti.

La prima parte è dedicata alla revisione della letteratura per presentare lo stato della ricerca sulla manutenzione e sull'LCA, con un'attenzione particolare al requisito di durabilità e manutenibilità.

La seconda parte presenta prove di durabilità, affiancate a prove di monitoraggio effettuate sul materiale.

Nella terza parte si inseriscono prove oligocicliche fatte su una struttura realizzata interamente in FRP.

La parte finale raccoglie i risultati delle prove e dei monitoraggi di lunga durata (19 mesi) effettuati su un padiglione realizzato interamente in FRP.

La tesi ha come obiettivo quello di fornire dei risultati e colmare dei vuoti normativi sulla durabilità dell'FRP.

1. Fiber Reinforced Polymer

1.1 Caratteristiche del materiale

Le caratteristiche tecnologiche dei materiali compositi fibrorinforzati si sono sviluppate per il campo edilizio ma anche per settori tecnologicamente più avanzati, come quello aeronautico, aerospaziale, meccanico, navale e della difesa, dove si ha un ritorno più rapido e consistente rispetto alle risorse impiegate in fase di messa a punto delle nuove tecnologie: telai in fibra di carbonio, scafi in fibra di vetro, giubbotti antiproiettile in kevlar sono di uso ampiamente diffuso da decenni.

Una volta che l'impiego degli FRP si è consolidato in tali settori, tutto il know-how è stato esportato nel settore edilizio, meno avanzato dei precedenti e ancora in fase di sperimentazione.

Il trasferimento di questi materiali nel campo dell'edilizia non è comunque stato immediato, dovendo adattare i materiali ad applicazioni molto diverse da quelle per le quali erano stato progettati. La ricerca inizialmente si è concentrata sulle proprietà meccaniche dei materiali, ovvero sulla capacità di migliorare il comportamento delle strutture su cui essi sono applicati. In generale si può affermare che, da questo punto di vista, mediante l'impiego di FRP si ottengono significativi incrementi di resistenza e duttilità delle strutture, l'argomento sarà approfondito nei capitoli successivi. In una seconda fase, è stata verificata la durabilità degli interventi, ovvero il comportamento a lungo termine dei materiali. Si sono riscontrati numerosi studi condotti in laboratorio in merito al comportamento del materiale sottoposto a cicli di invecchiamento artificiale, tuttavia mancano monitoraggi estesi per applicazioni reali del materiale e quindi dati sul comportamento del sistema materiale-supporto nelle reali condizioni di esercizio.

Nel campo edile i materiali fibrorinforzati vengono utilizzati sottoforma di tessuti, barre, laminati, profili pultrusi. Nei compositi polimerici fibrosi, le fibre continue con alta resistenza e alta rigidità sono incorporate e legate insieme dalla matrice polimerica a basso modulo. La matrice polimerica deve svolgere le seguenti funzioni principali: legare insieme le fibre e proteggere la loro superficie dai danni durante la manipolazione, la fabbricazione e la vita utile del composito, disperdere le fibre e separarle, trasferire le sollecitazioni alle fibre. La matrice dovrebbe essere chimicamente e termicamente compatibile con le fibre e gioca un ruolo importante nel controllo del comportamento complessivo sforzo-deformazione del composito e

della sua resistenza agli ambienti corrosivi. Il tipo di matrice polimerica influenza anche il meccanismo di rottura del composito.

Le fibre utilizzate nella produzione di materiali compositi si presentano come filamenti continui molto sottili, al punto da poter essere considerati monodimensionali. Questa caratteristica comporta che le proprietà di rigidità e resistenza siano molto più alte di quelle degli stessi materiali in configurazione tridimensionale, a causa della minore densità di difetti tipica delle strutture monodimensionali.

Le dimensioni ridotte comportano la difficoltà di impiego e manipolazione, per cui sono poste in commercio in diverse forme:

- monofilamenti (filamento): elemento di base avente diametro di circa 10 μm ;
- tow (cavo da filatura) prodotto dalla macchina di filatura e costituito da un fascio comprendente un elevato numero di filamenti (migliaia) senza alcuna torsione, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sottoforma di fibra discontinua;
- spun yarn (filo o filato) filo formato da filamenti tenuti insieme da torsione;
- rowing (filo assemblato): filo costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione.

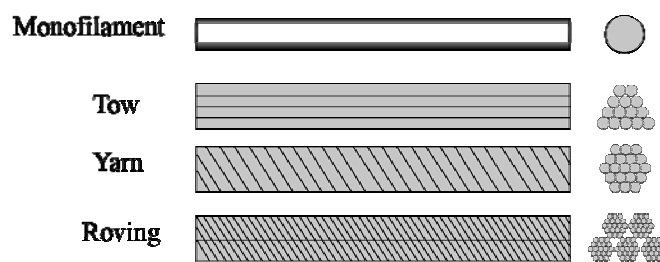


Fig. 1 Tipologia e classificazione delle fibre.

Dall'unione di tow o yarn si ottengono dei tap e in cui i fili possono essere cuciti, affiancati o fissati ad un supporto. La classificazione è quella tipica dei materiali prodotti dall'industria tessile e anche le denominazioni derivano da questa: il Tex è l'unità di misura della massa lineare ed è equivalente ad un grammo per chilometro di fibra. Le fibre destinate al mercato dell'edilizia non si trovano in commercio come yarn e rowing, ma assemblate in strutture più facilmente utilizzabili, come tessuti e nastri o all'interno di materiali compositi preformati in forma di lamine, profilati e barre.

I tessuti

I tessuti differiscono dai nastri essenzialmente per la loro dimensione, essendo i nastri di larghezza da 20 a 30 centimetri mentre i tessuti sono di larghezza superiore a 30centimetri raggiungendo i 120 – 130 centimetri. Nei tessuti, come nei nastri, vi è una direzione principale detta ordito (warp) ed una secondaria, detta trama (weft)ortogonale all’ordito. I tessuti possono essere ottenuti a partire dal rowing, che prendono il nome di stuoia(woven rowing), oppure direttamente dalla tessitura di yarn, quando si richiede maggiore leggerezza e compattezza. In generale un laminato ottenuto a partire da un tessuto avrà una frazione in fibre minore rispetto a quella di un laminato composto da lamine unidirezionali a causa dell’ondulazione (crimp) delle fibre nel tessuto.

Una classificazione può essere fatta in base al tipo di tessitura in tela, batavia e raso [Fig.2]:

- la *tela* (plain) è la più semplice, si presenta con un filo sopra ed uno sotto,ha una struttura più rigida ma è più difficile da impregnare con la resina a causa del crimp che arriva al 10%. Questo comporta una minore efficacia del rinforzo nel piano del laminato;
- il *batavia* (twill) presenta due fili sopra e due sotto, è più facile da impregnare rispetto alla tela, presenta una minore ondulazione, ha però lo svantaggio di essere più difficile da maneggiare;
- Il *raso* (satin) presenta più fili sopra ed uno sotto, è ancora più efficace del batavia, presentando un’ondulazione minima e quindi la massima rigidità nel piano, ma è anche più delicato da maneggiare in fase di realizzazione del laminato.

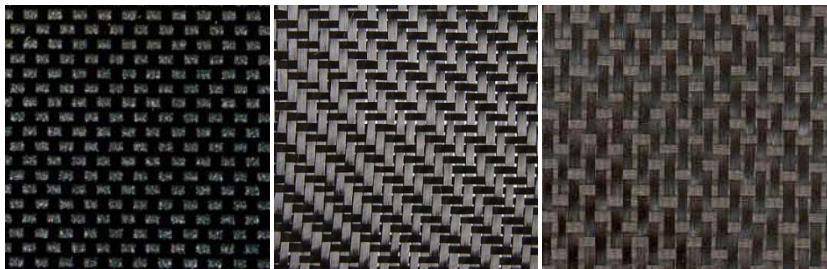


Fig. 2 Da sinistra verso destra, tessuto plain, tessuto twill, tessuto satin, tutti in fibra di carbonio.

La classificazione proposta sopra è valida per tessuti bidirezionali, che presentano un ordito ed una trama, ma esistono anche altri tipi di disposizione delle fibre, in base a cui i tessuti si possono classificare in:

- tessuti unidirezionali, con fibre orientate in un’unica direzione ed allineate su di un piano;

- tessuti intrecciati convenzionali, la maggior parte dei tessuti più comunemente utilizzati sono intrecci convenzionali di trefoli di filamenti. La struttura intrecciata blocca i filamenti dell'ordito e della trama, i filamenti della trama e dell'ordito non sono completamente distesi ma, nel sovrapporsi alternativamente si incurvano aumentando la deformabilità finale del tessuto;
- tessuti ad intreccio piano e mat, realizzati per tessuti da impregnare e ricoprire con una matrice polimerica al fine di eliminare l'incurvamento dei filamenti fuori dal piano del laminato e di ottenere un materiale con proprietà elastiche più uniformi. In questo tipo di struttura, i filamenti della trama sono solo appoggiati su quelli dell'ordito (non intrecciati con essi) e vengono successivamente cuciti fra loro con un filamento molto leggero. Le fibre possono essere disposte in modo ordinato (tese ed allineate) o disordinato (non allineate e curve come nei mat). In questo caso, d'altra parte, è difficile prevedere quali possano essere le caratteristiche meccaniche del risultante materiale;
- tessuti ad intreccio su più assi, o tessuti multi assiali, finalizzati all'ottenimento di una maggiore resistenza allo strappo ed agli sforzi di taglio, un esempio di tessuto intrecciato su più assi è quello triassiale nel quale i filamenti sono intrecciati con angoli di circa 60°.

La disposizione delle fibre ovviamente influenza le proprietà del tessuto: i tessuti unidirezionali, avendo tutte le fibre orientate secondo l'ordito, presentano un'elevata resistenza a trazione secondo quella direzione e sono pertanto anisotropi anche nel piano.

I tessuti bidirezionali presentano in genere le fibre disposte secondo due direzioni ortogonali (verticale ed orizzontale oppure inclinate a $\pm 45^\circ$) con caratteristiche uguali nelle due direzioni (tessuti bilanciati) o differenti per quantità e tipo di fibre utilizzate nelle due direzioni (tessuti sbilanciati) [Fig.2].

I tessuti multiassiali, con fibre disposte secondo più direzioni, possono arrivare ad essere quasi isotropi nel piano del tessuto.

Un'altra tipologia di tessuto è quella definita a largo intreccio, che si presenta come rete con maglie larghe da 3 a 6 millimetri che facilitano l'impregnazione del tessuto e consentono l'uso di una quantità ridotta di fibre.

Infine vi sono i tessuti ibridi, realizzati con differenti tipi di fibre al fine contenere i costi e di ottimizzare le prestazioni, combinando opportunamente le proprietà dei diversi materiali.

In generale, la scelta del tipo di tessuto dipende da diversi fattori quali la sollecitazione cui si prevede sarà sottoposto il rinforzo, la natura del supporto da rinforzare, le condizioni ambientali ed il costo dell'intervento.

Ad esempio, si utilizzano tessuti unidirezionali per assorbire sforzi di trazione in strutture soggette a flessione semplice o per cerchiare strutture sottoposte a compressione assiale, mentre si preferiscono tessuti multi assiali per strutture sottoposte a taglio, torsione, sollecitazioni composte o anche per sollecitazioni soggette a variazioni di direzione.

Per la scelta del tipo di fibra invece si fa riferimento alla resistenza ed alla rigidezza richieste dal progetto e alla qualità della sollecitazione (costante, ciclica, da impatto).

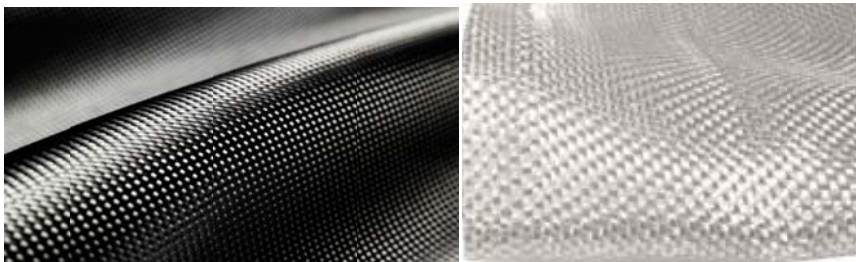


Fig. 3 Da sinistra verso destra: tessuto unidirezionale in fibra di carbonio, tessuto bidirezionale in fibra di vetro.

I profili pultrusi

Le fibre possono anche essere impiegate in compositi preformati, ovvero lamine, barre e profilati con sezione ad “L”, a “C”, doppio “T” o “H”.

Il processo produttivo che porta alla realizzazione di questi prodotti è un particolare tipo di estrusione, detto pultrusione, da cui questi compositi prendono anche il nome di pultrusi.

La pultrusione è un processo continuo articolato in tre fasi:

- a) formatura;
- b) impregnazione;
- c) consolidamento.

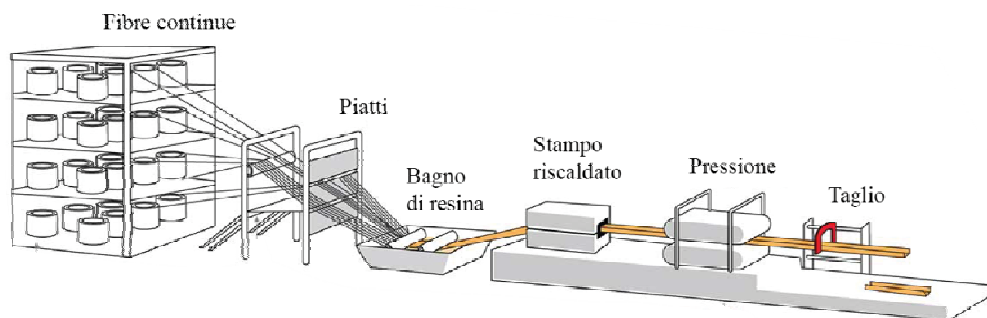


Fig. 4 Processo di pultrusione.

Il tipo di pultrusione più diffusa è quello a bagno di resina in vasca aperta, il cui schema è riportato in [Fig.4]. Le fibre sono prelevate dai rocchetti ed immerse in una vasca contenente resina, dove avviene l'impregnazione; il fascio passa poi attraverso un dispositivo di controllo che rimuove la resina in eccesso e uno di preformatura fino a raggiungere lo stampo vero e proprio, dove avviene la formatura a caldo e sotto pressione, in modo da eliminare tutti i vuoti presenti, garantendo la continuità del materiale. All'uscita dallo stampo la resina viene solidificata ed il materiale viene afferrato da un dispositivo di traino e convogliato verso una sega che lo taglia nella lunghezza voluta. È possibile aggiungere strati di mat o tessuti per rinforzare il composito in direzioni diverse da quella di traino.

Le lamine sono prodotte, nella maggior parte dei casi, con resina epossidica o vinilestere e sono in genere applicate a strutture che presentano una superficie piana e regolare.

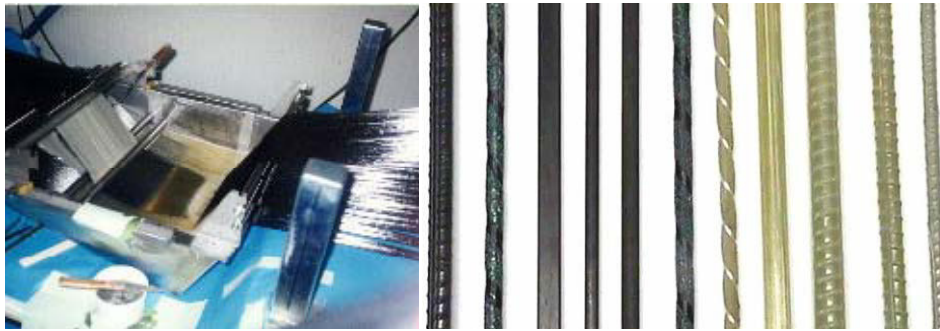


Fig. 5 Processo di pultrusione e barre risultate dal processo di stampaggio.

Le barre [Fig.5] si presentano con sezione solitamente circolare, buona resistenza alla trazione e una rigidità flessionale maggiore di quella dei tessuti. Il processo produttivo ordinario porta alla realizzazione di barre lisce, ma, al fine di migliorare l'aderenza delle barre, può essere realizzato un trattamento superficiale mediante sabbatura o deformando la superficie laterale della barra stessa, ad esempio mediante l'avvolgimento di filamenti elicoidali. L'applicazione delle barre riguarda il consolidamento di murature mediante rinforzo a taglio, catene su strutture spingenti, assorbimento degli sforzi di trazione in strutture inflesse. Rispetto alle corrispondenti barre in acciaio presentano i vantaggi di una maggiore resistenza a parità di sezione, assenza di fenomeni di ossidazione e rilassamento, tipici invece degli elementi in acciaio.

Attraverso il processo di pultrusione vengono realizzati dei profili simili per forma e dimensione ai profili standardizzati dell'acciaio ma differenti per le caratteristiche meccaniche. 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 si rileva come un 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 - 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 [6].

Disposizioni speciali delle fibre o una combinazione di due o più tipi di fibre di rinforzo può essere usata per conferire al composito proprietà meccaniche differenti.

1.2 Caratteristiche meccaniche

Le fibre utilizzate oggi possono essere di diversa natura ed ottenute secondo diversi processi, presentando caratteristiche molto differenti in funzione delle variabili di produzione. In generale, questi materiali, presentano alcuni vantaggi rispetto all'acciaio: sono più durevoli, più leggeri e consentono una maggiore lavorabilità dell'impasto.

Una prima classificazione dei materiali compositi fibrorinforzati può essere fatta in base alla geometria delle fibre: in funzione della lunghezza si distinguono compositi a fibra lunga o a fibra corta mentre in funzione della disposizione si distinguono i compositi a fibre orientate che presentano tutte le fibre orientate nella stessa direzione, da quelli a fibre non orientate che presentano una disposizione casuale delle stesse.

a. Materiali fibrorinforzati a fibre corte

Si definiscono materiali compositi a fibra corta, quei materiali in cui la matrice organica o inorganica è rinforzata dalla presenza di uno o più materiali fibrosi di dimensioni ridotte. Le fibre possono essere lineari o piegate, con o senza fibrillature e si presentano disperse nella matrice in tutte le direzioni, creando in tal modo una tessitura multi-direzionale distribuita che migliora il composito in termini di caratteristiche quali isotropia, duttilità, resistenza a trazione, modulo elastico, durabilità, ritiro, resistenza agli urti, resistenza all'abrasione e resistenza al fuoco. In generale l'aggiunta di fibre abbassa la lavorabilità e la fluidità del materiale, quindi è opportuno tenere conto di questo effetto, ad esempio intervenendo con l'impiego di fluidificanti.

Le fibre più utilizzate per la realizzazione di materiali compositi a fibre corte destinati al settore edile sono le fibre di vetro, le fibre di polivinilalcol, le fibre di

carbonio e le fibre aramidiche, ciascuna con le sue caratteristiche peculiari che la rendono più o meno adatta ad i diversi impieghi; le stesse fibre sono utilizzate anche nella realizzazione di materiali compositi a fibre lunghe, pertanto nei paragrafi successivi saranno trattate solo nell'ottica dell'impiego nei compositi a fibra corta, per poi avere una trattazione più approfondita nel capitolo sui compositi a fibra lunga.

Le fibre di vetro.

Le fibre di vetro sono prodotte per fusione, trafilatura e veloce raffreddamento di particolari vetri, generalmente composti di alluminio-boro silicati (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , B_2O_3 , Na_2O , ZrO_2) da cui derivano i vari tipi di prodotto in commercio caratterizzati da diverse proprietà.

Le fibre di vetro presentano caratteristiche inferiori a quelle delle fibre aramidiche o di carbonio, ma hanno il vantaggio di un costo più basso: per questo motivo sono spesso utilizzate in combinazione con le altre per ottenere un rinforzo di proprietà intermedie e costi contenuti. Presentano comunque buone proprietà, quali un'ottima compatibilità con le matrici organiche, mentre hanno lo svantaggio di essere facilmente attaccate dagli alcali e quindi, per la maggior parte, sono incompatibili con matrici cementizie. Hanno inoltre lo svantaggio di una bassa resistenza a fatica e lo stesso modulo elastico, relativamente basso, può essere una caratteristica positiva o negativa in relazione alle proprietà volute nel composito risultante. Le più utilizzate in edilizia sono le fibre E-glass, più economiche ma con scarse proprietà meccaniche, e le S-glass che raggiungono resistenze paragonabili a quelle delle fibre di carbonio, ma con un modulo elastico sensibilmente più basso e con un costo molto elevato.

Le fibre aramidiche.

Le fibre Aramidiche sono fibre polimeriche ad altissime prestazioni meccaniche ottenute per lavorazione di Poliammidi Aromatiche dalla cui contrazione deriva il nome "Aramid", si tratta quindi di fibre derivate per sintesi da petrolio e gas naturale. Storicamente sono state prodotte per la prima volta con il nome commerciale di kevlar. Presentano, in genere, elevati valori di resistenza meccanica sia a trazione che a taglio, il modulo elastico è inferiore a quello del carbonio a cui sono spesso accoppiate, hanno un'elevata resistenza agli urti e una struttura stabile alle alte temperature.

Le fibre di carbonio.

Le fibre di carbonio sono ottenute a partire da sostanze di natura organica dette "precursori": bitume, rayon, poliacrilonitrile (PAN); si trovano in commercio in

diversi tipi, con forti escursioni di valore. Il modulo elastico varia tra 230 e 700 GPa e la resistenza meccanica tra 1500 e 5000 MPa.

In base a queste caratteristiche le fibre di carbonio si classificano in fibre ad alta resistenza e fibre di carbonio ad alto modulo, che costituiscono le due classi più utilizzate in edilizia, mentre la terza classe, fibre di carbonio ad altissimo modulo, sono usate in rarissimi casi.

Le fibre di polivinilalcol.

Le fibre di polivinilalcol (PVA) sono state introdotte solo da poco tempo in edilizia, sebbene fossero già presenti da anni in altri campi di impiego. Generalmente vengono utilizzate come rinforzo in malta cementizia, presentando un'alta compatibilità con la matrice. Le caratteristiche meccaniche mostrano un modulo elastico più elevato ed una resistenza più bassa rispetto alle altre fibre.

I principali vantaggi risiedono nella tixotropia che le fibre di PVA conferiscono alle malte cementizie e la resistenza che oppongono alle fessurazioni della malta, sia in fase di indurimento che in seguito.

Nella Tabella 1 di seguito riportata vengono riassunte le caratteristiche meccaniche delle principali fibre utilizzate nell'ambito dell'edilizia.

Tabella 1 Comparazione delle proprietà meccaniche delle fibre.

FIBRE	Modulo elastico [GPa]	Resistenza a trazione [MPa]	Deformazione ultima [%]	Coeff. di Poisson	Densità [g/cm ³]	Resistenza specifica
Aramide	32-180	3200-3600	1,5-5,5	0,35	1,44-1,47	2,18-2,50
Carbonio	240-760	2400-5100	0,5-1,8	0,2	1,75-1,90	1,62-2,78
Vetro	72-87	3300-4500	3,5-5,5	0,2	2,5	1,32-1,78
Acciaio	210	1000-2000	5	0,3	7,85	0,12-0,15
Alluminio	75	500	10	0,33	2,80	0,18
Titanio	110	1200	14	0,34	4,50	0,27

b. Materiali fibrorinforzati a fibre lunghe

I materiali compositi a fibra lunga rappresentano una evoluzione delle applicazioni dei compositi a fibra corta. Mentre in questi ultimi, le fibre, disperse nella matrice secondo direzioni casuali, hanno il compito di migliorare le caratteristiche della matrice stessa o di conferirle nuove proprietà, nei compositi a fibra lunga invece la fibra svolge il vero e proprio ruolo di rinforzo strutturale e la matrice ha il compito

di trasferire gli sforzi tra le fibre e dal supporto alle fibre, oltre alla funzione protettiva nei confronti delle fibre stesse.

La matrice può essere di natura organica o inorganica e si presenta generalmente come un continuo isotropo, mentre le fibre che costituiscono il rinforzo, ad eccezione di quelle di vetro, sono un materiale anisotropo, presentando proprietà differenti nelle diverse direzioni.

Le proprietà che caratterizzano un composito a fibre lunghe, secondo le istruzioni CNR-DT 200/2004 sono:

- geometria: forma, dimensioni e distribuzione delle dimensioni;
- disposizione: orientazione rispetto agli assi di simmetria del materiale, se essa è casuale (nel piano o nello spazio) il composito risulta avere caratteristiche simili a quelle di un materiale isotropo (quasi isotropo); in tutti gli altri casi il composito è anisotropo;
- concentrazione: frazione in volume, distribuzione della concentrazione (dispersione).

Le due fasi, matrice e rinforzo, contribuiscono in maniera determinante alle caratteristiche finali del composito, inoltre il materiale è caratterizzato dall'interfase, un terzo componente posto tra la fibra e la matrice con lo scopo di promuovere l'adesione tra le due fasi. Si tratta di un elemento che avvolge le fibre in uno strato sottilissimo, spesso monoatomico e le rende compatibili con la matrice organica. L'interfase non contribuisce direttamente alla determinazione delle caratteristiche meccaniche del composito, ma lo influenza pesantemente, in quanto l'interfaccia fibra matrice rappresenta uno dei punti di maggiore criticità del sistema e la mancanza di adesione tra le due fasi, costituisce una delle principali cause di cedimento strutturale del composito.

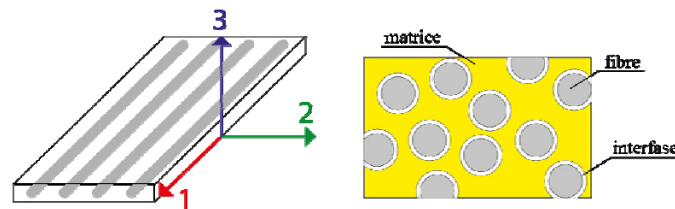


Fig. 6 Sistema riferimento per l'orientamento delle fibre nei compositi.

Una prima classificazione dei compositi fibrorinforzati può essere fatta in maniera indipendente dalle caratteristiche delle fasi, distinguendo tra compositi monostrato o lamine e compositi multistrato o laminati. Le lamine presentano spessori contenuti

nell'ordine dei decimi di millimetro e sono costituite da fibre disposte nel piano della lamina stessa; i laminati sono costituiti dalla sovrapposizione di più lamine dello stesso tipo, oppure possono essere laminati ibridi, cioè ottenuti sovrapponendo lamine costituite da materiali di natura diversa (ad esempio fibre sintetiche-alluminio) o diversi tipi di fibra (ad esempio carbonio o aramide).

In generale, le lamine sono composti di tipo anisotropo, non presentando fibre nella direzione ortogonale al piano della lamina. Posto un sistema di riferimento orientato convenzionalmente secondo gli assi naturali della lamina [Fig.6], si hanno differenti proprietà nelle diverse direzioni.

Le fibre maggiormente utilizzate per la produzione di materiali compositi a fibra lunga sono le fibre di vetro, di carbonio e aramidiche. Anche all'interno di ciascuna delle tre tipologie ci sono notevoli variazioni nelle proprietà delle fibre, in funzione del particolare processo produttivo seguito o dell'aggiunta di additivi modificatori delle caratteristiche del prodotto. In generale si può comunque dire che, in confronto agli altri materiali da costruzione, le fibre presentano elevati valori di resistenza ed un valore del modulo elastico variabile in un campo molto ampio. La bassa densità comporta che i valori di resistenza specifica (rapporto resistenza/densità) e modulo elastico specifico (rapporto modulo/densità) siano superiori a quelli dei materiali da costruzione tradizionali. Tali caratteristiche fanno propendere per la scelta di questi materiali nel caso di interventi strutturali, in particolare nel consolidamento di edifici antichi, poiché, a parità di resistenza, comportano un aumento di carico sulla struttura preesistente decisamente inferiore ad altri materiali come ad esempio l'acciaio.

Il tipo di fibra e di resina impiegato nel materiale composito ne determina le principali caratteristiche: i materiali stessi sono quindi classificati e denominati proprio in relazione ai componenti, distinguendo tra:

- GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers), fibre di vetro in matrice polimerica;
- AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymers), fibre aramidiche in matrice polimerica;
- CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers), fibre di carbonio in matrice polimerica;
- FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), materiali fibrorinforzati in matrice cementizia (inorganica), generalmente con fibre di carbonio.

Tipologia e classificazione delle fibre

Le fibre più diffuse nel settore edile sono quelle di carbonio dotate di alta resistenza e alto valore del modulo elastico, mentre sono meno usate le fibre di vetro (meno performanti, ma talvolta preferite per il loro costo minore) e le fibre aramidiche (con un'altissima resistenza agli urti ed un elevato assorbimento di energia in caso di rottura, ma con un costo molto elevato).

Spesso si ricorre a compositi ibridi per combinare le caratteristiche positive delle diverse fibre disponibili.

Le principali proprietà che caratterizzano le fibre, in base alla loro funzione diparte resistente del composito, sono:

- Modulo elastico a trazione [MPa]
- Resistenza a trazione [MPa]
- Allungamento percentuale a rottura [%]
- Densità [g/cm³].

In realtà esistono molte altre proprietà che contraddistinguono le fibre, queste elencate consentono un immediato confronto tra le fibre stesse, in relazione agli altri materiali da costruzione, così come evidenziato in Tabella 2.

Le fibre di vetro

Le fibre di vetro sono utilizzate per la fabbricazione di materiali compositi dalle caratteristiche medio-alte. Sono prodotte per fusione, trafilatura e veloce raffreddamento di particolari vetri, generalmente composti di alluminio-boro silicati, a cui vengono aggiunti ossidi di alluminio e di altri ioni metallici per migliorarne alcune proprietà. Nel processo produttivo i vari componenti vengono miscelati a secco e portati al punto di fusione di circa 1260°C, il vetro fuso passa dalla fornace (tank) alla filiera di platino (bushings) da cui viene fatto passare per gravità attraverso fori praticati nel fondo; i filamenti prodotti sono quindi raggruppati, eventualmente con una leggera torsione, in una treccia o fibra. I filati sono raccolti in roving, senza ritorcitura; quelli destinati all'impiego nel campo dell'ingegneria civile presentano un titolo superiore a 2000 Tex.

Le stesse fibre di vetro sono disponibili anche in fogli sottili, detti mat, costituiti da fibre lunghe o corte disposte nel piano in maniera casuale e tenute insieme da un legante chimico. I mat presentano larghezza variabile da 5 a 200 centimetri e una densità di massa di circa 0,5 kg/m² [Fig.7].

Le norme ISO 1139:1973(E) e ISO 2078:1993(E) indicano la modalità di denominazione delle fibre di vetro:

- la prima lettera indica il tipo di vetro impiegato;
- la seconda lettera indica il tipo di fibra utilizzato (C=continuo, D=discontinuo);
- un numero indica il diametro nominale del filamento espresso in μm ;
- un numero separato da uno spazio indica la massa lineare delle fibre espressa in Tex;
- il senso ed il valore della torsione espresso in giri/metro (opzionale)
- il numero di fili costituenti ritorti (opzionale)
- il codice del produttore contenente informazioni aggiuntive (opzionale).



Fig. 7 Sulla sinistra Yarn in fibra di vetro. Sulla destra MAT in fibra di vetro.

Tra i filati destinati all' applicazione dell'ingegneria civile sono molto diffusi quelli caratterizzati dalle sigle EC5 10 x 2 (vetro E a fibra continua con diametro del filamento di $5 \mu\text{m}$, massa lineare del filamento di 10 Tex e due filamenti) e SC5 4 x 2 (vetro S a fibra continua con diametro del filamento di $5 \mu\text{m}$, massa lineare di 4 Tex e due filamenti). Le fibre di vetro risultano vantaggiose per la buona resistenza a trazione, una buona resistenza all'impatto, agli attacchi chimici e per il costo contenuto; gli svantaggi sono legati al basso valore del modulo elastico (circa 70 GPa per le E-glass) in linea con le fibre aramidiche e molto inferiore a quello delle fibre di carbonio. Il valore basso del modulo elastico limita lo sfruttamento della resistenza a trazione delle fibre di vetro, che risultano per altro idonee per il rinforzo di elementi in materiali molto deformabili come il legno. Per migliorarne le caratteristiche spesso vengono utilizzate insieme alle fibre di carbonio all'interno di compositi ibridi.

Un ulteriore svantaggio è quello della scarsa resistenza all'abrasione e alla fatica ed una scarsa adesione alle matrici polimeriche. Per ovviare a questi inconvenienti ed incrementare l'adesione alle matrici, le fibre vengono trattate con sostanze aventi una funzione compatibilizzante (processo di sizing): questo processo migliora le caratteristiche di durabilità e resistenza alla fatica, ma può favorire l'insorgere di tensioni dovute all'assorbimento dell'umidità.

Le fibre più utilizzate in ingegneria civile sono quelle di tipo “E”, con basso valore del modulo elastico e costi molto bassi e quelle di tipo “S” con caratteristiche prestazionali migliori paragonabili per resistenza alle fibre di carbonio, ma a costi più elevati rispetto alle E-glass.

Le fibre di vetro in generale risultano facilmente attaccabili in ambiente alcalino e, come tali, non sono adatte all’impiego in matrici cementizie o comunque in presenza di alcali. Per ovviare a questo inconveniente sono state messe a punto le fibre di tipo AR ottenute con l’aggiunta di zirconio alla miscela di fusione, che presentano una buona resistenza agli alcali.

Nel grafico sottostante sono messe a confronto le fibre sopra descritte [Fig.8].

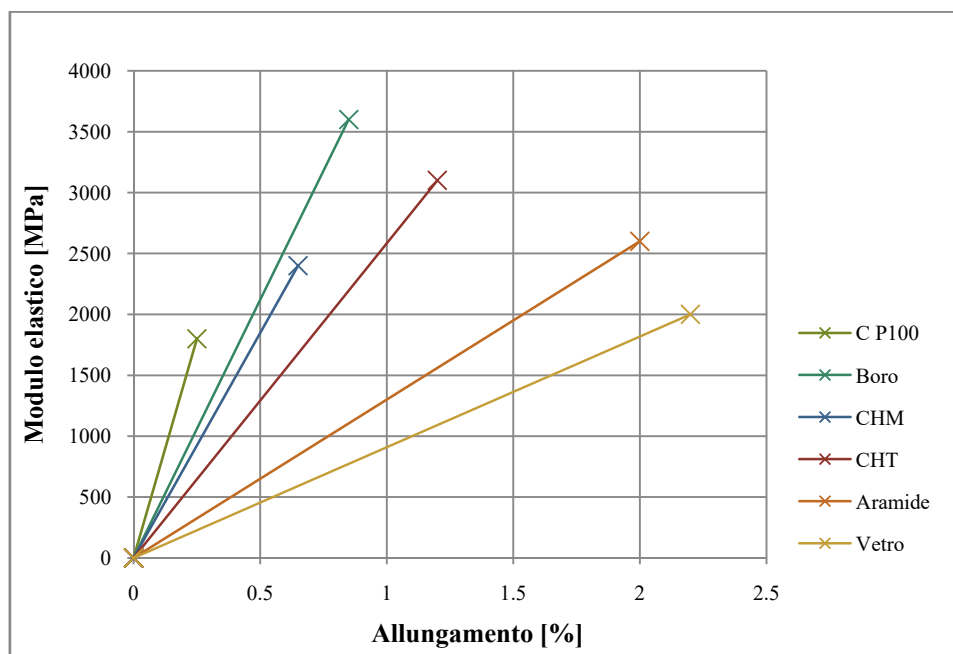


Fig. 8 Comparazione tra fibre con diversa matrice.

1.3 Il quadro Normativo

La maggior parte del patrimonio edilizio italiano, comprendente anche costruzioni di rilevanza storica ed architettonica, necessita sempre più spesso di interventi di riabilitazione strutturale. L’utilizzo dei materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (Fibre Reinforced Polymer, FRP) o inorganica (Fibre reinforced grout, FRG anche noti come Fiber reinforced cementitious Matrix, FRCM) si è sempre più diffuso negli interventi di consolidamento e di adeguamento sismico delle costruzioni esistenti, grazie agli innegabili vantaggi derivanti dalla loro leggerezza e dalle loro elevate caratteristiche meccaniche. Alla diffusione di queste tecnologie innovative non corrisponde un aggiornamento del quadro normativo. In Italia la

prima Ordinanze del Presidente del Consiglio dei Ministri è stata emanata nel 2003, normando l'impiego dei materiali compositi fibrorinforzati nella mitigazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti di c.a. (*vedi par. 11.3.4.3*). Allo stato attuale il quadro normativo è fondamentalmente costituito dalle Norme Tecniche per le costruzioni D.M. 17/01/2018 (indicate come NTC2018). Tali norme riconoscono la possibilità di utilizzare materiali non tradizionali (tra cui rientrano i compositi fibrorinforzati) e, per la loro qualificazione e accettazione, come anche per il progetto e le verifiche strutturali, rimandano alle Istruzioni del consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP), alle linee guida e ai documenti tecnici del consiglio Nazionale delle ricerche. In dettaglio, il paragrafo 4.6 e il Cap. 11 delle NTC2018, stabiliscono che non si possono utilizzare materiali non tradizionali senza il preventivo assenso del consiglio Superiore dei lavori pubblici. Deve essere ottenuta la certificazione di Idoneità Tecnica all'Impiego, rilasciata dal Servizio Tecnico Centrale (STC) su parere del CSLLPP, per lo specifico prodotto utilizzato e, nel caso di rinforzi FRP, FRG, FRCM, anche in riferimento allo specifico supporto su cui questi sono applicati. E' necessario sottolineare a questo proposito che, a differenza dei materiali tradizionali, è assente una classificazione consolidata per i compositi fibrorinforzati; a ciò si aggiunge, nel caso di applicazioni su murature esistenti, anche l'assenza di una classificazione del sottofondo.

Nel 2004 il CNR ha emanato il documento CNRDT 200 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di Interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati", la cui prima revisione è stata emanata nel 2012 (CNR DT 200 R1/2012). Nel 2009 le CNR DT 200 sono state approvate dal CSLLPP, che le ha divulgate sotto forma di linee guida Nazionali (24/07/2009), aggiungendo anche le indicazioni per le prove di accettazione in situ. Dal 2009, è quindi possibile utilizzare i compositi costituiti da matrice epossidica e fibre di carbonio, vetro o aramide (si escludono invece le matrici cementizie e le altre fibre). Nel 2011 un'apposita commissione promossa da Assocompositi colma la lacuna sui controlli emettendo le linee guida per la qualificazione ed il controllo dei materiali compositi Frp (sempre escludendo gli FRCM), ma il CSLLPP deve tuttora approvarle. Per tal motivo i produttori dei sistemi FRP non hanno ancora qualificato propri sistemi di certificazione della qualità, secondo le procedure indicate. Nel 2009 è stata diffusa una prima bozza di linee guida per la riparazione ed il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni, predisposta dal consorzio della rete dei laboratori Universitari di Ingegneria Sismica ReLUIS. Sono attualmente in via di redazione, da parte di una commissione istituita dal Ministero

delle Infrastrutture e dei Trasporti, le linee guida per la qualificazione di compositi rinforzati a matrice inorganica da utilizzare per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti. Tra le diverse linee guida del CNR sul consolidamento mediante compositi, si citano anche le:

- CNR DT 201/2005 - Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni per interventi di consolidamento Statico di Strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati;
- CNR DT 202/2005 - Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni per interventi di consolidamento statico di strutture metalliche mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati;
- CNR DT 203/2006 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato;
- CNR DT 205/2007 - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture realizzate con profili pultrusi di materiale composito fibrorinforzato (FRP);
- CNR DT 215/2018 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica.

Si ricorda anche il DPCM del 9 febbraio 2011 – Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni 2008.

La progettazione con FRP non è espressamente normata nelle NTC18, ma al cap. 8.6 delle stesse si sottolinea la possibilità di utilizzare per interventi sulle costruzioni esistenti *“materiali non tradizionali, purchè nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità, ovvero quelli elencati al cap. 12”* cap. 12 NTC18: *“Per quanto non diversamente specificato nella presente norma, si intendono coerenti con i principi alla base della stessa, le indicazioni riportate nei seguenti documenti:*

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali o, in mancanza di esse, nella forma internazionale EN;

- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea;

- Norme per prove, materiali e prodotti pubblicate da UNI. Inoltre, in mancanza di specifiche indicazioni, a integrazione delle presenti norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di comprovata validità:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;

- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;

- Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, come licenziate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e ss. mm. ii.;

- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.). Possono essere utilizzati anche altri codici internazionali, purché sia dimostrato che garantiscano livelli di sicurezza non inferiori a quelli delle presenti Norme tecniche”.

Tra le linee guida presenti nel panorama **internazionale**, si menzionano infine le americane ACI440.2R-08, le canadesi ISIS design Manual n°4 e il FIB Bulletin 14.

La filosofia delle leggi emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e delle successive istruzioni CNR DT200 R1/2013, che per loro genesi e natura non sono norme cogenti, è quella di filtrare la numerosa bibliografia nazionale ed internazionale fornendo un aiuto progettuale ai tecnici, lasciando, ovviamente, a questi ultimi la responsabilità finale delle scelte operate. Sebbene particolare attenzione sia posta riguardo alla qualificazione e al controllo dei materiali per l'impiego strutturale, non sono ancora disponibili criteri adeguatamente condivisi, con i conseguenti problemi in fase di progettazione, di accettazione in cantiere e nel collaudo finale.

Tabella 2 Normative e linee guida sull'utilizzo dell'FRP a livello nazionale.

Normative e indicazioni a livello nazionale	Opcm 3274/2003	Ordinanza	Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
	CNR DT 200/2004	Normativa Tecnica	Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.
	CNR DT 201/2005	Normativa Tecnica	Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di Consolidamento Statico di Strutture Lignee mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati.
	CNR DT 202/2005	Normativa Tecnica	Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per Interventi di consolidamento Statico di Strutture Metalliche mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati.
	CNR DT 203/2006	Normativa Tecnica	Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato.
	CNR DT 205/2007	Normativa Tecnica	Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di Strutture realizzate con profili pultrusi di Materiale composito Fibrorinforzato.
	Circolare del Ministero per i Beni e le Attività Culturali 05/6/2007	Linee Guida	Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni.
	Consiglio superiore dei lavori pubblici 24/07/2009	Linee Guida	Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP.
	DPCM 9 febbraio 2011	Direttiva del presidente del Consiglio dei Ministri	Linee guida per la valutazione del rischio sismico del patrimonio culturale.
	CNR DT 200 R1/2013	Normativa Tecnica	Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi.
	DP CSLP n.220/2015	Linee Guida	Linea Guida per la identificazione, qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica da usare per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.
	NTC DM 17/1/2018	Normativa Tecnica	Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018).
DP CSLP n.293/2019	Linee Guida	Linea Guida per la identificazione, qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica da usare per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.	

1.4 I pultrusi e il ruolo nell'architettura

L'applicazione di materiali compositi avanzati nell'ingegneria civile si è evoluta lentamente, principalmente a causa di ragioni economiche. I loro vantaggi chiave, come caratteristiche di progettazione libera e personalizzabile, rapporti forza-peso che superano significativamente quelli dei materiali convenzionali di ingegneria civile e un alto grado di inerzia chimica nella maggior parte degli ambienti civili si perdono in alti costi di materiale e di produzione. Inoltre, l'attuale pratica di sostituzione uno a uno degli elementi dei sistemi strutturali convenzionali con componenti compositi avanzati, ha dimostrato che è difficile giustificare l'uso di compositi avanzati nella costruzione civile, non solo per motivi economici, ma anche per motivi strutturali.

Gli esempi raccolti nell'Allegato 2, evidenziano applicazioni differenti nell'utilizzo del materiale: l'FRP utilizzato per realizzare parti strutturali di edifici leggeri, l'applicazione del materiale come rivestimento di grandi opere (permettendo una maggiore libertà delle forme) ed infine, l'applicazione del materiale per la costruzione di ponti o passerelle nonché il suo impiego per riqualificazioni strutturali.

Si è arrivati ad utilizzare in maniera largamente diffusa questo materiale, grazie ai numerosi studi fatti e tutt'ora in corso. Diversi sviluppi hanno portato alla sua diffusione di utilizzo negli ultimi anni:

- tecniche come la pultrusione, lo stampaggio a trasferimento di resina, l'avvolgimento di filamenti e la produzione semiautomatica di grandi componenti hanno portato a progressi nella produzione FRP a basso costo;
- una ridotta domanda di materiale nell'industria della difesa ad alto prezzo, l'espansione di un mercato altamente competitivo per questi materiali nell'industria degli articoli sportivi e le prospettive per l'uso di grandi volumi nel settore civile hanno portato a nuova produzione di materiali a basso costo;
- i progetti realizzati con l'unione di nuovi materiali e materiali tradizionali, piuttosto che la sostituzione di singoli componenti, hanno dimostrato che può essere raggiunta l'efficienza tecnica all'interno di vincoli economici competitivi.

Nuovi campi dell'ingegneria, possono meglio descrivere il ruolo dei compositi nel campo delle costruzioni civili.

Le innovazioni in campo ingegneristico-architettonico possono essere divise in:

- a) **nuova costruzione** con soluzioni in FRP o nuovi sistemi compositi;
- b) **riabilitazione**, applicazioni per la riparazione, il rafforzamento e retrofit di strutture.

L'efficacia strutturale degli FRP nella riabilitazione di sistemi strutturali esistenti è stata ripetutamente dimostrata con test su larga scala. I rivestimenti in tessuto di carbonio sono stati usati per rafforzare pareti in muratura, così come per ripristinare la capacità di spostamento nella riparazione di edifici. Le fibre di carbonio sono state utilizzate anche per rafforzare le lastre di cemento armato e il rinforzo di tubazioni in cemento precompresso di grande diametro, per ripristinare perdite causate dalla pressione dell'acqua. Le pile dei ponti sono state adeguate sismicamente e riparate con fibre di vetro, carbonio e compositi ibridi, che hanno dimostrato di essere efficaci quanto i tradizionali rivestimenti in acciaio. Il successo delle misure di riabilitazione strutturale con materiali compositi avanzati, ha portato allo sviluppo di nuovi concetti strutturali che utilizzano gusci e tubi in FRP per formare nuovi sistemi costruttivi. I sistemi compositi sono stati sviluppati per l'uso di nuove tecnologie costruttive, ad esempio per ponti leggeri e padiglioni espositivi, grazie alla loro semplificazione nella costruzione per le eccellenti caratteristiche strutturali a breve e lungo termine.

Nell'Allegato 2 è fornita una panoramica della ricerca su progetti riguardanti l'applicazione di compositi nell'ingegneria civile e nell'architettura. Nelle schede, vengono raccolti i progetti più significativi che riassumono l'utilizzo dell'FRP negli ultimi venti anni. Dagli interventi si può notare il triplice utilizzo del materiale:

- Applicazioni in architettura, grazie alla facilità di modellazione, leggerezza e facilità di assemblaggio, viene utilizzato come rivestimento per molti edifici e nella realizzazione di padiglioni espositivi;
- Applicazioni in riqualificazioni strutturali, grazie alla leggerezza i profili pultrusi vengono utilizzati per la riqualificazione di strutture storiche o interventi architettonici in luoghi particolarmente ostili, dove le strutture sono state affette da gravi danni a seguito di calamità naturali;
- Applicazioni in ingegneria, per la realizzazione di ponti sia carrabili che pedonali.

1.5 Manutenzione e LCA nell' FRP

Il processo di sviluppo di strumenti atti al controllo dell'eco-sostenibilità dei prodotti edilizi, prende sempre più piede all'interno delle industrie. Questo processo è stato inizialmente utilizzato per il controllo dei costi energetici e dell'efficienza della produzione come unico obiettivo quello economico. Successivamente, con la diffusione del concetto di eco-sostenibilità e l'affermarsi del concetto di climate change, si è sentito il bisogno di rendere il consumatore sempre più informato e consapevole delle sue scelte riguardanti i prodotti da utilizzare. Per questo motivo, i nuovi strumenti di controllo, nati soltanto per un fine economico, iniziano a migliorarsi sempre più e ad essere sempre più utilizzati nei vari settori di produzione e nel processo edilizio.

Tali strumenti di controllo, si occupano del calcolo delle prestazioni ambientali degli edifici, così da permettere ai fruitori di orientarsi verso scelte più eco-efficienti per ottenere prestazioni sempre più evolute. Ciò ha portato allo sviluppo di normative e direttive europee ed internazionali sulle politiche ambientali da adottare.

Purtroppo, ancora oggi non esiste un metodo univocamente codificato, perché la sperimentazione, legata al settore industriale ed edilizio, è sempre più complessa ed in continua evoluzione, ma si cerca di trovare delle soluzioni temporanee per cercare di ottenere dei risultati definitivi dall'applicazione di queste normative.

I metodi adottati per la valutazione dell'impatto ambientale vengono di solito racchiusi in due categorie, in base alla quantità di parametri analizzati ed alla tipologia di valutazione effettuata:

- i metodi di valutazione a punteggio, **multicriterio**, che prendono in considerazione un'ampia gamma di parametri, fornendo così una valutazione di tipo qualitativo;

- i metodi di valutazione **sintetici**, basati su rigorosi eco-bilanci, che prendono in considerazione un ridotto numero di parametri, fornendo una valutazione di tipo quantitativo.

1.5.1 Metodo multicriterio

Una delle prime strategie che è stata adottata per la valutazione ambientale dei prodotti edilizi e successivamente per la valutazione ambientale dell'edificio sono i metodi a punteggio multicriterio. I metodi di verifica multicriterio, sono degli

strumenti che fungono da supporto alla progettazione, perché sono in grado di sintetizzare quelli che sono i punti forza di un progetto green, in particolare relativi alla categoria dei materiali.

Alla base di un processo multicriterio si ha la verifica dei requisiti ambientali e la loro classificazione in macro aree ad ognuna delle quali viene assegnato un punteggio di merito (credito) più o meno alto, in relazione alla scala di riferimento assunta. I punteggi ottenuti, adeguatamente pesati, in base all'importanza attribuita a ciascun requisito in relazione all'intero sistema di valutazione, portano ad una classificazione di tutti gli edifici rispetto ad una scala di qualità che "misura" il loro grado di eco-sostenibilità, il cui valore, compreso all'interno di un intervallo definito, permette di attribuire un valore alla sostenibilità ambientale. In questo modo è possibile confrontare vari prodotti tra loro simili, facili da decifrare anche da persone non esperte di sostenibilità e valutazione.

L'analisi multicriterio permette di effettuare delle valutazioni intermedie sulle diverse fasi del processo, eseguendo le opportune analisi direttamente all'interno del team di progetto. Essa inoltre, è utilizzata come strumento di controllo della qualità del processo per la committenza, sia pubblica o privata.

Per quanto possa essere diffuso l'utilizzo dei metodi multicriterio, presentano però, degli aspetti limitativi tra cui:

- l'assenza di un bilancio unitario dell'intero ciclo di vita, soprattutto nei criteri legati alla scelta dei materiali e dei componenti edilizi;

- scarsa considerazione di un metodo oggettivo, perché la scelta dei criteri da considerare spetta a chi effettua l'analisi.

Esistono vari strumenti di valutazione e certificazione ambientale degli edifici, su scala internazionale, europeo e anche nazionale.

Quello più diffuso e maggiormente utilizzato è la certificazione americana **Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)**. Inizialmente questa certificazione LEED, nasceva solo per l'America e quindi tarata per gli standard tipici americani, successivamente con la sua diffusione a livello internazionale arriva anche in Italia nel 1967, trovando alcuni ostacoli per la valutazione degli edifici, perché differivano nelle tecniche costruttive, i materiali e soprattutto, nel contesto italiano, non era diffuso il ripristino di strutture esistenti.

Per accedere alla certificazione LEED bisogna rispettare dei requisiti di pre-accesso obbligatori, la cui valutazione deve risultare positiva, perché in caso contrario non si accede alle successive fasi di valutazione del criterio. Ad ogni scheda compilata viene assegnato un punteggio, che sarà uguale a zero nel caso in cui non vengano rispettati i requisiti di valutazione. Il punteggio finale che viene attribuito all'analisi è data dal rapporto tra sommatoria dei punteggi conseguiti e il punteggio massimo conseguibile.

In ambito strettamente italiano, si è sentita la necessità di inserire nei regolamenti edilizi, criteri di sostenibilità per gli interventi sul territorio e di avere strumenti di valutazione per la verifica dei soddisfacimenti di questi criteri. Per tale motivo, è stato istituito il Protocollo ITACA68 Nazionale 2011, che viene usato come autovalutazione di strutture residenziali su tutto il territorio italiano.

ITACA nasce come uno strumento di valutazione del livello di sostenibilità delle costruzioni, in particolare del livello di sostenibilità energetico ambientale degli edifici nelle fasi di progetto, costruzione ed esercizio. Il Protocollo ITACA si basa su una checklist di criteri di valutazione utili per quantificare le prestazioni dell'oggetto edilizio connesse alle tematiche ambientali. I criteri a loro volta vengono quantificati nella pratica attraverso indicatori di prestazione cui è associato un punteggio numerico. La valutazione complessiva dei punteggi relativi a tutti i criteri determina il livello di sostenibilità energetico - ambientale raggiunto. Il Protocollo ITACA è composta da 35 schede che analizzano ogni singolo requisito relativo ai diversi aspetti dell'eco-sostenibilità di un progetto è in linea con la direttiva comunitaria 2010/31/UE, che prevedeva un consumo energetico quasi azzerato per gli edifici pubblici nel 2020. Tra tutti i criteri di valutazione, il Protocollo ITACA, è l'unico che attribuisce un punteggio negativo, infatti si va da -1 a +5, punteggio che viene assegnato dopo un confronto con i valori dello standard di paragone o scala di prestazione (benchmark). Il punteggio zero identifica il rispetto della pratica costruttiva corrente, che rispetta le leggi o i regolamenti vigenti.

1.5.2 Metodi di valutazione sintetici

I metodi sintetici sono basati (in modo approfondito e oggettivo) su pochi indicatori di tipo quantitativo, che permettono di effettuare una valutazione degli impatti ambientali di un prodotto, di un processo o di un servizio. A livello internazionale, prende sempre più piede e importanza la **Life Cycle Assessment (LCA)**, che è stato

definito come “*il processo per identificare i carichi ambientali associati ad un prodotto, processo o attività, identificando e quantificando energia e materiali utilizzati ed emissioni rilasciate nell’ambiente per valutarne l’impatto, per identificare e valutare le opportunità di miglioramento*”.

La valutazione LCA di un prodotto prende in esame tutto il suo ciclo di vita, partendo dall’estrazione e trasformazione delle materie prime, passando per la fabbricazione del prodotto, il trasporto e la distribuzione, analizzando le fasi di utilizzo, riuso, stoccaggio, riciclaggio, giungendo poi alla dismissione del prodotto.

L’analisi LCA prende piede in ambito industriale alla fine degli anni ‘70, sviluppandosi sempre di più nel corso del tempo, soprattutto durante gli anni ‘90. La sua struttura metodologica e le sue procedure di applicazione, sono state standardizzate a livello internazionale, tanto che la LCA ha iniziato ad essere utilizzata per individuare i criteri ecologici di tutti quei prodotti che vogliono ottenere l’etichettatura ecologica Ecolabel².

Il principio alla base di tutto il processo LCA è quello di cercare di ridurre, quanto più possibile, tutti gli impatti negativi, massimizzare il riciclaggio e selezionare quei materiali che presentano un ridotto impatto ambientale. Sembra quasi affiancarsi al principio dell’ecologia, ovvero, “massimizzare la diversità, diminuendo l’uso delle risorse”.

Uno dei primi fattori che limita notevolmente l’applicazione della procedura di LCA è sicuramente la quantità di operatori interessati al ciclo dell’edificio e la loro diversità. Gli operatori sono indicati come progettisti, imprese di costruzione, fruitori, imprese di demolizione, imprese di smaltimento, ognuna delle quali presenta delle modalità operative differenti, non omogenee, variabili in funzione della dimensione, dell’attività e della localizzazione geografica. Un secondo fattore di difficoltà è il reperimento dei dati, perché riferendoci ad un edificio, la verifica è complessiva e studia tutti i componenti che interagiscono tra di loro assumendo in questo caso comportamenti complessivi diversi da quelli che vengono attribuiti singolarmente. Inoltre è difficile valutare i benefici economici dovuti ai costi di esecuzione, in relazione all’importo complessivo, soprattutto quando in esame si trova un edificio di piccole dimensioni.

² Ecolabel è il marchio di qualità ecologica dell’Unione Europea, istituito nel 1992 dal Regolamento n.88/92 ed oggi disciplinato dal regolamento CE n.66/2010.

Nonostante ciò, piuttosto che applicare delle procedure troppo rigide che avrebbero ridotto notevolmente l'ambito di applicazione, si è deciso di intervenire sui singoli componenti edilizi, che trova un campo di più facile applicazione. Questo porta ad una notevole riduzione delle variabili considerate, in quanto si rifanno solamente al singolo elemento e non al contesto intero dell'edificio, riducendo così i dati da analizzare.

Gli aspetti principali della metodologia LCA, possono essere riassunti come segue: vengono valutati sia l'intero ciclo di vita di un prodotto (dall'estrazione e lavorazione delle materie prime, alla produzione e l'uso, fino al riciclaggio o allo smaltimento) sia la totalità degli impatti ambientali connessi al ciclo di vita (le emissioni nell'aria, nell'acqua e nel suolo, i rifiuti, il consumo di materie prime o l'uso del suolo) sia gli aspetti ambientali (la qualità dell'ecosistema, il cambiamento climatico e impatto sulle risorse). Bisogna altresì ricordare, che solo l'LCA è regolamentata dalle normative ISO.

La struttura di LCA è suddivisa in quattro momenti principali:

- **Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio:** quali prodotti si studiano, l'unità funzionale, i confini del sistema, le assunzioni e i limiti, l'applicazione prevista e le motivazioni, a chi è indirizzato lo studio.
- **Analisi d'inventario (LCI):** consiste nella raccolta di dati e nelle procedure di calcolo volte a quantificare i flussi in entrata e in uscita rilevanti di un sistema di prodotto, in accordo all'obiettivo e al campo di applicazione.
- **Valutazione degli impatti (LCIA):** La valutazione dell'impatto del ciclo di vita ha lo scopo di valutare la portata dei potenziali impatti ambientali utilizzando i risultati dell'analisi di inventario del ciclo di vita.
- **Interpretazione:** è un procedimento sistematico volto all'identificazione, qualifica, verifica e valutazione dei risultati delle fasi di inventario e di valutazione degli impatti, al fine di presentarli in forma tale da soddisfare i requisiti dell'applicazione descritti nell'obiettivo e nel campo di applicazione, nonché di trarre conclusioni e raccomandazioni.

Nel corso della vita utile del bene edilizio si assiste ad una progressiva diminuzione dei livelli prestazionali, ossia della capacità di soddisfare le esigenze dell'utenza da parte dell'organismo, dei sistemi, dei componenti e dei materiali in maniera diversificata (modalità e tempi), in dipendenza di numerosi fattori fra cui la destinazione ed i modi d'uso, il contesto sollecitante, ecc. Quando tali prestazioni

raggiungono un livello minimo accettabile occorre mettere in atto interventi di manutenzione per riportare le prestazioni ad un livello adeguato al fine di garantire una continuità di servizio sotto il profilo tecnico e funzionale. Infatti, preso atto che una corretta manutenzione debba contribuire a far sì che l'opera mantenga per una vita di esercizio economicamente ragionevole i propri requisiti, non va trascurato l'aspetto secondo cui la riduzione del consumo di risorse di materie prime, può essere conseguito attraverso il prolungamento del ciclo di vita utile dei singoli edifici e delle diverse parti che li costituiscono.

Intorno a queste tematiche fervono attività di ricerca e normative.

1.5.3 Attività di ricerca

Esistono diversi modi per descrivere il ciclo di vita di un edificio. Esiste un modello fisico consolidato in Europa sviluppato dal gruppo CEN/TC 350 in UNE- EN 15978: 2012, basato sulla configurazione modulare sviluppata inizialmente dal gruppo internazionale ISO/TC 59/SC 17 in ISO 21931- 1: 2010.

Secondo questo modello [Tab.3], le fasi del ciclo di vita degli edifici sono generalmente suddivise in fase di pre-utilizzo, di uso e di post-utilizzo.

Tabella 3 Fasi del ciclo di vita. EN 15978:2011.

Building Assessment Information														
Building Life Cycle Information													Supplementary Information beyond the Building Life Cycle	
A1-A3			A4-A5		B1-B7					C1-C4				D
Product stage			Construction process stage		Use stage					END LIFE stage				Benefit and loads beyond the system boundary
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	
Raw material supply	Transport	Mnufacturing	Transport	Construction Process	Use	Maintenance	Repair	Replaceent	Refurbishment	De-Construction	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse - Recovery Recycling potential
					B6	Optional energy use								
					B7	Optional water use								

- Il ciclo di vita di un edificio si suddivide in quattro fasi principali:
- Fase del prodotto (A1-3)
- Fase del processo di costruzione (A4-5)
- **Fase di utilizzo (B1-5)**
- Fase di fine vita (C1-4).

Esiste anche un modulo aggiuntivo e separato (modulo D: vantaggi e carichi oltre il limite del sistema).Ogni fase è ulteriormente suddivisa in diversi moduli. Si evidenzia inoltre una distinzione tra impatti incorporati e operativi. La fase di

utilizzo copre la vita utile prevista dell'edificio, ovvero il numero presunto di anni di funzionamento. Nella pratica, 50-80 anni vengono usati abitualmente come periodi di riferimento delle valutazioni, anche se la struttura fisica di un edificio medio ha il potenziale perdurare più a lungo. La fase di utilizzo contribuisce notevolmente agli impatti del ciclo di vita calcolato. Tuttavia, lo sforzo continuo nel ridurre l'energia operativa negli edifici ha portato a un cambiamento nel ruolo delle fasi del ciclo di vita negli LCA degli ultimi edifici a bassa energia, dove gli impatti incorporati stanno acquisendo importanza[7].

L'approccio modulare consente una facile organizzazione ed espressione dei pacchetti di dati per l'intero ciclo di vita del prodotto. Pertanto, è raccomandato l'adozione del modello descritto nella standardizzazione internazionale applicandolo, se necessario, ad altri modelli descritti negli standard regionali o nazionali.

In generale, questo approccio richiede che i confini del sistema del prodotto per le fasi del ciclo di vita e i moduli di informazione inclusi siano trasparenti, ben definiti e applicabili al prodotto descritto.

Poiché la distinzione tra i moduli da B2 a B5 non è semplice, si consiglia di ricordare la distinzione tra i tre diversi vari concetti:

- La *manutenzione* deve comprendere tutte le azioni pianificate relative al mantenimento di un prodotto o di una parte di edificio, come operazioni di manutenzione preventive e regolari e operazioni di pulizia. La manutenzione deve essere intesa come l'insieme delle operazioni correlate al contesto eseguite in condizioni normali (ad esempio un prodotto potrebbe avere una manutenzione diversa in base ai climi diversi).
- La *riparazione* deve comprendere modifiche del prodotto e operazioni causate da incidenti, installazione o gestione impropria, eventi imprevedibili, ecc. Ciò include, ad esempio, la manutenzione correttiva (ovvero la sostituzione di un componente rotto). Il modulo di riparazione può anche essere applicato a sistemi complessi costituiti da componenti, la cui durata è inferiore rispetto al sistema complessivo.
- La *sostituzione* dovrebbe comprendere le operazioni relative alla sostituzione dell'intero prodotto a causa di un danno o per la fine della sua vita. I lavori di ristrutturazione dovrebbero comprendere le operazioni riguardanti la sostituzione di un intero elemento da costruzione come parte di un programma, concertato di manutenzione, riparazione e / o sostituzione dell'edificio.

All'interno della tesi, verrà posta particolare attenzione alla fase di **utilizzo del materiale**, all'interno della quale viene analizzato il concetto di *manutenzione*. L'attività di ricerca che ha come obiettivo lo studio dell'FRP in relazione al concetto di manutenzione, è stato fino ad oggi poco indagato. Tra gli obiettivi della ricerca, la manutenibilità dell'FRP in relazione al concetto di durabilità, assume un ruolo significativo.

Gli studi che impiegano il metodo LCA sono aumentati di recente, occupandosi della valutazione ambientale dei materiali da costruzione e delle prestazioni degli edifici, le loro pratiche di progettazione, costruzione e ristrutturazione. Diverse ricerche, che raccolgono studi basati su LCA applicata all'industria delle costruzioni, sono riportati nei lavori di Ortiz et al.[8], Zabalza Bribian et al.[9], Cabeza et al.[10]i quali hanno studiato diverse applicazioni edilizie e hanno valutato le prestazioni ambientali di materiali da costruzione, componenti e sistemi relativi al ciclo di vita complessivo dell'edificio.

In generale, ci sono due approcci alternativi adottati nell'applicazione della LCA all'industria delle costruzioni: LCA per materiali da costruzione e combinazioni di componenti (BMCC) e LCA dell'intero processo di costruzione (WPC) [8].

Nel primo approccio si valuta l'impatto ambientale dei materiali da costruzione; in particolare vengono considerati solo l'estrazione delle materie prime e il processo di fabbricazione. I risultati ambientali di questo approccio possono essere usati per definire la "Dichiarazione ambientale di prodotto" (EPD), infatti, l'EPD guarda alla relazione tra un prodotto e l'ambiente e si basa sulla LCA; contiene informazioni sull'acquisizione di materie prime, all'uso di energia, al contenuto di materiali e sostanze chimiche, alle emissioni in aria, terra e acqua e alla produzione di rifiuti.

Altri studi hanno applicato la tecnica LCA per studiare l'impatto ambientale della costruzione di materiali locali; per esempio è stato confrontato l'impatto ambientale della produzione di tre materiali da pavimentazione (linoleum, vinile e legno massiccio) in Svezia[11]; Asif e Muneer [12]hanno condotto LCA basata sul processo per i materiali usati nell'edilizia residenziale in Scozia: legno, alluminio, vetro, cemento e piastrelle di ceramica; allo stesso modo Fabiano e Ximenes [13] quantificano i benefici ambientali dell'uso di prodotti in legno in Australia, in confronto con materiali da costruzione alternativi; Koroneos e Dompros [14]hanno studiato il processo di produzione dei mattoni in Grecia. Altri esempi di studi LCA di materiali e prodotti da costruzione comprendono il rivestimento dei pavimenti in Germania Nebel, Zimmer et al. [15]; il confronto tra piastrelle di ceramica e marmo in Italia Nicoletti, Notarnicola et al. [16]; confronto tra bambù con il legno d'acciaio

in Europa occidentale van der Lugt, van den Dobbelsteen et al.[17]; l'uso di un rivestimento di biossido di titanio di dimensioni nano nel vetro Babaizadeh e Hassan [18]; l'uso di materiali a cambiamento di fase, PMC, nell'edilizia in Spagna Aranda-Usón, Ferreira et al. [19].

Nel secondo approccio, è stato valutato l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita dell'edificio, in particolare, vengono considerati la produzione e l'assemblaggio dei materiali da costruzione (fase di pre-utilizzo), il consumo totale di energia per il riscaldamento e il raffreddamento (fase d'uso), l'energia e i materiali per le operazioni di ristrutturazione/manutenzione (fase di manutenzione) e la demolizione dell'edificio (fase di fine vita). Diversi studi hanno tentato di valutare l'impatto ambientale dei sistemi di costruzione secondo questo approccio. Tali sforzi hanno spesso identificato le fasi del ciclo di vita con il più alto impatto ambientale. Questi studi si concentrano su due direzioni principali: una direzione si concentra sull'analisi delle nuove strutture, mentre l'altra direzione si concentra sull'analisi dell'intervento su edifici esistenti. Per quanto riguarda le nuove strutture edilizie, molti studi hanno concluso che il maggiore impatto ambientale si verifica durante la fase di utilizzo; si stima che il 70-90% del carico ambientale totale si verifica in questa fase [20]. Altre ricerche hanno mostrato che l'impatto ambientale della fase d'uso può essere significativamente ridotto da un migliore isolamento e dall'uso di energia rinnovabile [21][22].

Nonostante gli sforzi di ricerca concentrati sui nuovi edifici, che rafforzano efficacemente la consapevolezza comune sugli obiettivi di sostenibilità per le prospettive future, l'intervento sugli edifici esistenti non può essere trascurato in vista di una valorizzazione sostenibile del patrimonio edilizio. Tuttavia, ci sono pochissimi studi che valutano effettivamente l'impatto ambientale del retrofit edilizio; in particolare, questi studi affrontano l'impatto ambientale dell'intervento di retrofit energetico [23].

Mentre diversi studi hanno analizzato interi edifici, altri lavori di ricerca si sono concentrati su sottosistemi dell'edificio. Per esempio, Osman e Ries [24] hanno valutato l'impatto ambientale della costruzione e delle operazioni di un impianto di cogenerazione per soddisfare il requisito energetico dell'edificio.

Altri studi, invece, si concentrano solo su alcune fasi del ciclo di vita dell'edificio ad esempio Blengini [25] ha focalizzato lo studio sulla fase di fine vita dell'edificio, indagando su un edificio italiano, che è stato demolito tramite sabbiatura controllata.

Allo stesso modo, O'Brien, Guy et al. [26] ha condotto una LCA comparativa dei metodi di decostruzione per caserme militari. Guggemos e Horvath [27] e Bilec, Ries et al.[28] valutano l'impatto ambientale della fase di costruzione in diverse soluzioni.

1.5.4 Quadro normativo

Dopo i primi studi (1987) del CIB W80/RILEM 175 - *Service life prediction methodologies*, in campo **internazionale** la metodologia generale per la valutazione della **durabilità** di componenti edilizi, prevista dalla ISO 15686 - *Building and Constructed Assets Service Life Planning 3*, è finalizzata alla definizione della vita utile in condizioni di riferimento o Reference Service Life (RSL) e della vita utile in condizioni di progetto o Estimated Service Life (ESL). Alla prima si perviene attraverso prove sperimentali su campioni sottoposti a prove di invecchiamento accelerato in laboratorio e di invecchiamento naturale in esterno, ovvero da indagini statistiche o dati forniti dai produttori. Alla seconda si perviene correggendo i valori di RSL con il *Metodo Fattoriale* basato su fattori moltiplicativi che tengono conto delle condizioni particolari di utilizzazione.

Il riferimento normativo internazionale per l'esecuzione degli studi di LCA è rappresentato dalle norme ISO della serie 14040:

- **UNI EN ISO 14040:2021** Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi e quadro di riferimento;
- **UNI EN ISO 14044:2021** Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Requisiti e Linee guida.

La valutazione per le UNI EN ISO 14040 e UNI EN ISO 14044:2021 si riferisce al ciclo di vita di un prodotto (bene o servizio), la UNI EN ISO 14072 si riferisce a livello di organizzazione.

La Direttiva Europea 106/89/CEE4 per il riconoscimento dell'idoneità all'impiego, aveva già stabilito che i prodotti da costruzione devono soddisfare i sei requisiti essenziali per un periodo di vita economicamente ragionevole, al fine di assicurare, assieme alla qualità tecnologica, anche una equilibrata sostenibilità dell'organismo edilizio. Il nuovo Regolamento UE 305/2011, che modifica ed abroga la Direttiva 106/89/CEE, introduce il settimo requisito: *Uso sostenibile delle risorse naturali - Le opere di costruzione devono essere concepite, realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare: a) il riutilizzo o la riciclabilità delle opere di costruzione, dei loro*

materiali e delle loro parti dopo la demolizione; b) la durabilità delle opere di costruzione; c) l'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.

Nel 2006, sulla base dell'attività svolta dall'apposito Gruppo di lavoro UNI promosso dal BEST, usciva la norma UNI 11156. *Valutazione della durabilità dei componenti edilizi*, articolata in tre parti, approvata prima dalle Commissioni UNI "Processo edilizio" e "Prodotti e sistemi edilizi", e poi dalla Commissione centrale tecnica dell'UNI. Anche nel D.M. 2018 (*Norme Tecniche per le Costruzioni*), viene ribadito come gli aspetti della qualità, sicurezza e durabilità siano da perseguire in tutte le fasi di progettazione-costruzione dell'opera e venga introdotto il principio della *vita utile di progetto* per diverse classi di opere. Il committente e il progettista, di concerto, dichiarano nel progetto la vita utile dell'opera.

1.6 La durabilità nei materiali compositi

La durabilità degli FRP non è, un tema facile da affrontare, poiché il danneggiamento del materiale dipende sia dal comportamento delle fibre che della matrice. Tutti e due gli elementi giocano un loro ruolo nella definizione delle caratteristiche del materiale composito e le loro singole prestazioni devono essere garantite durante tutta la vita di progetto della struttura.

La matrice protegge le fibre e trasferisce le forze uniformemente tra le stesse, perciò il tipo e la qualità della fibra giocano un ruolo fondamentale. La qualità della resina dipende dall'assenza di difetti e dalla continuità della superficie. Per esempio se si eseguono tagli sui profili pultrusi, si espongono direttamente le fibre all'ambiente esterno e ciò può provocare effetti indesiderati da un punto di vista della durabilità e si provocano danneggiamenti che si propagano dalla regione di taglio a tutta la lunghezza del profilo.

Le caratteristiche delle resine che potrebbero aumentare la durabilità dei materiali FRP, indipendentemente dalla resina e dal tipo di fibra, sono:

- buon ricoprimento delle fibre con la resina;
- assenza di difetti, sia sulla superficie che nello spessore;
- assenza di vuoti;
- grado di cura del processo (una mancanza di controllo del processo non garantisce un buon legame trasversale tra fibra e matrice).

Le fibre garantiscono la rigidità e la resistenza del materiale composito, così che le prestazioni della struttura dipendono dalle loro principali caratteristiche meccaniche e dalla loro durabilità. In generale le fibre di vetro, utilizzate nei compositi oggetto di studio, sono però anche più sensibili agli ambienti alcalini, rispetto a quelle di carbonio o aramide.

La durabilità di un materiale composito FRP dipende, come già detto, non solo dalle proprietà dei materiali che lo costituiscono (matrice e fibre), ma anche dall'integrità dell'interfaccia tra i due componenti.

Risulta, pertanto, necessario avere una forte (solida) interfaccia fibra/matrice, poiché il deterioramento di questa interfaccia riduce la capacità di trasferimento degli sforzi tra le fibre, con una conseguente debolezza del materiale composito. Le osservazioni appena fatte sono alla base di una continua revisione dei processi di realizzazione degli FRP, in considerazione del fatto che il miglioramento delle prestazioni si può

ottenere anche ottimizzando le tecnologie ed usando resine di tipo diverso. I principali fattori che vengono riconosciuti come causa di riduzione della durabilità degli FRP sono: il deterioramento dovuto ai fattori ambientali e la riduzione delle proprietà meccaniche per effetto di carichi significativi prolungati nel tempo.

Uno dei fenomeni che possono influenzare la durabilità dei materiali compositi fibrorinforzati è il fenomeno del creep, al quale verrà data maggiore attenzione.

1.6.1 Il fenomeno del creep

I materiali viscoelastici, com'è possibile comprendere dalla stessa denominazione, combinano le caratteristiche dei solidi elastici e quelle dei fluidi viscosi, presentando un comportamento intermedio tra i due. Il comportamento viscoelastico è tipico dei polimeri ed è dovuto alla natura stessa del legame molecolare, che è causa di una naturale tendenza allo scorrimento, anche sotto l'azione di un carico costante. La velocità di scorrimento dipende sia dalla natura chimica dei polimeri, che dalla temperatura.

Un materiale viscoelastico è spesso detto materiale dotato di “**memoria**”, perché il comportamento di tali materiali dipende non soltanto dalle condizioni correnti di carico, ma anche dall'intera storia di carico manifestatasi fino a quel momento. La reologia è la scienza che ne studia il comportamento.

Caratteristica dei materiali viscoelastici è lo *scorrimento viscoso* (creep), ovvero l'aumento di deformazione nel tempo per effetto di una forza costante applicata ed il *rilassamento delle tensioni* nel caso di una deformazione imposta.

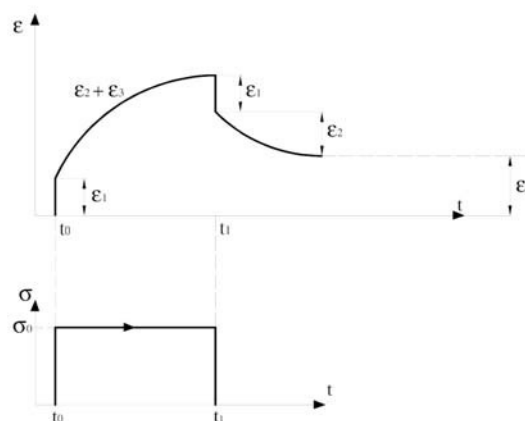


Fig. 9 Andamento nel tempo delle deformazioni del materiale viscoelastico.

La [Fig.9] mostra l'andamento nel tempo delle deformazioni di un materiale viscoelastico sottoposto ad una prova di creep e successivo scarico, secondo la seguente legge di carico: applicazione istantanea di una tensione σ_0 , che viene

mantenuta costante nell'intervallo di tempo (t_0, t_1) e poi riportata a zero. Nel diagramma (ϵ, t) osserviamo che la deformazione totale è somma di tre componenti proporzionali al carico: ϵ_1 e ϵ_2 rappresentano, rispettivamente, la deformazione elastica istantanea e ritardata, mentre ϵ_3 è la deformazione permanente non recuperabile e dovuta al creep.

Il creep nei materiali compositi

Anche i materiali compositi FRP esibiscono un comportamento viscoso (connesso sostanzialmente alle proprietà viscosi della resina polimerica che costituisce la matrice) che può pregiudicare nel tempo le loro caratteristiche meccaniche iniziali. Il fenomeno può essere visto come una riduzione nel tempo del modulo di Young del materiale.

Tale comportamento si evidenzia sottoponendo il materiale in esame a prove di creep, ossia a prove di trazione assiale, condotte per prefissati valori della temperatura, con carico applicato istantaneamente e poi mantenuto costante.

Se si fa riferimento al caratteristico diagramma (ϵ, t) di una tipica prova di creep [Fig.10], si osserva una deformazione elastica istantanea, successivamente una fase nella quale la deformazione cresce velocemente (nota come creep primario), a cui segue una ulteriore fase (detta creep secondario) nella quale l'incremento di deformazione nel tempo, ossia la velocità di creep, è pressoché costante. Per valori elevati della tensione si può arrivare (in una fase detta di creep terziario) alla rottura del provino.

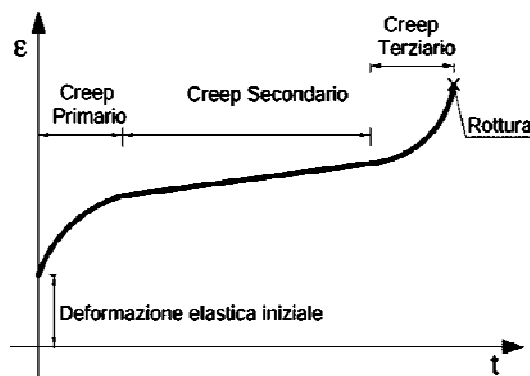


Fig. 10 Diagramma di andamento per una prova di creep.

La formulazione matematica generale del tasso di creep ha la seguente forma:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = F(\sigma, T) \quad (1.1)$$

ε è la deformazione da creep, t il tempo, T la temperatura e s la tensione.

La relazione (1.1) indica come la variazione nel tempo della deformazione da creep sia funzione della tensione e della temperatura. Il creep, rientra tra i comportamenti a lungo termine che caratterizzano la durabilità e l'affidabilità di un materiale, e quale dipende dalle caratteristiche di entrambi i materiali che costituiscono il composito.

Nel caso dei materiali compositi, quindi, F è funzione delle tensioni prodotte in entrambi i componenti, pertanto la resistenza al creep dipenderà dalla resistenza dei singoli componenti. In particolare, la deformazione da creep del componente a resistenza minore (matrice) sarà controllata dal materiale a resistenza maggiore (fibra). Ne consegue che una maggiore adesione tra i due componenti potrebbe anche comportare una resistenza maggiore di quella manifestata dai singoli componenti.

Per tutto quanto detto appare evidente, quindi, che il creep nei materiali polimerici compositi dipenda dai seguenti fattori:

- tipo di matrice;
- tipo di fibra, percentuale volumetrica e orientamento delle stesse;
- storia di carico;
- temperatura e umidità.

Essendo le fibre meno sensibili ai fenomeni viscosi di quanto non lo sia la matrice polimerica, un elevato contenuto in volume di fibre limita, in maniera più o meno sensibile a seconda del tipo di fibra, la deformazione a lungo termine del composito. Per quanto riguarda le fibre, abbiamo già visto nel paragrafo 1.3 che quelle in carbonio, rispetto al vetro ed all'aramide, sono le meno sensibili al fenomeno del creep.

Oltre che dalla composizione chimico-fisica delle fibre e dalla natura della matrice, il comportamento a creep degli FRP è influenzato anche da fattori di tipo ambientale, come la temperatura e l'umidità. In particolare la temperatura esalta i fenomeni viscosi, quanto più i valori di temperatura sono prossimi a quelli di transizione vetrosa della matrice.

Le deformazioni da creep dipendono, inoltre, anche dal livello delle tensioni mobilitate in condizioni di esercizio e dalla "storia di carico" precedente. Oltre a ciò, anche la direzione di applicazione del carico stesso, influisce sulla risposta, trattandosi di un materiale anisotropo per la presenza delle fibre lunghe di rinforzo.

1.6.2 Modelli viscoelastici elementari

I solidi elastici hanno la caratteristica di avere una forma propria, si deformano se sottoposti ad un carico esterno, ma non appena cessa l'azione delle forze esterne ritornano alla forma iniziale. Per essi vale la legge di Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon(1.2)$$

la quale lega lo sforzo alla deformazione, descrivendo il *legame costitutivo* di tali materiali.

I liquidi, al contrario, non hanno una forma propria, quindi gli sforzi interni non dipendono dalla deformazione, proprio perché non esiste una forma di riferimento, ma dipendono dalla velocità di cambiamento della forma, ovvero dalla velocità di deformazione (gradiente di velocità).

Per i liquidi vale la Legge di Newton:

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon}(1.3)$$

che lega tensione e gradiente di velocità tramite la costante η (viscosità).

Modello di Maxwell

Per descrivere le caratteristiche dei materiali che esibiscono un comportamento viscoelastico lineare da un punto di vista monodimensionale esistono modelli elementari basati su analogie meccaniche, ottenuti accoppiando in serie ed in parallelo molle elastiche e dissipatori viscosi.

Tra questi, il modello rappresentato in [Fig.11] che accoppia in serie una molla (di rigidezza E) ed un ammortizzatore viscoso (di rigidezza η), è noto come *modello di Maxwell*.



Fig. 11 Modello di Maxwell.

La deformazione al generico istante t è data dalla somma della deformazione della molla e di quella dell'ammortizzatore.

Indicando con ε la deformazione al generico istante t del modello di Maxwell e con ε_S e ε_D , rispettivamente, quelle della molla e dell'ammortizzatore, risulta:

$$\varepsilon = \varepsilon_S + \varepsilon_D \quad (1.4)$$

da cui, derivando rispetto al tempo, si ottiene:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_S + \dot{\varepsilon}_D \quad (1.5)$$

Sostituendo nella (1.4), le (1.2) e (1.3), si ottiene:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (1.6)$$

La (1.6) rappresenta l'equazione differenziale che descrive il comportamento di un materiale viscoelastico interpretato con il modello di Maxwell.

Sottoponiamo il materiale ad una prova di creep, in cui la tensione viene istantaneamente portata al valore σ_0 e poi mantenuta costante nel tempo [Fig.12].



Fig. 12 Prova di creep.

Dalla (1.6) si ricava che il fenomeno esaminato è descritto dall'equazione differenziale del primo ordine:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{\eta} \quad (1.7)$$

che, integrata con la condizione iniziale:

$$\varepsilon(t - t_0) = \frac{\sigma_0}{E} \quad (1.8)$$

essendo nulla all'istante t_0 la deformazione del dissipatore, fornisce il legame costitutivo del modello di Maxwell, che si traduce nella seguente relazione:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 + \frac{E}{\eta} (t - t_0) \right] \quad (1.9)$$

Indicando con t_r il tempo di ritardo:

$$t_r = \frac{\eta}{E} \quad (1.10)$$

Si ricava in definitiva:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 + \frac{1}{t_r} (t - t_0) \right] \quad (1.11)$$

Il grafico della relazione (1.11) è rappresentato nella [Fig.13], dalla quale si evince che un materiale di Maxwell esibisce inizialmente una deformabilità pari ad $1/E$; poi la deformazione cresce nel tempo con legge lineare di coefficiente angolare pari a $\frac{\sigma_0}{E}$.

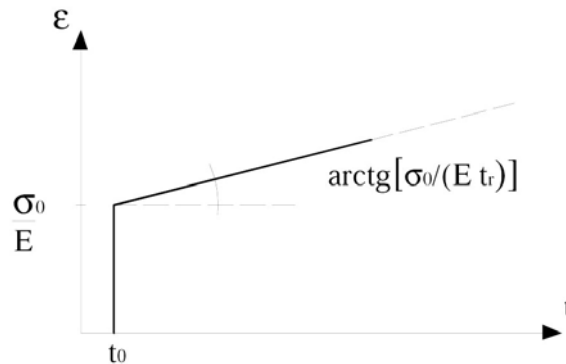


Fig. 13 Legame costitutivo viscoelastico secondo il modello di Maxwell.

Ipotizziamo di sottoporre il modello di Maxwell alla legge di carico, come visibile nella Fig.14a), ottenibile per sovrapposizione delle due di Fig.14b) e 45 c), la tensione è portata istantaneamente al valore s_0 all'istante $(t - t_0)$, poi mantenuta costante nell'intervallo (t_0, t_1) ed all'istante t_1 istantaneamente azzerata.

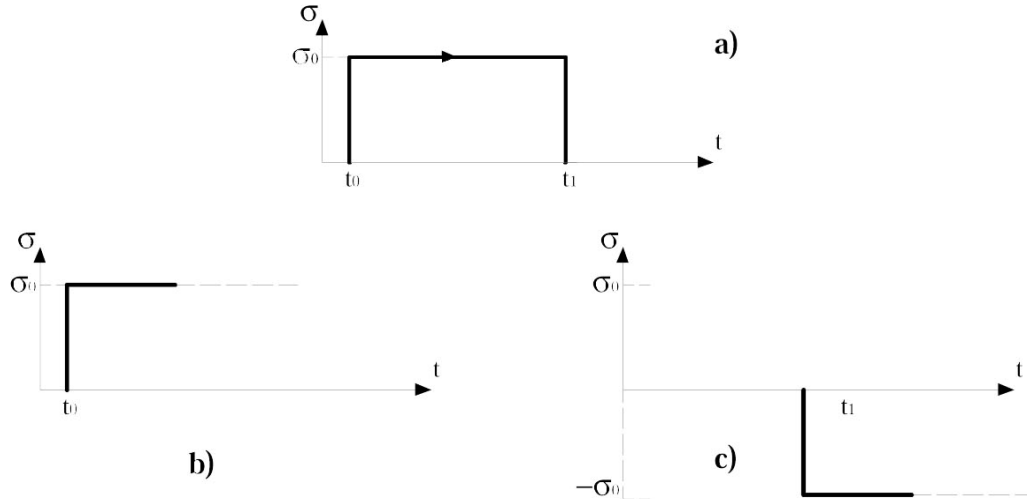


Fig. 14 Legge di carico.

Considerata la linearità della (1.11) la risposta del materiale alla legge di carico indicata nella [Fig.13] si può ottenere per sovrapposizione degli effetti.

In particolare per $t > t_1$ risulta:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 + \frac{1}{t_r} (t - t_0) \right] - \frac{\sigma_0}{E} \left[1 + \frac{1}{t_r} (t - t_0) \right] = \frac{\sigma_0}{Et_r} (t_1 - t_0) \quad (1.12)$$

con $t > t_1$

Il grafico della (1.12) è rappresentato nella [Fig.15].

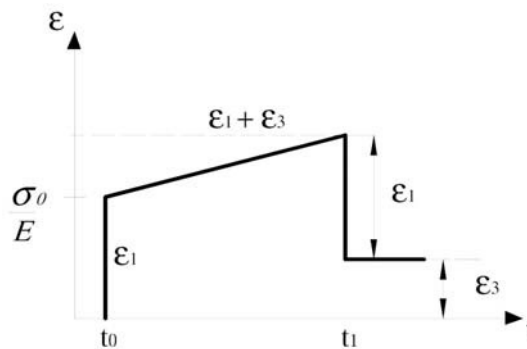


Fig. 15 Comportamento del modello di Maxwell ad una prova di creep.

In questo caso la deformazione è somma di due termini:

$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E}$ che rappresenta la deformazione elastica iniziale e che viene interamente recuperata all'istante t_1 di scarico, e

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_0}{Et_r} (t_1 - t_0) \quad (1.13)$$

Che rappresenta la deformazione viscoelastica, che residua allo scarico.

Dal grafico della [Fig.15] si evince allora che il modello di Maxwell riproduce il fenomeno della elasticità istantanea, ma non quello della elasticità ritardata. Tutta la deformazione viscosa si tramuta in deformazione residua: *in altri termini tutta la deformazione viscoelastica è irreversibile.*

Il modello di Maxwell interpreta bene il comportamento viscoso dei materiali polimerici a struttura amorfa senza legami chimici tra le molecole.

Modello di Voigt

Tra i modelli viscoelastici lineari va ricordato anche il Modello di Voigt o Kelvin, in cui, contrariamente al modello di Maxwell l'elemento elastico e quello viscoso sono disposti in parallelo. Quando una sollecitazione (F) costante è applicata al sistema la deformazione della molla può venire ritardata dallo smorzatore; in tal caso la sollecitazione totale sarà la somma della sollecitazione che compete alla molla e di quella che compete allo smorzatore:

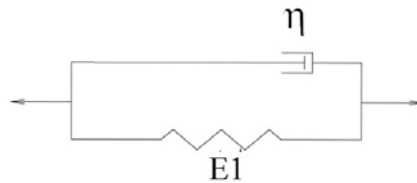


Fig. 16 Modello di Voigt.

$$F = \eta \frac{d\sigma}{dt} + E\sigma \quad (1.14)$$

Dalla prova di creep si osserva che, per un tempo infinito $F = F_0$, separando e integrando si ha:

$$\sigma(t) = \sigma_0 [1 - \exp(-t/\lambda)] \quad (1.15)$$

Il tempo λ che caratterizza la deformazione del materiale in funzione del tempo ci permette di effettuare una classificazione tra i materiali sulla base dei tempi sperimentati t_e :

- $t_e < \lambda$ Comportamento Elastico Ideale;
- $t_e > \lambda$ Comportamento Fluido Viscoso Ideale;
- $t_e \cong \lambda$ Comportamento Visco-Elastico.

Modello Standar Linear Solid

Per descrivere il comportamento di un elastomero (solido viscoelastico) è necessario utilizzare quindi, sia il modello di Maxwell che quello di Voigt;

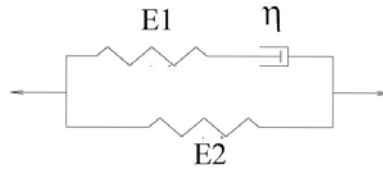


Fig. 17 Modello Standar Linear Solid.

Il modello ottenuto ponendo in parallelo con il modello di Maxwell un elemento elastico, prende il nome di Standard Linear Solid la cui generalizzazione prende il nome di modello di Zener:

$$F = F_1 + F_2 \quad (1.16)$$

Dove F_1 è la forza localizzata nella molla k_1 e F_2 è la forza localizzata nel modello di Maxwell; dunque, la deformazione della molla k_1 e dell'elemento di Maxwell è la stessa.

Per la molla si può scrivere:

$$\sigma = \frac{F_1}{k_1} \quad (1.17)$$

e per il modello di Maxwell:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{k_2} \frac{dF_2}{dT} + \frac{F_2}{c_2} \quad (1.18)$$

effettuando le dovute sostituzioni e risolvendo l'equazione differenziale si ottiene:

$$\sigma(t) = \frac{F_0}{k_1} \left(1 - \frac{k_2}{k_1 + k_2} e^{\alpha t} \right) \quad (1.19)$$

dove

$$\alpha = -\frac{k_1 k_2}{(k_1 + k_2) c_2} \quad (1.20)$$

Le difficoltà incontrate per determinare le caratteristiche meccaniche degli elastomeri hanno spinto l'attenzione verso procedure sperimentali alternative per lo studio del loro comportamento viscoelastico. Il metodo del "modulo complesso" consiste nell'applicare ad un materiale viscoelastico, uno sforzo sinusoidale $[\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen} \omega t]$, la deformazione risultante avrà ancora un andamento sinusoidale con frequenza ω ma in ritardo (δ) rispetto alla sollecitazione $[\gamma = \gamma_0 \text{sen}(\omega t - \delta)]$.

Scomponendo lo sforzo in una componente in fase ed una in quadratura con la deformazione, si ottiene:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t - \delta) \cos \delta + \sigma_0 \cos(\omega t - \delta) \sin \delta \quad (1.21)$$

allora si può scrivere il modulo complesso:

$$G' + iG'' \quad (1.22)$$

si identifica anche il fattore di perdita:

$$\tan \delta = G'/G'' \quad (1.23)$$

dove:

- $G' = [(\sigma_0/\gamma_0) \cos \delta]$ è in fase con la deformazione ed è chiamato “storage modulus” in quanto rappresenta l’energia immagazzinata nel materiale;
- $G'' = [(\sigma_0/\gamma_0) \sin \delta]$ è in quadratura con la deformazione ed è chiamato “loss modulus” e rappresenta l’energia dissipata ad ogni ciclo.

Un altro principio importante per lo studio dei materiali viscoelastici è il “principio di sovrapposizione Tempo-Temperatura”. È stato infatti osservato, che un aumento ΔT di temperatura equivale ad uno spostamento nella scala dei tempi e vice-versa [$\alpha_T = \Delta \log(t)$]; la relazione che ne segue è detta legge di Williams-Landel-Ferry (WLF):

$$\ln \alpha_T = \frac{40(T-T_g)}{52+T-T_g} \quad (1.24)$$

in cui T è la temperatura di prova e T_g è la temperatura di transizione vetrosa, ambedue espresse in gradi Kelvin; α_T è il fattore di traslazione corrispondente al passaggio dalla temperatura T_g alla temperatura T .

La legge, tuttavia, è valida solo per i Polimeri Amorfi e per intervalli di temperatura tali che: $T_g < T < T_g + 100$.

In quest’ottica si inserisce la cosiddetta “teoria fenomenologica” che base i suoi principi sulle relazioni che intercorrono in un materiale elastico tra energia immagazzinata e deformazione senza tenere conto della struttura del materiale.

1.6.3 Viscosità non lineare

Un sistema che presenta caratteristiche non lineari quando non esiste una relazione di proporzionalità tra la forza e la prima potenza dello spostamento; in questo caso, il principio di sovrapposizione degli effetti non può più essere applicato per la risoluzione del problema si devono scrivere equazioni differenziali non lineari. Sistemi non lineari mostrano una relazione tra frequenza propria e ampiezza di

oscillazione; la frequenza diminuisce all'aumentare dell'ampiezza nel caso di sistemi sottolineari (molle 'soffici' – softening), invece aumenta con l'ampiezza di oscillazione per sistemi sovra lineari (molle 'dure' – hardening); ne risulta che il modulo dinamico è funzione della deformazione. Si può in definitiva affermare che un materiale viscoelastico contenente nerofumo o altre cariche presenta diversi valori di modulo per ciascuna frequenza e temperatura; il modulo statico varia in seguito all'applicazione di cicli di deformazione e, infine, la misura del modulo dinamico deve essere effettuata in condizioni quanto più simili a quelle operative.

Smorzamento

Lo smorzamento può essere classificato essenzialmente in due categorie:

- a. material damping;
- b. non-material damping.

Il primo tipo è dovuto allo 'smorzamento interno' del materiale quindi dipende dalla natura del materiale in esame; alla seconda categoria appartengono sia lo smorzamento del mezzo circostante, noto come 'smorzamento viscoso', sia lo smorzamento di contatto nelle aree di giunzione noto come 'smorzamento Coulombiano' o 'dry damping'.

a. Smorzamento interno

Nello smorzamento interno i materiali tradizionali utilizzati nell'ingegneria dissipano piccole quantità di energia durante un ciclo di deformazione (un ciclo completo di deformazione sotto carico alterno è rappresentato da un'ellisse molto schiacciata) se paragonate con l'energia dissipata da materiali come gomma, elastomeri e polimeri. Gli inconvenienti principali nell'utilizzo di materiali altamente smorzanti sono dovuti alle loro caratteristiche meccaniche spesso insufficienti per applicazioni di tipo strutturale e alla difficoltà di analisi e simulazione a causa del loro comportamento non-lineare.

b. Smorzamento viscoso

Nello smorzamento viscoso la forza in questo caso risulta essere funzione della velocità di vibrazione ed è dovuta alla resistenza del fluido durante l'oscillazione. La descrizione matematica di un fenomeno così complesso risulta onerosa, un'analisi semplificata può essere effettuata considerando un elemento di tipo viscoso. La forza F è variabile linearmente con la velocità del fluido e può essere descritta dall'equazione:

$$F = c \frac{dx}{dt} \quad (1.25)$$

in cui c il coefficiente di viscosità e $\frac{dx}{dt}$ la velocità delle particella in relazione al fluido.

L'energia dissipata in un ciclo è data da:

$$W_d = \int F dx \quad (1.26)$$

se consideriamo un sistema massa-molla con smorzamento viscoso soggetto ad una forzante sinusoidale ($F = F_0 \sin \omega t$), l'energia dissipata in un ciclo è proporzionale alla frequenza della forzante e al quadrato dell'ampiezza della risposta ($x = X \sin(\omega t - \Phi)$):

$$W_d = \int c \frac{dx}{dt} dx = c \omega^2 X^2 \int_0^T \cos^2(\omega t - \Phi) dt \quad (1.27)$$

Da cui sapendo che $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$ si ricava che l'energia dissipata è data dall'area racchiusa dall'ellisse di equazione:

$$W_d = \pi c \omega X^2 \quad (1.28)$$

Se consideriamo anche la forza elastica presente nel sistema massa-molla allora avremo ancora un'ellisse ma con gli assi ruotati; l'area racchiusa sarà esattamente uguale alla precedente, il sistema dissipa la stessa quantità di energia; questa curva è nota come 'ciclo di isteresi'.

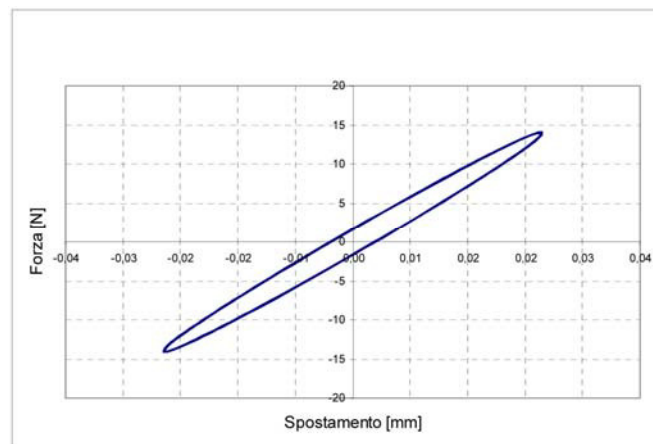


Fig. 18 Andamento di un qualunque ciclo di isteresi.

- **Smorzamento Columbiano**

La forza è data dal prodotto tra la forza normale alle due superfici di contatto 'N' e il coefficiente di frizione ' π ' e risulta indipendente dalla velocità relativa delle due superfici.

$$F_c = fN \quad (1.29)$$

- **Caratterizzazione dei materiali viscoelastici**

Un materiale viscoelastico è considerato un materiale con ‘memoria’ perché il suo comportamento dipende non solo dalle attuali condizioni di carico ma anche dalla storia dei cicli precedenti.

In genere, il comportamento dei materiali viscoelastici è approssimato con quello di un materiale isotropo con comportamento lineare per cui, la dilatazione è sempre di natura elastica mentre la distorsione viscoelastica è dovuta essenzialmente alla deformazione a taglio (shear deformation).

- **Misura dello smorzamento**

A causa della complessità del comportamento dei materiali viscoelastici vengono utilizzati diversi parametri per la misura dello smorzamento, i più comuni sono:

- Fattore di perdita
- Capacità di smorzamento specifica del sistema di vibrazione
- Rapporto di smorzamento
- Diminuzione delle vibrazioni libere
- Fattore di amplificazione risonante.

2. Sperimentazione sul materiale

I polimeri rinforzati con fibre di vetro (GFRP) hanno visto un uso limitato nella costruzione per decenni. A causa della necessità di riparare e adattare rapidamente le infrastrutture in rapido deterioramento, negli ultimi anni, il potenziale per l'utilizzo di materiali rinforzati con fibre è in fase di implementazione [29][30]. Il materiale rinforzato con fibre offre una migliore resistenza agli agenti ambientali, innumerevoli vantaggi nei suoi rapporti rigidità-peso e potenza-peso, rispetto ai materiali da costruzione convenzionali[31]. FRP è ormai noto a molti studiosi, ma ci sono ancora molte perplessità e aspetti che devono essere studiati circa la loro durata e le prestazioni in condizioni ambientali severe[32]. A differenza di altri materiali, i compositi FRP mostrano un'eccellente resistenza alla trazione nella direzione della fibra e una resistenza relativamente bassa nella direzione trasversale della fibra, il che dimostra un comportamento ortotropo del sistema [33][34]. Spesso sono stati simulati diversi test sul materiale, ma, in bibliografia ci sono pochi test meccanici eseguiti sul loro comportamento e sui processi di invecchiamento indotto come quelli qui di seguito proposti.

I telai in acciaio, le strutture strunt e reticolare vengono spesso usati come lavori di retrofit per aumentare la forza complessiva delle strutture in muratura contro le azioni sismiche. In termini di sostenibilità, non solo in termini di costi, ma anche in termini di ambiente, il peso dell'acciaio e la necessità di manutenzione possono diventare un problema critico. Una possibile soluzione può essere l'uso di profili polimerici rinforzati con fibre (PFRP) invece dell'uso dell'acciaio[35]. I tipici schemi di rinforzo disponibili in letteratura includono il riempimento di fessure e vuoti, la cucitura delle fessure, il rivestimento esterno, la post-tensione esterna o post-tensione interna con tiranti in acciaio, laminati con polimeri rinforzati con fibre (FRP) o poliurea rinforzata con rete FRP, installazione in prossimità della fessura di barre in FRP o montate in superficie (NSM), banda in polipropilene retrofit (banda PP) e banda FRP + PP retrofit [36][37].



Fig. 19 Installazione di barre NSM.

Questo capitolo esamina la durabilità a lungo termine dei compositi FRP utilizzati per strutture realizzate integralmente in materiale composito. Poiché la tecnologia FRP è in costante sviluppo, le normative e le linee guida utilizzate sono ancora oggi in fase di aggiornamento e oggetto di studio.

Vengono descritte, le condizioni in cui può trovarsi il materiale composito (FRP) in termini di agenti aggressivi che possono influenzare il suo rendimento e quindi, la sua durabilità. Le circostanze considerate per queste prove sono gli effetti dovuti dall'umidità, dai cloruri, dagli alcali, dallo stress, dalla temperatura, dalle azioni UV, dalla carbonatazione e dall'acido.

I risultati ottenuti da queste prove sono differenti a seconda della fibra che compone il materiale composito[§1.3.1]. Tuttavia, la variabilità può anche derivare dalla barra tecnica di produzione che durante il processo di pultrusione produce profili con all'interno delle differenze quantitative di materiale.

Nonostante ciò, i potenziali meccanismi di degradazione sono discussi con riferimento alla ricerca a livello internazionale.

La durabilità dell'FRP è stata prevalentemente misurata con metodi di prova accelerati che espongono i campioni ad ambienti più difficili di quelli che incontrerebbero normalmente in servizio. Questi dati sono poi utilizzati per estrapolare stime delle probabili prestazioni a lungo termine.

I cambiamenti meccanici nella resistenza alla compressione, nel taglio interlaminare, nella forza di adesione e nel modulo elastico, sono i migliori indicatori indiretti della durata del composito in FRP. Questi possono essere integrati da studi sulle proprietà fisiche e microstrutturali usando tecniche come TGA (Analisi Termogravimetrica), SE Microscopia (Elettroni a Scansione), DMA (Analisi Dinamica Meccanica), DSC (Calorimetria Differenziale a Scansione Calorimetria), scansioni di polarizzazione

potenzio dinamica, test di accoppiamento galvanico e FTIR (Spettroscopia Infrarossa con Trasformata di Fourier).

Anche se sono stati fatti notevoli progressi verso la comprensione del meccanismo di deterioramento del rinforzo FRP nel calcestruzzo, sono disponibili pochi dati di progettazione che possono essere facilmente utilizzabili dai progettisti. La mancanza di un accordo internazionale sui metodi dei test di durabilità sull'FRP, la variabilità dei metodi di produzione FRP, i vari tipi di fibre/polimeri, gli approcci di ricerca e la mancanza di dati sulle prestazioni in tempo reale, rende molto difficile il settaggio di queste prove.

Di seguito verranno presentati alcuni test sperimentali effettuati all'interno del Laboratorio di Scienze delle costruzioni dell'Università Iuav di Venezia in collaborazione con il dipartimento di Scienze Molecolari e Nanosistemi dell'Università Cà Foscari.

2.1 Prove di durabilità

La ricerca mostra i risultati sperimentali finali, relativi alle prestazioni meccaniche residue di campioni pultrusi soggetti ad invecchiamento indotto.

I campioni analizzati sono stati tagliati da un unico profilo pultruso con sezione a I, il materiale che li compone è fibra di vetro e poliestere (GFRP). Dal profilo sono stati tagliati un totale di 19 campioni le cui dimensioni sono 120,00 mm x 120,00 mm con uno spessore delle ali e del nucleo centrale pari a 8,30 mm [Fig.20]. Il peso di ogni provino è di 380,90 g.

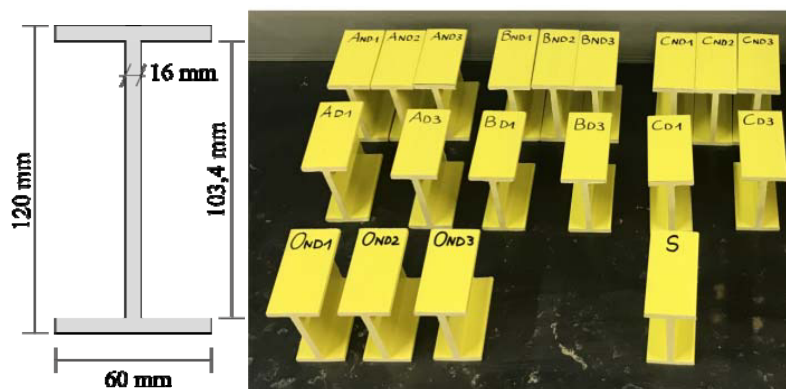


Fig. 20 Sezione descrittiva del profilo. Campioni prova utilizzati per i test.

Le proprietà meccaniche delle lastre e dei profili in GFRP sono state fornite dal produttore (Top Glass S.p.A., Osnago, Italia) e sono state basate su valori tabellari, che hanno poi tenuto conto della contemporanea presenza di fibre unidirezionali e matrice casuale sulla superficie [Tab.4].

Tabella 4 Caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato. TopGlass.

<i>PROPRIETA' MECCANICHE</i>	<i>Normativa</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori</i>
Peso specifico	ASTM D792	g/cm ³	1.9
Modulo elastico a flessione	EN 13706	GPa	28
Resistenza a trazione longitudinale	ASTM D638	MPa	450
Modulo elastico a trazione	ASTM D638	GPa	28
Resistenza a compressione	ASTM D695	MPa	250
Resistenza a taglio	ASTM D2344	MPa	30

Abbiamo scelto di lavorare attraverso tre prove sperimentali:

- Immersione in acqua lagunare;
- Esposizione ad agenti atmosferici;
- Esposizione ad alte temperature.

Per ogni prova sono stati utilizzati 3 provini danneggiati e 3 provini integri. È stato necessario effettuare due prove preliminari prima di danneggiare i campioni.

La prima prova è stata eseguita sul Provino da Sacrificio denominato provino S, lo stesso, è stato sottoposto ad una prova a compressione per determinarne il carico massimo. La prova a compressione è stata eseguita utilizzando una macchina speciale per la compressione del calcestruzzo con un controllo dello spostamento (velocità della corsa) e una velocità costante di 0,5 mm / min. Il carico costante è stato applicato sul provino fino allo snervamento totale dello stesso. Il collasso del campione è arrivato in un tempo pari a 8 minuti, con un carico massimo di 529,71 kN [Fig. 21-22].

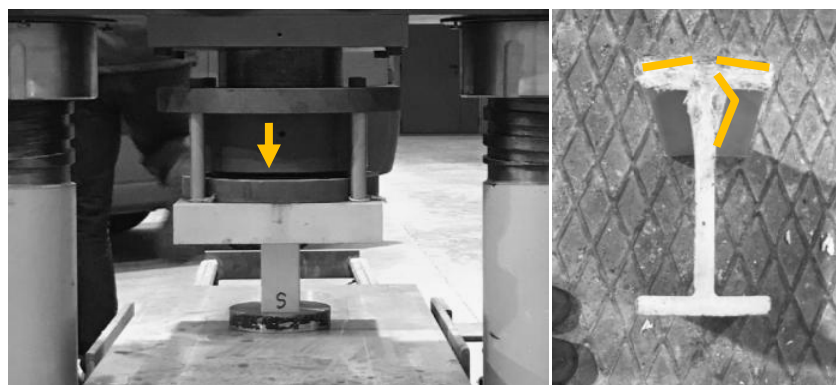


Fig. 21 Provino durante il processo di compressione e provino al termine della prova.

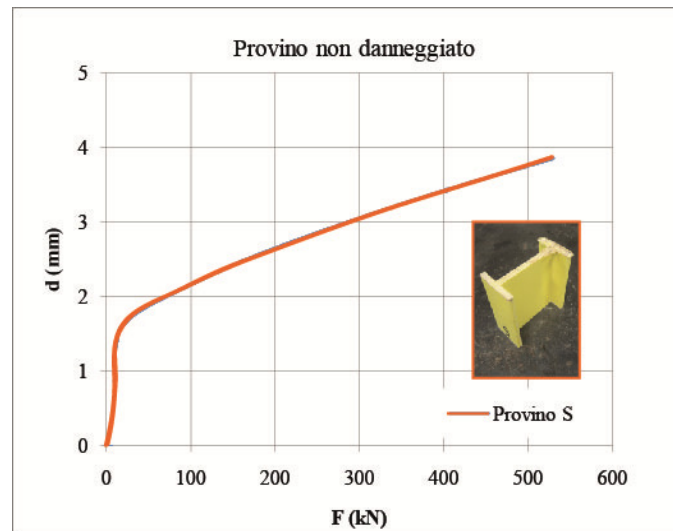


Fig. 22 Risultati del test di compressione.

Il secondo campione è stato sottoposto a due test all'interno del Laboratorio di Nanotecnologie dell'Università Cà Foscari.

Il primo test effettuato, prende il nome di termogravimetria (TG), tale test ha permesso di comprendere nel dettaglio la composizione del materiale e di verificare che le caratteristiche compositive dichiarate dal produttore risultassero corrette. La TG, è una misura della perdita di peso del materiale polimerico, verificando di fatto, la quantità di vetro presente all'interno. Il test è stato eseguito su un campione di 25 mm x 25 mm, con un peso di 4,94 g, prelevato da un campione di prova. Il provino è stato inserito all'interno della macchina, con una temperatura costante impostata a 25°C. La temperatura è stata costantemente aumentata di 10°C/min, fino a raggiungere i 1000°C. La prima perdita significativa di materia si è verificata intorno ai 400°C; una seconda perdita è stata avvertita al raggiungimento dei 540°C, ma sono visibili una serie di attività termiche tra 249°C e 255°C [Fig.23]. A seguito di questo test è stata confermata la composizione del materiale dichiarato dal venditore, in percentuale sono presenti 60% di matrice polimerica e 40% di componente vetrosa. Per verificare la prova termogravimetrica, si è scelto di procedere con il test di calorimetria differenziale a scansione, meglio conosciuta come DSC (Differential Scanning Calorimetry), ASTM D3418 e ASTM E 1999, che ha confermato i risultati ottenuti dalla termogravimetria. L'ultimo test effettuato è la spettrofotometria infrarossa (FTIR-ATR), che restituisce uno spettro FT-IR, in riflettanza totale attenuata. Il test utilizzato, permette di riconoscere i gruppi funzionali internamente presenti nel materiale.

Dal grafico sottostante risultano maggiormente presenti nel materiale i valori corrispondenti ai gruppi funzionali acrilici, il principale dei quali è il carbonile, visibile a 1720 cm⁻¹[Fig.24].

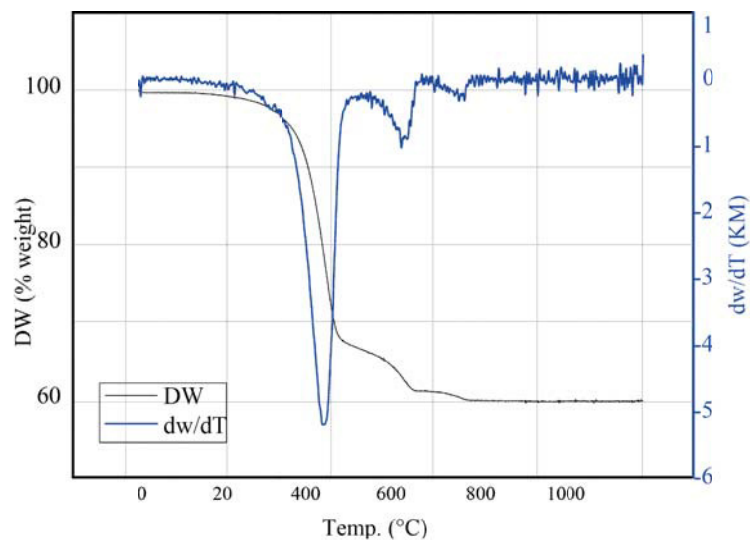


Fig. 23 Risultati dell' analisi TG. Il picco evidenzia la perdita di materiale vetroso attorno ai 400°C.

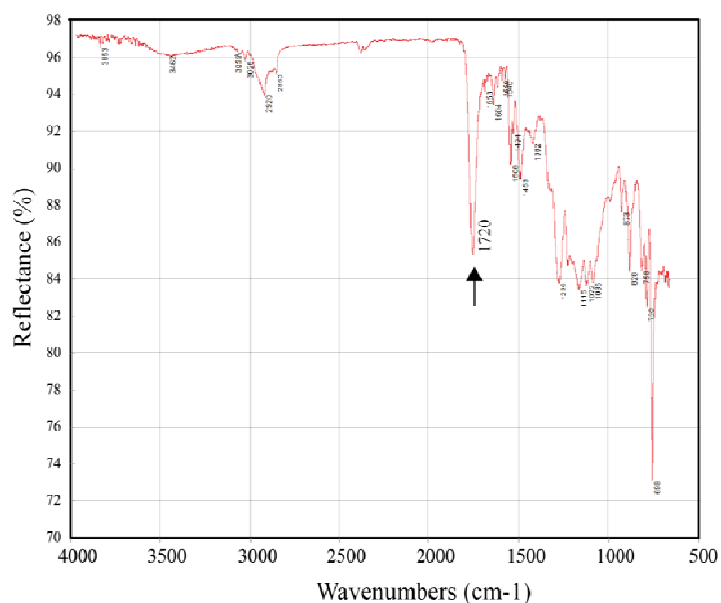


Fig. 24 Risultato dell' analisi FTIR-ATR. Il picco evidenziato indica la presenza di carbonile.

A seguito delle due prove preliminari si è proceduto ad indurre i danni in 9 campioni, la divisione dei provini utilizzati per i test, è visibile nella tabella di seguito riportata [Tab.5].

Le tipologie di danni indotti sui profili sono tre, a cui sono stati assegnati tre sigle, una per ogni classificazione [Fig.25]:

Tipo D1 - Foro sul nucleo centrale. Il foro è stato posto in posizione centrale sull'anima dei provini, diametro pari a 9 mm, come da CNR DT-205/2007;

Tipo D2 - Taglio sull'anima centrale. Il taglio è stato effettuato sull'anima dei provini, con dimensioni 19,83 mm x 3,00 mm secondo le norme EN 13706-2;

Tipo D3 - Compressione. I provini sono stati sottoposti a un carico pari all'80% del carico massimo.

Al termine di ogni prova (A-B-C-D), i provini sono stati portati al collasso. Prima di procedere alla prova a compressione, sono stati applicati tre stain-gauges su ciascun profilo in modo da poter monitorare le deformazioni durante la prova a compressione.

Tabella 5 Provini divisi per prove e tipologia di danno indotto.

A. Esposizione agenti atmosferici	AD1- foro sull' anima	AND1 – non danneggiato
	AD2-taglio sull'anima	
	AD3-compressione 80%	
B. Immersione in acqua	BD1- foro sull' anima	BND1 – non danneggiato
	BD2-taglio sull'anima	
	BD3-compressione 80%	
C. Alte temperature 120°C-stazionaria	CD1- foro sull' anima	CND1 – non danneggiato
	CD2-taglio sull'anima	
	CD3-compressione 80%	
D. Alte temperature 120°C-ciclica	DD1- foro sull' anima	DND1 – non danneggiato
	DD2-taglio sull'anima	
	DD3-compressione 80%	

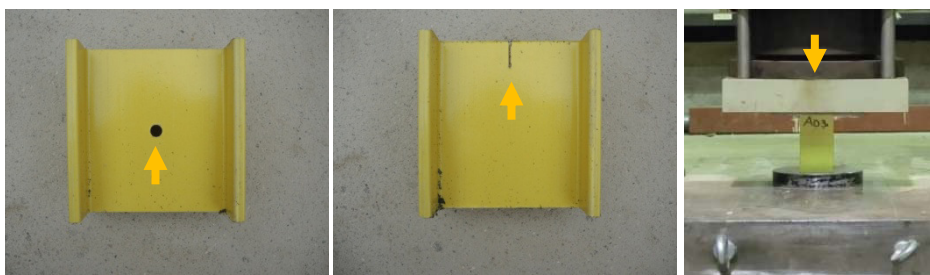


Fig. 25 Provini con le tipologie di danno indotto *D1,D2,D3*.

A. Esposizione agli agenti atmosferici:

Per la prova sono stati utilizzati 6 campioni di cui 3 danneggiati e 3 non danneggiati [Tab 5, A-Esposizione agenti atmosferici]. I provini sono stati collocati su una copertura piana del Laboratorio Labsco (EST 12° 15'18" NORD 45° 28' 46"), priva di ombreggiatura durante le ore del giorno ed esposti ad un ciclo naturale di illuminazione e di agenti atmosferici per la durata di 6 mesi. I campioni sono posizionati ad una distanza di 50 cm l'uno dall'altro in modo che l'ombra di uno non

ricadesse sull'altro [Fig.26]. Sono stati posizionati con l'anima parallela al pavimento, senza alcun tipo di fissaggio. È stata misurata la temperatura dell'aria, l'umidità e la velocità media del vento su base giornaliera [Fig.27]. Al termine dei sei mesi, tutti i provini sono stati sottoposti a una prova a compressione, al fine di studiare la potenziale influenza della stagionalità e dell'ambiente sul loro comportamento in seguito all'invecchiamento naturale.

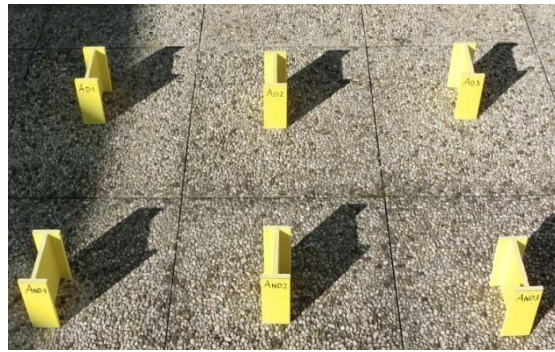


Fig. 26 Provini esposti agli agenti atmosferici.

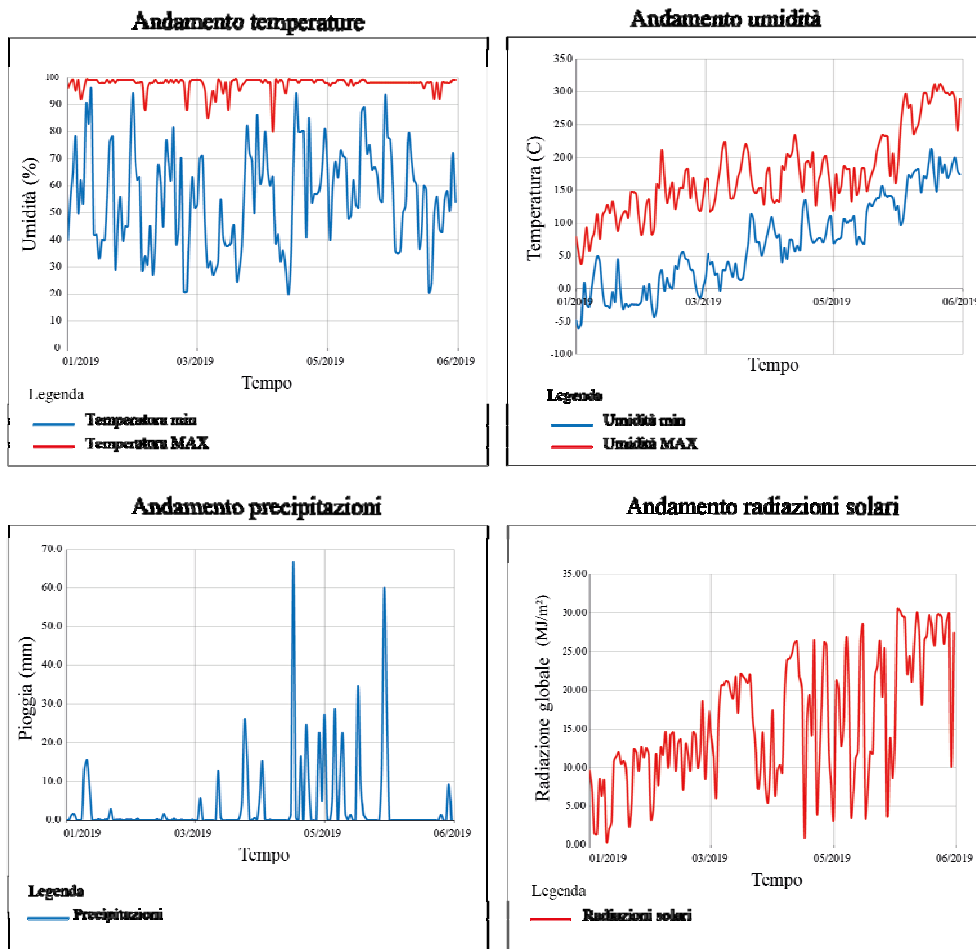


Fig. 27 Grafici andamento delle temperature e delle piogge nei 6 mesi riguardanti i test. Arpav

B. Prova di immersione in acqua lagunare:

Per il test sono stati utilizzati 6 provini, di cui 3 danneggiati e 3 integri [Tab.6, B-Immersione in acqua]. I provini sono stati immersi in acqua di laguna per una durata di 1000 ore. E' stata utilizzata una vasca collocata in una stanza priva di illuminazione al cui interno l'acqua è stata mantenuta ad una temperatura costante di 20,4 °C con un'umidità relativa del 12%. Dopo aver completato le prime 500 ore di immersione, i campioni sono stati asciugati e pesati utilizzando una bilancia elettronica con precisione di 0,01 mg. Dopo averli pesati sono stati immersi nuovamente nella stessa acqua per le restanti 500 ore. Il peso iniziale dei campioni variava da 375 g a 381 g. Al termine delle ore di immersione, tutti i campioni sono stati pesati. Ne è risultato che i provini non danneggiati hanno assorbito una maggiore quantità di acqua, pari a 0,6 g, rispetto a quelli danneggiati[Tab.6].

Tabella 6 Pesì dei provini prima e dopo la prova.

	Peso Iniziale	500 h	1000 h	Incremento Peso	
BND 1	384.74 g	385.09 g	385.32 g	0.58 g	+ 0.006%
BND 2	381.18 g	381.45 g	381.69 g	0.51 g	+ 0.005%
BND 3	376.87 g	377.26 g	377.47 g	0.60 g	+ 0.006%
BD 1	380.26 g	380.31 g	380.69 g	0.43 g	+ 0.004%
BD 2	381.52 g	381.52 g	381.84 g	0.32 g	+ 0.004%
BD 3	382.97 g	383.10 g	383.20 g	0.23 g	+ 0.002%

Bd * Provini danneggiati

Bnd** Non danneggiati

C. Prova ad alte temperature:

Per il test è stata utilizzata una muffola con una temperatura programmabile, in cui sono stati posti 6 campioni (3 danneggiati e 3 non danneggiati). I primi sei campioni sono stati posti all'interno della muffola con una temperatura interna iniziale della macchina pari a 20°C ± 3°C, è stata impostata una rampa pari a t1 = 1°C/min. La temperatura finale raggiunta è pari a t2 = 120°C, mantenuta costante per 15 min. Una volta raggiunto t2, per evitare la dispersione dei fumi, la muffola è stata riaperta dopo 24 ore. Per la seconda parte della prova, si è deciso di procedere con un ciclo termico della durata di 5 giorni. Il forno ha mantenuto le caratteristiche di partenza della prova precedente, ma la temperatura finale è stata diminuita a 100 °C. Una volta raggiunto t2 = 100°C, la muffola ha mantenuto la temperatura costante per 4 ore. Dopo aver raggiunto t2, la macchina è stata spenta per 19 ore durante le quali i provini sono rimasti all'interno. Il ciclo è stato ripetuto una volta al giorno per 5

giorni. Al termine dei 5 giorni, i provini sono stati portati fuori dalla muffola e lasciati raffreddare a temperatura ambiente prima di procedere con la prova a compressione[Fig.28].



Fig. 28 Provini sottoposti alle prove ad alta temperatura.

Effetti della temperatura:

I materiali polimerici, nel tempo, tendono a deformarsi applicando un carico costante. Questa deformazione, o flusso, deriva dal movimento molecolare delle catene polimeriche nel tentativo di minimizzare l'energia localizzata [38][39]. Con un aumento della temperatura, la frequenza del raggruppamento molecolare aumenterà, accelerando di conseguenza il processo di scorrimento. L'interpretazione fisica di questa dipendenza dalla temperatura è che tutti i tempi di ritardo, τ_i , per i processi molecolari responsabili del comportamento viscoelastico lineare dei polimeri vetrosi, sono influenzati nella stessa misura da un cambiamento di temperatura, T , secondo l'Eq. (2.1),

$$a_T = \frac{\tau_i(T_{ref})}{\tau_i(T)} \quad (2.1)$$

dove τ_i è l'iesimo tempo di ritardo, a_T è il fattore di spostamento della temperatura e T_{ref} la temperatura di riferimento. Diversi modelli semi-empirici che descrivono la dipendenza di a_T dalla temperatura sono stati proposti in letteratura[40]. Il loro uso, tuttavia, dipende dall'intervallo di temperatura coperto dai test. Per temperature inferiori a T_g , a_T può essere adattato utilizzando un modello log-polinomiale:

$$\log a_T(T) = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 \quad (2.2)$$

dove b_0 , b_1 , e b_2 sono parametri determinati adattando i dati ottenuti sperimentalmente all'Eq.(2.2).

L'approccio di cui sopra è indicato in letteratura come il principio di sovrapposizione tempo-temperatura (TTSP)[41], è data dalla forma generale e descritta dalla Eq.(2.3) :

$$S(t,T) = S_{ref}(aTt, T_{ref}) \quad (2.3)$$

dove $S(t, T)$ è una rappresentazione generica per qualsiasi componente di conformità e $S_{ref}(aTt, T)$ è la rappresentazione della conformità alla curva di riferimento[42].

Effetti dell'umidità:

L'assorbimento dell'umidità dei compositi in funzione del tempo è stato misurato in base al guadagno di massa, utilizzando la seguente formula:

$$M(t) = \left[\frac{m(t) - m_{dry}}{m_{dry}} \right] \times 100 \quad (2.4)$$

dove m_{dry} è la massa iniziale del provino, $m(t)$ è la massa del provino dopo l'immersione per il tempo t in ore e $M(t)$ è il contenuto percentuale di umidità del campione in funzione del tempo. La massa media iniziale dei campioni era di 380g circa [Tab.6]. Nel corso dell'esperimento, i campioni immersi in acqua a temperatura ambiente, hanno incrementato in loro peso da 0.50g a 0.20g, a seconda del danno che avevano subito. I provini non danneggiati, come visibile dalla [Tab.6], hanno assorbito un maggior quantitativo di acqua, in quanto, a differenza dei provini non danneggiati, presentavano una massa maggiore. Questa differenza è dovuta al numero delle superfici di diffusione, due superfici integre per i campioni non danneggiati diversamente alle due superfici non integre per i campioni danneggiati.

L'assorbimento dell'umidità è caratterizzato dalla migrazione di molecole lungo il gradiente di concentrazione, che avviene attraverso la diffusione. Diversi studi in corso, verificano se le fibre di vetro siano suscettibili di lisciviazione, immersi in acqua[43].

Le proprietà delle matrici possono anche cambiare significativamente durante l'esposizione ad un ambiente acquoso. Inoltre, l'acqua può diffondersi tra le fibre e la matrice, indebolendo o distruggendo il legame interfaccia fibra-matrice. Tuttavia, una volta che l'acqua penetra fino all'interfaccia fibra/matrice, è possibile che si diffonda lungo l'area dell'interfaccia causando danni sia a livello meccanico che fisico.

Il confronto visivo ha rivelato che la matrice del campione testato ha mantenuto la sua colorazione gialla lucida, sulle superfici non sono presenti muffe e funghi, l'effetto dell'acqua non ha modificato neppure la lucidità del provino.

Un modello Fickiano può essere usato per descrivere i dati di assorbimento dell'umidità. Se la temperatura iniziale e il contenuto di umidità in un provino sono uniformi, e se la geometria permette di assumere una diffusione unidimensionale attraverso lo spessore (sezione), allora il contenuto percentuale di umidità (in peso), $M(t)$ è dato da [44]:

$$M(t) = G - (M_{\infty} - M_i) + M_i \quad (2.5)$$

dove

$$G = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp \left[-(2j+1)^2 \pi^2 \left(\frac{Dt}{h^2} \right) \right] \approx 1 - \exp \left[-7.3 \left(\frac{Dt}{h^2} \right)^{0.75} \right] \quad (2.6)$$

dove M_i , M_{∞} e $M(t)$ sono i contenuti in percentuale di umidità dei campioni prima dell'immersione, allo stato di saturazione e ad un dato tempo t . In (2.6), G è un parametro dipendente dal tempo che descrive l'estensione della diffusione, h è lo spessore del campione e D è il coefficiente di diffusione, che può essere definito come la costante di proporzionalità tra il flusso di diffusione e il gradiente di concentrazione nella prima legge di Fick. La grandezza del coefficiente di diffusione, D è proporzionale alla velocità di diffusione ed è una funzione della temperatura.

Dai risultati presentati in [Tab.6] sono visibili le percentuali di assorbimento dell'acqua di ogni singolo provino durante tutto il ciclo di prove. Dai risultati ottenuti si denota che il livello di saturazione raggiunto è del tutto costante nei campioni.

Concluse le prove a cui è stato sottoposto ciascun provino sono stati applicati tre strain-gauges con dimensioni di 60 mm, resistenza di $120 \pm 0,3$ e un fattore di misura di $2,12 \pm 1\%$ [Fig.29]. Tutti i provini sono stati sottoposti a prove di carico a rottura. La macchina utilizzata è comunemente impiegata per la compressione del calcestruzzo, con un controllo di spostamento costante di 0,5 mm/min[Fig.30].

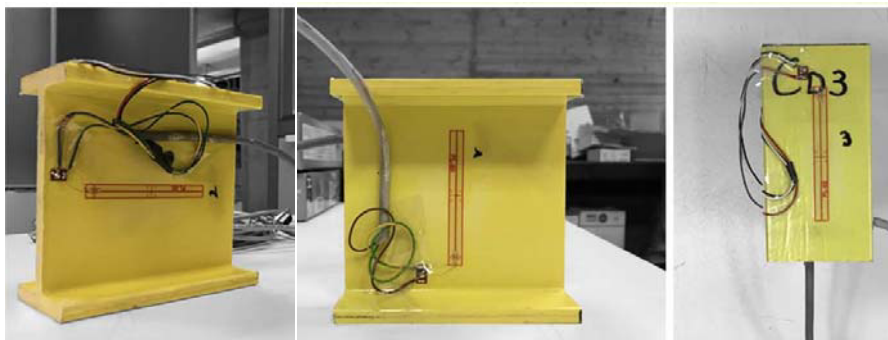


Fig. 29 Posizionamento strain-gauges sui provini.



Fig. 30 Provino durante la prova a rottura.

Al termine della prova sono stati realizzati grafici di confronto che mettono in relazione per tipologia di danno indotto, la rigidità dei singoli campioni [Fig.31-34]. Dai Grafici si denotano comportamenti differenti a seconda della categoria di appartenenza del provino. Il gruppo di provini che hanno dimostrato avere una rigidità minore sono quelli sottoposti alla prova ad immersione in acqua. Durante ogni prova hanno dimostrato avere la rigidità minore.

Contrariamente a quanto descritto sul comportamento dei profili pultrusi sottoposti a prove ad alte temperature, dalle prove effettuate si evince che l'aumento di temperatura non ha determinato modifiche sul comportamento meccanico del profilo. Come precedentemente descritto i materiali polimerici tendono a deformarsi applicando un carico costante, causando una deformazione dovuta dal movimento delle molecole nel tentativo di minimizzare l'energia localizzata. Con l'aumento della temperatura la frequenza delle molecole tenderà ad aumentare, accelerando il processo di deformazione.

Nei grafici sottostati sono state messe in relazione le curve carico-spostamento dei provini sottoposti alla prova a compressione, divisi per categoria di danno indotto.

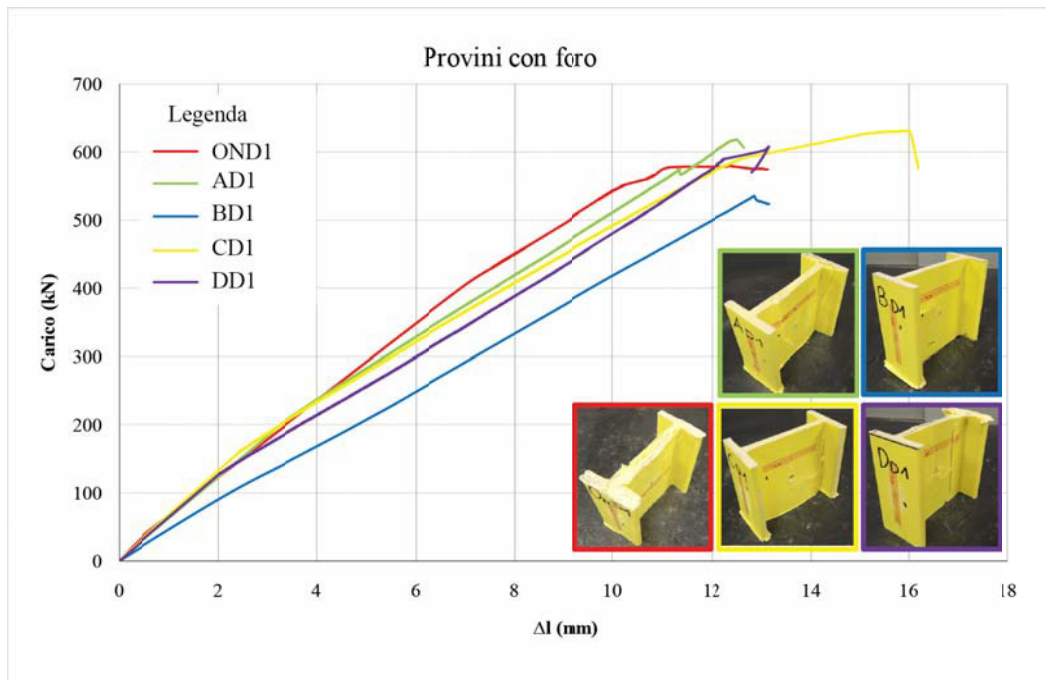


Fig. 31 Grafico carico-deformazione dei provini caratterizzati dal foro sull'anima (D1).

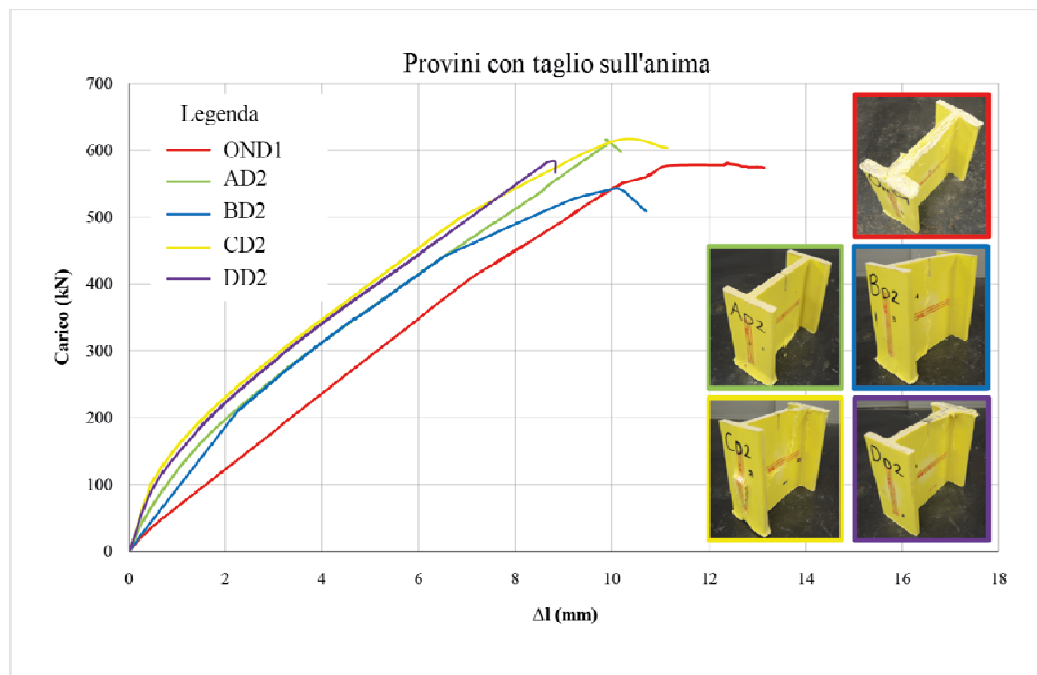


Fig. 32 Grafico carico-deformazione dei provini con il taglio sull'anima (D2).

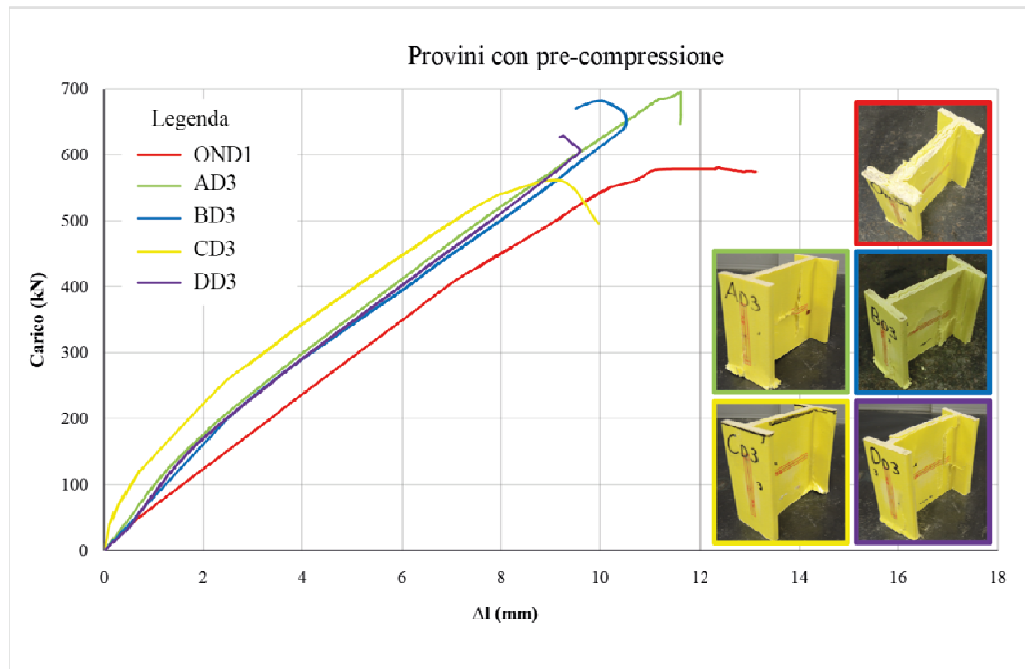


Fig. 33 Grafico carico-deformazione dei provini che hanno subito la compressione all'80% (D3).

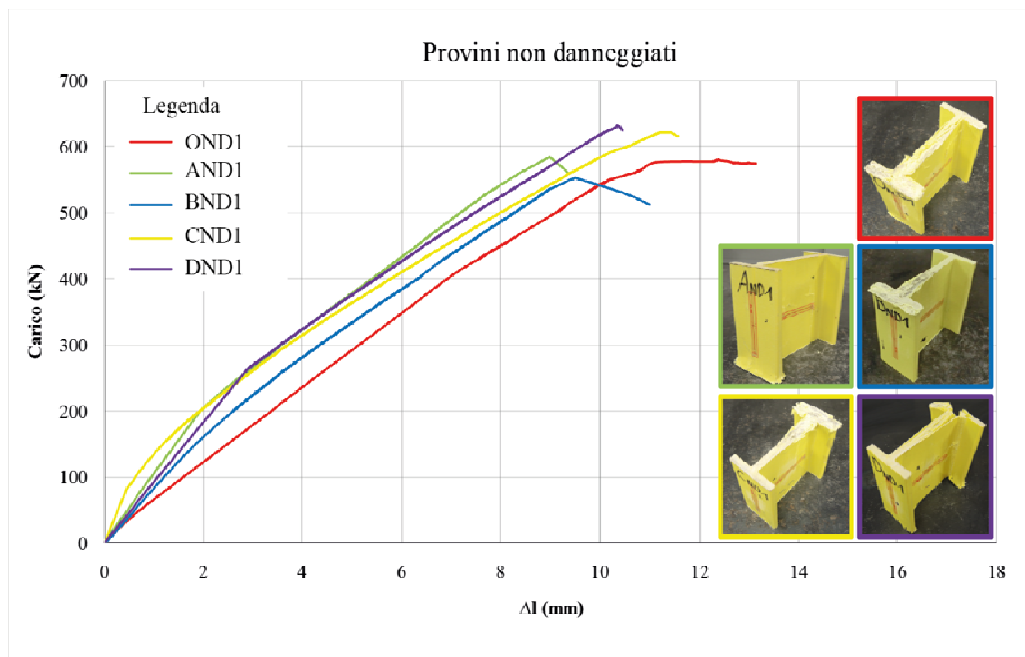


Fig. 34 Grafico carico-deformazione dei provini non danneggiati sottoposti alle prove (ND1).

2.2 Valutazione del danno tramite la tecnica dell'AE

Questa seconda fase della ricerca mira ad ampliare l'area delle conoscenze relative al monitoraggio del materiale composito attraverso la tecnica di monitoraggio delle emissioni acustiche. Il risultato finale atteso da questa ricerca sarà una chiara identificazione delle varie modalità di guasto presenti nei materiali compositi.

Sono disponibili tecnologie per monitorare la progressione del danno nei materiali compositi; queste sono raggruppate sotto il termine di test non distruttivi (NDT). Esempi di tecnologia NDT sono: l'emissione termica (SPATE), il trasferimento ottico (usando fibre ottiche incorporate), la scansione ultrasonica (C-Scan), e l'emissione acustica (AE). Il monitoraggio dell'emissione acustica (AE) è la tecnologia principale utilizzata per l'identificazione di diversi tipi di rottura nei materiali compositi per il monitoraggio in fase servizio della struttura[45][46].

La misurazione AE si basa sulla rilevazione dei movimenti superficiali causati dalle onde nei processi di frattura su scala microscopica. L'interpretazione dei segnali e, quindi, la valutazione delle fasi di danno, viene studiata tramite il metodo AE. Il principio di base della tecnica di emissione acustica è di convertire la vibrazione meccanica in segnali elettrici e di analizzare la risposta acustica in termini di aumento dell'energia e dell'ampiezza. La ricerca sulla legge di risposta acustica dei compositi è utile per comprendere meglio i meccanismi di rottura e l'evoluzione dei danni dei compositi.

L'Emissione Acustica è una tecnica largamente diffusa, grazie al suo rapporto tra i dati provenienti dalle registrazioni delle emissioni acustiche e la meccanica della frattura, rendono questa relazione uno strumento molto utile dal punto di vista del monitoraggio[47]. La tecnica dell'AE può anche monitorare il danno e l'evoluzione del danno in tempo reale, sia su microscala che su macroscala, valutando l'integrità strutturale dei componenti. L'AE può evidenziare i meccanismi di danno fondamentali e i processi di frattura nei compositi. I meccanismi di danno come il debonding interfacciale della matrice dalla fibra, la deformazione plastica della matrice, la fessurazione, lo strappo della fibra e la rottura della fibra possono essere caratterizzati da una varietà di parametri riferiti all'AE, in particolar modo la distribuzione dell' ampiezza[48]. Sui segnali viene applicata l'analisi Fast Fourier Transform (FFT) che evidenzia le frequenze dominanti, direttamente collegate al meccanismo principale di rottura, mentre la procedura Short-Time Fast Fourier Transform (ST-FFT) fornisce le informazioni temporali e quindi gli eventi sequenziali durante il processo di frattura. In breve, la ST-FFT e gli spettrogrammi permettono di visualizzare e analizzare i dati nel dominio del tempo e della frequenza allo stesso tempo. Questo dà una prospettiva su come il contenuto di frequenza di una forma d'onda sta variando in qualsiasi punto particolare o tempo della forma d'onda. Questo dominio simultaneo del tempo e della frequenza può essere visualizzato come un grafico con l'asse del tempo standard che sarebbe

rappresentativo della lunghezza delle forme d'onda con risposte di frequenza disposte verticalmente sull'asse del tempo [49][50].

Nei materiali fibro-rinforzati o nei compositi, il meccanismo di fratturazione si manifesta in modo diverso rispetto a strutture realizzate con materiali tradizionali, in quanto le zone fessurate crescono più lentamente. Questo è dovuto alla complessità ed eterogeneità della struttura che permette all'energia di dissiparsi in diversi modi. Inoltre, l'interfaccia tra i componenti, matrice e fibre, e la stessa eterogeneità del materiale, agiscono come meccanismo di arresto delle fessure, fornendo ulteriore resistenza e generando una risposta strutturale di tipo quasi duttile.

Prove sperimentali

Durante la prova, si è andato ad indagare il comportamento di un profilo pultruso in FRP, su cui sono state monitorate le emissioni acustiche in relazione all'applicazione di un carico, secondo tre layout di prova. L'uso della mappatura del profilo ha lo scopo di promuovere la comprensione dei meccanismi critici di rottura dei compositi e di ridurre il costo dell'ispezione. Il programma sperimentale mira in particolare a dare una parziale soluzione scientifica alla relazione tra emissione acustica e danno indotto.

Il test è stato eseguito su profili pultrusi in FRP con dimensioni diverse. Il primo profilo (A) con dimensioni $150 \times 150 \times 40$ mm con uno spessore di 10 mm, il secondo profilo (B) con dimensioni $144 \times 260 \times 40$ mm ha uno spessore di 7 mm [Fig.35]. Su entrambi i profili sono stati posizionati fori da 16 mm con un'interasse spaziatura di 50 mm e una distanza dalle flange di 40×35 mm.

Il profilo A è stato forato 2 volte, sul profilo B invece sono stati effettuati 8 fori, distribuiti su due file da 4. Si è scelto di lavorare con due profili aventi fori e dimensioni differenti, in modo da poter confrontare le prove e i risultati ottenuti. Il bullone utilizzato per le prove è filettato $\Phi 16$, acciaio inox AISI 304, qualità austenitica A2, classe di resistenza 70, resistenza a trazione ≥ 700 N/mm², conforme alla norma UNI EN ISO 3506.

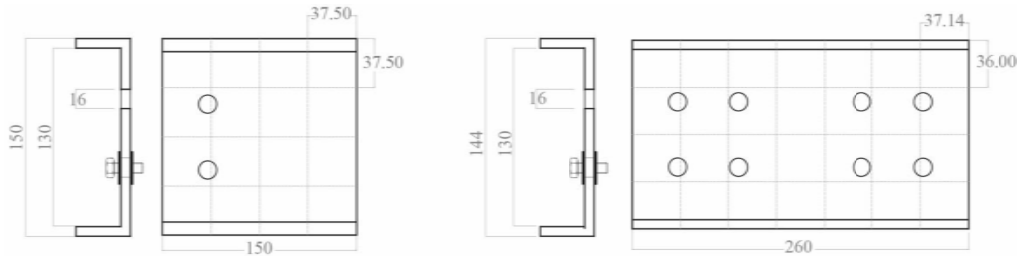


Fig. 35 Profili A a sinistra e tipo B a destra. Tutte le misure sono espresse in mm.

Le caratteristiche meccaniche del profilo sono le stesse dei provini utilizzati per le precedenti prove di laboratorio (§ 2.1).

I bulloni sono stati serrati utilizzando una chiave dinamometrica a serraggio controllato EXPERT E100108 conforme a UNI EN ISO 6789 con una coppia di serraggio massima di 200 Nm. L'analisi AE è stata condotta per valutare la propagazione del danno. Per l'acquisizione dei segnali è stato utilizzato un convertitore A/D a 16 bit su ogni canale, con impedenza di ingresso canale 50 e adatto a sensori con larghezza di banda di 1 kHz-1 MHz. Un preamplificatore della Physical Acoustics Corporation con guadagno selezionabile con interruttore 20/40/60 dB e ampia gamma dinamica di >90 dB è stato utilizzato con un canale per il collegamento di un trasduttore piezoelettrico al sistema Micro Express-8 AE. È stato impostato un valore di soglia di 40 dB nei preamplificatori per l'inizio della registrazione. Per ogni provino, è stato utilizzato un trasduttore piezoelettrico ad alta sensibilità (Physical Acoustics Corporation) per misurare gli eventi acustici sotto sforzo. Il sensore AE con diametro 19 mm e in acciaio inossidabile con una faccia in ceramica e una gamma di frequenza operativa di 35-100 kHz, una sensibilità di picco di 75 dB (Ref V/m/s) e una frequenza di risonanza di 50 kHz. Gli standard utilizzati per eseguire i test sono stati ISO 1996: 2-2017, DIN 45681:2005-03 e BS 4142: 2014.

Il primo scopo dell'analisi AE è stato quello di verificare se i diversi carichi sul provino danno luogo a risposte diverse nell'analisi AE. La tecnica delle emissioni acustiche è stata utilizzata per studiare gli effetti di un guasto in relazione alle emissioni acustiche e alla propagazione delle stesse all'interno del profilo.



Fig. 36 Profilo A e B. Chiave dinamometrica a serraggio controllato e analizzatore acustico.

Su entrambi i profili, è stata disegnata una griglia regolare per permettere di posizionare l'accelerometro in modo equidistante durante le misurazioni. Si è deciso di utilizzare questa tecnica in modo da avere un'unità di misura costante per studiare l'andamento delle emissioni rilevate. La griglia disegnata sul profilo A, presenta un passo regolare di $37,50 \times 37,50$ mm. Sul profilo B è stata disegnata una griglia non regolare di $37,14 \times 36,00$ mm [Fig.36]. Lungo la diagonale evidenziata nella Fig.37, l'accelerometro (Ch1) è stato posizionato in quattro punti diversi, denominati con numeri da 1 a 4. Per ogni punto è stata effettuata una registrazione misurando l'emissione acustica durante la fase di serraggio. La fase di monitoraggio ha inizio con l'applicazione del carico, incrementato manualmente da 0 a 50 Nm, con l'ausilio della chiave dinamometrica a serraggio controllato. Nella Fig.38 sono illustrate le fasi del monitoraggio effettuate sul profilo B avente uno spessore minore.

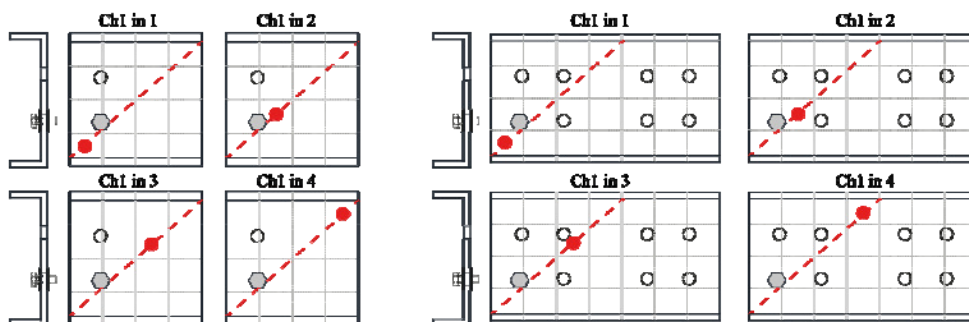


Fig. 37 Profilo A e B, la posizione dell'accelerometro durante i test è indicata in rosso. Ch1 indica l'accelerometro.

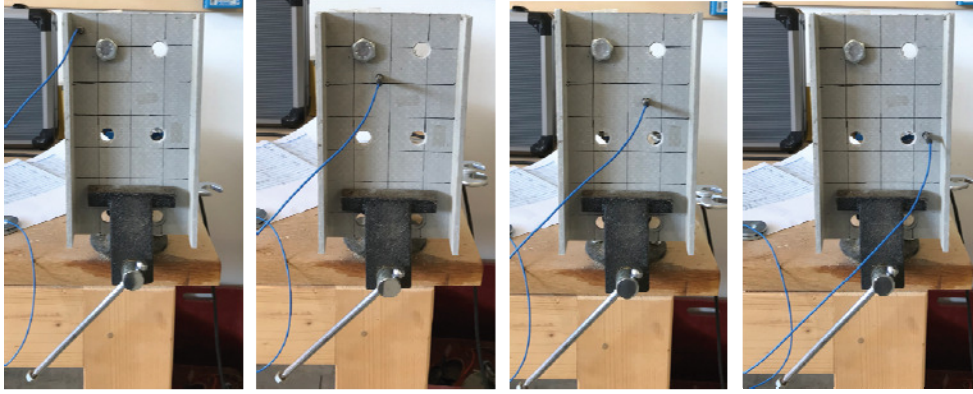


Fig. 38 Profilo B durante le registrazioni con bullone senza rondella.

I due profili sono stati sottoposti a due monitoraggi differenti. Per ogni prova è stato effettuato il monitoraggio registrando la dispersione di emissioni acustiche avute sul profilo.

Le prove sono state effettuate secondo due layout:

- applicando una rondella tra il bullone e il profilo
- registrazione senza rondella tra gli elementi.

Per ogni posizione dell'accelerometro, si è deciso di effettuare una registrazione delle emissioni acustiche e di individuare all'interno di essa 3 fasi. La prima fase caratterizzata dall'applicazione del carico pari a 30 Nm sul bullone, la seconda fase durante la quale è stato applicato un carico di 40 Nm e l'ultima durante la quale si è raggiunto il carico massimo stabilito di 50 Nm [Tab.7]. Le regolazioni su entrambi i profili sono state effettuate sul foro in basso a sinistra. La forza è stata applicata ad una distanza di 115 mm dalla base nel caso del provino A, e ad una distanza dalla base di 225 mm nel provino B. Il limite di carico, fissato a 50 Nm, è stato scelto perché questo valore coincideva con un'emissione acustica del materiale. Ogni regolazione è stata fatta posizionando l'accelerometro e applicando il carico sul bullone fino al raggiungimento del valore pre impostato sulla chiave dinamometrica a serraggio controllato.

Tabella 7 Profili indagati e configurazione tests.

	PROFILO A	30 Nm	40 Nm	50 Nm
A	Con rondelle	●	●	●
	Senza rondelle	●	●	●
B	Con rondelle	●	●	●
	Senza rondelle	●	●	●

Analisi dei guasti, formula chiusa e approccio analitico AE

Per essere in grado di determinare le modalità di rottura, è stato utilizzato il metodo di misurazione dell'emissione acustica (AE). Il principio di questo test è che la struttura sottoposta a carico meccanico emette onde sonore dalle aree in cui si è verificato qualsiasi cambiamento fisico (ad esempio, deformazione della matrice, estrazione delle fibre, ecc.). Se queste onde sonore vengono rilevate con un microfono adatto, la modalità di rottura può essere determinata dai parametri fisici delle onde. C'è una relazione significativa tra l'insorgenza delle microfratture dei materiali fragili e il rilascio di energia. L'emissione di energia viene calcolata in base alla tensione indotta di ogni segnale. Questa cosiddetta energia AE viene calcolata integrando il segnale al quadrato della tensione. Questo segnale diviso per 10 kOhm e poi integrato per la durata della forma d'onda AE come indicato nell'equazione (2.7)

$$E_{AE} = \sum \frac{V_s^2}{10(k\Omega)} \times 10^{-6}(sec) \times 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Watt-sec}} \quad (2.7)$$

In questa equazione, V_s è la tensione del sensore ed E è l'energia assoluta.

Per il test effettuato su profili pultrusi, il valore di E_{AE} è riportato automaticamente attraverso il sistema MISTRAS. Il sistema fornisce anche la possibilità agli utenti di calcolare la frequenza di picco degli eventi. La frequenza di picco è il punto sullo spettro di potenza in cui viene registrata la grandezza di picco. Questo sarà indicato tramite la Fast Fourier Transform (FFT) con un picco relativo alla forma d'onda provocata dal colpo AE. La seconda prova, effettuata su profili imbullonati, è stata rielaborata con il sistema XL2. È possibile ottenere la rielaborazione dei segnali acustici attraverso la trasformata veloce di Fourier (STFT) in relazione alla forma d'onda relativa al colpo. Per esaminare le modalità di errore basate sulla distribuzione di AE, Khaple ha introdotto una quantità normalizzata di energia basata su una trasformata di Fourier veloce (STFT) per i segnali AE registrati. Con

l'utilizzo di questo metodo, $E(f)$ rappresenta il rapporto di energia nelle frequenze e può essere calcolato come segue:

$$E(f) = \frac{\sum_{j=1}^N c(f_i, t_j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c(f_i, t_j)} \quad (2.8)$$

In questa equazione, C è la matrice dei coefficienti prodotta dalla STFT, t è il tempo, f è la frequenza, M e N sono rispettivamente il numero di unità discrete in frequenza e tempo. Il valore normalizzato $E(f)$ è dichiarato come indicatore delle componenti energetiche del segnale registrato ed è il rapporto tra l'energia distribuita nel tempo e l'energia distribuita sia nel tempo che nella frequenza. La $E(f)$ introdotta nell'equazione (2.8) ha come unità J^{-1} .

Per studiare l'andamento del cambiamento nella distribuzione dell'energia nel dominio della frequenza, è stata utilizzata la metodologia introdotta da Khaple. Khaple ha studiato la natura della distribuzione $E(f)$ nel dominio della frequenza per tre diversi casi di studio di eventi meccanici: caduta della palla, sfregamento e rottura. Va notato che $E(f)$ è un rapporto di energia che considera la distribuzione di energia sia nel dominio del tempo che in quello della frequenza (fare riferimento all'equazione 2.8).

Risultati sperimentali

Dalle prove effettuate, che consistevano nel serraggio dei bulloni e nel monitoraggio del profilo tramite la tecnica delle emissioni acustiche, abbiamo ottenuto quattro tipologie di dati: due riferiti al profilo tipo A e due riferiti al profilo tipo B. Ogni profilo a sua volta ha restituito due dati di prova (prova con rondella e prova senza rondella). Utilizzando le formule precedentemente descritte (Eq. 2.8), con l'ausilio del programma Matlab, è stato scritto un linguaggio per la restituzione dei dati registrati (Allegato 1, scrittura elaborata in Matlab per la restituzione delle prove di emissione acustica).

Il primo grafico rappresenta i valori in dB delle emissioni registrate sul materiale durante la prova. Si è voluto restituire uno spettrogramma, che rappresenta il rapporto tra il tempo e la frequenza delle emissioni registrate durante il test [Fig.39].

Dopo aver analizzato gli spettrogrammi delle prove, abbiamo determinato la finestra temporale in cui è possibile reperire il maggior numero di informazioni relative alle frequenze delle emissioni acustiche.

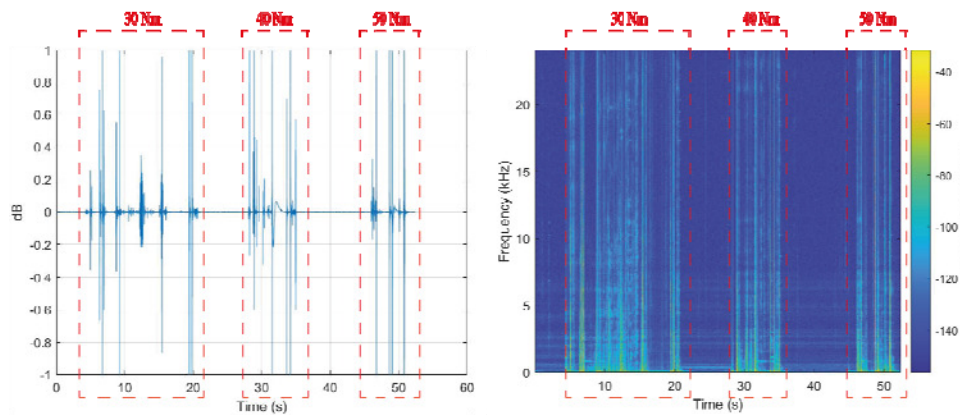


Fig. 39 Restituzione audio della prova sul profilo B con rondella, Ch1 in 1 e relativo spettrogramma.

Dopo l'analisi dei grafici, risulta convenevole eliminare dall'analisi le porzioni delle registrazioni che non contengono informazioni utili all'elaborazione dei dati, mentre è conveniente analizzare la coda sonora, che descrive il decadimento del suono. Pertanto, si è deciso di dividere l'intera registrazione in tre diversi audio, la prima descrive l'emissione acustica emessa dal profilo durante l'applicazione del carico di 30 Nm, la seconda durante la quale è stata applicata una forza di 40 Nm e la terza ed ultima, durante la quale è stato applicato il carico massimo di 50 Nm. Sono stati rielaborati tre grafici per ogni singola registrazione, il primo corrisponde al rapporto tra dB e tempo, il secondo rappresenta lo spettrogramma ed il terzo è il risultato

dell'analisi FFT [Fig.40]. Il segnale è stato campionato a 260 Hz e le frequenze ottenute dall'analisi vanno da 40 Hz a 130 Hz. Durante le registrazioni, l'attività delle emissioni acustiche è visibile nella storia del carico, evidenziando il non verificarsi di microfratture. Il numero di emissioni acustiche aumenta con l'aumentare del carico applicato [Fig.40]. All'interno dello spettrogramma sono evidenziati in arancio i picchi delle emissioni acustiche relative ai dB che vanno da -60 a -40 dB, in blu le emissioni che registrano decibel inferiori. Dallo spettrogramma è leggibile l'aumento delle emissioni acustiche soprattutto alle alte frequenze (da 0 a 8 kHz).

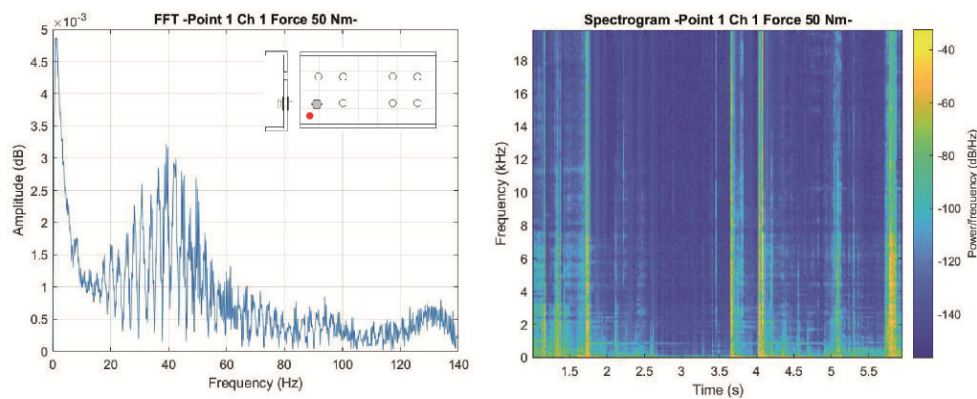


Fig. 40 FFT dell'emissione acustica registrata sul profilo sottile (B) con Ch1 nel punto 1 e il relativo spettrogramma.

I valori sono leggibili sulla base di due fasce di dati: i dati raccolti dal profilo A con e senza bulloni e i dati raccolti dal profilo B. Nel grafico seguente [Fig.41] sono raccolti e confrontati i valori in dB delle prove effettuate su entrambi i profili. Nel profilo B, a parità di Nm, i decibel risultano essere inferiori allo zero, ma con valori più alti rispetto al profilo A, questo è dovuto al minor spessore del profilo B. Nel punto 2, dove è stata inserita la rondella, si sono registrati valori con un'emissione acustica maggiore e, a differenza degli altri dati, in prossimità dello zero. Nel profilo B, avendo uno spessore minore, i dati hanno restituito dati vicini allo zero. Dalla registrazione fatta nel punto 2 sul profilo B, è chiaro che per tutti e tre i carichi applicati, i dati sono tutti maggiori di zero. La conclusione che ne deriva è che per entrambi i profili, il miglior comportamento si verifica con l'inserimento della rondella tra il bullone e il pultruso. La rondella assume la funzione di diffondere parte del carico che viene applicato sul bullone, evitando di danneggiare direttamente il profilo ed impedendo modifiche sia a livello meccanico che estetico.

Il grafico rappresentato nella Fig.41 riassume i risultati numerici ottenuti durante le registrazioni nei 4 layout di prova. I valori espressi in dB, delle prove effettuate con l'applicazione della rondella, hanno dB compresi tra i -40 dB e lo 0. I valori delle

emissioni acustiche registrati durante la prova, effettuata senza rondelle, hanno valori compresi tra -15 dB E +10 dB. L'inserimento della rondella ha assunto la funzione di dissipatore, non solo come dissipatore acustico, ma è stato utilizzato anche come protezione meccanica in quanto producendo meno emissioni acustiche, viene ridotto il rischio della formazione di microfratture sul profilo.

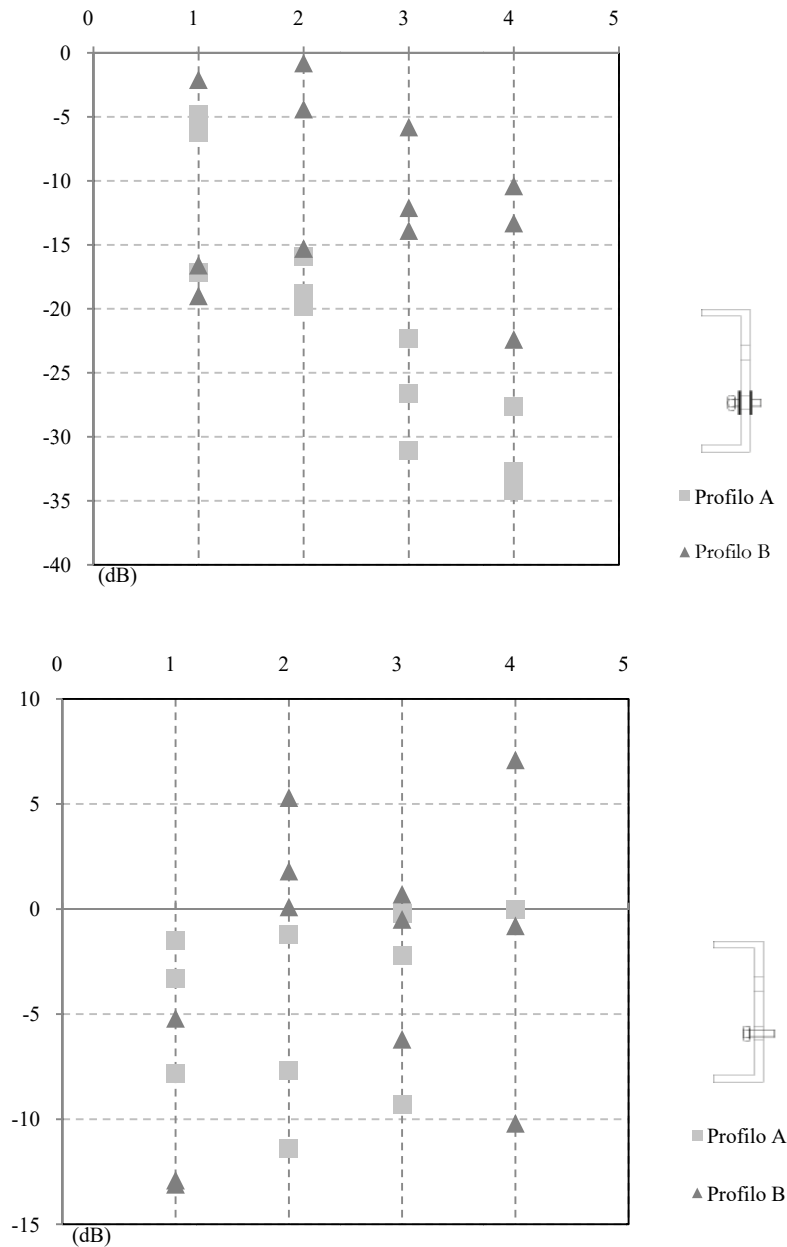


Fig. 41 Grafici di confronto tra emissione in dB del profilo con rondella (in alto) e senza rondella (in basso).

Dopo aver analizzato l'andamento delle emissioni acustiche tramite i grafici e gli spettrogrammi, con l'ausilio programma Surfer, è stato ricostruito l'andamento delle emissioni acustiche sul profilo[Fig.42]. Dall'immagine è evidente che in prossimità

del bullone le emissioni acustiche hanno un'intensità maggiore che vanno disperdendosi all'interno del materiale. Il confronto è stato restituito per entrambi i profili. In prossimità dell'applicazione del carico i valori delle emissioni acustiche sono compresi tra 10 dB e -10 dB.

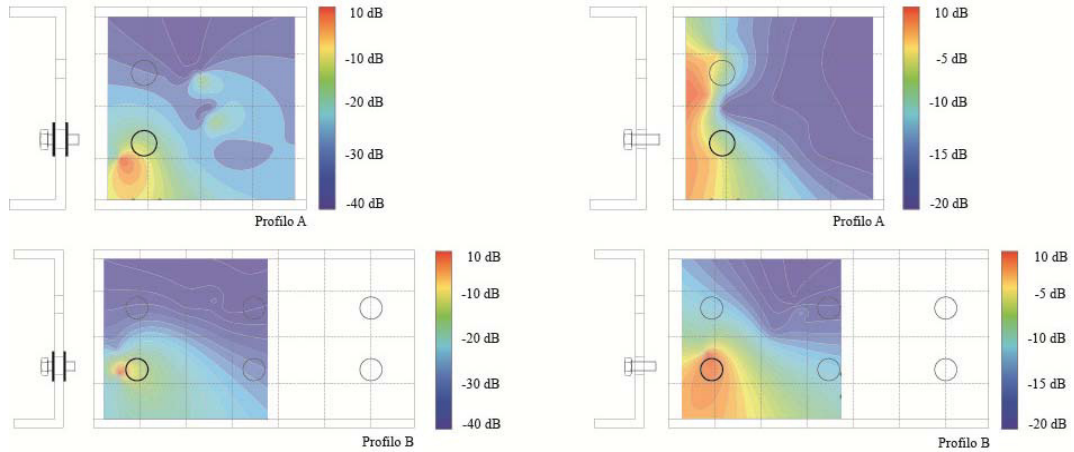


Fig. 42 Andamento delle AE nei profili A e B durante i test con e senza rondelle.

Nella [Fig.42] sono confrontati i profili al termine dei 4 layout di prova. Dalla prova è visibile che il materiale polimero è un conduttore di emissioni acustiche.

All'interno del materiale si assiste ad una diffusione eterogenea di diffusione di energia provocata dalla diffusione delle emissioni acustiche. Ottimi risultati si registrano dalla prova effettuata con l'uso delle rondelle, in quanto la maggior dispersione di energia si registra solo in prossimità dell'applicazione del carico, limitando così la formazione di microfratture sul profilo.

2.3 Conclusioni

All'interno del paragrafo sono stati commentati gli esiti relativi a prove di durabilità e test di monitoraggio, tramite la tecnica delle emissioni acustiche, eseguite su profili pultrusi in FRP.

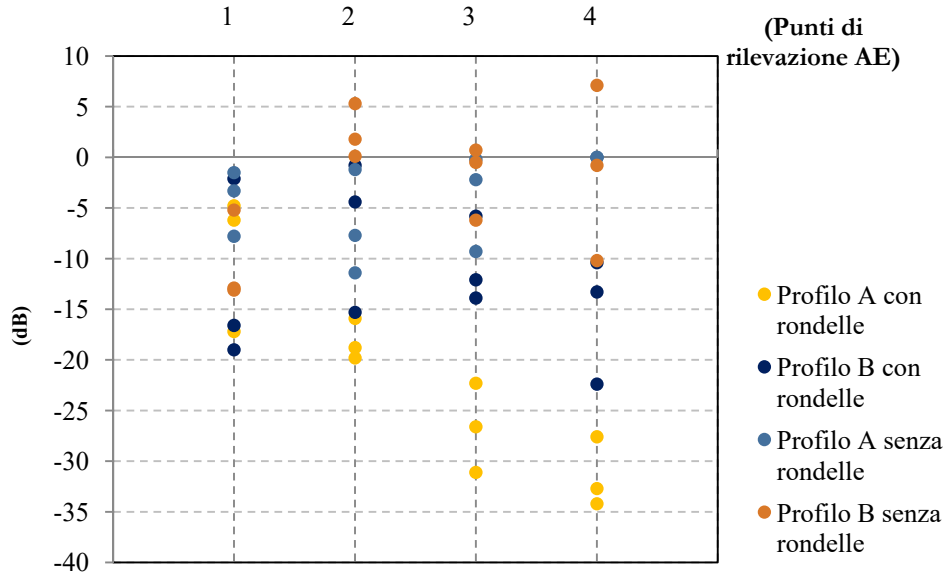
Si propongono le seguenti conclusioni:

- I provini immersi in acqua per 1000 h (41 giorni), con una temperatura dell'acqua di 20°C, hanno evidenziato, durante la conseguente prova a compressione, avere una perdita di rigidità rispetto ai provini sottoposti alle altre prove di durabilità (esposizione agli agenti atmosferici e prove ad alte temperature 100°C/120°C). In particolare, il provino forato sull'anima, presenta una rigidità inferiore del 10% rispetto ai provini con il foro nella stessa posizione, ma non sottoposti ad immersione in acqua [Fig.31].
- Il profilo in FRP con l'incisione sull'anima, immerso in acqua, ha evidenziato una rigidità inferiore del 5% rispetto agli stessi provini non sottoposti allo stesso test [Fig.32];
- Per le prove ad alte temperature si è scelto di lavorare con cicli di temperature di 100°C e 120°C. I gradi impostati per la prova sono stati calcolati a seguito del test termogravimetrico (Tg), in conseguenza della quale la perdita definitiva di materiale vetroso è avvenuta a 400°C [Fig.23]. Tuttavia le prime perdite di materiale vetroso, sono state registrate in corrispondenza di 249°C. Gli effetti della temperatura sul materiale non hanno comunque modificato le sue caratteristiche fisiche e meccaniche;
- I profili con il foro sull'anima, sottoposti a prove di esposizione agli agenti atmosferici, ad alte temperature e ad immersione in acqua, hanno registrato durante la prova a compressione, una rigidità inferiore del 10% rispetto al provino vergine;
- I risultati ottenuti dalla prova a compressione dei provini aventi il taglio sull'anima, e quelli sottoposti al danno della compressione dell'80% rispetto al carico ultimo, hanno registrato un aumento di rigidità del 7% rispetto al provino vergine [Fig.32-33].

Durante la seconda parte della ricerca, si è utilizzata la tecnica delle emissioni acustiche (AE) per studiare i meccanismi di danno nei profili pultrusi in FRP, in presenza di coppie di serraggio torsionali applicate al materiale.

Si possono proporre le seguenti conclusioni:

- Non si rileva la permeabilità del materiale rispetto alle emissioni acustiche;
- Durante i test acustici effettuati con l'inserimento della rondella tra il profilo e il bullone, i valori registrati sono risultati compresi tra 0dB/+35 dB. Si è trattato di valori minori, rispetto alla prova effettuata senza la rondella, che ha registrato valori compresi tra +10dB e -15dB. Il grafico seguente illustra i risultati conclusivi;



- Il profilo non ha comunque riportato alcuna forma di danno.
- La capacità di dissipazione del materiale FRP non risulta trascurabile rispetto ad altri materiali strutturali tradizionali, quale l'acciaio, caratterizzati da un comportamento plastico.

In riferimento all'LCA, il monitoraggio del materiale tramite la tecnica delle emissioni acustiche si inserisce perfettamente nella fase di manutenzione, come operazione preventiva da effettuare sulle componenti realizzate in FRP. La facilità di applicazione e i costi ridotti dell'FRP se si considerano i risparmi di quantità e di cantierizzazione, dovrebbero favorire la diffusione di questo materiale.

3. Test oligociclici su strutture in FRP

La fatica si configura come una delle possibili modalità di cedimento dei materiali ed è perciò un aspetto fondamentale da tenere in considerazione sia in fase di progetto che in fase di verifica per tutte le parti meccaniche soggette nella loro vita utile a carichi alternati o cicli di carico.

L'ATSM (American Society for Testing and Materials International) definisce la fatica come “una progressiva, localizzata e permanente alterazione strutturale che si verifica in materiali soggetti a tensioni e deformazioni variabili che può produrre cricche o fratture dopo un sufficiente numero di fluttuazioni”[52]. La fatica si configura perciò come un fenomeno irreversibile e degenerativo associato a sollecitazioni cicliche si verifica nella microstruttura di un materiale, provocandone da macroscopiche variazioni di prestazioni fino al cedimento. L'importanza dello studio della fatica è quindi dettata dalla necessità di prevedere la vita utile di un componente meccanico strutturale: poiché il fenomeno è dipendente da molti fattori e piccole variazioni della microstruttura possono avere forte influenza sui risultati di sperimentazioni e prove, il progetto a fatica è da sempre caratterizzato da alti livelli di incertezza e perciò alti coefficienti di sicurezza.

Il fenomeno della fatica può essere analizzato secondo diversi punti di vista, i più comuni sono quello della nucleazione, propagazione e frattura.

Dal punto di vista applicativo, considerazioni sulla microstruttura risultano poco pratiche nelle fasi di progetto e calcolo ed è certamente più interessante analizzare la fatica da un punto di vista fenomenologico. Essendo tipicamente un fenomeno non deterministico, sono stati classificati diversi tipi di fatica legati al cedimento del materiale, a seconda delle cause e delle modalità:

- Fatica ad alto numero di cicli HCF - fatica in controllo di sforzo
- Fatica a basso numero di cicli LCF - fatica in controllo di deformazione
- Fatica termica
- Fatica superficiale
- Fatica da impatto
- Fatica da corrosione
- Fretting fatigue.

Tipicamente le prove per lo studio della HCF sono eseguite in campo elastico e non interessano eventuali fenomeni di plasticizzazione del materiale. Per tale ragione, per semplicità concettuale lo svolgimento avviene in controllo di tensione e le

proprietà sono riportate in funzione delle σ . In questo lavoro l'interesse ricade in particolare sulla fatica a basso numero di cicli (LCF) per la quale le tensioni raggiunte sono tipicamente tali da superare il limite di proporzionalità del materiale R_{p02} e produrre deformazioni permanenti ciclo dopo ciclo.

Nel campo della Low Cycle Fatigue (LCF) a causa della presenza di zone plasticizzate, sarà necessario conoscere la risposta ciclica del materiale alla sollecitazione, ossia la curva di isteresi σ - ϵ di risposta del materiale, piuttosto che la sola curva monotona. Tale approccio è necessario poiché per ogni ciclo la componente di energia dissipata all'interno del materiale non è trascurabile e questo cambia di conseguenza la sua risposta ad una sollecitazione esterna rendendo il comportamento dipendente dalle sollecitazioni subite dal materiale. Per un materiale sottoposto a tensione alternata monoassiale σ_a e tensione media $\sigma_m = 0$ nulla è possibile costruire il cosiddetto diagramma di Wöhler [Fig.43] riportante, per un certo livello di probabilità di sopravvivenza del pezzo, la tensione alternata in funzione del numero di cicli sopportati.

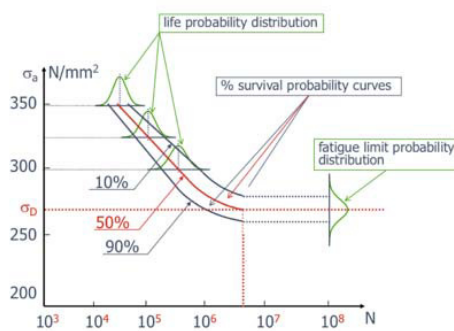


Fig. 43 Curve N tipicamente utilizzate per descrivere il comportamento a fatica.

Low Cycle Fatigue (LCF)

Tipicamente i materiali variano la propria risposta durante i primi cicli di plasticizzazione nei quali si ha maggior movimento delle dislocazioni all'interno del materiale. A causa di ciò, a sollecitazioni controllate in deformazione varia la risposta in tensione del materiale stesso e si possono avere due comportamenti differenti:

- incrudimento (hardening), per cui la medesima deformazione diventa sempre più onerosa ad ogni ciclo;
- addolcimento (softening), per cui la medesima deformazione diventa sempre meno difficoltosa ad ogni ciclo.

In ogni caso, la risposta ciclica tende a stabilizzarsi dopo un elevato numero di cicli ed il ciclo risultante, detto ciclo di isteresi, è utilizzato per descrivere la risposta ciclica stabilizzata del materiale.

La risposta ciclica ottenuta [Fig.44] è impiegata nello studio della fatica a basso numero di cicli, nel quale le prove vengono condotte solitamente in controllo di deformazione totale, riportando i dati sotto forma di una curva $\Delta \epsilon = f(N)$.

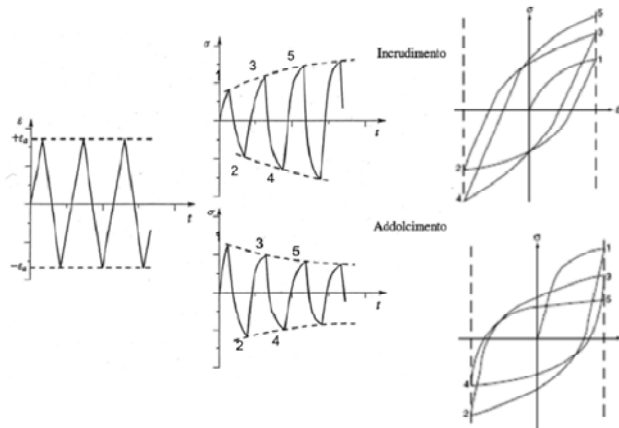


Fig. 44 Uno stesso materiale può esibire incrudimento o addolcimento a seconda delle condizioni di lavorazione.

In un diagramma doppio logaritmico $N - \Delta \epsilon$ i dati sperimentali tendono a disporsi lungo due rette, mostrando indipendenza tra i termini di deformazione plastica ed i termini di deformazione elastica [Fig.45].

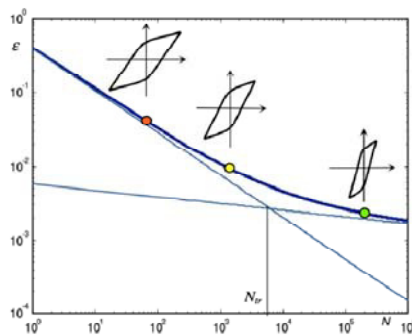


Fig. 45 Diagramma deformazione-cicli $\epsilon - N$ in assi doppio logaritmici.

Suddividendo la deformazione totale come somma delle due componenti di cui una parte elastica e una plastica [Fig.46]:

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p \quad (3.1)$$

è possibile scrivere la seguente relazione per la vita a fatica N , *Relazione di Basquin*:

$$\frac{\Delta \epsilon_e}{2} = \frac{\Delta \sigma_a}{E} = \sigma'_f (2N)^b \quad (3.2)$$

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N)^c \quad (3.3)$$

con

b, c esponenti di fatica, σ'_f coefficiente di resistenza a fatica, ϵ'_f coefficiente di duttilità a fatica.

Unendo le relazioni precedenti è possibile ottenere la *Relazione di Coffin-Manson*:

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \epsilon'_f (2N)^c \quad (3.4)$$

Per applicare l'equazione di Manson e Coffin e valutare il numero di cicli a rottura è sempre necessario calcolare, in conseguenza dei carichi agenti, il valore di $\Delta \epsilon$ plastico. Questo può essere fatto sperimentalmente, teoricamente (con metodi esatti o approssimati) numericamente tramite l'utilizzo della modellazione numerica.

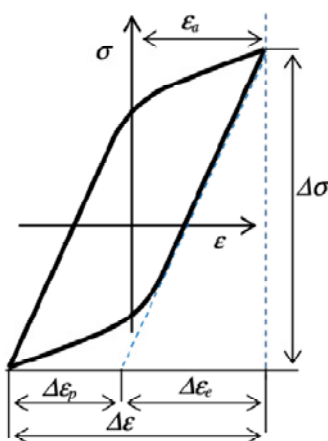


Fig. 46 Ciclo di isteresi stabilizzato.

Modelli energetici per LCF

Un approccio alternativo ai modelli classici di previsione classici (in particolare il modello di Coffin Manson), è rappresentato dai modelli energetici per la previsione della vita a fatica residua di un materiale. In generale il criterio di fatica Φ può essere espresso come una funzione generica dello stato tensionale del materiale $\Phi(\epsilon_p, \sigma, \Omega)$ [53] nella maniera che segue:

$$\Phi(\epsilon_p, \sigma, \Omega) N^\beta = C \quad (3.5)$$

dove N è la vita a fatica e β e C sono costanti tipiche del materiale (nel caso del modello di Coffin-Manson si ha ad esempio $\Phi \equiv \Delta \epsilon_p$). Poichè fisicamente il

fenomeno della fatica è associato dal punto di vista microscopico alla formazione di micro difetti, al movimento delle dislocazioni ed a tutti i fenomeni che concorrono alla nucleazione della cricca di fatica, appare naturale pensare ad un criterio energetico al fine di quantificare la presenza di questi microdifetti. Sulla base delle considerazioni di Skelton[54] sul comportamento in campo plastico dei materiali, riguardanti i fenomeni di incrudimento o addolcimento, diversi autori [55] hanno approfondito ed indagato un modello predittivo per LCF basato esclusivamente sull'energia dissipata all'interno del materiale durante il ciclo di isteresi. Scrivendo l'equilibrio di energia locale per un materiale si ha infatti:

$$\frac{dU}{dT} + \frac{dK}{dT} = \frac{dW}{dT} + \frac{dQ}{dT} \quad (3.6)$$

con U energia interna, K energia cinetica, W lavoro meccanico e Q calore prodotto. Poiché K è trascurabile e Q può essere anch'essa trascurata in condizioni isoterme (poiché il calore dissipato meccanicamente è trasmesso all'ambiente), si può vedere

come l'energia interna accumulata sia solo funzione del lavoro meccanico $\frac{dU}{dT} + \frac{dW}{dT}$.

Per tale ragione è stato proposto quale criterio per la LCF:

$$\Phi(x) = \int \sigma(x) \dot{\epsilon}(x) dt \quad (3.7)$$

quantità che corrisponde all'area racchiusa dal ciclo di isteresi, l'energia meccanica dissipata all'interno del materiale. In particolare, il criterio diventa

$$[\max \Phi(x)] N^\beta = C \quad (3.8)$$

se si considera che il campo di tensioni e deformazioni non è uniforme all'interno del materiale. I valori di β e C devono essere determinati sperimentalmente e la loro dipendenza, oltre che dal materiale (composizione e microstruttura), dalla temperatura T a cui sono condotte le prove di fatica, e dal rapporto di tensioni

$R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$ è dibattuta in letteratura e sembra dipendente dai materiali analizzati [55]. In letteratura sono presenti diversi casi di applicazioni su strutture in acciaio, ma lo stato dell'arte per strutture in materiale polimero risulta assente.

Stato dell'arte

Dagli studi effettuati, come precedentemente espresso, risulta esserci un vuoto bibliografico sulle prove cicliche effettuate su strutture realizzate interamente in FRP.

Per il settaggio delle prove oligocicliche da svolgere in laboratorio, si è scelto di seguire linee guida e normative utilizzate per le strutture in acciaio.

Si è scelto di provare ad applicare le normative utilizzate per il collaudo di strutture in acciaio, tra le pi si è scelto di lavorare seguendo due procedure differenti, una a livello Europeo e l'altra Americana:

- **ECCS-45** procedura Europea del 1986 (“Procedura di prova raccomandata per valutare il comportamento degli elementi strutturali in acciaio sotto carichi ciclici”);
- **North-American ATC-24** (Applied Technology Council-24 “Linee guida per le prove sismiche cicliche di componenti di strutture in acciaio”).

La normativa Europea suggerisce come strutturare una prova completa. Il test viene strutturato in tre prove, la prima e la seconda prova vengono applicate insieme; vengono eseguite imponendo sul provino, spostamenti monotonici fino a rottura, al fine di valutare il carico di snervamento F_y^+ e la deformazione ϵ_y^+ in una direzione e nell'altra. Gli spostamenti vengono definiti dall'intersezione della tangente alla curva F_e all'origine, con la tangente alla curva F_e di pendenza $1/10$ del valore precedente [Fig.47]. La terza prova viene eseguita singolarmente e successivamente alle prime due, consiste in una prova ciclica con spostamento imposto crescente. Calcolata lo spostamento di snervamento, vengono applicati 4 cicli che hanno come valore $1/4$ dello spostamento di snervamento e successivamente vengono applicati gruppi di tre cicli che hanno come valore $(2+2n)\epsilon_y^+$ e $(2+2n)\epsilon_y^-$, con $n=0,1,2,3,\dots$ fino ad arrivare al collasso della struttura.

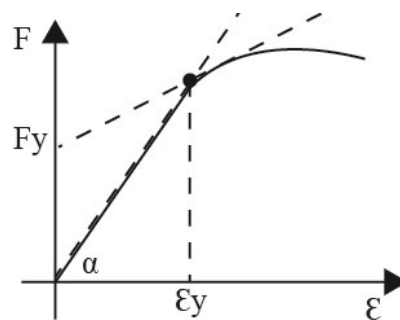


Fig. 47 Settaggio prova sperimentale con la procedura ECCS – 45.

La normativa americana raccomanda di applicare cicli di carico crescenti, incrementandoli di un delta costante, fino ad arrivare al totale collasso della struttura.

La maggior parte degli elementi strutturali sottoposti a prove cicliche, riguardano connessioni singole trave-colonna, punto critico nelle strutture leggere sottoposte a un'azione ciclica[56][57].

Le prove oligocicliche effettuate sulla struttura in FRP, contrariamente ai suggerimenti delle procedure descritte, non sono state applicate portando la struttura al suo stato di vita ultimo, ma sono state effettuate nello stato di vita limite (SLV).

3.1 Set-up prove oligocicliche

Nel capitolo si riportano i risultati delle prove cicliche effettuate su una singola campata del padiglione Glass House assemblato all'interno del Laboratorio di prove meccaniche dell'Università di Venezia IUAV.

Strumentazione

Per la prova si è scelto di lavorare su una singola campata delle dieci che compongono il padiglione Glass House [Fig.48]. La struttura è stata installata in soli due giorni all'interno del laboratorio IUAV e le sue dimensioni totali sono di 8.5x1.25x3.8m. Il padiglione è stato vincolato alla pavimentazione utilizzando due travi in ferro delle dimensioni di 2,30m di lunghezza, posizionate trasversalmente alle travi principali del padiglione. Tutte le chiusure a secco sono state serrate utilizzando la stessa chiave dinamometrica utilizzata per le precedenti prove. I valori applicati alle coppie di serraggio, sono stati quelli utilizzati nel secondo monitoraggio avvenuto sul padiglione [Tab.11]. Durante il test, le chiusure a secco sono state monitorate attraverso un controllo manuale con chiave dinamometrica, in modo da verificare se ci fosse una perdita della coppia di ammortamento. Per sollecitare la struttura è stato utilizzato un'attuatore idraulico a spostamento controllato [Fig.49]. Le caratteristiche dell'attuatore idraulico lineare utilizzato è il Modello 201.35T con capacità massima in compressione: 365kN, capacità massima in trazione: 250kN. Il pistone dell'attuatore si estende in una doppia direzione con una corsa massima di 500mm. Il drenaggio avviene senza ausilio di pompe per il ricircolo dell'olio, permettendo così un continuo raffreddamento del liquido idraulico. Internamente al pistone è montato un trasduttore digitale di produzione Temposonic di tipo G (MTS Sensors). I dati ottenuti sono stati rielaborati tramite l'ausilio della piattaforma di programmazione e calcolo numerico per l'analisi dei dati, Matlab.

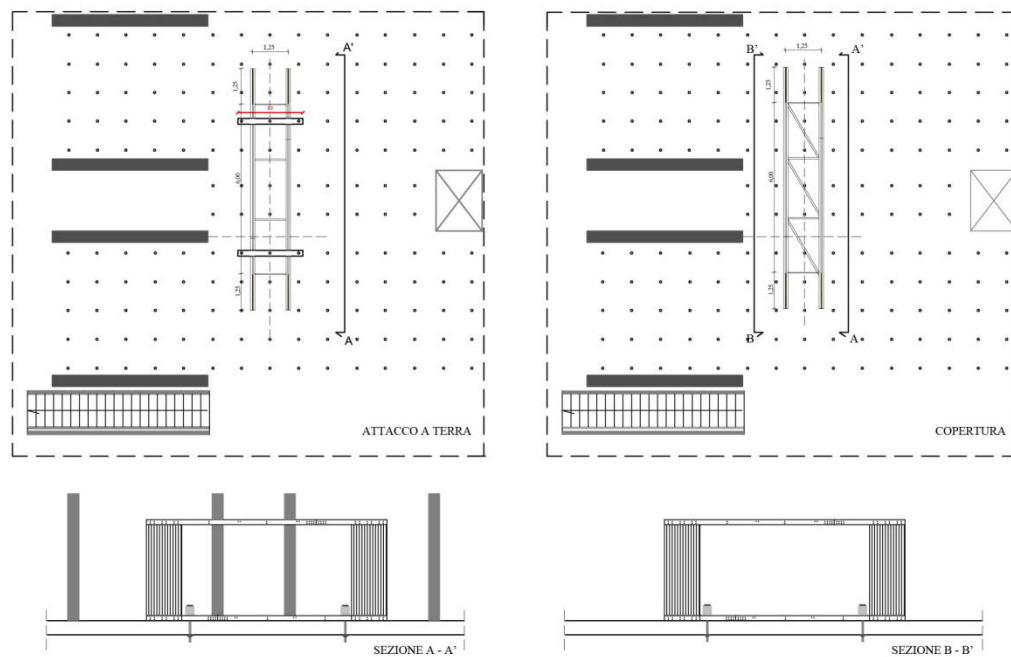


Fig. 48 Planimetria e prospetti della Glass House.

Il padiglione è stato installato in prossimità dell'attuatore ed è stato utilizzato per la connessione tra i due, un blocco in legno dello spessore di 0.10m. Si è scelto di applicare il carico orizzontale dell'attuatore, in corrispondenza del punto di discontinuità delle due travi principali, punto di connessione tra le due travi principali, di cui una è di lunghezza 6m e la seconda di lunghezza 2.5m [Fig.50].

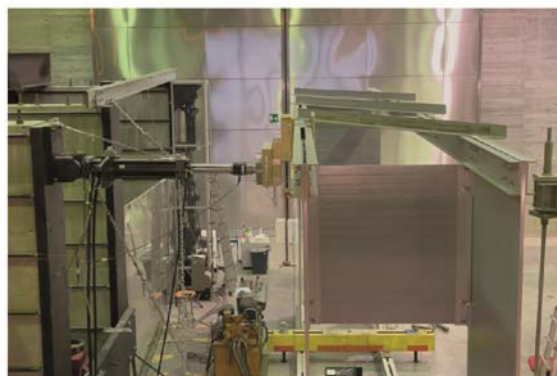


Fig. 49 Collocazione dell'attuatore rispetto al nodo sollecitato.

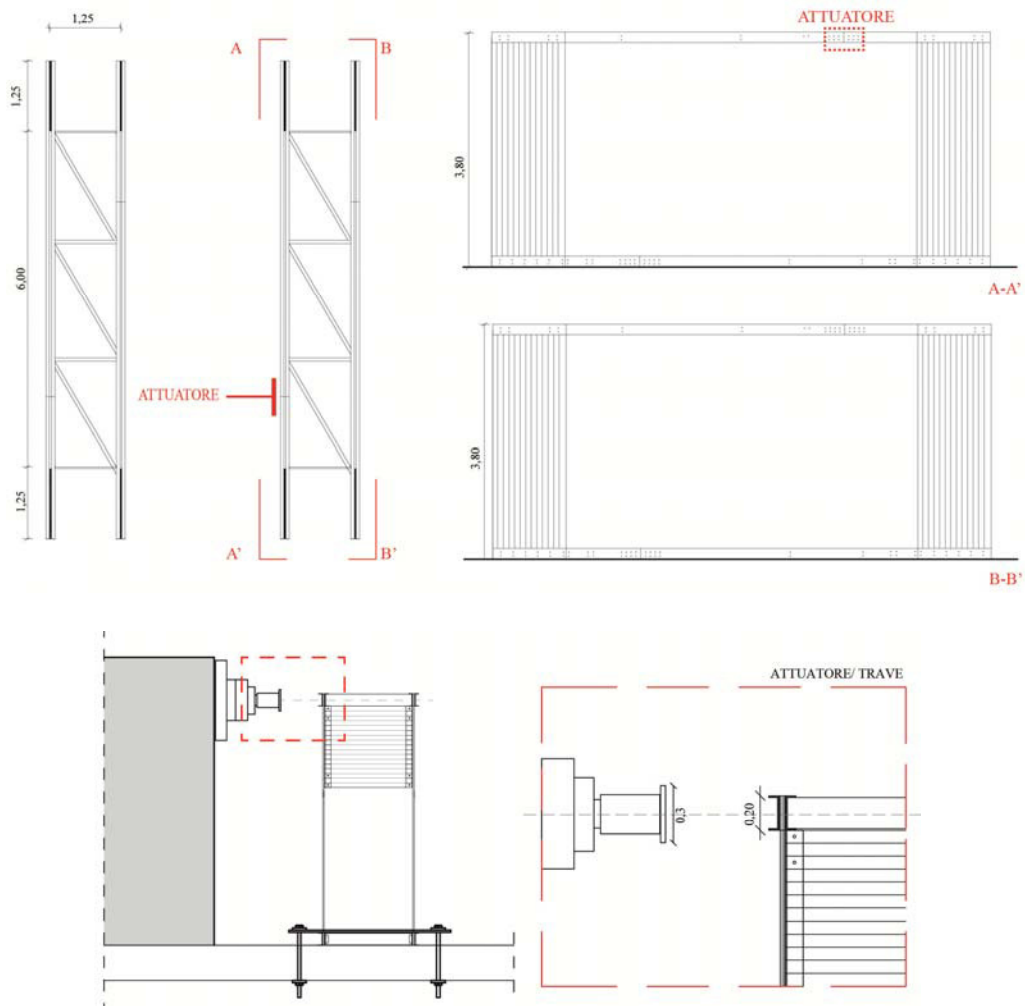


Fig. 50 Planimetria e sezione dell'attuatore in relazione al nodo sollecitato.

Per il monitoraggio della struttura si è scelto di procedere tramite tre sistemi di controllo differenti:

- Monitoraggio **globale**, rielaborazione dati attuatore [Fig.52]
- Monitoraggio **locale**, con l'applicazione di 3 trasduttori e un sistema di controllo rotazionale [Fig.52];
- Monitoraggio **puntuale** con l'applicazione di 5 strain-gauges, di dimensione di 60 mm, una resistenza di 120 ± 0.3 , un fattore di misura di $2.12 \pm 1\%$, in prossimità delle chiusure a secco nei nodi sollecitati [Fig.53]. Un secondo monitoraggio puntuale è stato effettuato tramite la tecnica delle emissioni acustiche per il controllo delle chiusure a secco (§ 3.5.1).



Fig. 51 Sistemi di monitoraggio utilizzati durante le prove.

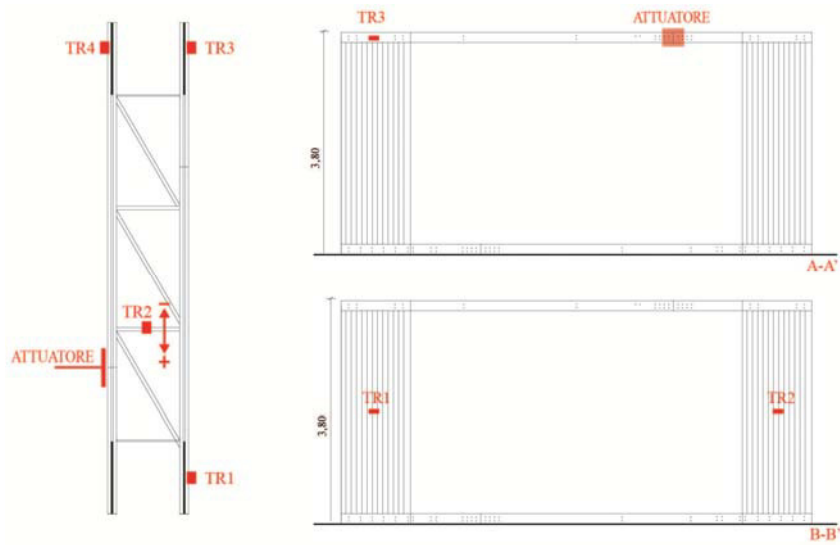


Fig. 52 Planimetria padiglione con sistemi di controllo globale.

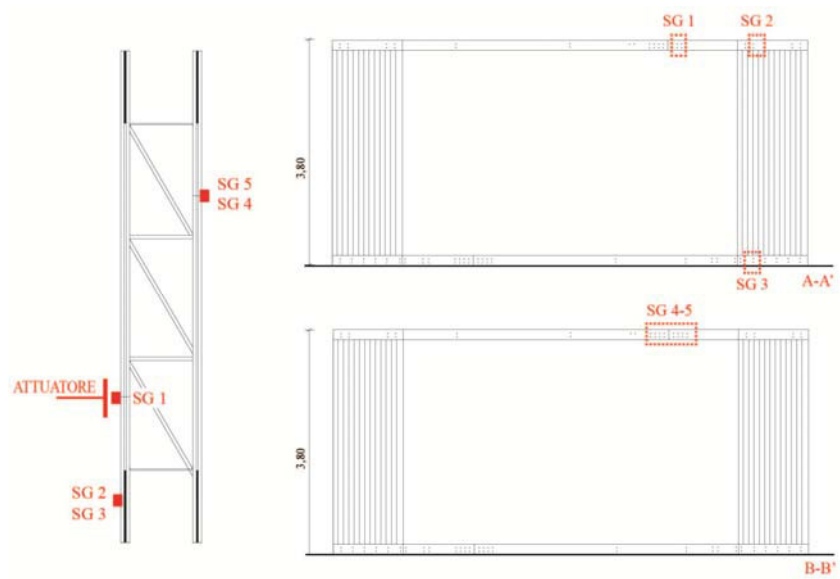


Fig. 53 Planimetria padiglione con sistemi di monitoraggio locale.

Set-up di prova

La prima definizione delle prove laboratoriali, era stata impostata utilizzando le normative in uso per le prove oligocicliche effettuate su strutture in acciaio (ECCS-45, ATC-24).

Ipotizzando di utilizzare la terza parte della procedura dell'ECCS-45, si applica come valore di spostamento di snervamento (ϵy^+) del padiglione, valore ricavato a seguito dell'analisi pushover realizzata sul modello numerico del padiglione. Dall'analisi pushover lo spostamento ultimo del padiglione è stato calcolato ad $1.43m = (\epsilon y^+)$.

Si sono definiti così, una trilogia di cicli divisi secondo macrogruppi:

$$\begin{aligned}
 4 \text{ cicli} &\longrightarrow \frac{1}{4} \epsilon y = \frac{1}{4} 1.43 \text{ m} = 0.35 \text{ m} \approx 35.000 \text{ mm} \\
 3 \text{ cicli} &\longrightarrow (2+2n)\epsilon y = (2+2 \cdot 1)1,43 \text{ m} = 5,72 \text{ m} \approx 5.720.000 \text{ mm} \\
 3 \text{ cicli} &\longrightarrow (2+2n)\epsilon y = (2+2 \cdot 2)1,43 \text{ m} = 8,52 \text{ m} \approx 8.520.000 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

I valori ottenuti applicando la normativa, risultano maggiori rispetto a quelli che potremmo applicare sulla nostra struttura, in quanto la normativa è stata studiata per regolamentare test da effettuare su telai realizzati interamente in acciaio, a differenza della nostra struttura che è un telaio realizzato in GFRP.

Comparando i risultati provenienti dall'applicazione delle normative e i risultati ottenuti dal modello numerico, si è scelto di lavorare con degli spostamenti e delle frequenze che ci permettessero di mantenere la struttura nello stato di esercizio, strutturando così un differente piano di prove.

Le prove hanno avuto una durata totale di 18 giorni, durante i quali è stato applicato sul padiglione una variazione di carico tale da avere uno spostamento pari a $\pm 30\text{mm}$ per i primi ± 15 giorni e 50mm per i restanti 3 giorni [Tab.14]. Le prove sono state effettuate in continuità, sottoponendo così la struttura ad uno sforzo continuo.

Tabella 8 Settaggio prove cicliche effettuate sulla struttura.

	Spostamento (mm)	Frequenza (Hz)	Durata (gg)
I Prova	30	0.05	4
II Prova	30	0.10	4
III Prova	30	0.20	4
IV Prova	30	0.40	3
V Prova	50	0.40	3

3.2 Analisi dei risultati

All'interno del paragrafo sono allegati una serie di grafici ottenuti dai risultati delle prove svolte all'interno del Laboratorio Labsco, dell'Università Iuav di Venezia. I grafici sono il risultato di una campagna di prove che ha avuto la durata di 28 giorni circa. Le prove si sono svolte in maniera continuativa, restituendo una quantità notevole di dati.

Si evidenzia, inoltre, che in bibliografia non sono presenti prove oligocicliche su telai realizzati interamente in FRP.

Di seguito vengono riportati i grafici riguardanti la restituzione delle prove cicliche divise per frequenze (§1.6.3).

I Prova

Il grafico di seguito è il risultato della **I Prova** [Tab.8], della durata di 4 giorni, durante i quali la struttura è stata sollecitata con una frequenza pari a 0.05 Hz. Lo spostamento per tutta la durata della prova è stato controllato dal sistema di centraline collegato all'attuatore ed è stato imposto a 30 mm.

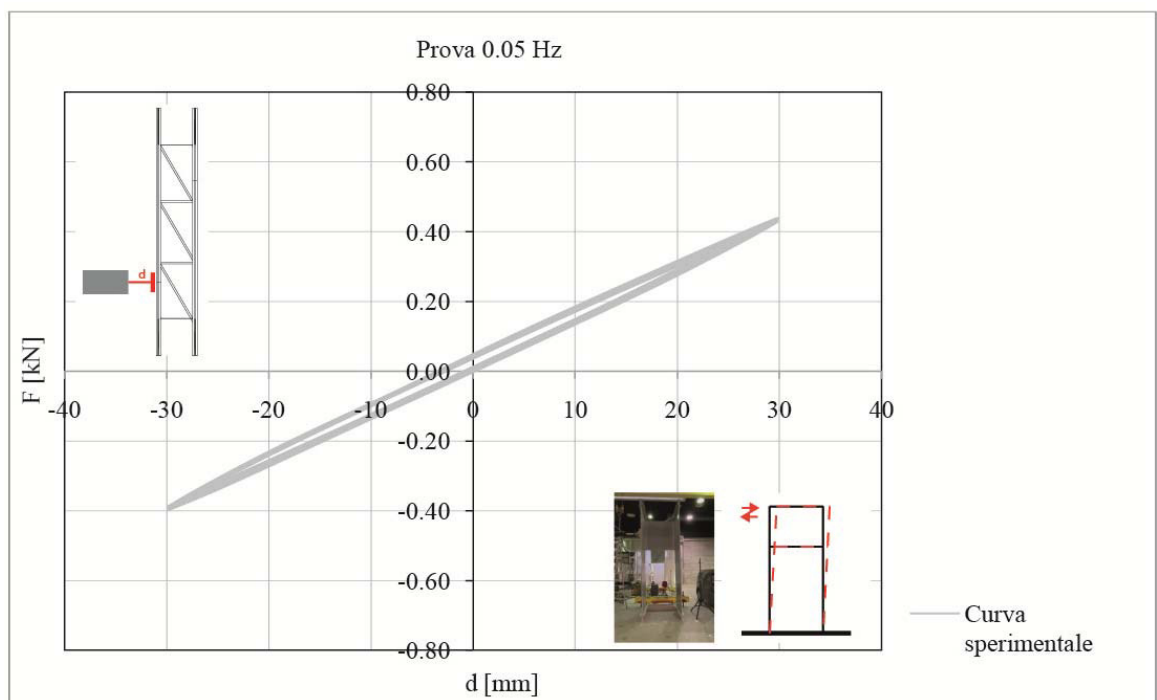


Fig. 54 Grafico Carico-Spostamento 0.05 Hz.

I risultati dimostrano un comportamento dei cicli di isteresi che si è stabilizzato a seguito delle prime 3 ore di prova. Il fenomeno della stabilizzazione, prende il nome di shakedown. Dalla deformazione dei grafici si denota che il legame elastico lineare

subisce una traslazione, che tende sempre di più allo zero ad ogni alternanza [Fig.46], determinando diversi cicli di isteresi a seconda della frequenza imposta. Dal grafico è visibile come la deformazione massima tende a stabilizzarsi progressivamente con il numero di cicli ad ampiezza di carico costante.

L'intera prova è stata monitorata in modo puntuale da un sistema di Strain Gauges illustrato nella [Fig.49]. Dal monitoraggio, si è potuto studiare la perdita o l'aumento di rigidità della struttura. Dai grafici sottostanti è visibile l'andamento della rigidità della struttura, a seguito del monitoraggio puntuale avvenuto con gli Strain Gauges.

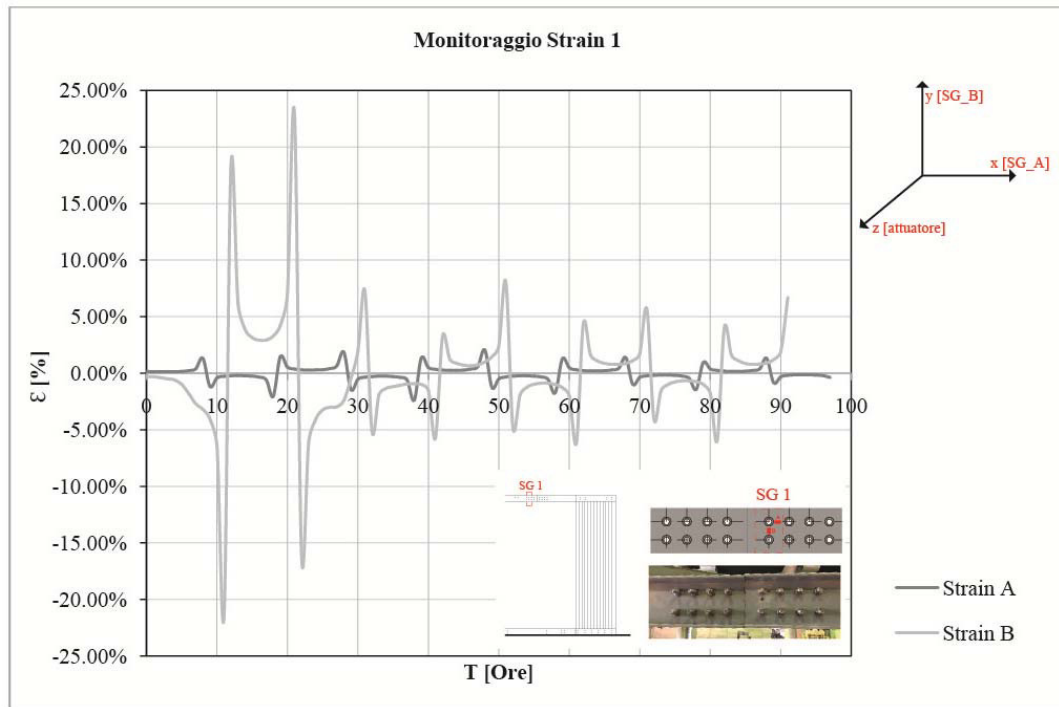


Fig. 55 Monitoraggio Strain Gauges 1A-1B. Frequenza 0.05 Hz.

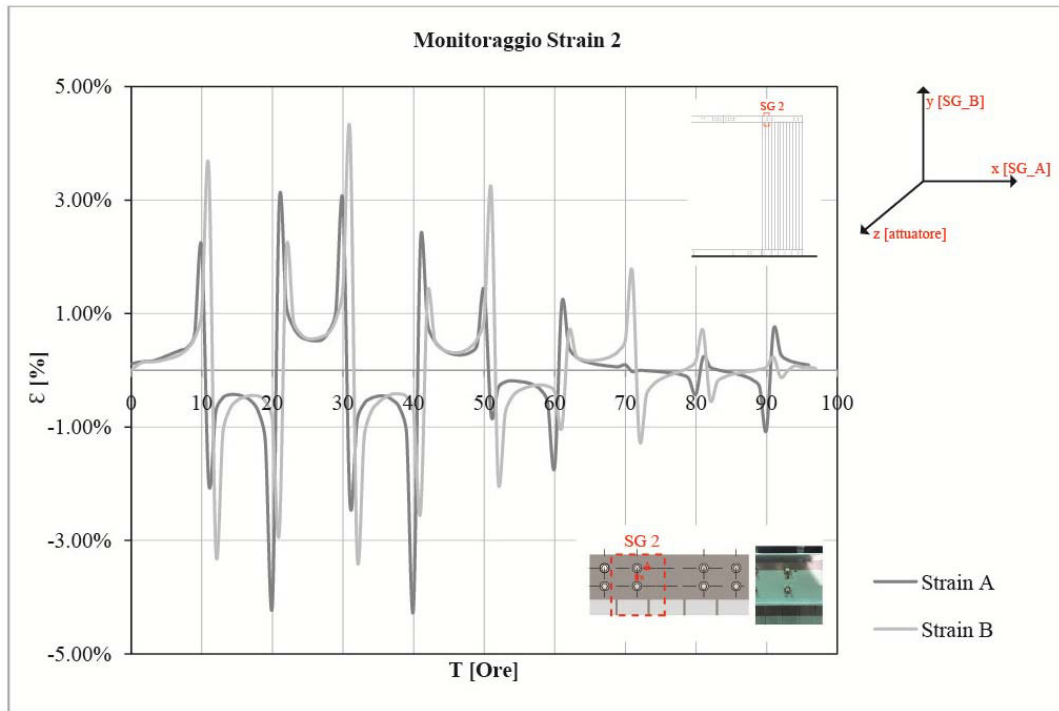


Fig. 56 Monitoraggio Strain Gauges 2A-2B. Frequenza 0.05 Hz.

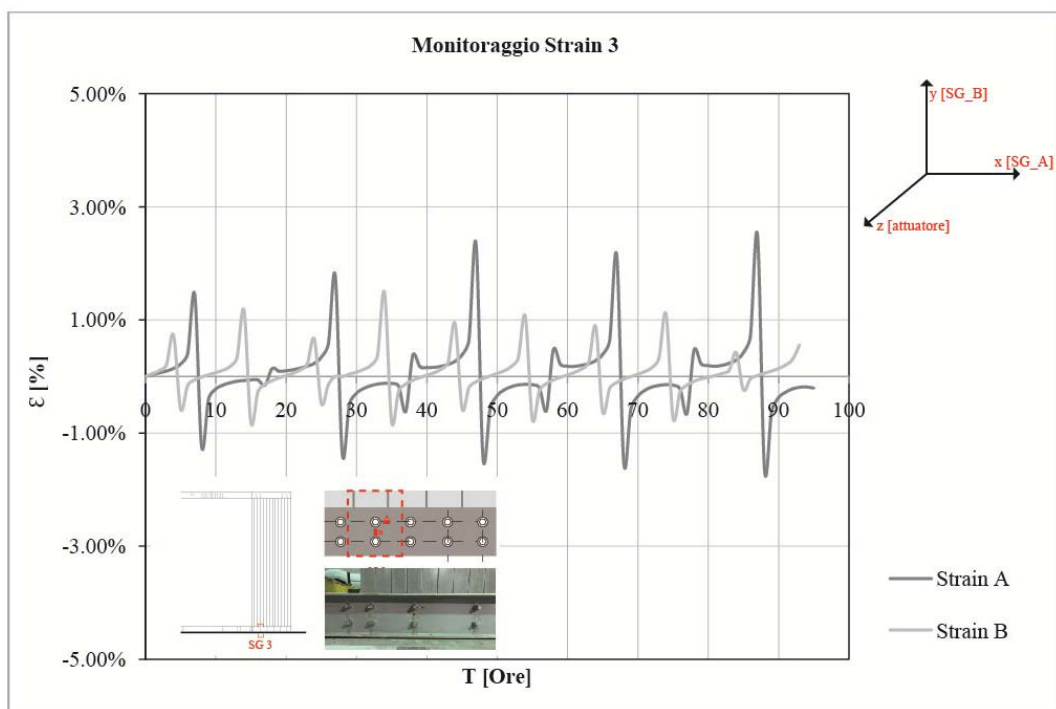


Fig. 57 Monitoraggio Strain Gauges 3A-3B. Frequenza 0.05 Hz.

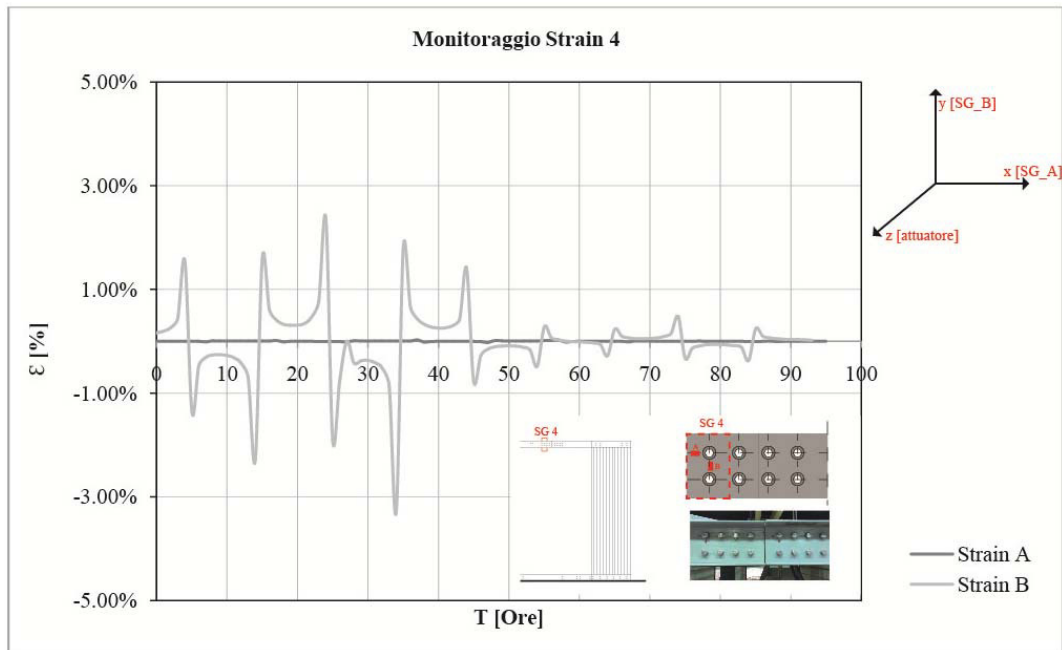


Fig. 58 Monitoraggio Strain Gauges 4A-4B. Frequenza 0.05 Hz.

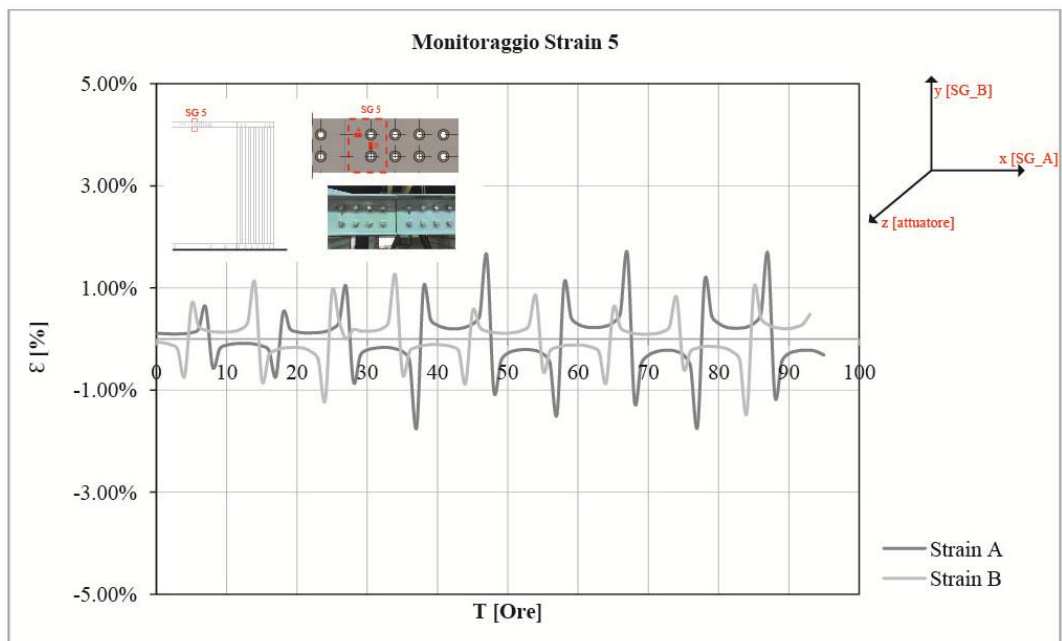


Fig. 59 Monitoraggio Strain Gauges 5A-5B. Frequenza 0.05 Hz.

Dai grafici è visibile la reazione delle fibre all'interno dei profili pultrusi. Tramite il controllo degli strain Gauges è visibile, a seconda della collocazione sulla struttura, la perdita o l'aumento di rigidità della stessa.

Il nodo maggiormente sollecitato risulta essere anche quello più stressato, dove si ha una maggiore perdita nella direzione ortogonale alle fibre, come visibile nella Fig. 55-Strain Gauges 1B. L'aumento di rigidità si registra nelle prime 20 ore di prova, arrivando fino al 25%. Il nodo ottenuto dalla giunzione delle travi principali

nella parte superiore, sono stati applicati due Strain Gauges, il 4 e il 5. Nel monitoraggio dello strain 4-B, lungo la direzione delle fibre, la struttura sembra non aver registrato alcuna perdita o incremento di rigidità. Il padiglione ha mantenuto un comportamento costante [Fig.58-59].

Durante le prove, il monitoraggio puntuale è stato effettuato tramite le registrazioni delle emissioni acustiche, applicando l'accelerometro come visibile dalla figura [Fig.51]. I risultati delle registrazioni sono rappresentati nel grafico sottostante.

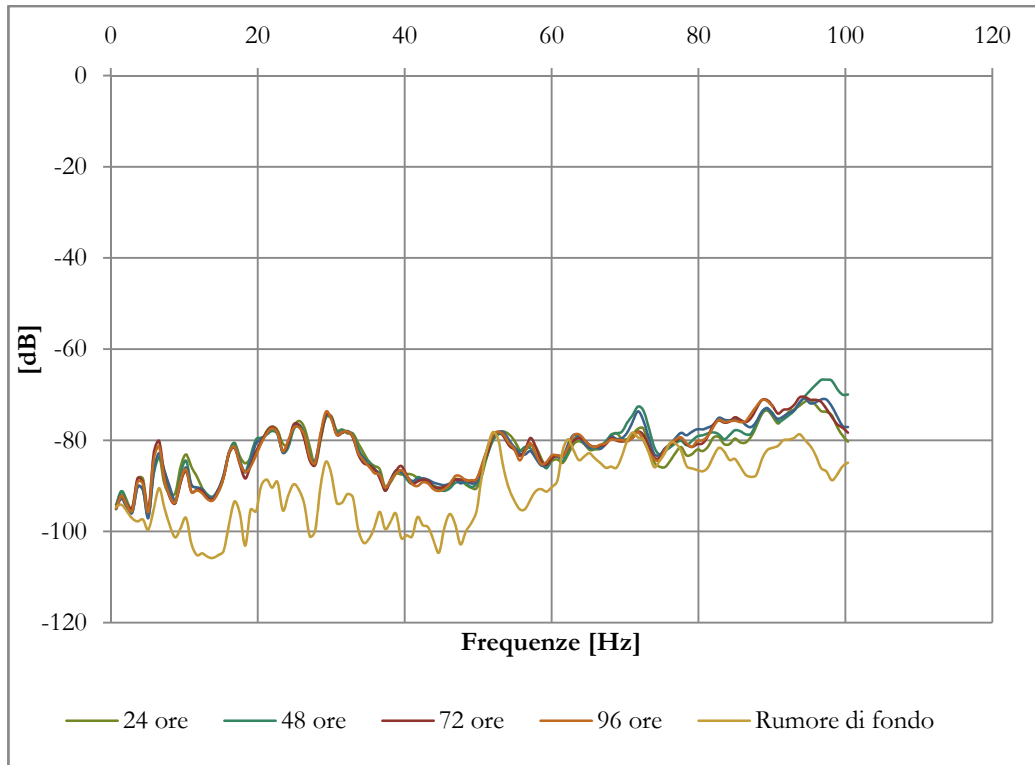


Fig. 60 Andamento delle emissioni acustiche durante la prova a 0.05 Hz.

Dalle registrazioni possiamo notare come alle basse frequenze le curve tengono a coincidere tra loro, all'aumentare delle frequenze si ha un'aumento dei decibel e quindi di emissione acustica. L'aumento di emissione acustica equivale ad una possibile formazione di danno all'interno della struttura. Le registrazioni hanno confermato le ipotesi precedentemente fatte.

II Prova

Il grafico di seguito è il risultato della **II Prova** [Tab.14], della durata di 4 giorni, durante i quali la struttura è stata sollecitata con una frequenza pari a 0.10 Hz. Lo spostamento per tutta la durata della prova è stato controllato dal sistema di centraline collegato all'attuatore ed è stato imposto a 30 mm.

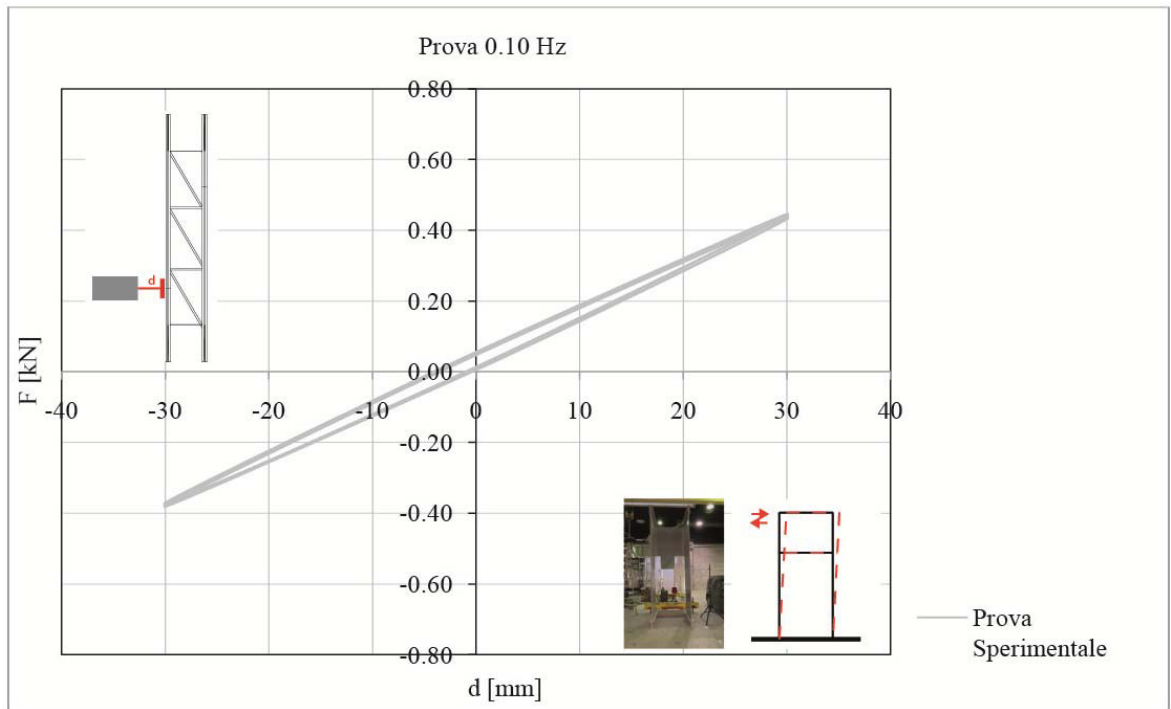


Fig. 61 Grafico Carico-Spostamento 0.10 Hz.

I risultati rappresentano i cicli di isteresi raggiunti dalla struttura nelle 96 ore di prova. A differenza della prova I, il legame elastico lineare subisce una traslazione di ε_p [Fig.61]. Il ciclo di isteresi denota un' area maggiore del 6% rispetto alla prova effettuata con la frequenza a 0.05 Hz.

L'intera prova è stata monitorata in modo puntuale da un sistema di Strain Gauges illustrato nella [Fig.49]. Dal monitoraggio degli stessi, siamo riusciti a caratterizzare la perdita di rigidità del padiglione durante la prova a fatica. Ne deriva che durante le 96 ore totali, il comportamento della struttura è risultato piuttosto omogeneo. Dai grafici sottostanti è visibile l'andamento della perdita o aumento di rigidità durante la prova, suddivisa per i singoli Strain Gauges.

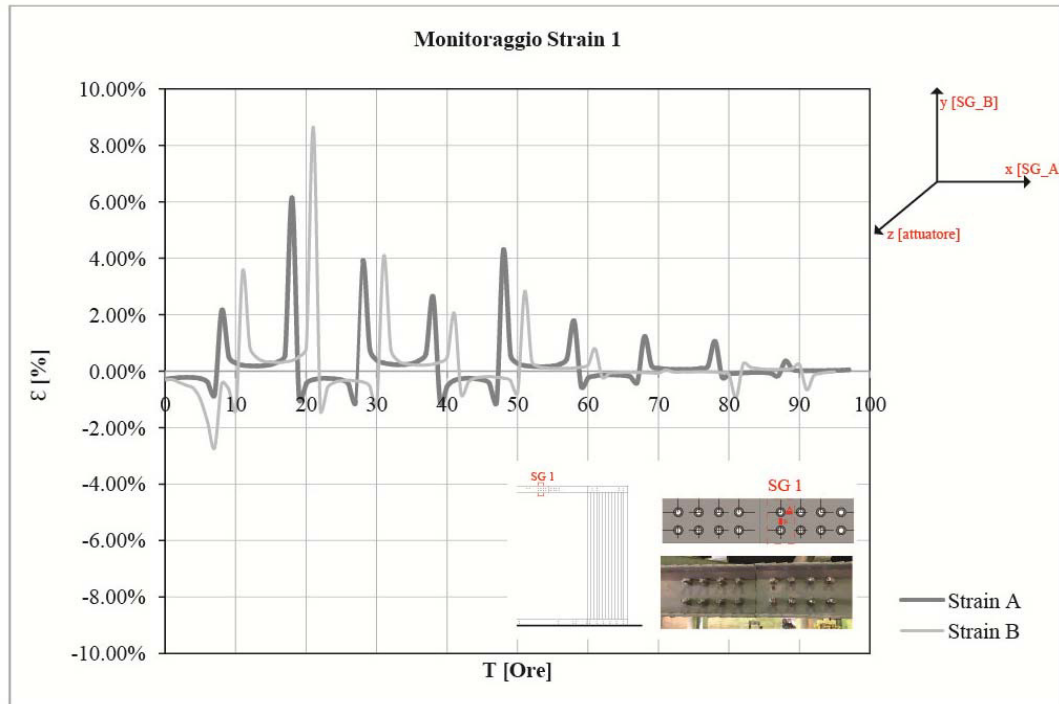


Fig. 62 Monitoraggio Strain Gauges 1A-1B. Frequenza 0.10 Hz.

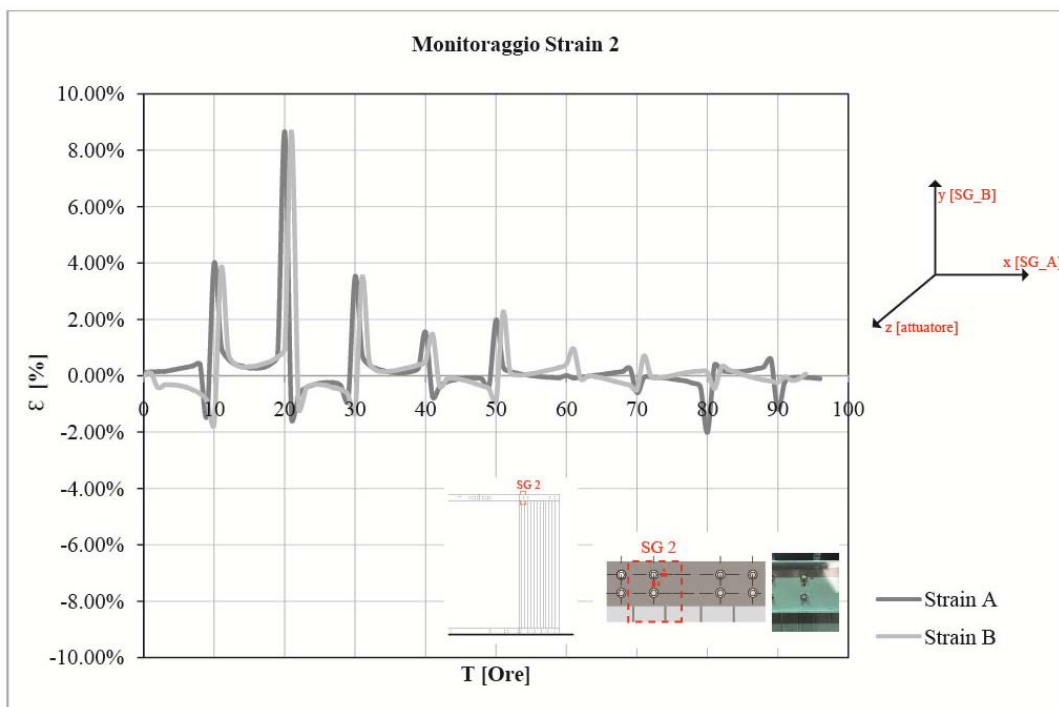


Fig. 63 Monitoraggio Strain Gauges 2A-2B. Frequenza 0.05 Hz.

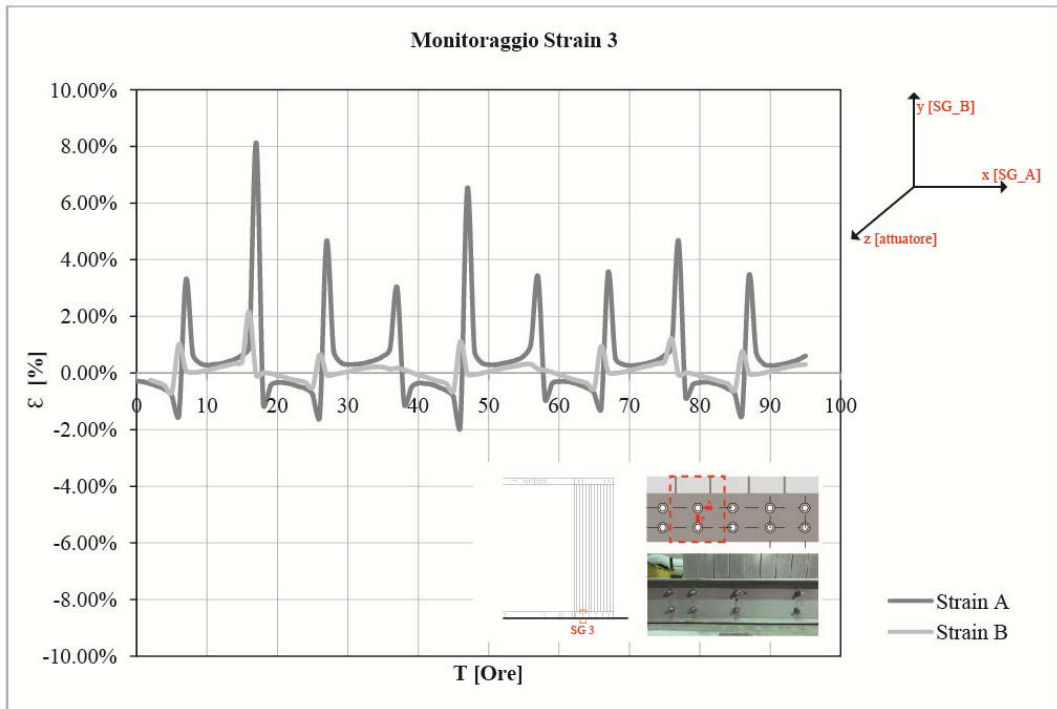


Fig. 64 Monitoraggio Strain Gauges 3A-3B. Frequenza 0.10 Hz.

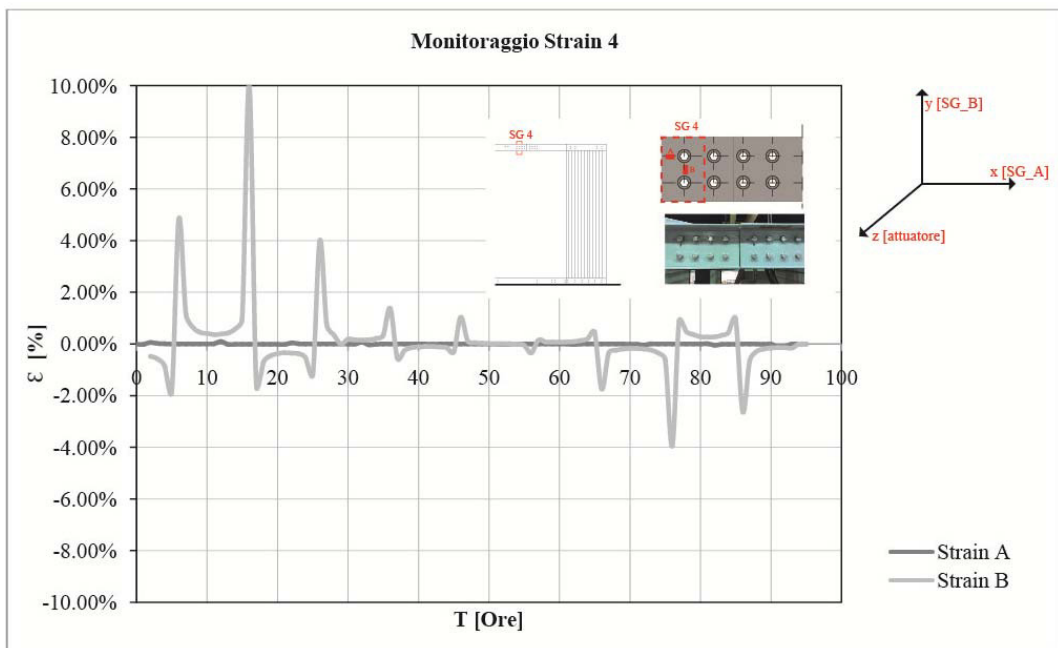


Fig. 65 Monitoraggio Strain Gauges 4A-4B. Frequenza 0.10 Hz.

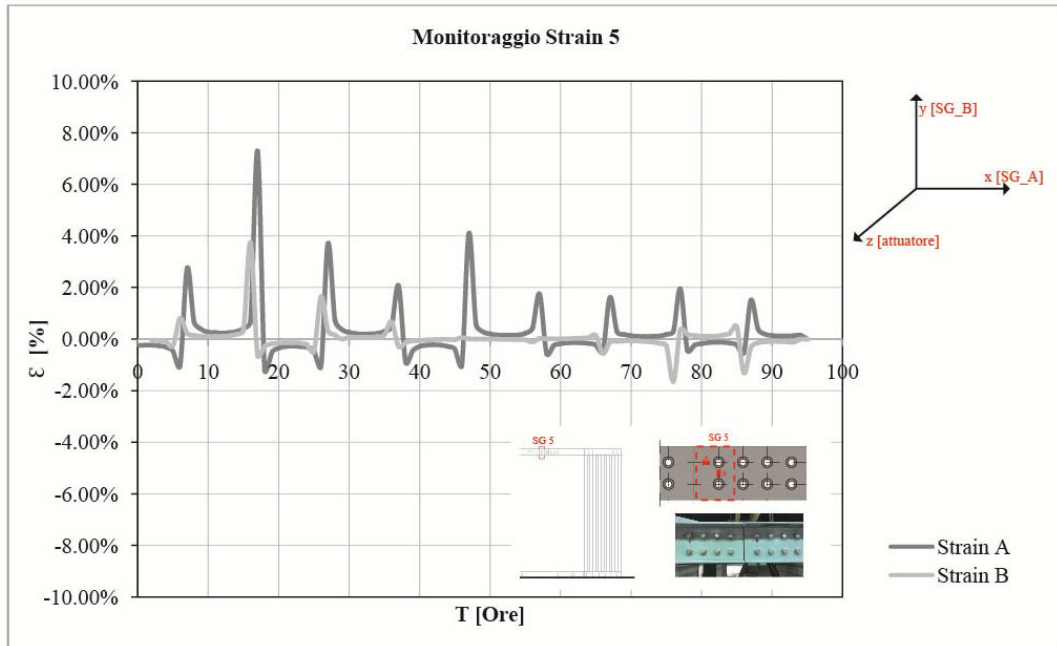


Fig. 66 Monitoraggio Strain Gauges 4A-4B. Frequenza 0.10 Hz.

Dai grafici è visibile come lavorano le fibre all'interno dei profili pultrusi. Tramite il controllo degli Strain Gauges si nota come nelle diverse posizioni si ha un picco, comune a tutti i trasduttori, raggiunto attorno alle 20 ore di prove, dove la struttura registra un aumento di rigidità di circa 8%. Tuttavia, come evidenziato dalla restituzione del ciclo di isteresi, il valore di ε_p tende verso lo zero.

Nel monitoraggio dello strain 4-B, lungo la direzione delle fibre, la struttura sembra non aver registrato alcuna perdita di rigidità, il padiglione ha mantenuto un comportamento costante[Fig.58-59].

Come per la prova precedente, nella Fig.67 è rappresentato l'andamento delle Emissioni acustiche durante il monitoraggio puntuale effettuato sul padiglione.

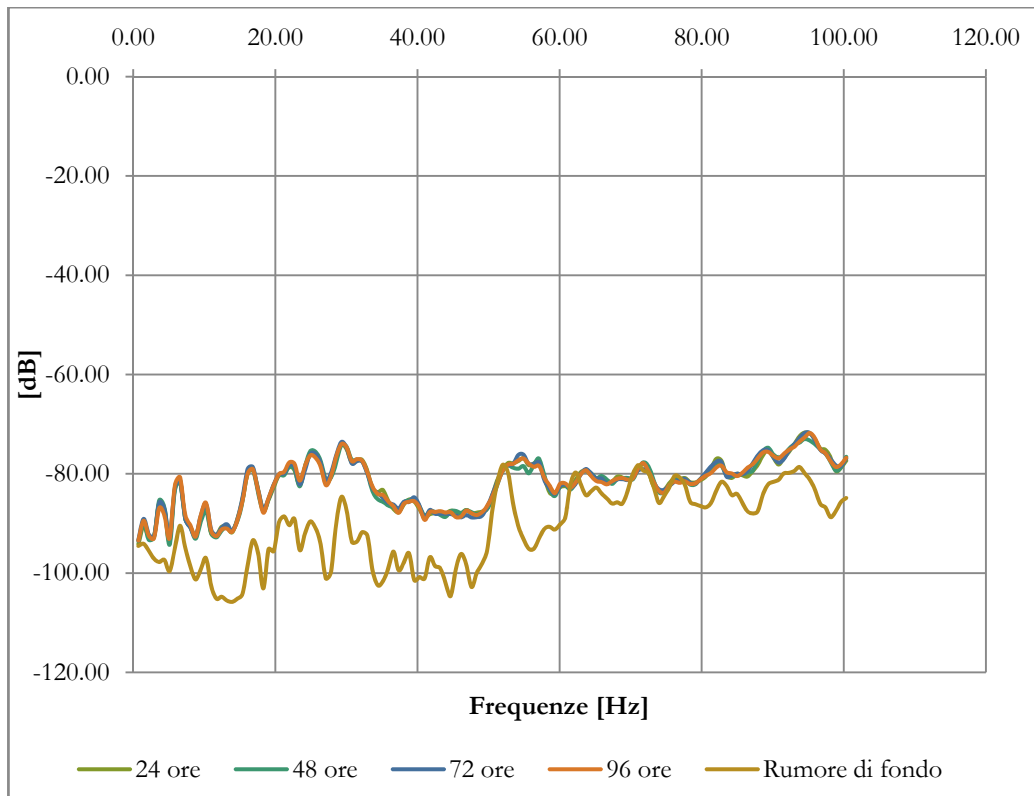


Fig. 67 Andamento delle emissioni acustiche durante la prova a 0.10 Hz.

Dalle registrazioni possiamo notare come durante l'intera prova le curve combaciano perfettamente tra loro. Dai risultati ottenuti durante la prova, sul padiglione non sono state registrate particolari emissioni acustiche, segno della presenza di microfrazture all'interno della stessa. Confrontandola con i dati ottenuti dalla prova precedente, le curve non sembrano avere un'andamento differente neanche alle alte frequenze.

III Prova

Il grafico di seguito è il risultato della **III Prova** [Tab.14], della durata di 4 giorni, durante i quali la struttura è stata sollecitata con una frequenza pari a 0.20 Hz. Lo spostamento per tutta la durata della prova è stato controllato dal sistema di centraline collegato all'attuatore ed è stato imposto a 30 mm.

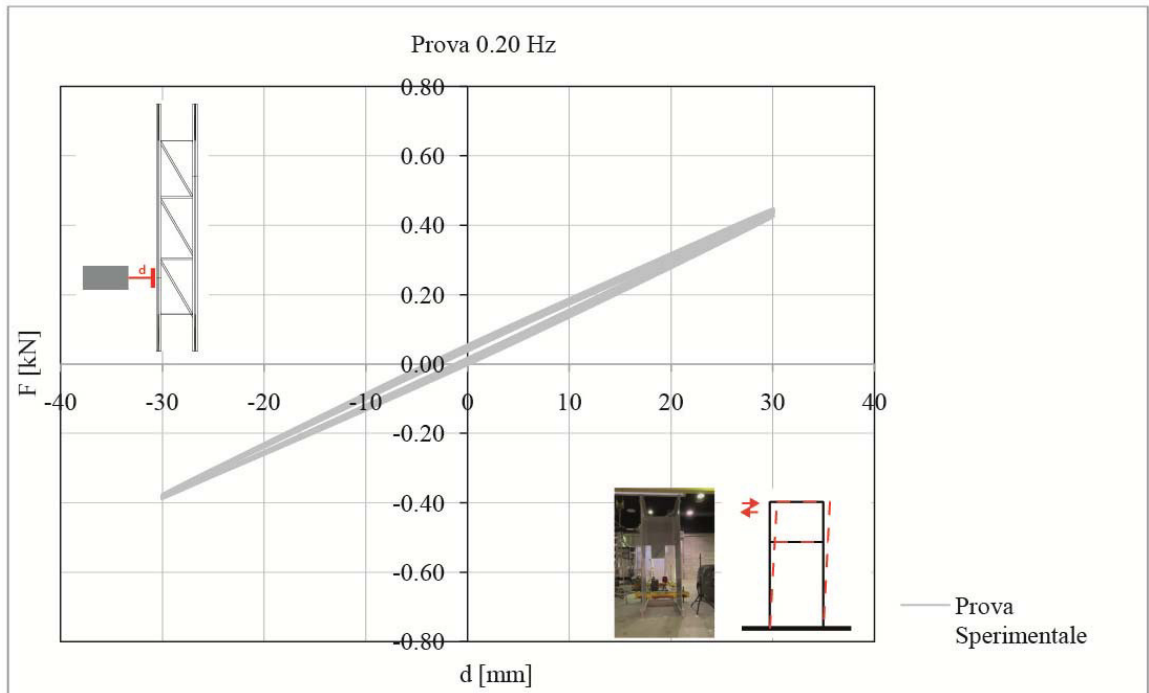


Fig. 68 Grafico Carico-Spostamento 0.20 Hz.

I risultati rappresentano i cicli di isteresi raggiunti dalla struttura nelle 96 ore di prova. Il legame subisce una traslazione di ε_p , riducendosi del 2% [Fig.68].

Come per le prove precedenti, l'intera prova è stata monitorata in modo puntuale da un sistema di Strain Gauges illustrato nella [Fig.49]. Dal monitoraggio degli stessi, si è riusciti a caratterizzare la perdita di rigidezza del padiglione durante la prova a fatica. Ne deriva che durante le 96 ore totali, il comportamento della struttura è risultato piuttosto omogeneo. Dai grafici sottostanti è visibile l'andamento della perdita o aumento di rigidezza durante la prova, suddivisa per i singoli Strain Gauges.

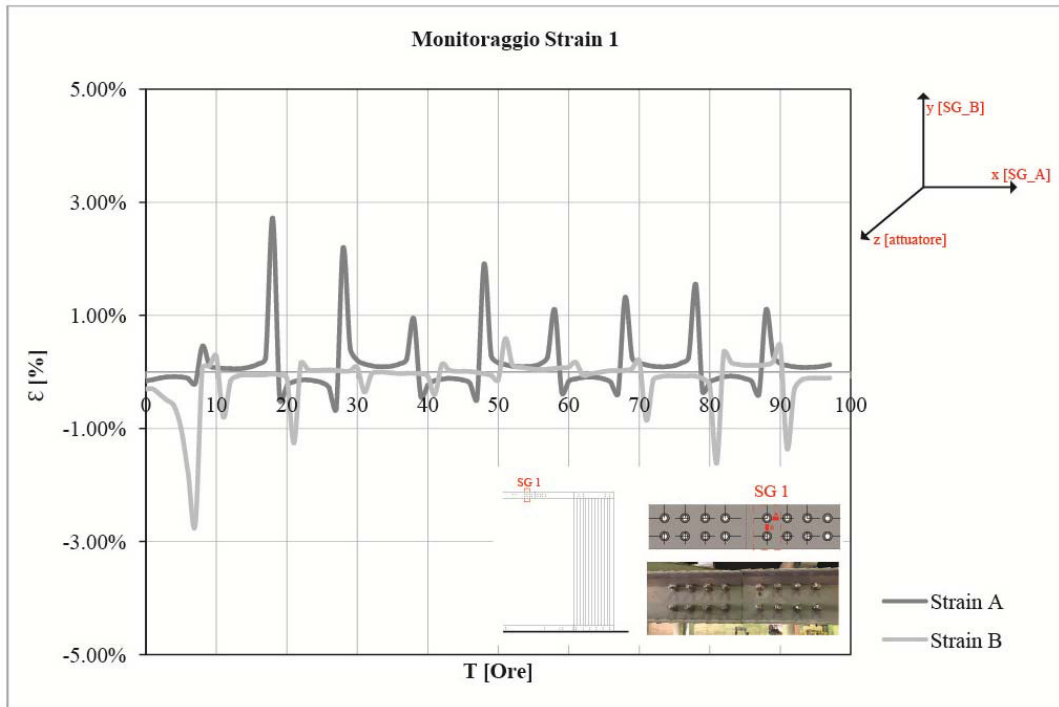


Fig. 69 Monitoraggio Strain Gauges 1A-1B. Frequenza 0.20 Hz.

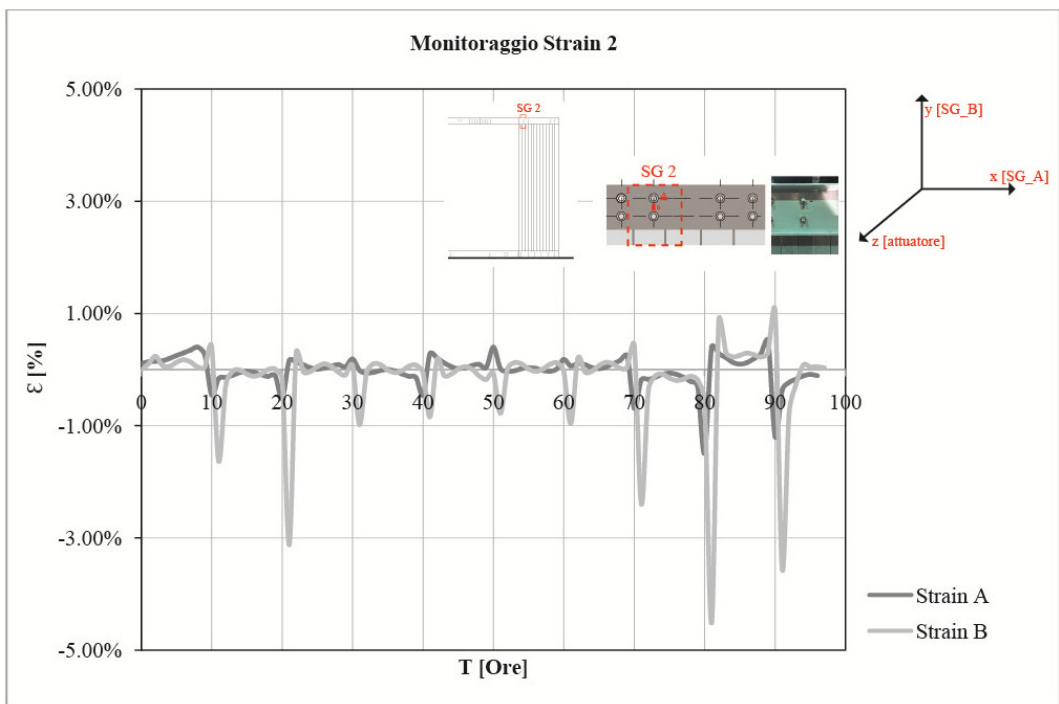


Fig. 70 Monitoraggio Strain Gauges 2A-2B. Frequenza 0.20 Hz.

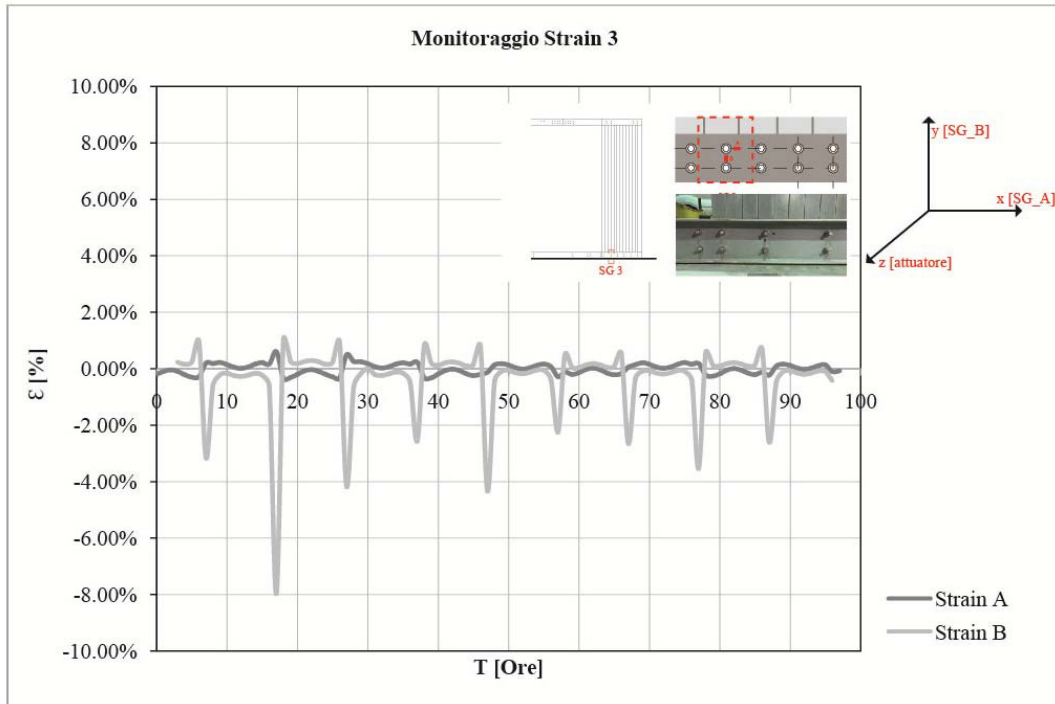


Fig. 71 Monitoraggio Strain Gauges 3A-3B. Frequenza 0.20 Hz.

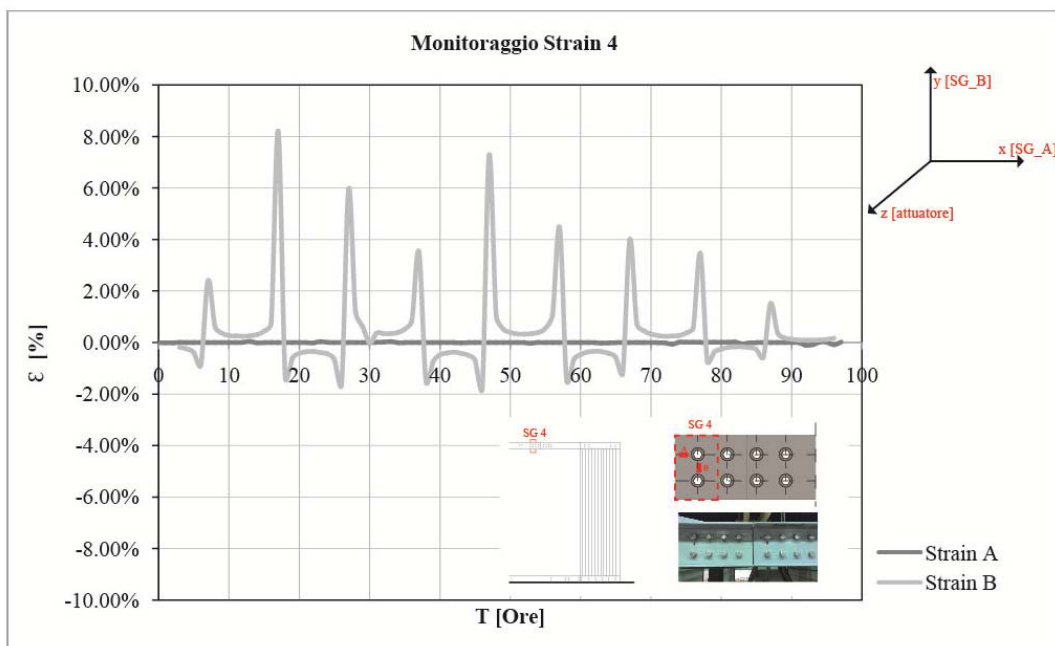


Fig. 72 Monitoraggio Strain Gauges 4A-4B. Frequenza 0.20 Hz.

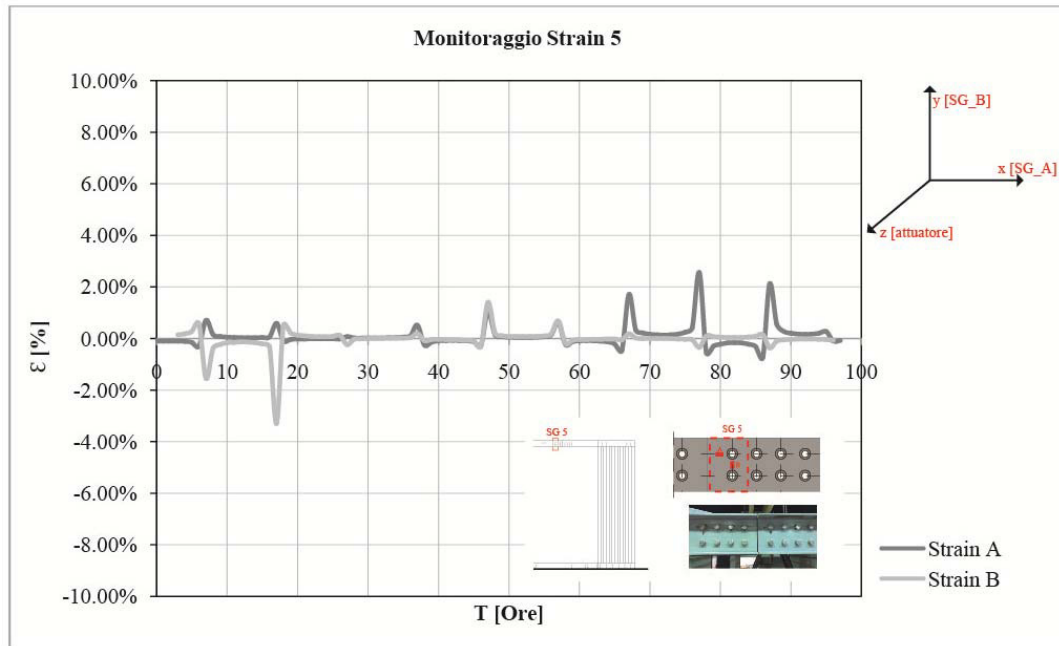


Fig. 73 Monitoraggio Strain Gauges 5A-5B. Frequenza 0.20 Hz.

Nei grafici di restituzione delle prove è visibile come in tutti gli Strain Gauges si registri una perdita di rigidità della struttura, meno che per lo strain 4B.

Dal confronto tra la curva di isteresi, si nota una perdita in percentuale pari all'8%.

Durante le prove, il monitoraggio è effettuato tramite le registrazioni delle emissioni acustiche, applicando l'accelerometro come visibile dalla figura [Fig.51]. I risultati delle registrazioni sono visibili dal grafico sottostante.

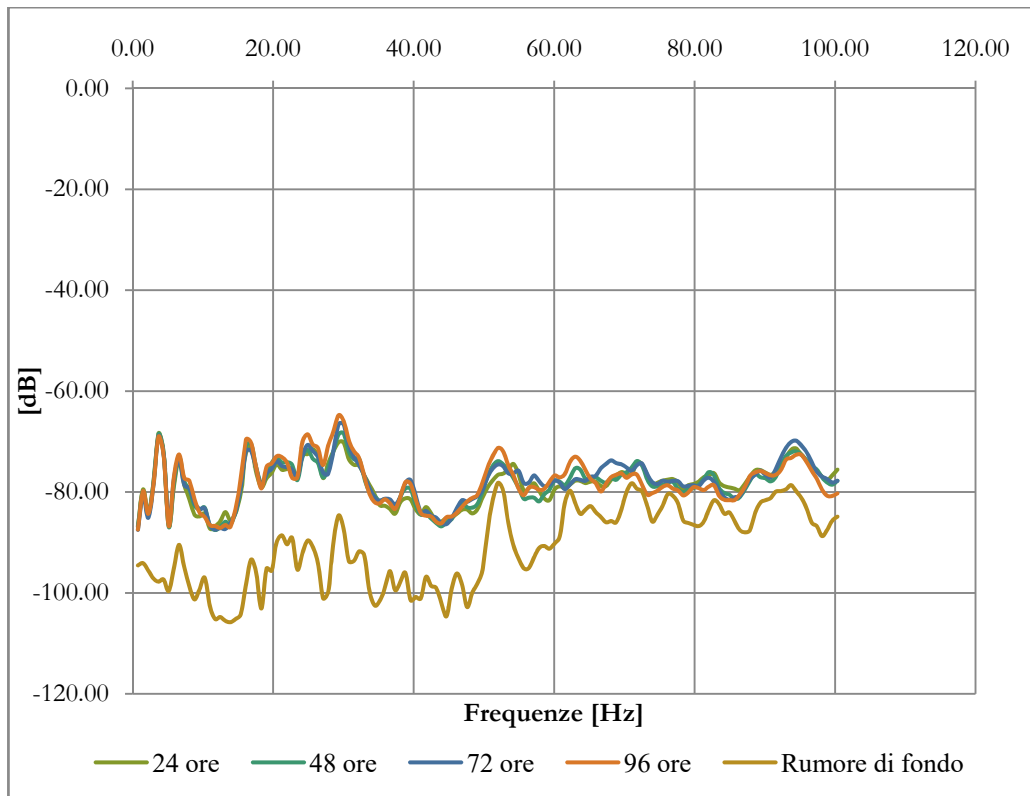


Fig. 74 Andamento delle emissioni acustiche durante la prova a 0.10 Hz.

Dalle registrazioni possiamo notare come alle basse frequenze le curve tengono a coincidere tra loro, all'aumentare delle frequenze le curve hanno dei picchi che sono corrispondenti, ma che raggiungono valori diversi. I picchi più bassi corrispondono alle prime ore di prova, con l'aumentare delle ore di prova, il picco raggiunge un aumento di decibel. Come precedentemente descritto nelle prove di emissione acustica (AE), l'aumento di emissione acustica equivale ad un possibile formazione di un danno all'interno della struttura.

VI Prova

Il grafico di seguito è il risultato della **VI Prova** [Tab.14], della durata di 3 giorni, durante i quali la struttura è stata sollecitata con una frequenza pari a 0.40 Hz. Lo spostamento per tutta la durata della prova è stato controllato dal sistema di centraline collegato all'attuatore ed è stato imposto a 30 mm.

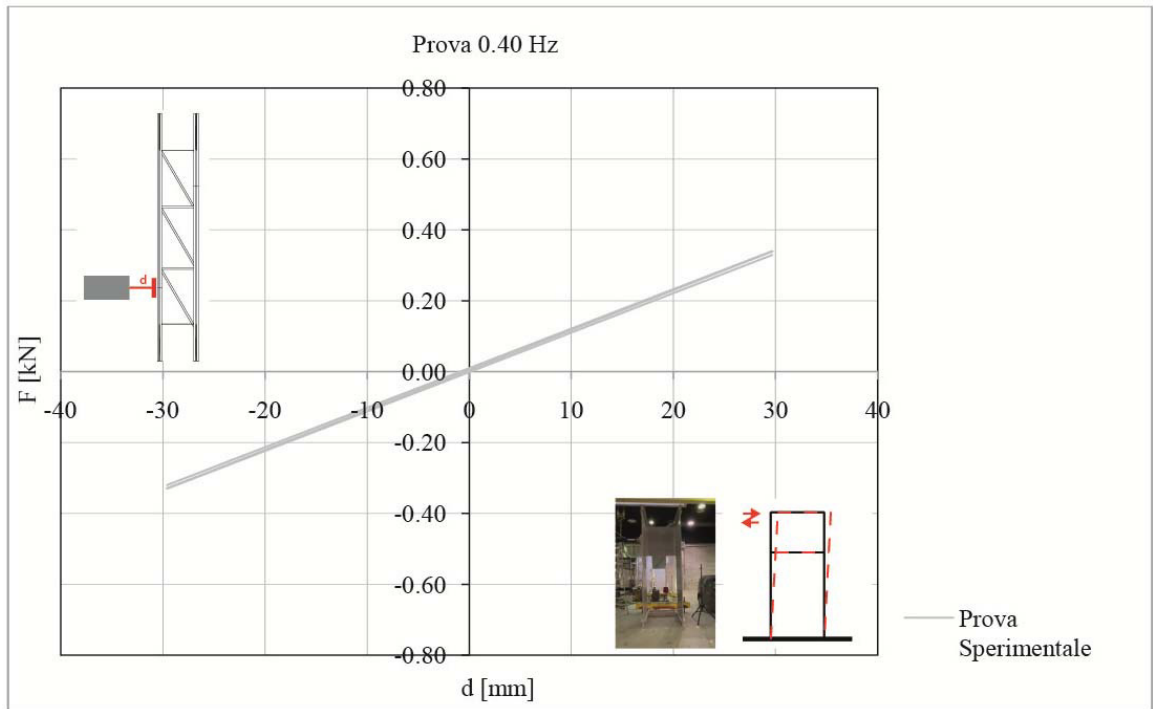


Fig. 75 Grafico Carico-Spostamento 0.40 Hz con spostamento 30 mm.

I risultati rappresentano i cicli di isteresi raggiunti dalla struttura nelle 72ore di prova. A differenza delle prove con frequenze più basse, nella Fig.75, si nota che la struttura ha un ciclo di isteresi che tende allo zero. Durante questo fenomeno il ciclo tensione-deformazione tende a sovrapporsi e mantenersi stabile. Questo fenomeno assieme al fenomeno dell'accomodamento sono effetti dei cicli di deformazione in campo plastico. Come vedremo successivamente, il comportamento di questa curva di isteresi, risulta essere molto simile a quella derivante dal modello numerico.

Dai grafici sottostanti è visibile l'andamento della perdita o aumento di rigidezza durante la prova, suddivisa per i singoli Strain Gauges.

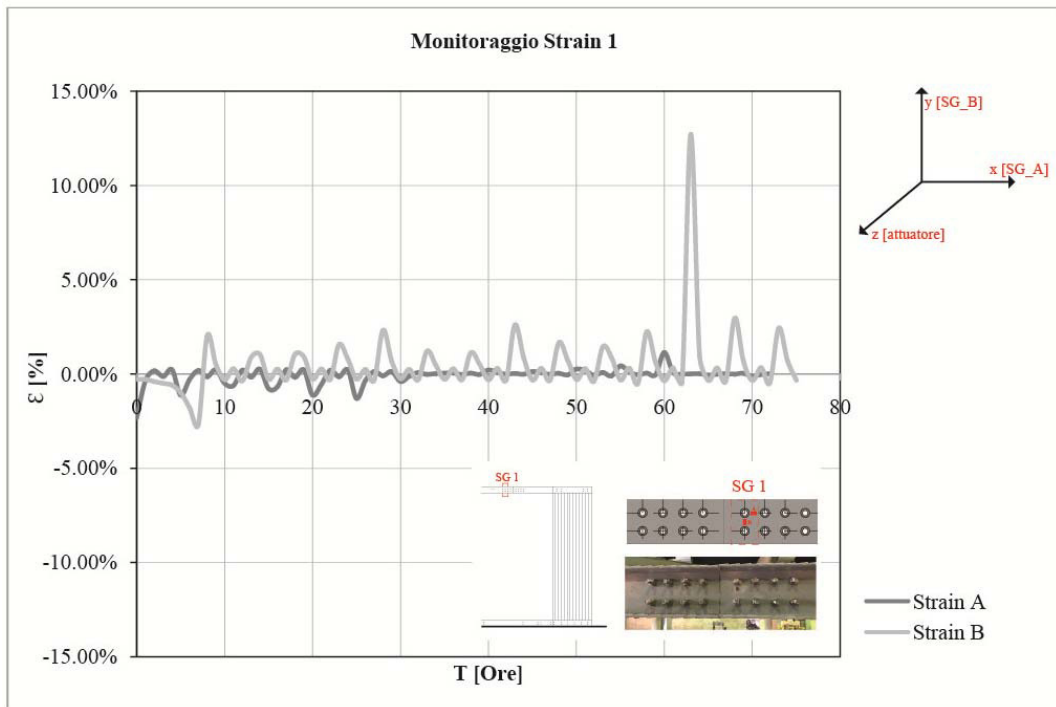


Fig. 76 Monitoraggio Strain Gauges 1A-1B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 30 mm.

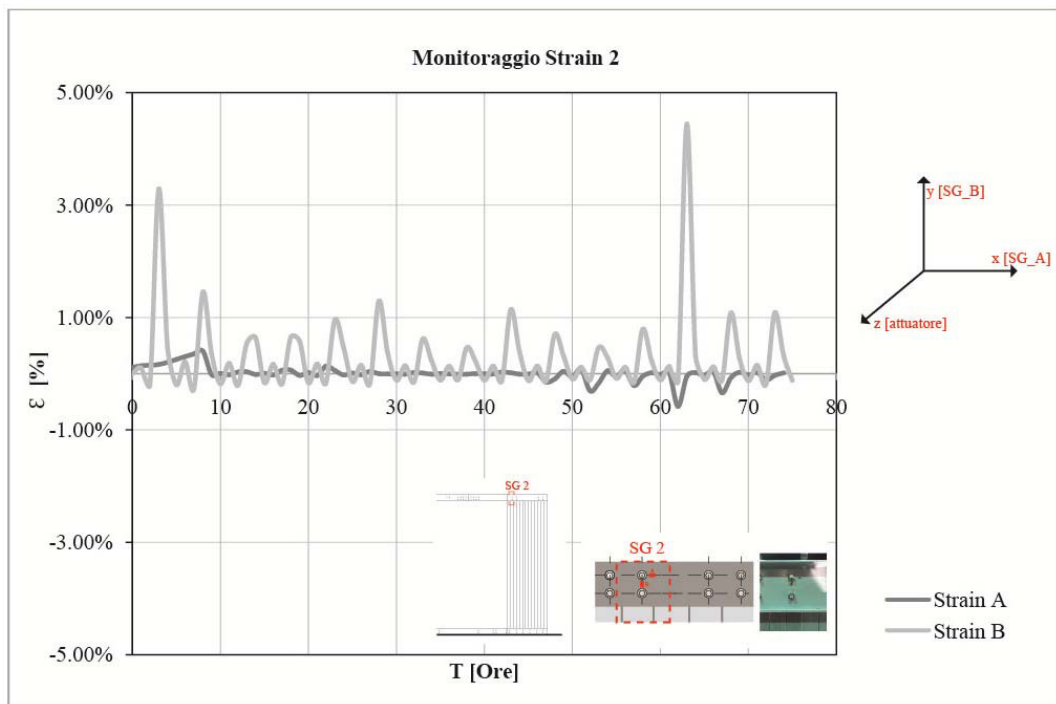


Fig. 77 Monitoraggio Strain Gauges 2A-2B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 30 mm.

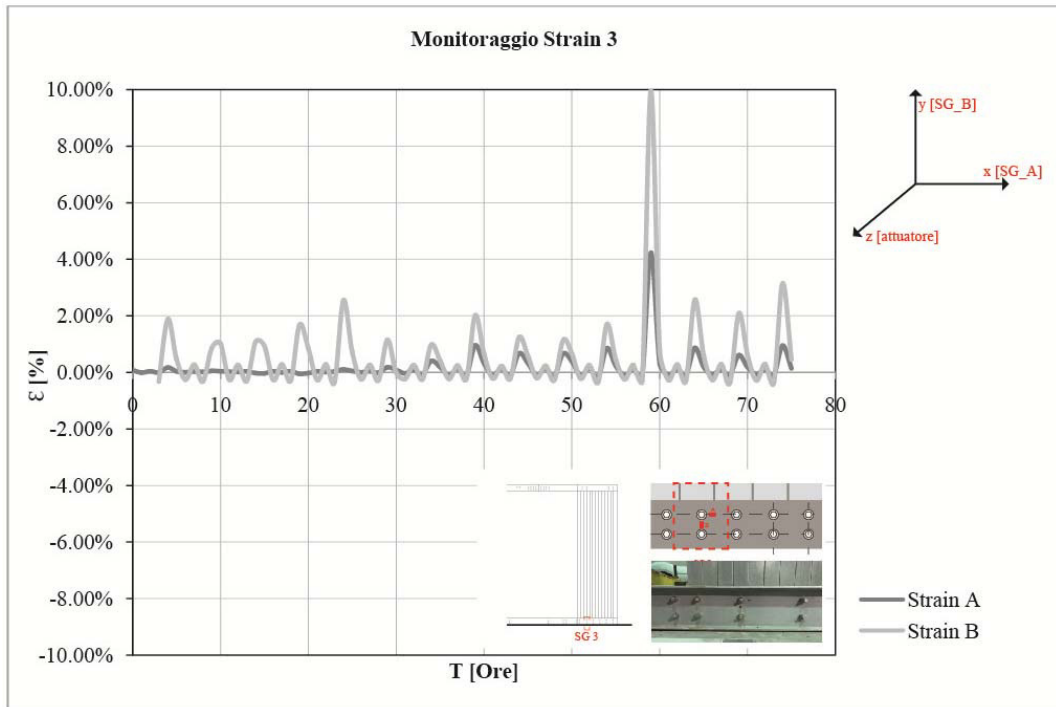


Fig. 78 Monitoraggio Strain Gauges 3A-3B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 30 mm.

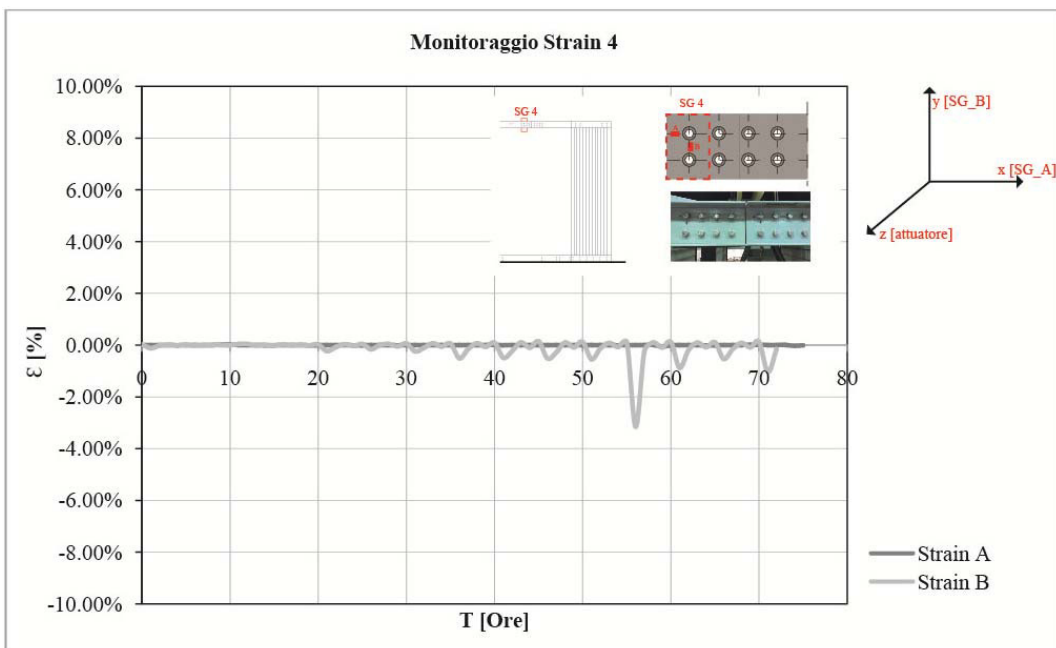


Fig. 79 Monitoraggio Strain Gauges 4A-4B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 30 mm.

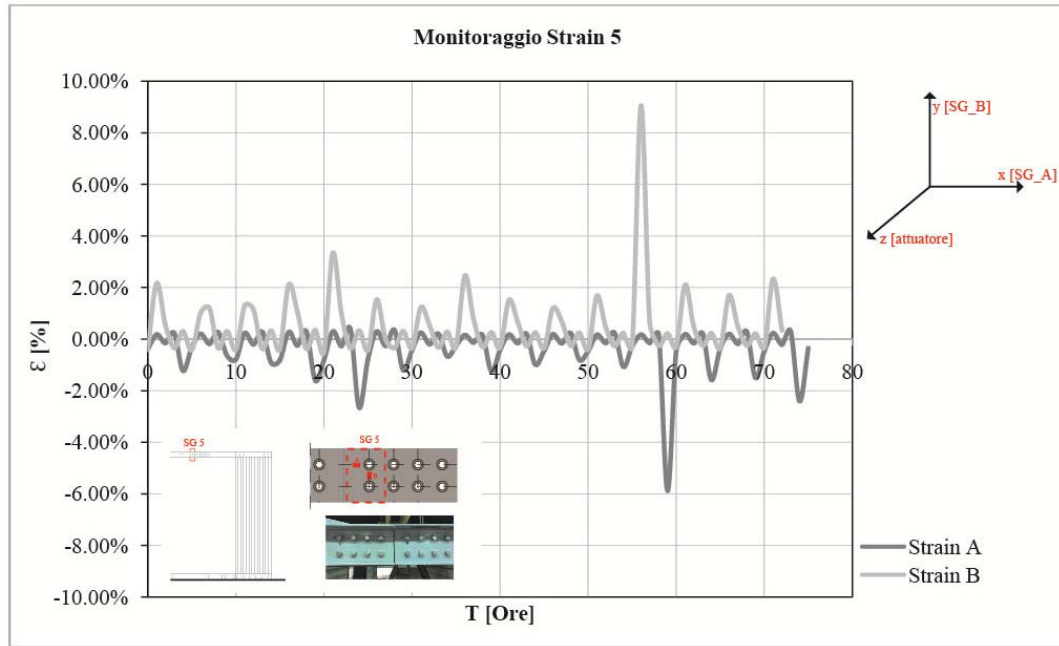


Fig. 80 Monitoraggio Strain Gauges 5A-5B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 30 mm.

Nei grafici di restituzione delle prove è visibile come, durante la prova si sono registrati degli aumenti e delle diminuzioni di rigidità sulla struttura, ma i valori più significativi, comuni a tutta la struttura, sono stati registrati dopo 60 ore di prove.

Se durante la prova effettuata con una frequenza a 20 Hz, il padiglione aveva avuto un incremento o una perdita della rigidità attorno alle 20 ore, in questa simulazione si è verificata dopo 60 ore.

Durante le prove, il monitoraggio puntuale è effettuato tramite le registrazioni delle emissioni acustiche, applicando l'accelerometro come visibile dalla figura [Fig.51]. I risultati delle registrazioni sono visibili dal grafico sottostante.

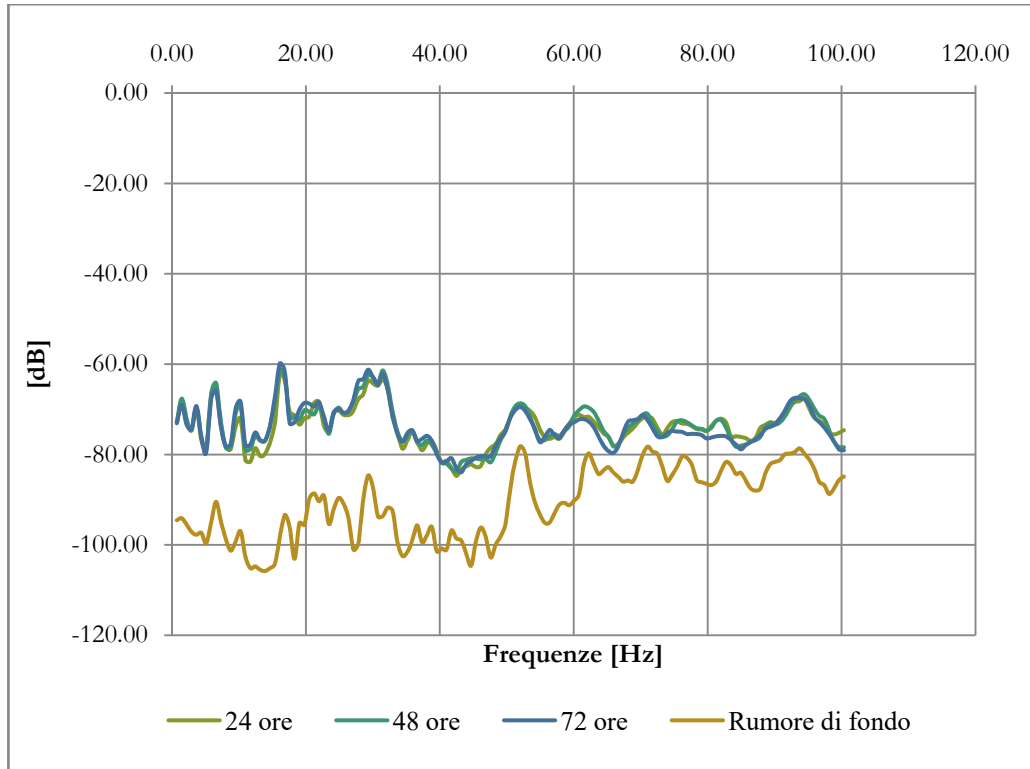


Fig. 81 Andamento delle emissioni acustiche durante la prova a 0.40 Hz con spostamento 30mm.

Dalle registrazioni possiamo notare come alle basse frequenze le curve tengono a coincidere tra loro, all'aumentare delle frequenze le curve hanno dei picchi che sono corrispondenti, ma che raggiungono valori diversi. Confrontando i dati con le prove precedenti, le curve rientrano tutte tra i -80 e i -60 dB. I picchi più bassi corrispondono alle prime ore di prova, con l'aumentare delle ore di prova, il picco raggiunge un aumento di decibel. Come precedentemente descritto nelle prove di emissione acustica (AE), l'aumento di emissione acustica equivale ad un possibile formazione di un danno all'interno della struttura.

V Prova

Il grafico di seguito è il risultato della **V Prova** [Tab.8], della durata di 3 giorni, durante i quali la struttura è stata sollecitata con una frequenza pari a 0.40 Hz. Lo spostamento per tutta la durata della prova è stato controllato dal sistema di centraline collegato all'attuatore ed è stato imposto a 50 mm. Per l'ultima prova abbiamo voluto incrementare sia la distanza che la frequenza, per studiare il comportamento della struttura in una situazione critica.

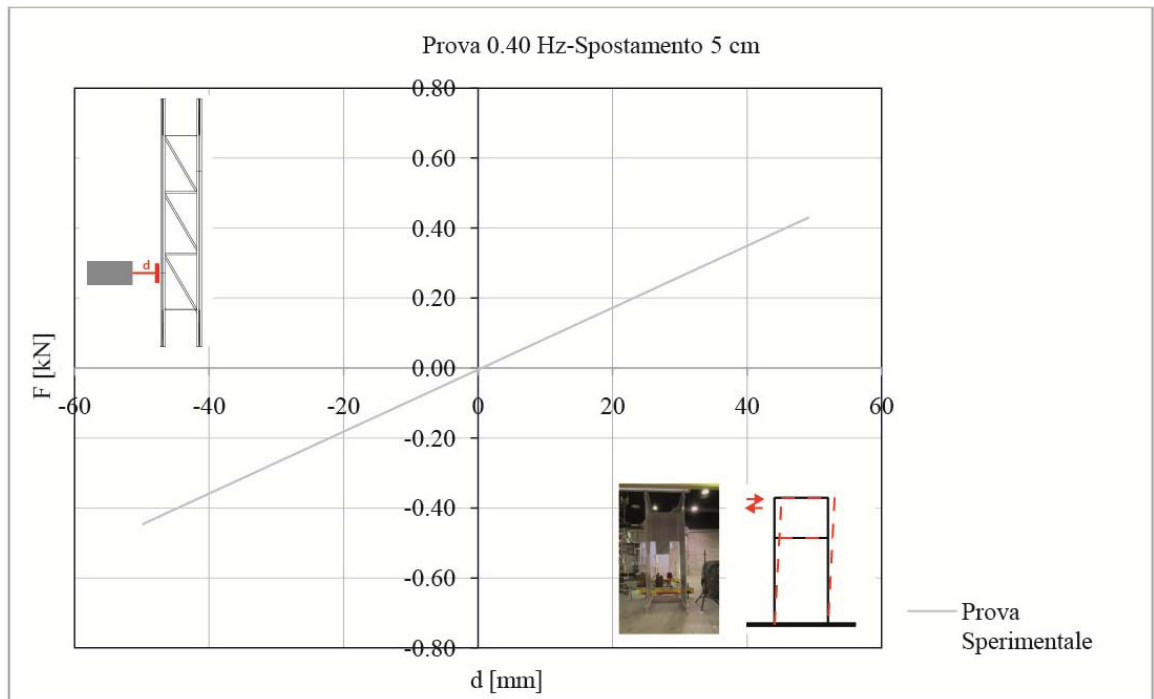


Fig. 82 Andamento delle emissioni acustiche durante la prova a 0.40 Hz con spostamento 50mm.

I risultati rappresentano i cicli di isteresi raggiunti dalla struttura nelle 72 ore di prova. A differenza delle prove con frequenze più basse, nella Fig.82, si nota che la struttura si è stabilizzata, creando un ciclo di isteresi è che riconducibile ad una linea retta. Durante questo fenomeno il ciclo tensione-deformazione tende a sovrapporsi e mantenersi stabile. Assieme alla prova precedente, il comportamento di questa curva di isteresi, risulta essere molto simile a quella derivante dal modello numerico.

Le 72 ore di prova, sono state monitorate in modo puntuale da un sistema di Strain Gauges illustrato nella [Fig.49].

Dai grafici sottostanti è visibile l'andamento della rigidezza all'interno delle travi che compongono la struttura.

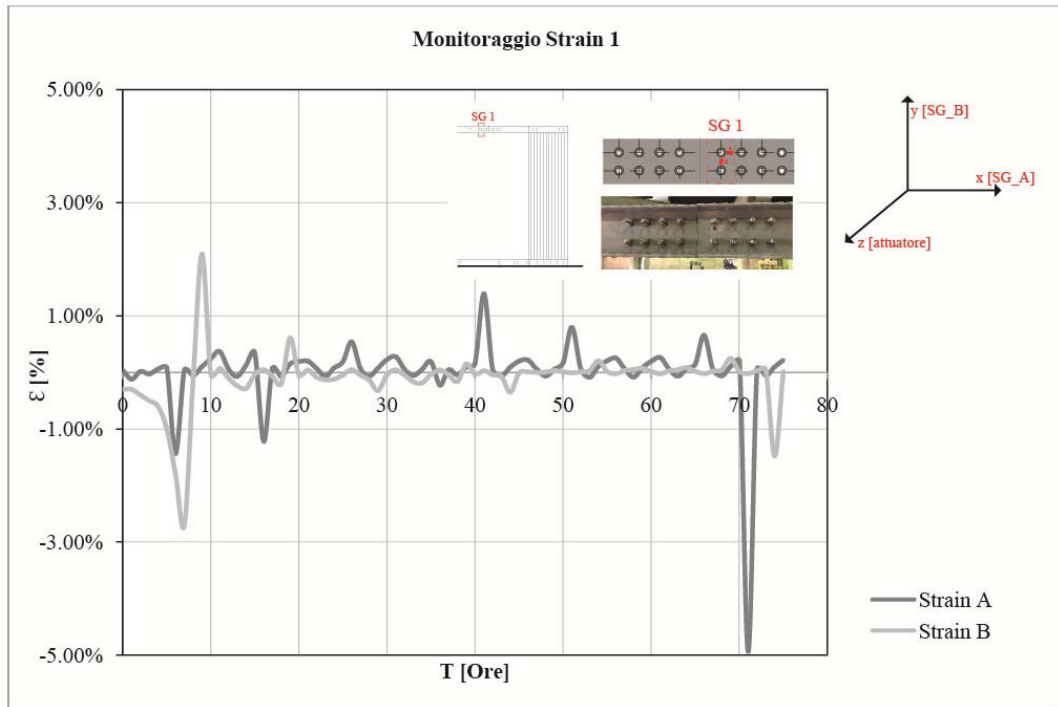


Fig. 83 Monitoraggio Strain Gauges 1A-1B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 50 mm.

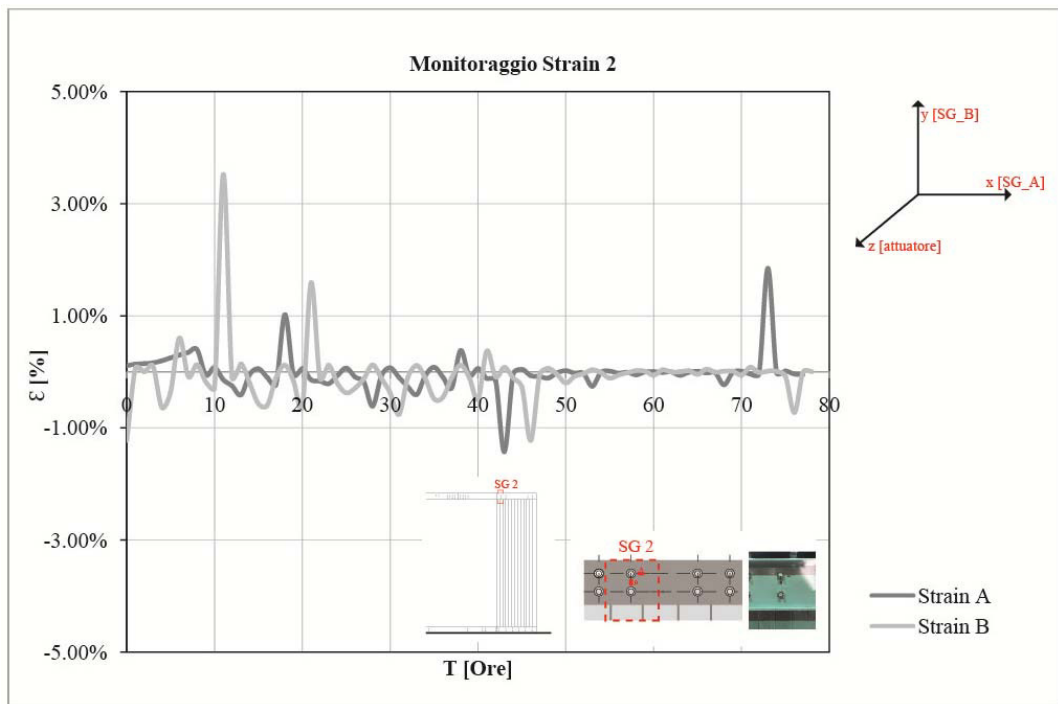


Fig. 84 Monitoraggio Strain Gauges 2A-2B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 50 mm.

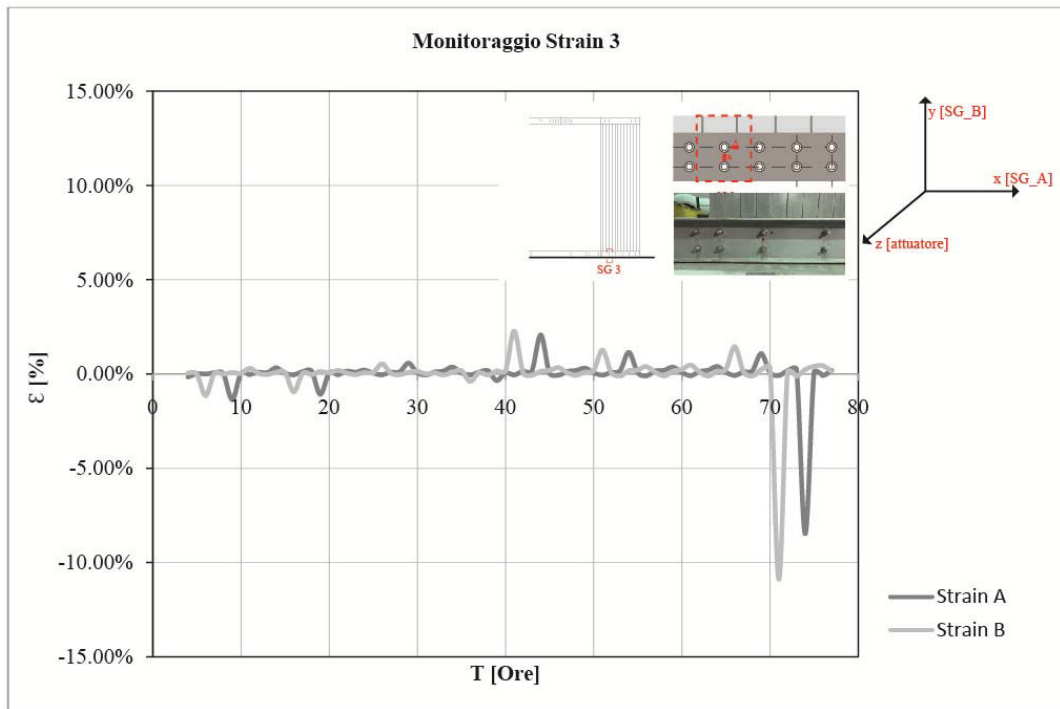


Fig. 85 Monitoraggio Strain Gauges 3A-3B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 50 mm.

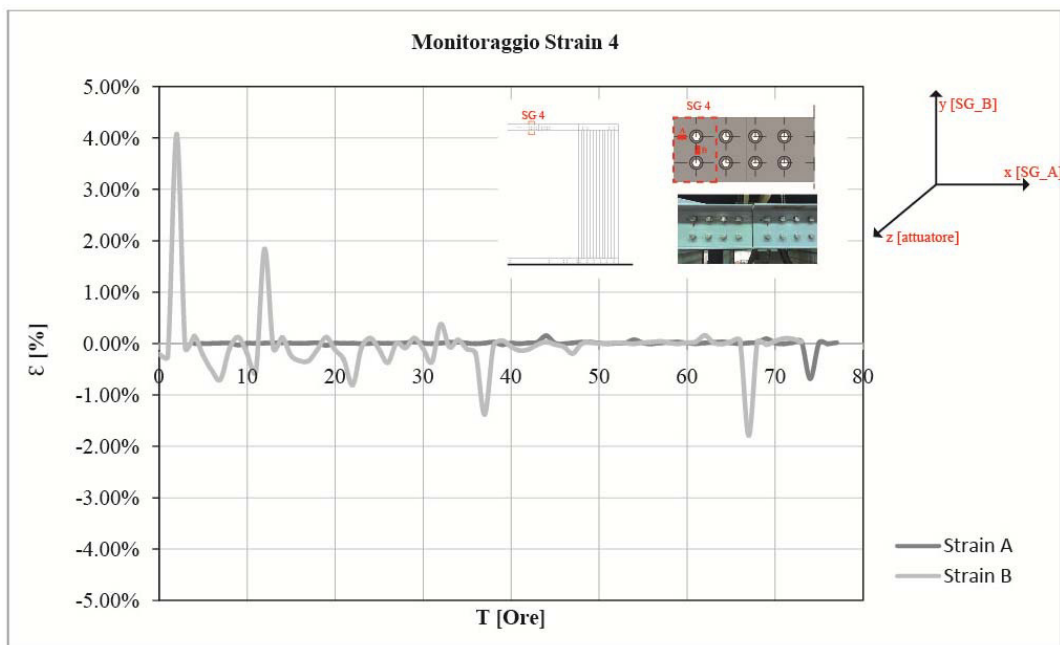


Fig. 86 Monitoraggio Strain Gauges 4A-4B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 50 mm.

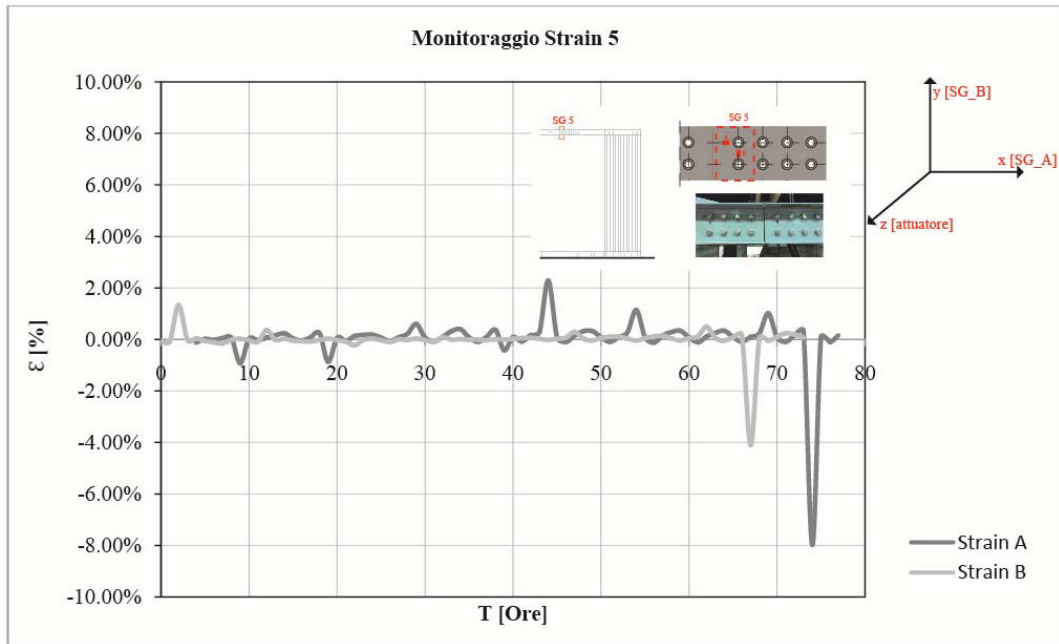


Fig. 87 Monitoraggio Strain Gauges 5A-5B. Frequenza 0.40 Hz con spostamento di 50 mm.

Nei grafici di restituzione delle prove è visibile come per tutte le travi monitorate, la perdita o l'aumento della struttura è attorno allo zero, come confermato dall'andamento del ciclo di isteresi. Una perdita viene registrata al termine della prova, dove la struttura perde la sua rigidezza iniziale.

Durante le prove, un'ulteriore monitoraggio è avvenuto tramite la tecnica delle emissioni acustiche. È stato applicato un accelerometro come visibile dalla figura [Fig.51]. I risultati delle registrazioni sono visibili dal grafico sottostante.

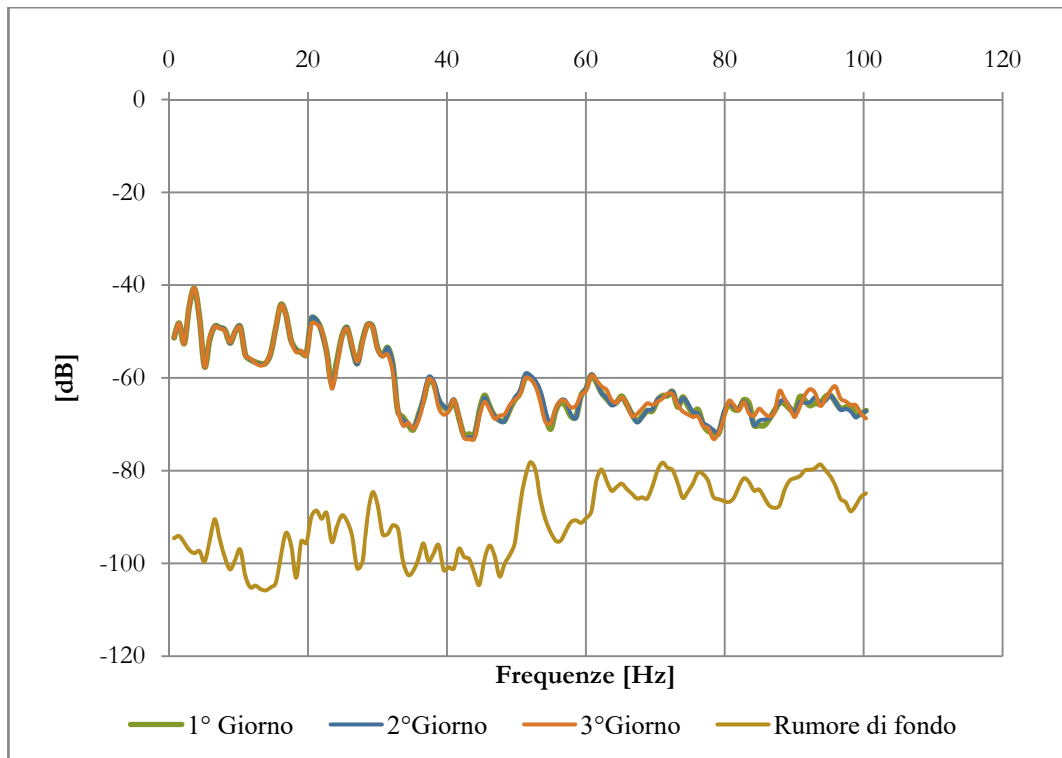


Fig. 88 Andamento delle emissioni acustiche durante la prova a 0.40 Hz con spostamento 50mm.

Dalle registrazioni possiamo notare come alle basse frequenze le curve tengono a coincidere tra loro, all'aumentare delle frequenze le curve hanno dei picchi che sono corrispondenti, ma che raggiungono valori diversi. Confrontando i dati con le prove precedenti, le curve rientrano tutte tra i -60 e i -40 dB. I picchi più bassi corrispondono alle prime ore di prova, con l'aumentare delle ore di prova, il picco raggiunge un aumento di decibel. Come precedentemente descritto nelle prove di emissione acustica (AE), l'aumento di emissione acustica equivale ad un possibile formazione di un danno all'interno della struttura.

Il confronto tra i grafici riguardanti le emissioni acustiche danno una lettura immediata riguardo i danni indotti alla struttura attraverso queste prove.

3.3 Confronto tra Modellazione numerica e modello sperimentale

La tesi, come descritto precedentemente, ha come obiettivo indagare la durabilità dei materiali compositi tramite prove a breve, media e lunga durata, con caratterizzazione dello stesso, tramite prove meccaniche.

A supporto di ciò è stato realizzato un modello ad elementi finiti per proporre un confronto con l'approccio sperimentale.

Il modello è stato realizzato con un metodo semplificato perché si è scelto di modellare solamente una campata della Glass House sulla quale sono state effettuate le prove in laboratorio.

Il modello è stato realizzato con il programma di calcolo e progettazione ad elementi finiti, Straus7 (di cui si è chiesta licenza per l'utilizzo). Il modello è stato calibrato utilizzando i valori dichiarati dal costruttore dei profili pultrusi. Su di questo sono state poi effettuate tre tipologie di analisi, rimanendo sempre nello Stato limite di servizio (SLS):

- Analisi Modale;
- Analisi Lineare per materiale;
- Analisi dinamica non Lineare.

Il confronto tra l'approccio sperimentale e quello numerico ha permesso di conseguire alcune considerazioni rilevanti tra i risultati delle analisi numeriche e dei dati sperimentali.

Costruzione del modello numerico e analisi modale

L'approccio adottato consiste nel modellare la struttura, rispettando i criteri dimensionali, strutturali e le caratteristiche fisiche e meccaniche individuati nel materiale.

Un'ulteriore semplificazione si basa sulla scelta di non modellare le chiusure a secco, in quanto il modello pone l'attenzione sul comportamento complessivo della struttura. Il modello è stato realizzato con la costruzione di 1493 nodi, 30 Beams e 430 Plates, le proprietà fisiche e meccaniche applicate sul materiale sono quelle rilasciate dalla casa produttrice dei profili utilizzati per la Glass House.

Sono state utilizzate le seguenti formulazioni per la discretizzazione dell'impalcato: elementi monodimensionali di tipo Beam per la schematizzazione delle travi

longitudinali, trasversali e dei traversi reticolari. La seguente figura illustra una vista degli elementi Beam costituenti il modello di analisi.

Elementi Bidimensionali di tipo Plate sono stati utilizzati per la discretizzazione dei pannelli verticali, realizzati in FRP e cavi nella parte interna.

Il materiale FRP è stato modellato come un materiale isotropo, lungo le travi della base sono stati applicati degli incastri, permettendo alla struttura lo spostamento longitudinale (Z).

Il modulo elastico applicato al materiale del modello è stato dichiarato dal costruttore (28500 MPa).

Di seguito sono riportati i risultati dell'Analisi Modale effettuata sul modello.

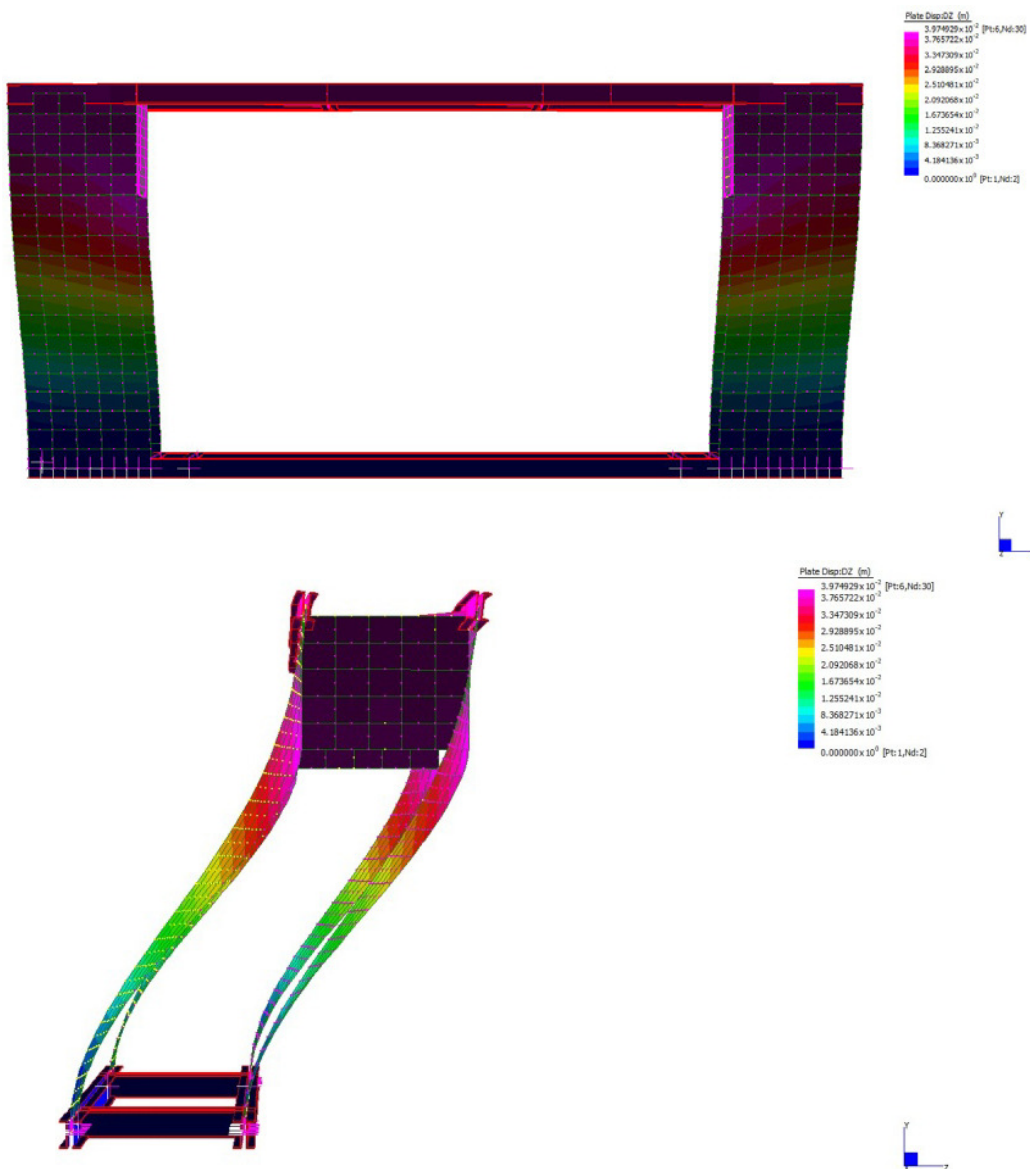


Fig. 89 Analisi modale del caso studio.

MODE PARTICIPATION FOR ROTATIONAL EXCITATION

Mode	Frequency (Hz)	Modal Mass (Eng)	Modal Stiff (Eng)	PF-RX (%)	PF-RY (%)	PF-RZ (%)
1	1.2869E+00	6.3291E+02	4.1383E+04	89.721	48.239	0.000
2	4.9505E+00	2.8177E+02	2.7262E+05	0.000	31.677	0.000
3	6.6597E+00	7.9198E+01	1.3867E+05	0.000	0.000	0.001
4	6.6647E+00	7.8948E+01	1.3844E+05	0.000	0.000	0.006
5	8.0937E+00	1.3315E+02	3.4434E+05	0.098	3.983	0.000
6	9.3601E+00	1.8738E+02	6.4811E+05	0.000	0.243	0.000
7	1.2352E+01	8.1906E+01	4.9330E+05	0.000	0.000	0.004
8	1.2375E+01	7.3918E+01	4.4692E+05	0.000	0.023	0.015
9	1.2909E+01	1.0107E+02	6.6493E+05	0.007	1.959	0.000
10	1.3711E+01	9.4191E+01	6.9902E+05	0.000	1.417	0.000

MODE PARTICIPATION FOR TRANSLATIONAL EXCITATION

Mode	Frequency (Hz)	Modal Mass (Eng)	Modal Stiff (Eng)	PF-X (%)	PF-Y (%)	PF-Z (%)
1	1.2869E+00	6.3291E+02	4.1383E+04	0.000	0.000	80.014
2	4.9505E+00	2.8177E+02	2.7262E+05	0.000	0.000	0.000
3	6.6597E+00	7.9198E+01	1.3867E+05	0.005	0.000	0.000
4	6.6647E+00	7.8948E+01	1.3844E+05	0.024	0.000	0.000
5	8.0937E+00	1.3315E+02	3.4434E+05	0.000	0.000	6.616
6	9.3601E+00	1.8738E+02	6.4811E+05	0.000	0.000	0.000
7	1.2352E+01	8.1906E+01	4.9330E+05	0.014	0.000	0.000
8	1.2375E+01	7.3918E+01	4.4692E+05	0.058	0.000	0.017
9	1.2909E+01	1.0107E+02	6.6493E+05	0.001	0.000	3.243
10	1.3711E+01	9.4191E+01	6.9902E+05	0.000	0.000	0.000

L'analisi modale condotta evidenzia un primo modo del quale si forniscono i coefficienti di partecipazione rotazionali: frequenza di 1.28 Hz e massa partecipante dell'89%. Un secondo modo di traslazione trasversale (asse Z) ad una frequenza di 1.28 Hz, in cui la massa partecipante è dell'80%

Analisi non lineare per materiale

Partendo dai risultati dell'analisi modale, è stata effettuata sulla struttura anche un'analisi lineare per materiale. Applicando uno spostamento massimo di 30 mm, è stata simulata la prova in laboratorio. Dai risultati dell'analisi pushover si ha che la struttura inizia a plasticizzare con uno spostamento di 1,50m. La seconda prova effettuata sul modello è stata quella di lanciare delle analisi pushover modificando il valore del modulo elastico del materiale, confrontandolo con il modulo elastico reale [Fig.90].

Al termine della prova si è voluto confrontare il risultato della prova numerica con quella analitica. Ne deriva che la forza esterna F_y che fa plasticizzare il sistema, viene calcolata utilizzando con la (32), adottando come tensione il valore della tensione di snervamento del materiale:

$$\sigma_y F = \sigma / (h / (4 \cdot A \cdot l) + h / (8 \cdot W)) \quad (4.1)$$

Ne deriva che la forza calcolata in modo analitico equivale a 47,726 kN mentre la forza ottenuta dal modello numerico è 48 kN. Applicando una forza agente maggiore a 48 kN, la struttura inizia a plasticizzare.

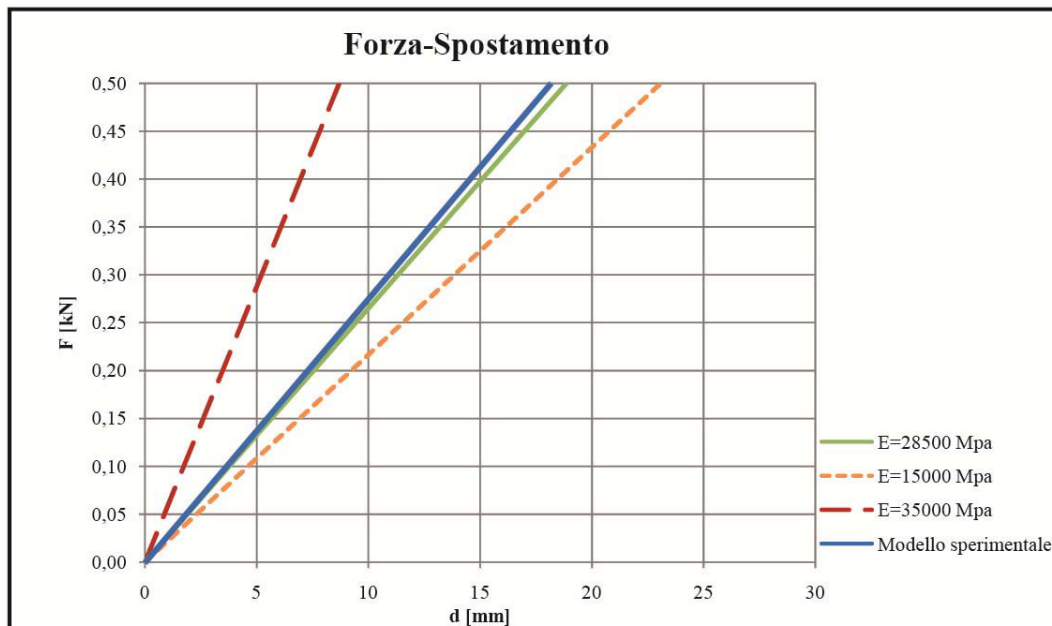
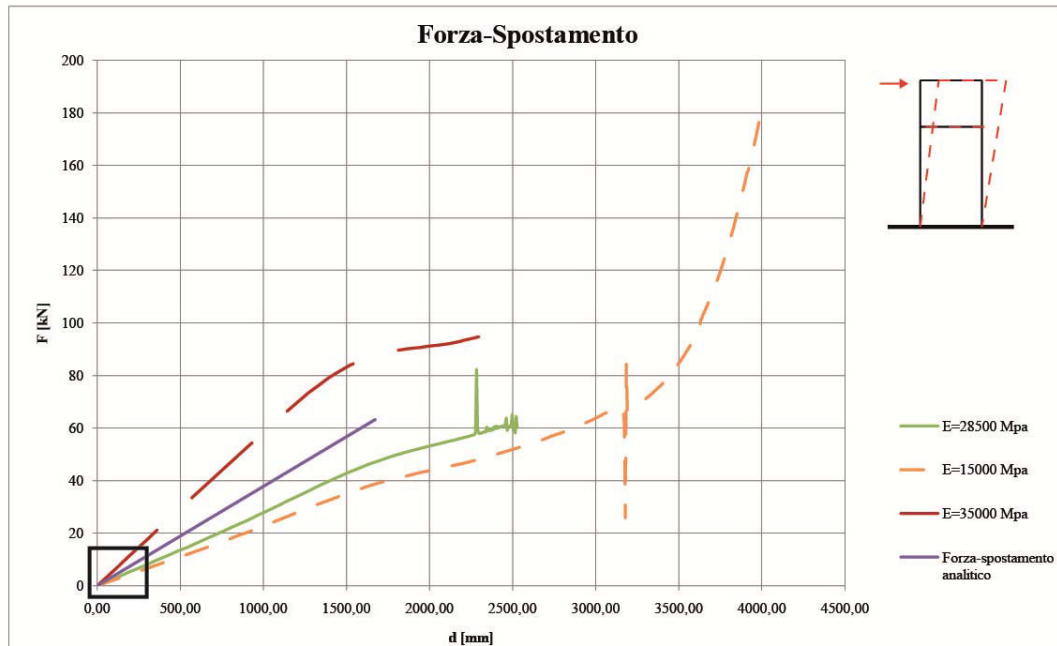


Fig. 90 Confronto tra i diversi moduli di elasticità applicati sul modello numerico.

Analisi dinamica non lineare

Nell'ultima analisi effettuata sul modello, si è utilizzata un'analisi dinamica non lineare, per simulare la prova oligociclica effettuata in laboratorio. Per la costruzione della prova sono state inseriti 5 settaggi differenti (modificando frequenze e spostamenti), ciascuna a simulare la prova sperimentale. Si mette in relazione la curva sperimentale con la curva numerica ottenute dall' analisi dinamica

non lineare. Di seguito vengono riportati i grafici di confronto tra le due curve. È visibile che in tutte le prove la rigidezza si è confermata essere la stessa.

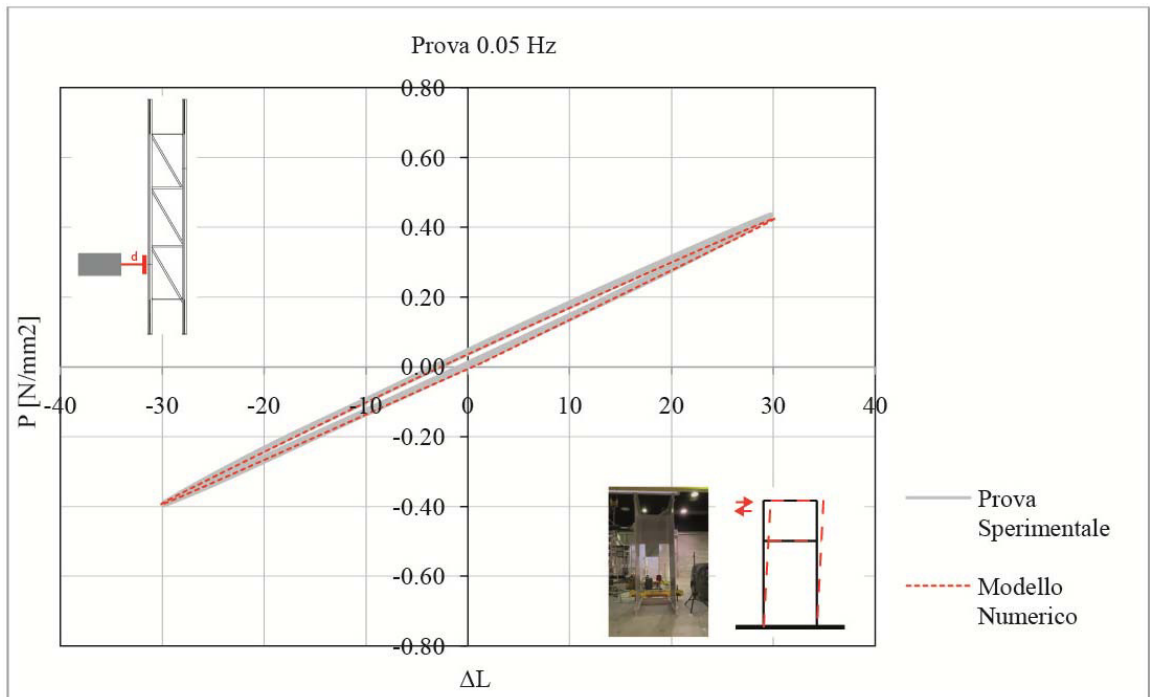


Fig. 91 Confronto tra modello numerico e modello sperimentale 0.05 Hz.

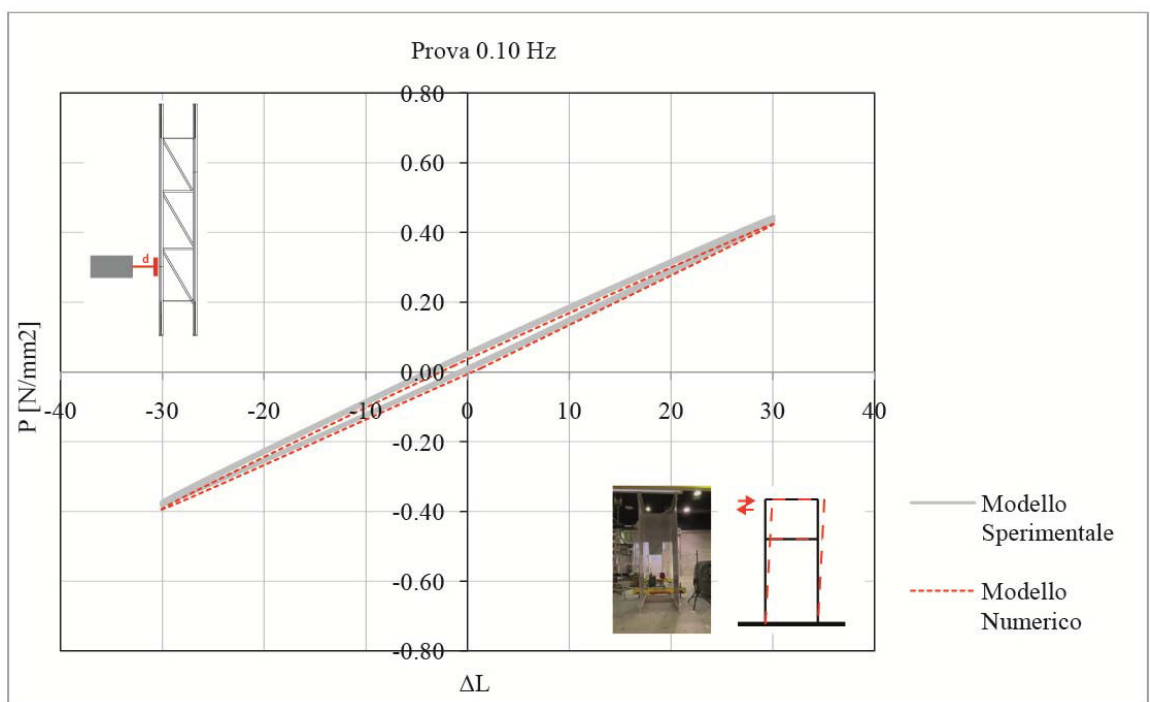


Fig. 92 Fig. 93 Confronto tra modello numerico e modello sperimentale 0.10 Hz.

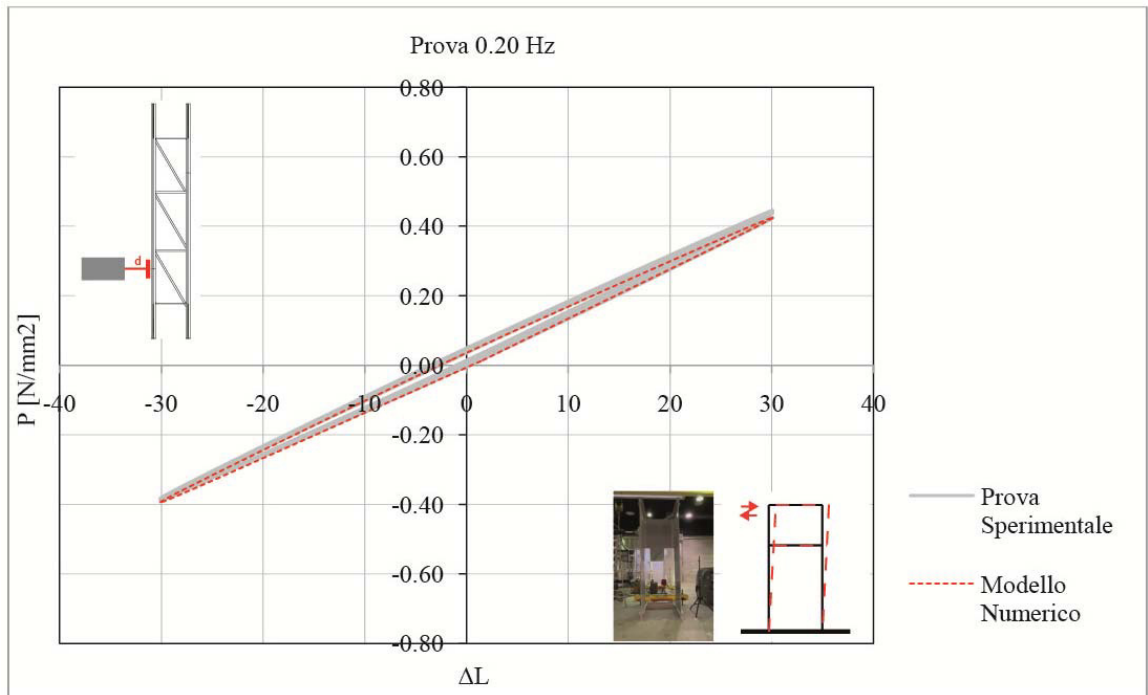


Fig. 94 Confronto tra modello numerico e modello sperimentale 0.20 Hz.

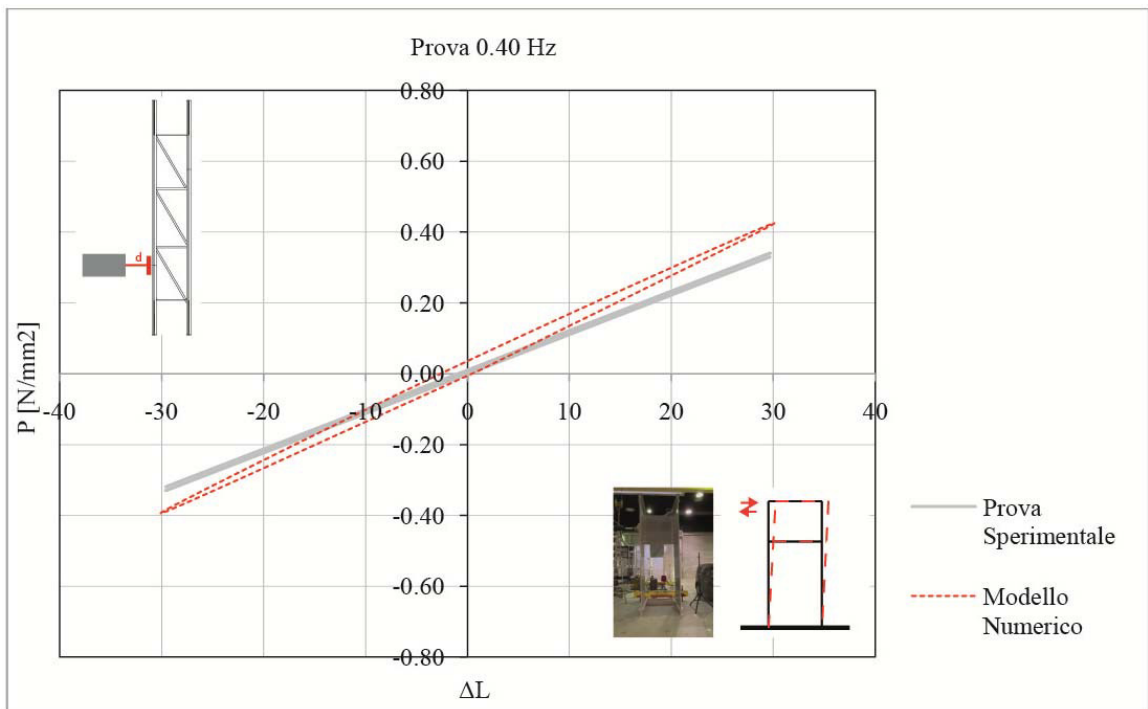


Fig. 95 Confronto tra modello numerico e modello sperimentale 0.40 Hz e spostamento 30mm.

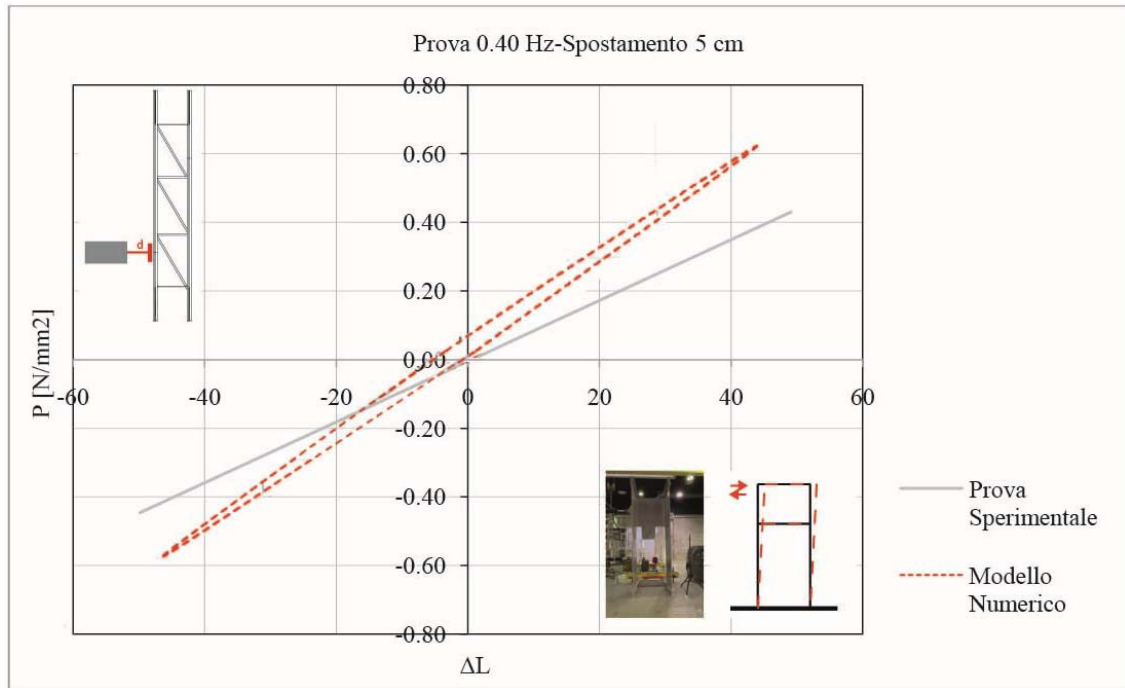


Fig. 96 Confronto tra modello numerico e modello sperimentale 0.40 Hz e spostamento 50mm.

La simulazione del modello numerico conferma quanto descritto dagli Strain Gauges, ovvero che non ci sono perdite significativamente importanti durante le prove oligocicliche. Le prove hanno riportato una forte correlazione tra il modello numerico e quello sperimentale. La differenza più evidente si denota nella prova sperimentale effettuata con una frequenza di 0.40 Hz. L'area calcolata tramite l'equazione (3.7) corrisponde all'energia meccanica dissipata all'interno del materiale.

3.4 Conclusioni

Le prove effettuate si riferiscono al comportamento oligociclico di una struttura realizzata interamente con elementi in FRP, giuntata con bulloni in acciaio. Nell'esecuzione del test sono stati utilizzati tre differenti monitoraggi: globale, locale e puntuale.

Per il monitoraggio globale della struttura si è utilizzato un attuatore a trasduttore digitale; mentre per il monitoraggio locale sono stati utilizzati due trasduttori posizionati nella mezzeria dei pannelli verticali ed uno sulla trave, lungo la quale veniva applicato il carico [Fig.52].

Il monitoraggio puntuale è stato effettuato tramite 10 Strain Gauges posizionati in prossimità delle chiusure a secco, di cui 5 in direzione perpendicolare alle fibre e 5 nella direzione delle fibre [Fig.53]. In corrispondenza dell'applicazione del carico ne sono stati applicati 2, in prossimità delle chiusure dei pannelli verticali si è scelto di posizionarne 2 sulla trave superiore e 2 sulla trave inferiore [Fig.53]. Gli ultimi sono stati inseriti sulla giunzione della trave superiore e sul nodo gemello a quello in cui è stato applicato il carico [Fig.53].

Nelle prove, le prime eseguite su una struttura totalmente in FRP, si è riscontrato:

- La presenza del fenomeno dell'accomodamento, in cui il ciclo tensione-deformazione descrive con evidenza, un'area di isteresi;
- La crescita dei valori tensionali all'aumentare del numero dei cicli;
- Il fenomeno della stabilizzazione, in cui la curva di isteresi tende a valori costanti dei parametri resistenziali e deformativi.

Si può inoltre dedurre quanto segue:

-Applicando l'equazione per il calcolo dell'area del ciclo di isteresi (3.7), durante la prova effettuata con frequenza imposta di 0.10 Hz, si è riscontrato che l'area ha dimensione maggiore del 6% rispetto all'area derivante dal ciclo di isteresi della prova con frequenza di 0.05 Hz, e maggiore dell'8% rispetto alla prova effettuata con frequenza di 0.20 Hz;

- L'energia dissipata all'interno del materiale è direttamente proporzionale all'area racchiusa dal ciclo di isteresi;

- Il monitoraggio puntuale della struttura ha consentito la lettura di una deformazione del materiale lungo la direzione delle fibre. Nella prova effettuata con

frequenza imposta di 0.05 Hz, l'incremento è stato del 20% rispetto alla prova effettuata a 0.10 Hz. Per la prova effettuata a frequenza 0.20 Hz si è registrata una deformazione dell'8%. Durante la prova effettuata con frequenza imposta di 0.40 Hz, si è registrata una deformazione delle fibre del 13%, dopo 60 ore dall'inizio della prova;

- Dall'analisi delle emissioni acustiche, si è riscontrato come alle alte frequenze (comprese tra 0/20 Hz), le curve relative alle registrazioni avvenute durante le 96 ore di prova (per i cicli effettuati a 0.05 Hz e 0.10 Hz) sono comprese tra -97dB e -78dB. Per la prova effettuata fino a 0.20 Hz, le emissioni registrate sono comprese tra -80dB e -60dB. Ne deriva che all'aumentare delle frequenze imposte sulla struttura, risulta esserci un aumento di emissione acustica.

Nel grafico sottostante sono riportate le emissioni acustiche derivanti dalle registrazioni.

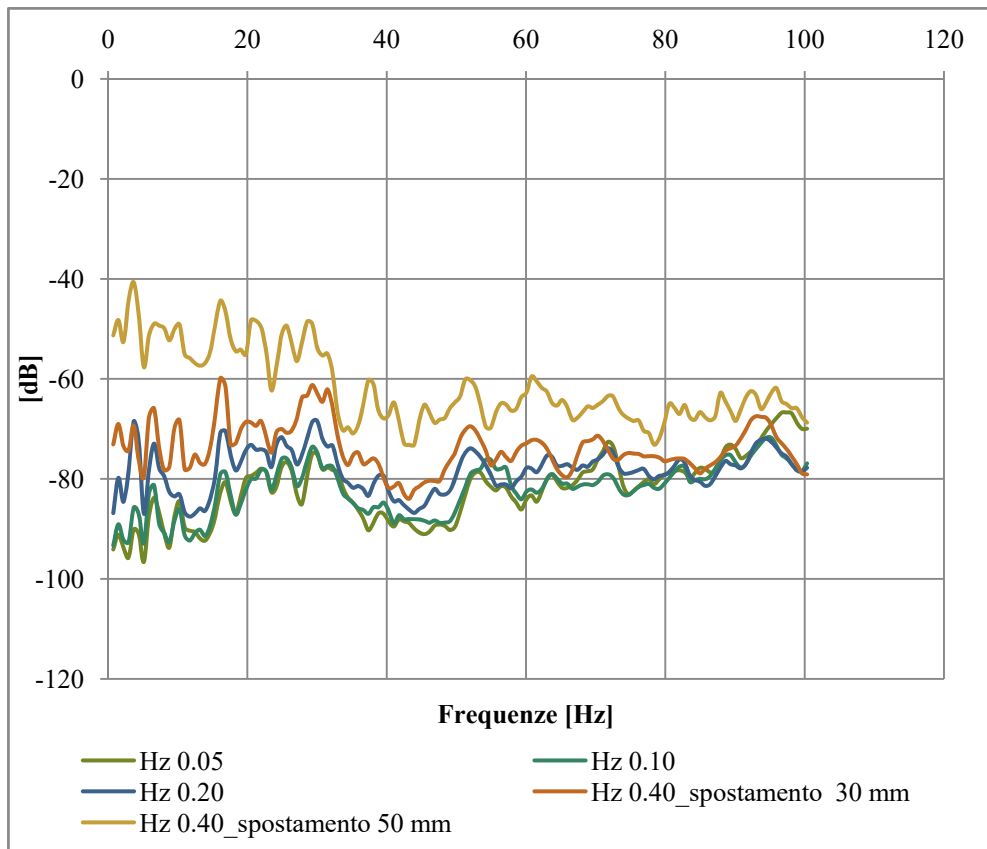


Fig. 97 Comparazione emissioni acustiche registrate durante le prove oligocicliche.

Il modello numerico è stato realizzato con il programma Straus7. Il modello è composto da 1493 nodi, 30 elementi Beams e 430 elementi Plates. Le proprietà fisiche e meccaniche applicate al materiale sono quelle indicate dalla casa

produttrice dei profili utilizzati per la Glass House. Dalla costruzione del modello numerico sono state effettuate tre analisi differenti dalle quali si possono dedurre le seguenti conclusioni:

- L'analisi modale evidenzia una prima traslazione trasversale (asse Z) [Fig.89] ad una frequenza di 1.28 Hz, in cui la massa partecipante è dell'80%. Si è evidenziato un secondo modo rotazionale (asse X) con frequenza di 1.28 Hz e massa partecipante dell'89%;
- L'analisi pushover evidenzia che il carico ultimo è pari a 47.72 kN;
- L'analisi dinamica non lineare, effettuata con frequenze pari alle frequenze sperimentali (0.05 Hz, 0.10 Hz, 0.20 Hz, 0.40 Hz), ha evidenziato cicli di isteresi la cui area è simile a quella ottenuta dalle prove sperimentali. Fa eccezione la prova svolta alla frequenza di 0.40 Hz. In questo caso il modello sperimentale ha restituito un ciclo di isteresi differente rispetto al modello numerico [Fig.95]. Nella prova svolta con 0.40 Hz e spostamento imposto di 30 mm, la differenza tra le due curve era del 4%. Nella prova svolta con spostamento imposto di 50 mm la differenza tra la curva numerica e quella sperimentale era del 10%. Potrebbe aver influenzato questa analisi la scelta di aver realizzato un modello numerico semplificato rispetto al modello reale. Nel modello numerico semplificato potrebbero non evincersi dei meccanismi che si sono innescati simulando la prova con più alte frequenze [Fig.96].

4. Manutenzione e Ceck strutturale: il caso della Glass House

Il progetto del padiglione Glass House rappresenta uno dei pochi esempi di strutture realizzate interamente con profili pultrusi in Fibra di Vetro (GFRP), serrati a secco con bulloni in acciaio. Il padiglione è il risultato di un concorso indetto dalla facoltà di architettura di Venezia Iuav e una convenzione con un'azienda produttrice di fibre, la TopGlass. La struttura è stata realizzata ed installato a Venezia presso la Biblioteca dei Tolentini, in occasione dell'Open Day IUAV 2018. La struttura del padiglione è interamente in GFRP e presenta una maglia rettangolare di dimensioni 8,5x11,45x3,80m[Fig.97].

A livello del pavimento, la struttura irrigidente è realizzata in due profili a C di dimensioni 2,00x0,60x0,10m fissati ai pannelli verticali[Fig.98]. Tali profili costituiscono il piano d'appoggio delle lastre di pavimentazione. Per aumentare la rigidità in senso ortogonale alle lastre, sono presenti dei collegamenti composti da due profili a C 2,00x0,60x0,10m in prossimità di ogni lastra tra i vari portali. Alle travi principali che si trovano sia in copertura che nella parte inferiore, sono collegati dei pannelli verticali composti da profili scatolari di dimensioni 1,25x4,00m. Gli elementi verticali sono posti ad interasse di 1,25m.

A livello del pavimento, la struttura irrigidente è realizzata in due profili a C di dimensioni 2,00x0,60x0,10m fissati ai pannelli verticali. Tali profili costituiscono il piano d'appoggio delle lastre di pavimentazione. Per aumentare la rigidità in senso ortogonale alle lastre, sono presenti dei collegamenti composti dalle due C, in prossimità di ogni lastra tra i vari portali. La copertura è realizzata in due C, analoghi a quelli indicati in pavimentazione, sui quali vengono fissate le lastre grecate all'ala inferiore. La controventatura della copertura, realizzata in angolari 1,00x1,00x0,08m, è fissata alle ali superiori.

Al termine dei 19 mesi di prova, la struttura è stata smontata. A seguito dello smontaggio e analizzando i singoli profili non si sono riscontrati danni visibili, né in corrispondenza delle chiusure e neanche sui pannelli verticali. Ricordiamo che la struttura nel corso dei 19 mesi, è stata utilizzata dagli studenti dell'Università come padiglione all'interno del quale si potevano svolgere delle attività di aggregazione.

Attualmente la struttura verrà trasportata in Grecia all'interno di un campo profughi come costruzione utile da donare ad una ONG. Il progetto si è dimostrato coerente con la sua idea iniziale, inserirsi in una prospettiva di recycling.

Nelle immagini seguenti vengono illustrati i disegni costruttivi e i rilievi fotografici relativi al padiglione.

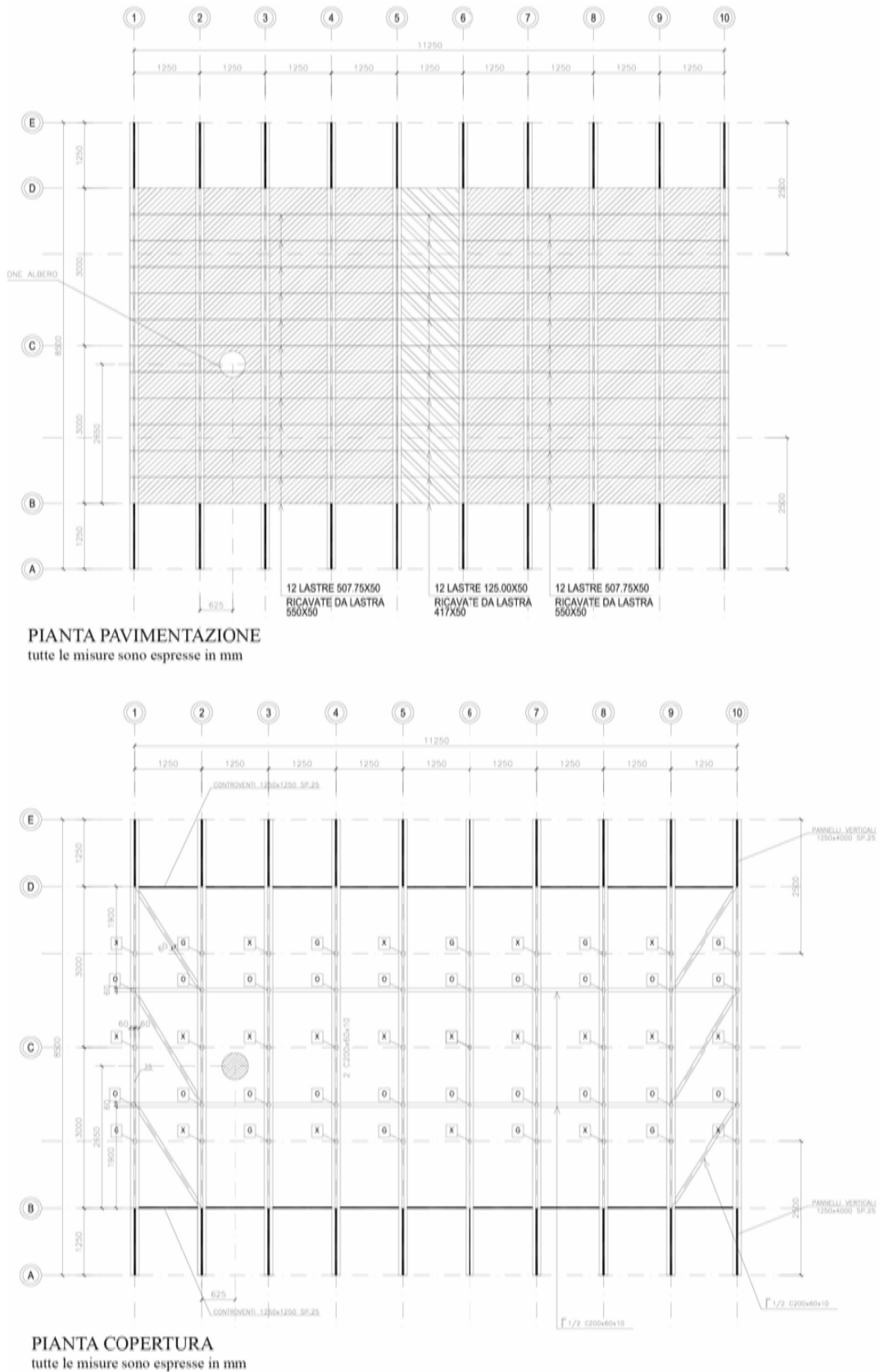


Fig. 98 Planimetria pavimentazione e coperture della Glass House.

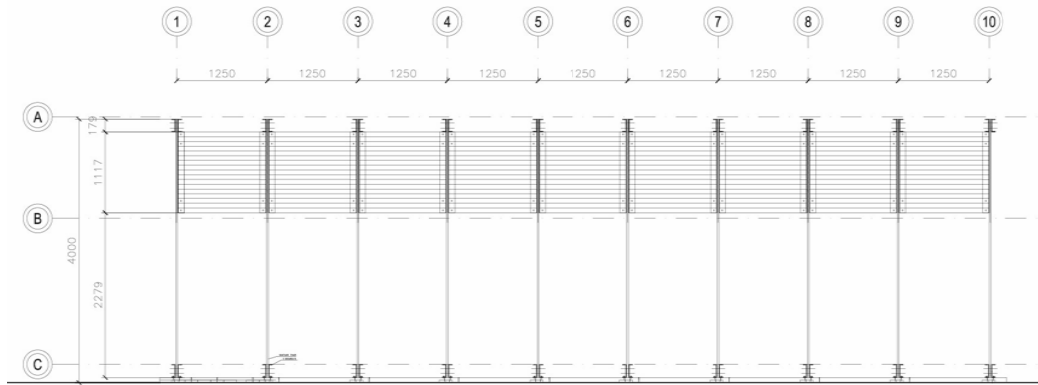


Fig. 99 Prospetto della Glass House.



Fig. 100 Immagini fotografiche relative alla Glass House.

Caratteristiche meccaniche del materiale

I profili in FRP pultrusi hanno caratteristiche meccaniche diverse in direzione assiale 1 o X (// alle fibre) o ortogonali ad esse, di conseguenza le prestazioni offerte in direzione 2 o 3 sono tra loro uguali [Fig.100].

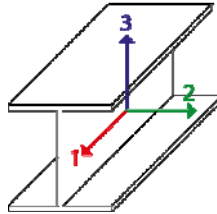


Fig. 101 Orientamento delle fibre nei profili pultrusi.

Il materiale fornito è composto da una matrice in poliestere e un rinforzo in vetro. Le caratteristiche meccaniche e fisiche sono state fornite dal produttore e sono il risultato di prove effettuate sui profili secondo le normative di seguito riportate.

Proprietà fisiche³:

Peso specifico	ASTM D792	1,77 g/cm ³
Contenuto fibra vetro in peso	ASTM D2584	57%
Contenuto fibra vetro in vol.	ASTM D2584	40,5%
Temperatura transiz. Vetrosa	ISO 11357	95°C
Conduc. termica	EN12667/EN12664	0.35 W/mK

Proprietà meccaniche:

||lungo la direzione delle fibre, \perp lungo la direzione delle fibre ortogonali

Tensile modulus	EN ISO 527-4	18000 MPa
Tensile modulus \perp	EN ISO 527-4	10000 MPa
Tensile strength	EN ISO 527-4	240 MPa
Tensile strength \perp	EN ISO 527-4	50 MPa
Compressive modulus EN	ISO 14126	18000 MPa
Compressive modulus \perp	EN ISO 14126	10000 MPa
Compressive strength	EN ISO 14126	240 MPa

³ Dati forniti dalla casa produttrice del materiale TopGlass.

Compressive strength \perp	EN ISO 14126	70 MPa
Shear modulus	EN ISO 527-4	4000 MPa
Shear strength \parallel	EN ISO 14130	22 MPa
Pin-bearing strength \parallel	EN 13706-2	150 MPa
Pin-bearing strength \perp	EN 13706-2	70 MPa
Interlaminar shear strength \parallel	EN ISO 14130	25 MPa
Poisson's ratio \parallel	EN ISO 527-4	0.28
Poisson's ratio \perp	EN ISO 527-4	0.12

Le chiusure a secco

Per le chiusure a secco del padiglione sono stati usati diversi componenti:

Tabella 9 Tipologia di bulloni utilizzati per le chiusure.

Bulloni	AISI304	UNI EN ISO 3506
Viti filettate	DIN933	UNI 5739 EN ISO 4017
Dadi esagonali	DIN934	UNI 5588 EN ISO 4032
Rondelle strette	DIN125	UNI 6592 EN ISO 7089
Viti da legno	DIN571	UNI704

Ogni collegamento all'interno del padiglione è costituito da bulloni le cui dimensioni variano tra M12 e M16. La bulloneria utilizzata è in acciaio inox AISI 304, acciaio austenitico di qualità A2, classe di resistenza 70, carico di rottura ≥ 700 N/mm², conforme alla norma UNI EN ISO 3506. Le viti utilizzate sono completamente filettate DIN 933, i dadi sono esagoni medi DIN 934, con rondelle strette DIN 125 A. Tutti i componenti sono in acciaio AISI 304. È stata posizionata una rondella con dimensioni 30 mm tra il bullone e il profilo FRP.

Le connessioni sono riconducibili a cinque tipologie replicate all'interno della struttura come visibile dalla figura sottostante [Fig.102]. Le connessioni **a** e **b** sono utilizzate per collegare i pannelli verticali alle due travi principali a C; la connessione **c** è utilizzata in copertura per collegare i controventi, si tratta di una connessione che utilizza un bullone M12 di lunghezza inferiore rispetto agli altri

bulloni. Le connessioni **d** ed **e** collegano i pannelli verticali con i controventi laterali. I fori delle connessioni del padiglione hanno una dimensione di 15 mm, la distanza tra loro varia a seconda della posizione della connessione, le connessioni di tipo **a** situati alla base del padiglione hanno una distanza tra loro di 250 mm; i fori della connessione **b**, posizionati in cima al padiglione sono raggruppati in 2 coppie che hanno una distanza tra loro di 750 mm [Fig.103].

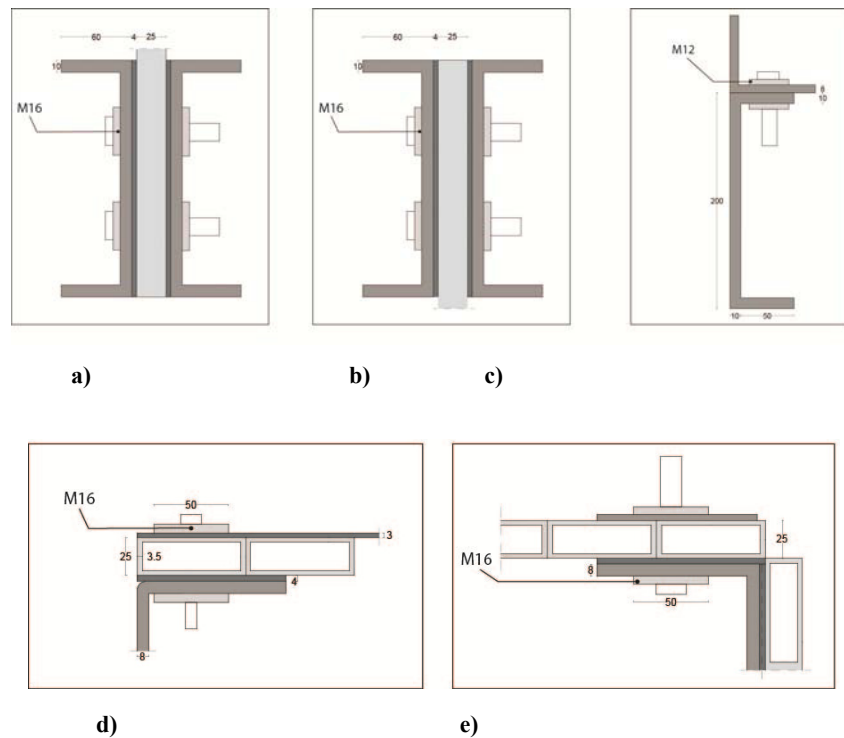


Fig. 102 Connessioni del padiglione, a) connessioni di base, b) connessione alla parte superiore, c)connessione di rinforzo, d)connessione rinforzo-parete, e)connessioni di pareti rinforzate. Tutte le unità di misura sono in mm.

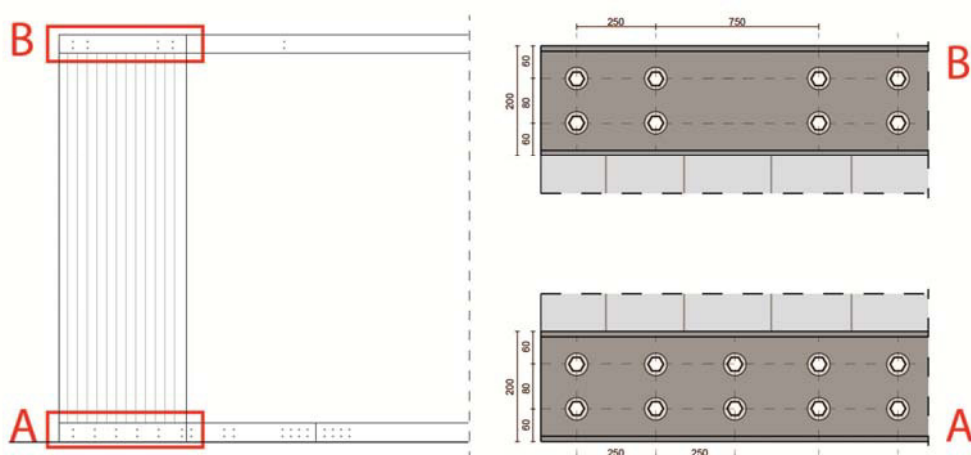


Fig. 103 Distanza tra i bulloni e collocamento delle chiusure lungo le travi principali.

4.1 Manutenzione e controllo delle chiusure a secco

Le connessioni bullonate in tutte le strutture FRP sono per molte ragioni preferibili alla soluzione di incollaggio che richiede un lavoro non sempre eseguibile in cantiere e, soprattutto, non permette la reversibilità della struttura.

Attualmente, l'approccio alla progettazione strutturale di tutte le connessioni bullonate FRP è affrontato da molte raccomandazioni tecniche prodotte in paesi specifici, come le raccomandazioni britanniche [58], italiane [59], americane [60][61], olandesi [62] e tedesche [63]. Sono disponibili oltre alla specifica normativa europea per le prove sperimentali [64], anche un rapporto tecnico dedicato alle linee guida per la progettazione strutturale [65], inteso come documento preliminare all'Eurocodice specifico per le costruzioni FRP.

Ovviamente, anche il mercato privato dei produttori professionali è caratterizzato da molti suggerimenti tecnici, di cui alcuni dei più applicati sono quelli citati da [66][67][68]. Anche la letteratura propone una quantità molto elevata di articoli e libri specifici, tra i quali si citano i seguenti [69][70].

Tuttavia, in tutti i documenti analizzati è presente un vuoto normativo sul serraggio delle chiusure a secco, soprattutto nel campo delle strutture in FRP [71].

Tra le prove svolte sul padiglione della Glass House, ci si è voluti concentrare sulla scrittura di una possibile formula per il serraggio di bullonature da poter applicare sulle strutture in composito. Per la costruzione della nuova formula, sono state selezionate le formule più utilizzate per il calcolo dei valori di serraggio utilizzate per le strutture leggere realizzate con materiali da costruzione tradizionali.

Per le strutture in acciaio si ricordano le normative (NTC 2018, UNI ENV 1993-1, EN 14399, EN 15048 e la EN 1090-2) da cui:

$$F_{p,c} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot \frac{A_{res}}{\gamma_{M7}} \quad (5.1)$$

$$M = \mu \cdot N_s \cdot d \quad (5.2)$$

Dove M indica il momento torcente, μ è il coefficiente di frizionamento (come indicato nelle norme UNI EN ISO 3506), N_s è carico di scorrimento applicato, espresso in kN e d è il diametro del bullone.

Per le strutture in legno le principali normative, sia sul territorio nazionale che internazionale sono le NTC 2018, EN 14399-2, UNI EN 1075:2002, UNI EN 1380:2009 e UNI ENV 1995-2. Di seguito si riportano le equazioni in formulazione

chiusa per il calcolo del precarico da applicare al bullone, racchiusa nella formula (5.3) e l'equazione riferita al momento torcente da applicare sullo stesso Eq. (5.4):

$$F_{p,c} = 0,7 \cdot k \cdot d \cdot A_s \cdot f_{ub} \quad (5.3)$$

$$M = k \cdot d \cdot F_{p,c} \quad (5.4)$$

Dove M indica il momento torcente, k è il coefficiente prestazione della coppia di ammorsamento, d è il diametro del bullone, $F_{p,c}$ è il carico assiale sul bullone durante la fase di serraggio.

Monitoraggio delle chiusure a secco nella Glass House

Il padiglione della Glass House, realizzato nell'aprile del 2018, è stato caratterizzato da tre fasi di monitoraggio durante la sua permanenza all'interno dell'Università Iuav di Venezia.



Tutte le chiusure a secco della struttura, sono state monitorate utilizzando una chiave dinamometrica a serraggio controllato [Fig.56]. La chiave utilizzata è EXPERT E100108, conforme alla norma UNI EN ISO 6789 che raggiunge un carico pari a 200 Nm.

Le chiusure a secco, sono state serrate con valori utilizzati per le coppie di serraggio di strutture in acciaio e calcolate secondo le NTC 2018 e il DM 17.01.18, Eq. (5.5)

$$M_{(c)} = \mu \times N_s \times d \quad (5.5)$$

che utilizza la simbologia già usata, dove $M_{(c)}$ è la coppia di serraggio calcolata, μ è il coefficiente di attrito stabilito dalla UNI EN ISO 3506, N_s è calcolato secondo le NTC 2018 e il valore del diametro del bullone, d è il diametro del bullone.

Tabella 10 Tipologie di chiusure presenti e valori delle coppie di serraggio durante l'assemblaggio.

Conessioni	Diametro Bullone (mm)	Diametro Rondella (mm)	Carico di scorrimento N_s (kN)	μ	Coppia di serraggio $M_{(c)}$ (kNmm)
A	16	30	16.3	0.37	96.5
B	16	30	7.8	0.37	46.1
C	<u>12</u>	30	10.9	<u>0.38</u>	49.7
D	16	50	9.2	0.37	54.4
E	16	30	15.3	0.37	90.5

I coefficienti di attrito utilizzati pari a $\mu = 0,37$ per i bulloni M16 e $\mu = 0,38$ per i bulloni M12, questo valore è consistentemente alto e, durante il montaggio, il valore applicato è risultato essere inferiore a quello calcolato. Si è scelto di applicare un valore più basso, in quanto, in fase di applicazione del carico, il materiale tendeva ad emettere delle emissioni acustiche e quindi, potevano innescarsi microfratture all'interno del materiale.

Come evidenziato sulla linea temporale, il padiglione, assemblato all'esterno ed esposto agli agenti atmosferici e cambiamenti climatici, è stato monitorato in 3 fasi. Come sopra descritto, il primo monitoraggio è avvenuto in fase di costruzione (Aprile 2018), il secondo screening è stato effettuato dopo 8 mesi (Gennaio 2019). Durante questa fase, sono state monitorate tutte le coppie di serraggio presenti sul padiglione. Le misurazioni sono avvenute manualmente, utilizzando la chiave dinamometrica a serraggio controllato utilizzata per applicare i valori iniziali; è stato verificato che tutte le chiusure avevano registrato una perdita delle coppie di serraggio applicate precedentemente.

A seguito del primo monitoraggio, per calcolare il valore relativo alla coppia di ammorsamento da applicare, è stato utilizzato un coefficiente di attrito diverso. Il valore del coefficiente di attrito è stato scelto da uno dei pochi μ presenti in letteratura. Rifacendoci alle prove laboratoriali eseguite da Mottram[72], nelle quali sono state applicate le coppie di serraggio dei bulloni e misurate tramite estensimetri, è stato evidenziato che dopo i test effettuati, i valori calcolati e applicati si sono ridotti del 20%.

Per i bulloni M12 la forza di attrito è quindi diventata pari a 0,38 kN per kNmm e per M16 è 0,22 kN per kNmm.

Partendo da questi valori utilizzati in letteratura, è stato calcolato il coefficiente di attrito approssimativo per FRP è quindi $(0.5 \times 0.38) / (2 \times 0.44) = 0,22$ per i bulloni M12, e $(0,5 \times 0,22) / (2 \times 0,40) = 0,14$ per i bulloni M16, stabilendo così un coefficiente μ con valore medio 0.2, tipico dei compositi polimerici [73].

Nella seguente tabella [Tab.11] sono riportati i nuovi valori applicati durante la fase di monitoraggio e riasset delle chiusure del padiglione [Fig.104]. Le nuove coppie di serraggio $M_{(c)s}$, sono state calcolate utilizzando l'Eq. (5.5) e sostituendo alla utilizzata per l'acciaio, il nuovo valore sperimentale $\mu(c)$.

Tabella 11 Tipologie di chiusure presenti e valori delle coppie di serraggio 2° monitoraggio.

Conessioni	Diametro Bullone (mm)	Diametro Rondella (mm)	Carico di scorrimento N_s (kN)	$\mu(c)$	Coppia di serraggio $M_{(c)s}$ (kNmm)
A	16	30	16.3	0.14	36.5
B	16	30	7.8	0.14	17.4
C	<u>12</u>	30	10.9	<u>0.22</u>	28.7
D	16	50	9.2	0.14	20.6
E	16	30	15.3	0.14	34.2

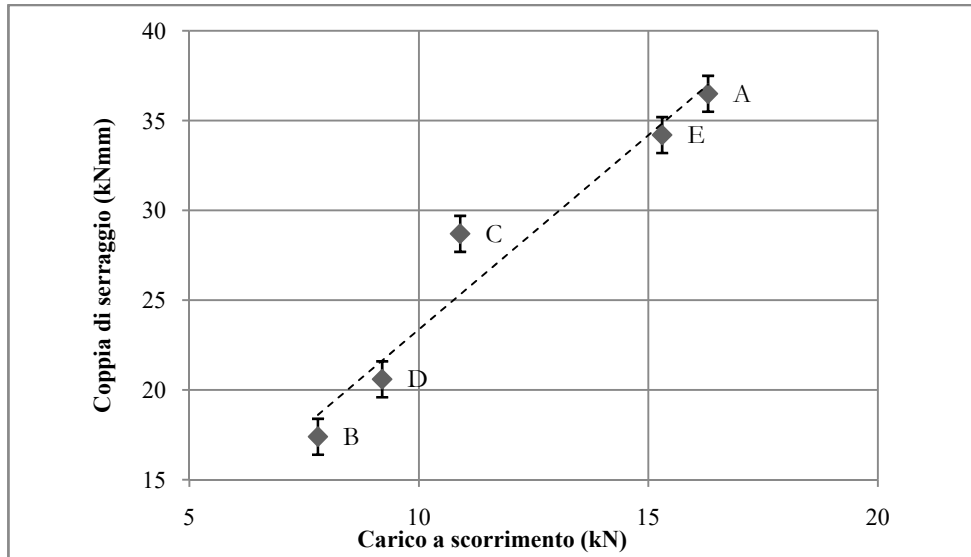


Fig. 104 Rapporto tra la coppia di serraggio e il carico applicato per le tipologie di chiusura.

Partendo dalla formula presente nelle normative per il calcolo della coppia di serraggio Eq.(5.5), è stato ricalcolato il coefficienti di attrito.

Per calcolare il coefficienti di attrito è stata utilizzata la formula sperimentale che divide la coppia di serraggio applicata, per il precarico moltiplicato per il diametro dei bulloni Eq.(5.6):

$$\mu_{(e)} = \frac{M_{(c)s}}{N_s \times d} \quad (5.6)$$

Dove $\mu_{(e)}$ è il coefficiente di attrito sperimentale, $M_{(c)s}$ è la coppia di serraggio sperimentale (il valore è stato misurato utilizzando la chiave dinamometrica su ciascun bullone), il carico di scorrimento N_s e il diametro del bullone sono gli stessi inseriti nell'Eq.(5.5). La formula sperimentale sopra riportata Eq.(5.6), è stata utilizzata per calcolare le nuove coppie di serraggio riferite alle cinque tipologie di nodi presenti nella struttura. Ciascun nodo è stato nuovamente serrato utilizzando valori calcolati sostituendo alla μ sperimentale, ottenendo così valori inferiori rispetto ai primi.

Dalla tabella sottostante [Tab.12] è visibile che non tutte le coppie di serraggio applicate corrispondono a quelle calcolate ma, i valori applicati differiscono del 10% rispetto a quelli calcolati [Fig.104].

Tabella 12 Coppie di serraggio calcolate con il nuovo coefficiente di attrito.

Conessioni	Diametro Bullone (mm)	Diametro Rondella (mm)	Carico di scorrimento N_s (kN)	$\mu(c)$	Coppia di serraggio $M_{(c)s}$ (kNmm)	Coppia di serraggio applicata $M_{(c)a}$ (kNmm)
A	16	30	16.3	0.14	36.5	38.0
B	16	30	7.8	0.14	17.4	22.0
C	<u>12</u>	30	10.9	<u>0.22</u>	28.7	38.0
D	16	50	9.2	0.14	20.6	20.0
E	16	30	15.3	0.14	34.2	32.0

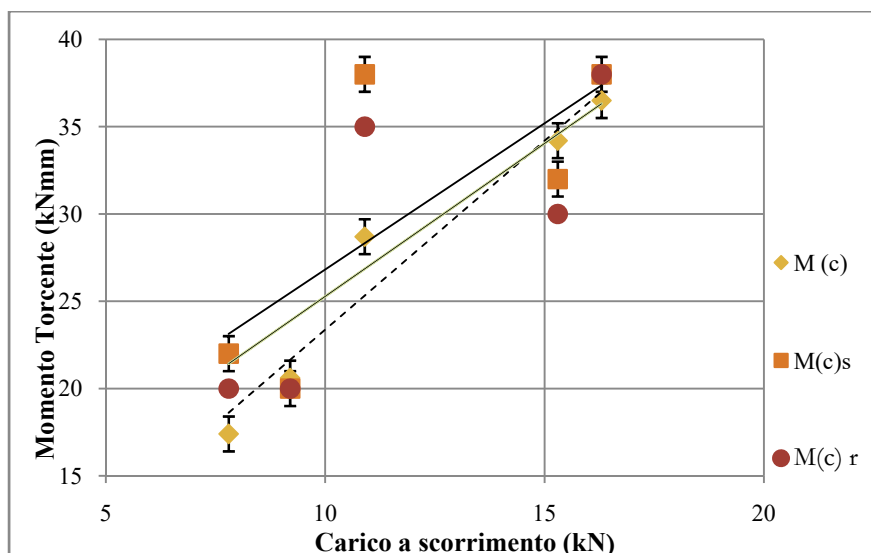


Fig. 105 Rapporto tra la coppia di serraggio e il carico applicato per le tipologie di chiusura e i diversi valori calcolati.

4.2 Risultati attesi

La terza ed ultima fase di monitoraggio dei nodi della Glass House è avvenuto 19 mesi dopo il suo montaggio. Anche in questa fase i nodi sono stati controllati con la stessa chiave dinamometrica a serraggio controllato. Tutti i nodi, contrariamente a quanto verificato durante la prima campagna di monitoraggio, dove le coppie di serraggio avevano perso i loro valori iniziali, nel secondo monitoraggio è stato verificato un netto miglioramento riguardo il comportamento del materiale. A distanza di 11 mesi dal primo monitoraggio, sono state verificate tutte le chiusure [Tab.13]. I risultati del monitoraggio sono stati estremamente positivi, in quanto tutte le chiusure hanno dimostrato mantenere i valori applicati e calcolati tramite l'equazione sperimentale [Tab.13].

Tabella 13 Tabella riassuntiva delle coppie di serraggio.

Conessioni	Coppia di serraggio $M_{(c)}$ (kNmm) $\mu=0.37$	Coppia di serraggio $M_{(c)}$ (kNmm) $\mu=0.38$	Coppia di serraggio $M_{(c)s}$ (kNmm) $\mu=0.14$	Coppia di serraggio $M_{(c)s}$ (kNmm) $\mu=0.22$	Coppia di serraggio applicata $M_{(c)a}$ (kNmm)	Perdita nel tempo
A	96.5		36.5		38.0	
B	46.1		17.4		22.0	10 %
C		49.7		28.7	38.0	8%
D	54.4		20.6		20.0	
E	90.5		34.2		32.0	10%

I valori relativi alla perdita serraggio sono il risultato di una media delle misure rilevate monitorando tutte le chiusure della struttura. Nell'immagine sottostante sono evidenziati in blu e arancione i collegamenti di tipo B ed E che risultano aver perso il 10% della coppia di serraggio, è evidenziata in rosso, la posizione delle chiusure di tipo C, che risultano aver perso l'8% della coppia di serraggio [Fig.105].

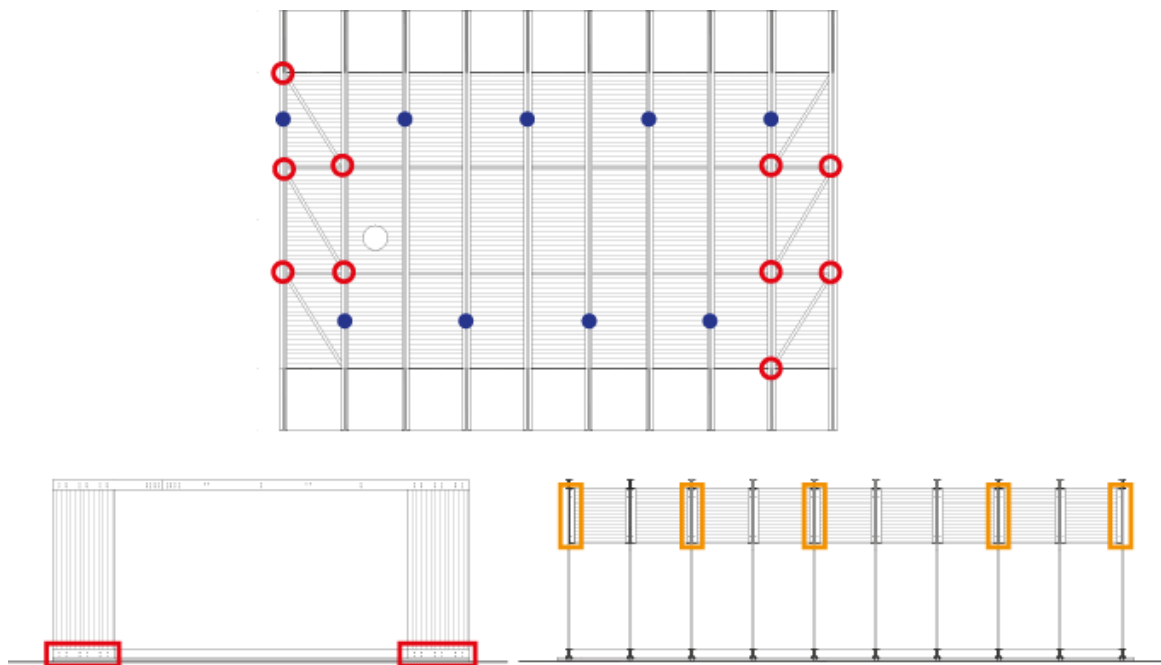


Fig. 106 Glass House a) planimetria delle coperture con i collegamenti B e C. Prospetto con il nodo A. Prospetto con nodi E e D.

Partendo dalla formula sperimentale Eq.(5.6) e sostituendo nell' equazione i valori rilevati durante il monitoraggio, è possibile ottenere il valore del coefficiente di attrito da applicare sui nodi del padiglione [Tab.14].

Tabella 14 Valore sperimentale di μ calcolato con l'Eq.(11).

Connessioni	Diametro Bullone (mm)	Carico di scorrimento N_s (kN)	Coppia di serraggio applicata $M_{(c)\alpha}$ (kNmm)	$\mu_{(e)}$
A	16	16.3	38.0	0.14
B	16	7.8	22.0	0.17
C	<u>12</u>	10.9	38.0	0.29
D	16	9.2	20.0	0.13
E	16	15.3	32.0	0.13

Dalla corrispondenza tra i valori calcolati e quelli applicati, deriva la veridicità della formula utilizzata. Dalla Tab.14 sono leggibili i valori delle coppie di ammortamento in relazione al coefficiente di attrito calcolato con l'utilizzo dell'Eq. (5.6). Dalla tabella è possibile notare come i nodi A ed E, simili per geometria, risultano avere un valore simile di precarico applicato. Cosa simile avviene anche per gli altri nodi: nonostante la diversa geometria, i valori di $\mu_{(e)}$ risultano simili tra loro. La tipologia di chiusura che differisce per dimensione e per geometria risulta essere la connessione C, che presenta un coefficiente di attrito calcolato, maggiore degli altri anche se la coppia di serraggio applicata, risulta avere lo stesso valore della connessione A.

4.3 Conclusioni

La ricerca si concentra sul monitoraggio delle giunzioni bullonate, di una struttura pultrusa in FRP. Le prove effettuate hanno avuto una durata complessiva di 19 mesi, durante i quali sono stati effettuati 3 monitoraggi delle chiusure a secco, tramite l'utilizzo di una chiave dinamometrica a serraggio controllato.

Dalla ricerca si possono proporre le seguenti conclusioni:

- I valori delle coppie di serraggio applicate durante il monitoraggio, calcolate utilizzando il coefficiente di attrito delle strutture in acciaio ($\mu=0,37$), è risultato essere il 40% più alto rispetto ai valori finali applicati [Tab.10];
- Durante il primo monitoraggio, si è scelto di serrare i bulloni fino al raggiungimento della prima emissione acustica. I valori calcolati utilizzando il coefficiente di attrito sperimentale ($\mu=0,14$) sono risultati superiori del 5% rispetto a quelli applicati [Tab.12];
- Per i valori delle coppie di serraggio applicati sul padiglione durante l'ultima fase di monitoraggio [Tab.12], è stata applicata la formula inversa derivante dal calcolo della coppia di serraggio (5.6). Sono stati calcolati nuovi valori dei coefficienti di attrito. Per il nodo A, che corrisponde all'attacco a terra dei pannelli verticali risulta la $\mu_e = 0,14$. Per il nodo posizionato nella parte superiore del pannello verticale la $\mu_e = 0,17$. I nodi che collegano i pannelli verticali e i controventi verticali hanno una $\mu_e = 0,13$ [Tab.14];
- Per il collegamento dei controventi in copertura, è stato utilizzato un bullone con dimensioni 12mm, a differenza degli altri che erano 16mm. Il valore del coefficiente di attrito sperimentale corrisponde a $\mu_e = 0,29$, maggiore rispetto a quello utilizzato in letteratura $\mu_c = 0,22$;
- A seguito del secondo monitoraggio avvenuto a distanza di 11 mesi, le chiusure hanno registrato una perdita del 10% rispetto ai valori applicati [Tab.13].

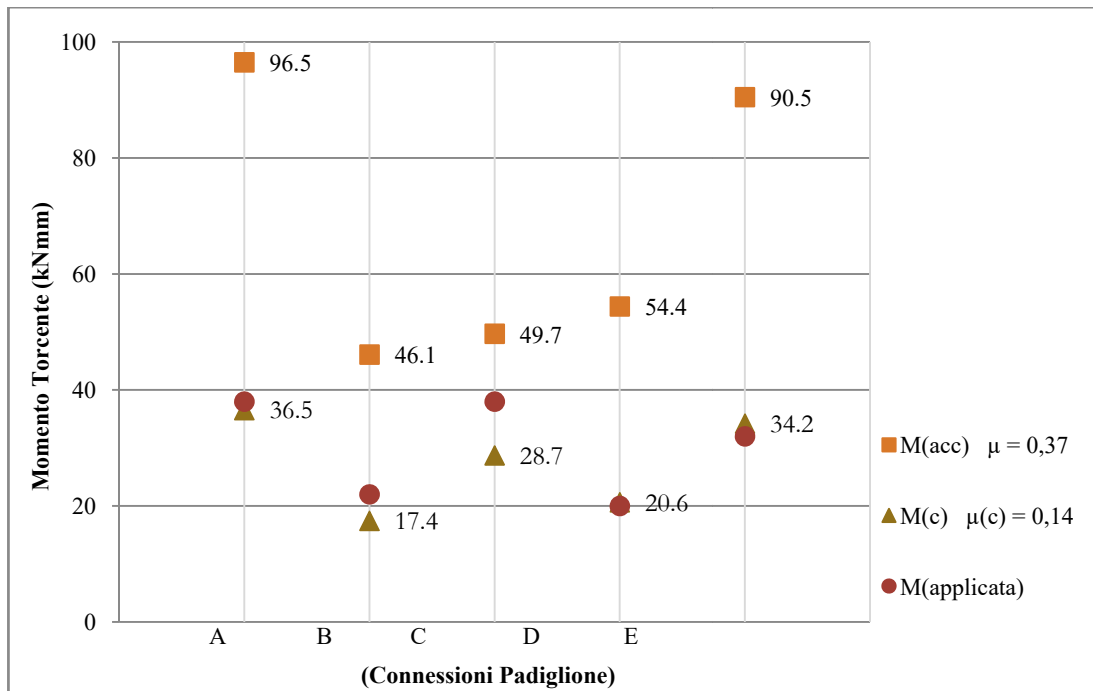


Fig. 107 Grafico riassuntivo di $T_s(c)$ calcolato.

Il grafico mette in relazione i diversi valori relativi alle coppie di serraggio applicate. I valori più alti si riferiscono ai valori calcolati con i coefficienti dell'acciaio, applicati durante il montaggio della struttura. I valori più bassi, calcolati con la $\mu_c = 0,14$, risultano essere quelli calcolati con il coefficiente di attrito noto in letteratura. L'ultimo valore inserito nel grafico di confronto, è il valore applicato sulla struttura, dal quale, tramite la formula inversa, abbiamo calcolato il valore del coefficiente di attrito sperimentale.

L'obiettivo della ricerca è stato quello di mostrare i risultati dei monitoraggi strutturali e di discuterne i risultati, nel quadro delle prestazioni generali previste per le strutture FRP. Le prove mirano a colmare il vuoto normativo sulle chiusure a secco delle strutture realizzate in materiale composito.

5. Considerazioni finali

La tesi proposta si pone l'obiettivo di dare una risposta al vuoto normativo e scientifico in tema di durabilità delle costruzioni in FRP pultruso e nel serraggio del materiale attraverso elementi in acciaio.

Le tipologie di prove utilizzate per lo studio riguardano 3 sperimentazioni differenti, tra loro connesse:

- Prove di durabilità sul materiale;
- Prove oligocicliche su strutture;
- Prove di manutenzione su costruzioni.

I test sono stati condotti sul materiale composito fibrorinforzato pultruso composto da una matrice vetrosa (GFRP).

Di seguito vengono riportate in modo puntuale le considerazioni conclusive:

- Al termine delle prove di durabilità condotte sul materiale, non sono state riscontrate, al termine delle prove a compressione, variazioni significative riguardanti la perdita di rigidità del materiale. La prova di immersione in acqua, la prova di esposizione agli agenti atmosferici e i test ad alte temperature non hanno modificato le prestazioni. Si è riscontrata una perdita di rigidità solo nei provini a cui sono stati indotti i danni sull'anima (incisione e foro). In particolare, i danni hanno causato durante la prova a compressione, una perdita di rigidità pari al 10% rispetto al provino vergine;
- Nelle prove oligocicliche si è scelto di mantenere la struttura nel suo stato di SVL. Per le prove, effettuate con frequenze comprese tra lo 0.05 Hz e 0.40 Hz, ciascuna con durata 96 ore, la struttura non ha dimostrato perdere la sua rigidità iniziale. Il monitoraggio puntuale della struttura ha evidenziato una deformazione delle fibre lungo il loro asse fino al 20%. Sulla struttura non si evidenziano formazioni di microfratture.
- In fase di monitoraggio, tramite la tecnica delle emissioni acustiche, si evince che con l'aumento delle sollecitazioni sulla struttura, si registra anche un aumento di emissioni del materiale, causando la formazione di microfratture in prossimità delle chiusure a secco.

In rapporto all'LCA, l'analisi dell'impatto ambientale del materiale composito deve coprire l'intero flusso del processo, dalla sintesi delle materie prime (resina e fibre), alla produzione dei componenti, passando per il loro utilizzo, fino allo smaltimento.

I materiali compositi si distinguono dagli altri materiali per la loro composizione, straordinaria rigidità, resistenza e leggerezza, che facilita il trasporto e il montaggio. Tutti questi vantaggi, combinati con la lunga durata del materiale sottoposto alle diverse condizioni operative, permette di concludere che i vantaggi legati all'uso dei compositi sono indiscutibili:

- minor consumo energetico e minori emissioni di gas serra;
- maggior durata dei componenti anche in assenza di manutenzione;
- migliori prestazioni e maggiore sicurezza.

LCA si pone come il metodo più adatto per quantificare l'impatto ambientale non solo dei materiali tradizionali, ma anche per i materiali compositi.

L'insieme delle diverse categorie di impatto sul ciclo di vita di un prodotto è definito da un protocollo internazionale chiamato International Reference Life Cycle Data System (ILCD) che identifica i diversi input e output elementari. Questo protocollo fornisce una base comune per una valutazione, considerando molteplici categorie di impatto che riguardano la salute umana, l'ambiente naturale e le risorse naturali. Le emissioni e le risorse sono assegnate a ciascuna di queste categorie d'impatto e sono poi convertite in indicatori che misurano l'effetto ambientale per unità di emissione o risorsa consumata. Lo sviluppo dell'ILCD è stato coordinato dalla Commissione Europea in un ampio processo di consultazione internazionale con esperti, stake holder e enti pubblici. Tra tutti gli indicatori che rientrano in questa analisi, i più importanti sono il CED⁴ (domanda cumulativa di energia-misura) totale delle risorse energetiche richieste per la realizzazione del prodotto) e il GHG⁵.

Attraverso un programma di calcolo (Eco Impact Calculator) è stata simulata un'analisi LCA della Glass House. L'analisi è stata poi confrontata ai risultati ottenuti da un'analisi effettuata su un padiglione dalle stesse dimensioni ma con elementi strutturali in acciaio [Fig.109].

⁴totale delle risorse energetiche richieste per la realizzazione del prodotto.

⁵protocollo nato per identificare e quantificare i gas a più alte emissioni.

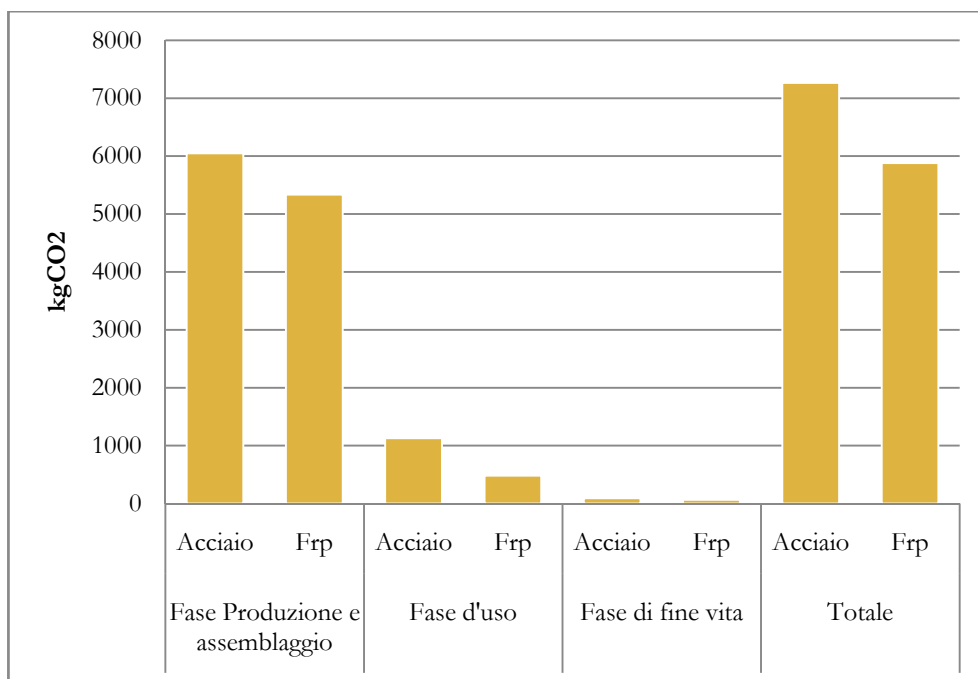


Fig. 108 Grafico LCA della Glass House.

Confrontando le due strutture ne deriva che il risparmio energetico totale, calcolato sommando il processo di produzione, il trasporto e le fasi di costruzione è del 18%.

Il materiale FRP grazie alle sue caratteristiche in termini di durabilità, adattabilità e manutenibilità rientra perfettamente nel concetto di economia circolare. Sicuramente risulta facile pensare al riutilizzo del materiale, grazie alla facilità di trasporto e la semplicità del montaggio, si presta ad essere utilizzato anche a supporto di opere ingegneristiche ed emergenziali.

I risultati della ricerca dimostrano aspetti positivi nell'utilizzo dell'FRP. Le proposte applicative dei pultrusi in sostituzione ai materiali tradizionali sono innumerevoli, soprattutto in vista dei nuovi obiettivi imposti dal GWP, prestandosi ad essere largamente utilizzato per la realizzazione di costruzioni edili ed opere ingegneristiche.

Bibliografia

- [1] O. Lucon *et al.*, "Buildings Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change". *Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Intergover. 2014.
- [2] S. IEA, "International Energy Agency, 2016," *Key World Energy Stat. 2015*, 2017.
- [3] G. A. Blengini and T. Di Carlo, "The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings" , *Energy Build.*, vol. 42, no. 6, pp. 869–880, 2010.
- [4] N. Francart and T. Malmqvist, "Investigation of maintenance and replacement of materials in building LCA", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 588, no. 3, 2020.
- [5] M. Buyle, J. Braet, and A. Audenaert, "Life cycle assessment in the construction sector: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, no. October, pp. 379–388, 2013.
- [6] S. Russo, "Sulla risposta sismica di strutture in PFRP : il caso della copertura della Chiesa di S . M . Paganica all ' Aquila", *Progettazione sismica*, vol.1, 2011.
- [7] H. Birgisdottir *et al.*, "IEA EBC annex 57 'evaluation of embodied energy and CO₂eq for building construction,'" *Energy Build.*, vol. 154, pp. 72–80, 2017.
- [8] O. Ortiz, F. Castells, and G. Sonnemann, "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 1, pp. 28–39, 2009.
- [9] I. Zabalza Bribián, A. Aranda Usón, and S. Scarpellini, "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 12, pp. 2510–2520, 2009.
- [10] L. F. Cabeza, L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez, and A. Castell, "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 394–416, 2014.
- [11] A. Jonsson, A. M. Tillman, and T. Svensson, "Life cycle assessment of flooring materials: Case study," *Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tek. Hogsk.*, vol. 32, no. 1426, pp. 245–255, 1998.
- [12] M. Asif, T. Muneer, and R. Kelley, "Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland," *Build. Environ.*, vol. 42, no. 3, pp. 1391–1394, 2007.
- [13] F. A. Ximenes and T. Grant, "Quantifying the greenhouse benefits of the use of wood products in two popular house designs in Sydney, Australia," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 4, pp. 891–908,

2013.

- [14] C. Koroneos and A. Dompros, “Environmental assessment of brick production in Greece,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 5, pp. 2114–2123, 2007.
- [15] E. M. Donoghue, G. L. Benson, and J. L. Chamberlain, “Sustainable production of wood and non-wood forest products,” *Gen. Tech. Reports US Dep. Agric. For. Serv.*, no. 604, pp. 1–2, 2004.
- [16] G. M. Nicoletti, B. Notarnicola, and G. Tassielli, “Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: Ceramic versus marble tiles,” *J. Clean. Prod.*, vol. 10, no. 3, pp. 283–296, 2002.
- [17] P. van der Lugt, A. A. J. F. van den Dobbelsteen, and J. J. A. Janssen, “An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 9, pp. 648–656, 2006.
- [18] H. Babaizadeh and M. Hassan, “Life cycle assessment of nano-sized titanium dioxide coating on residential windows,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 314–321, 2013.
- [19] A. Aranda-Usón, G. Ferreira, A. M. López-Sabirón, M. D. Mainar-Toledo, and I. Zabalza Bribián, “Phase change material applications in buildings: An environmental assessment for some Spanish climate severities,” *Sci. Total Environ.*, vol. 444, pp. 16–25, 2013.
- [20] B. L. P. Peuportier, “Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context,” *Energy Build.*, vol. 33, no. 5, pp. 443–450, 2001.
- [21] K. Blok and E. Nieuwlaar, “Life-cycle energy analysis,” *Introd. to Energy Anal.*, vol. 28, pp. 191–215, 2021.
- [22] S. Citherlet and T. Defaux, “Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 2, pp. 591–598, 2007.
- [23] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, and M. Mistretta, “Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 460–470, 2011.
- [24] A. Osman and R. Ries, “Life-Cycle Impact Analysis of Energy Systems for Buildings,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 87–97, 2004.
- [25] G. A. Blengini, “Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 2, pp. 319–330, 2009.
- [26] E. O’Brien, B. Guy, and A. S. Lindner, “Life cycle analysis of the deconstruction of military barracks: Ft. McClellan, Anniston, AL,” *J. Green Build.*, vol. 1, no. 4, pp. 166–183, 2006.
- [27] S. Junnila, A. Horvath, and A. A. Guggemos, “Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 10–17, 2006.

- [28] M. Bilec, R. Ries, H. S. Matthews, and A. L. Sharrard, "Example of a Hybrid Life-Cycle Assessment of Construction Processes," *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 207–215, 2006.
- [29] K. Liao, C. R. Schultheisz, and D. L. Hunston, "Effects of Environmental Aging on the Properties of Pultruded GFRP," 1998.
- [30] E. Barbero and V. S. Gangarao, "Structural applications of composites in infrastructure," *Sample J.*, vol. 28, pp. 9–16, 1992.
- [31] S. Russo, "Experimental and finite element analysis of a very large pultruded FRP structure subjected to free vibration," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 3, pp. 1097–1105, 2012.
- [32] G. Carra and V. Carvelli, "Ageing of pultruded glass fibre reinforced polymer composites exposed to combined environmental agents," *Compos. Struct.*, vol. 108, pp. 1019–1026, 2014.
- [33] S. Russo, B. Ghadimi, K. Lawania, and M. Rosano, "Residual strength testing in pultruded FRP material under a variety of temperature cycles and values," *Compos. Struct.*, vol. 133, pp. 458–475, 2015.
- [34] A. Cecchi, S. Russo, and F. Sciarretta, "Preliminary investigation on FRP profiles for the structural retrofit of masonry structures," *Key Engineering Materials*, vol. 747, pp. 74–77, 2017.
- [35] A. L. T. De Lorenzis, Laura, Antonio Nanni, "Bond of near surface mounted FRP rods in concrete masonry units," in *The Seventh Annual International Conference on Composites Engineering (ICCE/7)*, 2000.
- [36] G. Tumialan, A. Morbin, A. Nanni, and C. Modena, "Shear Strengthening of Masonry Walls with FRP Composites Composites," *Compos. 2001 Conv. Trade Show, Compos. Fabr. Assoc.*, no. March, pp. 3–8, 2001.
- [37] A. De Vita, A. Napoli, and R. Realfonzo, "Beam-Column Joints Strengthened with Steel Reinforced Polymer," vol. 4, no. July, pp. 1–17, 2017.
- [38] P. F. Silva, P. Yu, and A. Nanni, "Monte Carlo Simulation of Shear Capacity of URM Walls Retrofitted by Polyurea Reinforced GFRP Grids," *J. Compos. Constr.*, vol. 12, no. 4, pp. 405–415, 2008.
- [39] H. Mahmood and J. M. Ingham, "Diagonal Compression Testing of FRP-Retrofitted Unreinforced Clay Brick Masonry Wallettes," *J. Compos. Constr.*, vol. 15, no. 5, pp. 810–820, 2011.
- [40] G. C. Papanicolaou and S. P. Zaoutsos, *Viscoelastic constitutive modeling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites*, 2nd ed. Elsevier Ltd., 2019.
- [41] M. H. Motta Dias, K. M. B. Jansen, J. W. Luinge, H. E. N. Bersee, and R. Benedictus, "Effect of fiber-

- matrix adhesion on the creep behavior of CF/PPS composites: temperature and physical aging characterization,” *Mech. Time-Dependent Mater.*, vol. 20, no. 2, pp. 245–262, 2016.
- [42] S. Russo, I. Ippolito, and C. Bergamo, “FRP pultruded material as reinforcement for masonry: Expected interaction in the medium and long time,” *Key Eng. Mater.*, vol. 817, pp. 89–94, 2019.
- [43] F. R. Jones, “Durability of reinforced plastics in liquid environments.,” *Reinf. Plast. Durab.*, pp. 70–110, 1999.
- [44] G. S. Springer, “Environmental Effects,” in *Reference Book for Composites Technology-2*, SM Lee, Ed. 1989, pp. 17–36.
- [45] C. R. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, T. H. Gan, P. Purnell, and M. Pharaoh, “Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 12, pp. 1819–1827, 2004.
- [46] Pollock Adrian A., *Acoustic emission inspection*. Metals handbook, 1989.
- [47] Z. Huang, “Extensions to the k-Means Algorithm for Clustering Large Data Sets with Categorical Values. Data Mining and Knowledge Discovery 2, 283-304,” *Data Min. Knowl. Discov.*, vol. 2, no. 3, pp. 283–304, 1998.
- [48] E. Z. Yan, R. Wang, “Evaluation and management of tumor pain.,” *CHINESE J. Nurs.*, 2006.
- [49] R. B. J. De Groot, Peter J., Peter AM Wijnen, “Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites.,” *Compos. Sci. Technol.*, pp. 405–412, 1995.
- [50] K. K. and M. I. Qing-Qing Ni, “AE Technique for Identification of Micro in CFRP Composites Failure Modes,” *Mater. Sci. Res. Int.*, vol. 7, no. 1, pp. 67–71, 2001.
- [51] M. Kaphle, “Analysis Of Acoustic Emission Data For Accurate Damage Assesment For Structural Health Monitoring,” pp. 5–21, 2012.
- [52] ASTM, *ASTM E1823 - Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. 2000.
- [53] S. Suresh, *Fatigue of Materials*. 1998.
- [54] R. P. Skelton, “failure,” vol. 7, no. May, 1991.
- [55] A. Constantinescu *et al.*, “A computational approach to thermomechanical fatigue To cite this version : HAL Id : hal-00022603 A computational approach to thermomechanical fatigue,” pp. 805–818, 2021.
- [56] D. P. McCrum, J. Simon, M. Grimes, B. M. Broderick, J. B. P. Lim, and A. M. Wrzesien, “Experimental cyclic performance of cold-formed steel bolted moment resisting frames,” *Eng. Struct.*,

vol. 181, no. October 2018, pp. 1–14, 2019.

- [57] Y. Hu, J. Zhao, D. Zhang, and H. Zhang, “Cyclic tests of fully prefabricated concrete-filled double-skin steel tube/moment-resisting frames with beam-only-connected steel plate shear walls,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 146, no. December 2018, 2020.
- [58] J. Mottram, “Friction and load transfer in bolted joints of pultruded fibre reinforced polymer section,” *FRP Compos. Civ. Eng. - CICE 2004*, no. Clarke 1996, pp. 845–850, 2004.
- [59] I. N. R. Council, CNR, *Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements*, 2008.
- [60] ASCE, *Manuals for Composite Materials*, 1984.
- [61] ASCE, *Design guide for FRP composite connections*, 2011.
- [62] CUR96, *Fiber Reinforced Polymers in Civil Load Bearing Structures*, 2003.
- [63] DIN13121, *Structural Polymer Components for Building and Construction*, 2010.
- [64] UNI 2003, *Reinforced plastics composites specifications for pultruded profiles*, 2003.
- [65] J. European Commission, Science for Policy Report, Report EUR 27666 EN, Harmonization and further development of the Eurocode, *Prospect for New Guidance in the Design of FRP*, 2016.
- [66] American Composite Manufactures Association, *ACMA Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Polymer Structures*, 2010.
- [67] G.Boscato, C.Casalegno, S.Russo, *Design of frp structures in seismic zone*, TopGlass, *Design of FRP Structures in seismic zone*, 2014.
- [68] Fiberline Composites, *Design manual*. 2003.
- [69] Z. Y. Mottram JT, “State of the art review on the design of beams-to-columns connections for pultruded structures,” *Compos. Struct. Journale*, vol. 35, pp. 387–401, 1996.
- [70] J. Ever, *Introduction to composite material design*, 2010.
- [71] S. Russo, “On failure modes and design of multi-bolted FRP plate in structural joints,” *Compos. Struct.*, vol. 218, no. February, pp. 27–38, 2019.
- [72] J. T. Mottram, C. Lutz, and G. C. Dunscombe, *Aspects on the Behaviour of Bolted Joints for Pultruded Fibre Reinforced Polymer Profiles*. Woodhead Publishing Limited, 2004.
- [73] A. Picard, *Guide to design criteria for bolted and riveted joints*, vol. 15, no. 1, 1988.

Codice rielaborato in Matlab R2018

```
clc;
clear all;
close all;
```

```
[x,fs] = audioread ('2021-01-12_SLM_001_Audio_FS88.1dB(PK)_00.wav')
```

```
N = length(x);
t = (0: N-1)/fs;
N/fs
```

```
%plot time domain signal
plot(t, x);
grid on;
xlabel ('Time (s)')
ylabel ('dB')
title ('Point 1A')
```

```
%stats information
maxValue = max(x)
minValue = min(x)
meanValue = mean(x)
stdValue = std(x)
```

```
spectrogram(x, 1024, 512, 1024, fs, 'yaxis')
title('Spectrogram Point 1A')
```

```
function [ freq,amp ] = fft_function( sampling_rate, signal )
% Function performs Fourier Transform, outputs the frequency axis and the
% amplitudes curve
```

```
% Time space
dt = 1/sampling_rate;
t = (0:(length(signal)-1))*dt;
N = length(t);
% Frequency space
df = 1/(dt*N);
freq = (0:N-1)*df;
%dimf = length(f);
```

```
amp = abs(fft(signal)/N*2);
```

```
end
```

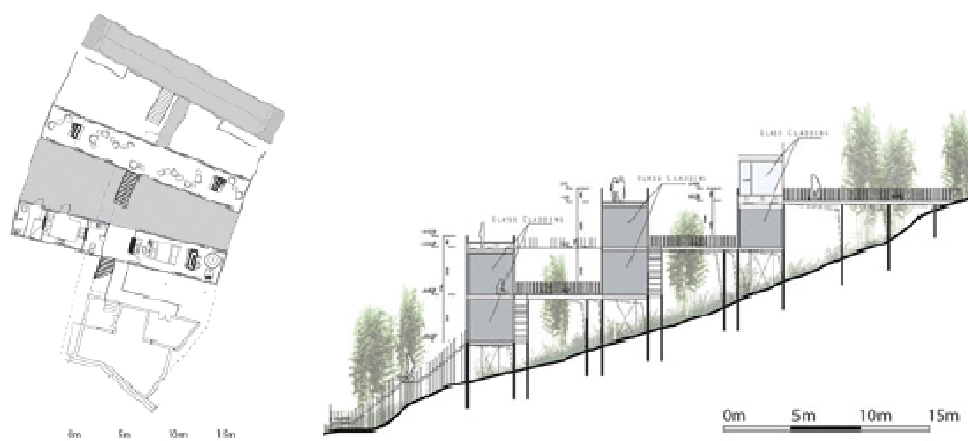
L'uso dell'FRP in Architettura

Frp House

Progettista: Ubicazione : sud Zhenzhuquan, CN

Anno di costruzione: 2003

Descrizione : L'edificio è un stato progettato come un hotel-villa sulle pendici di un ripido pendio vicino Nanchino, Cina. Grazie alla sua leggerezza architettonica e strutturale, permette di integrarsi perfettamente alla conformazione ricca di vegetazione del luogo. La struttura portante è composta interamente da tubolari pultrusi in FRP che permettono all'edificio di svilupparsi per 475 mq su 3 livelli differenti.



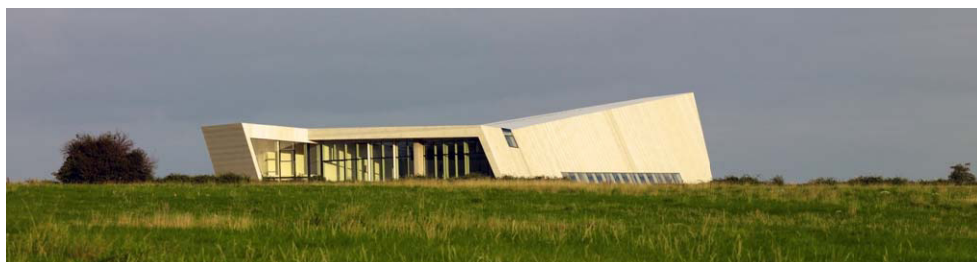
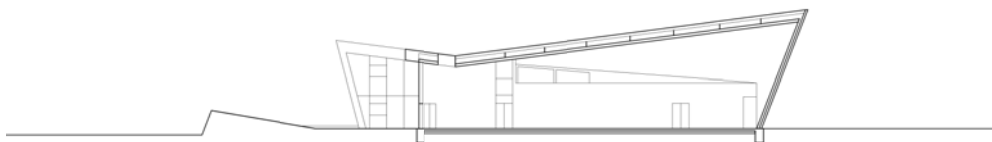
Hellig Kors Kirkes

Progettista: KHR arkitekter AS

Ubicazione: Jyllinge, DK

Anno di costruzione: 2007

Descrizione: L'edificio è costruito con l'utilizzo di compositi in fibra di vetro che rendono le pareti traslucide. Gli ambienti dell'edificio sono progettati tenendo conto delle funzioni della chiesa e del carattere mutevole del lucernario. Gli innovativi pannelli per facciate realizzati in composito GRP consentono la particolare architettura della struttura, permettendo anche il passaggio della luce.



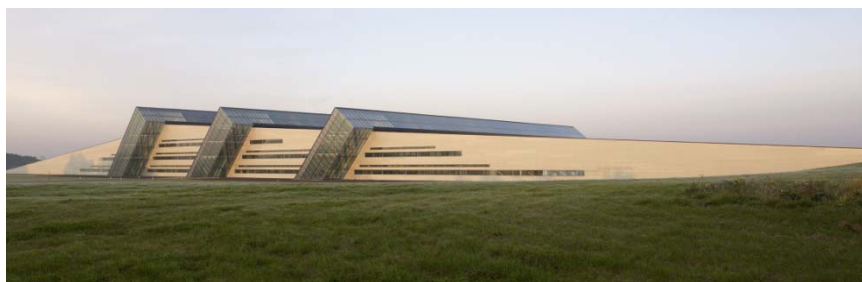
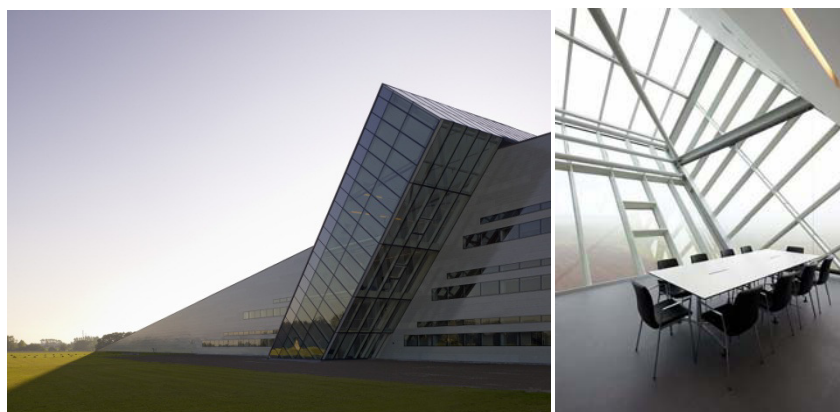
Compositi Fiberline

Progettista: KHR arkitekter AS

Ubicazione: Middelfort, DK

Anno di costruzione: 2008

Descrizione: La costruzione è il nuovo edificio per uffici e produzione di Fiberline. La struttura, che si sviluppa per 2400 m², è il trionfo dei profili pultrusi in fibra di vetro. Il rivestimento è stato realizzato con particolari pannelli in fibra di vetro che si alternano ad intere pareti finestrate. L'intero edificio ha una lunghezza complessiva di 300 m si sviluppa su 3 piani e ha un'altezza massima di 20 m.



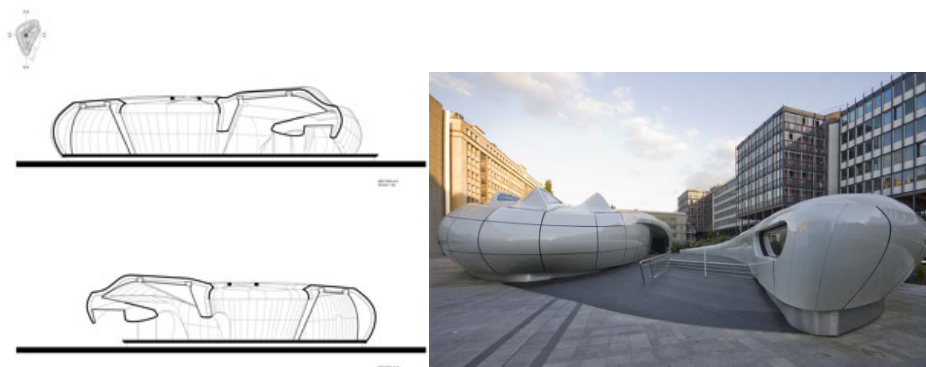
CHANEL MOBILE ART PAVILION

*Progettista:*ZAHA HADID ARCHITECTS

*Ubicazione:*Parigi, FR

Anno di costruzione: 2008

Descrizione : La struttura architettonica funzionale del Padiglione è composta da una serie di elementi continui a forma di arco, che formano nella parte centrale della struttura un cortile. La luce artificiale dietro il soffitto traslucido, enfatizza la struttura "ad arco" e aiuta nella creazione di un nuovo paesaggio artificiale per installazioni artistiche. I materiali utilizzati per la costruzione sono eterogenei: una facciata realizzata in FRP, il tetto in PVC, lucernari in ETFE, la struttura principale è stata creata da 74 tonnellate di acciaio con oltre 1752 diversi nodi di collegamento, la struttura secondaria è costituita da profili estrusi di alluminio. Tutta la struttura ha un'estensione di soli 29 mq e grazie ai materiali utilizzati, risulta di facile smontaggio e montaggio.



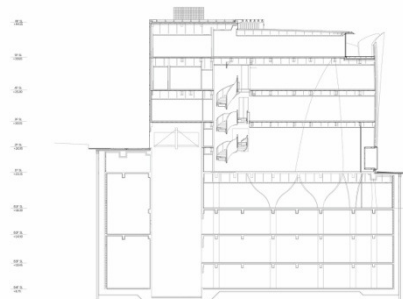
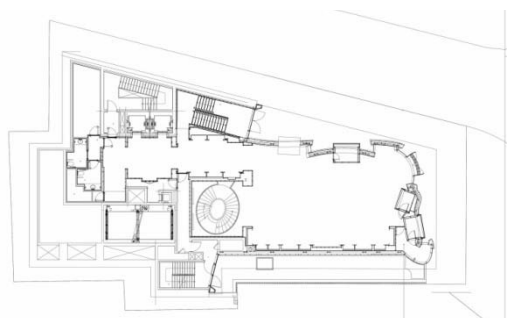
Ammiraglia Dior

Progettista: Christian De Portzamparc

Ubicazione: Gangnam-gu Seoul, KOR

Anno di costruzione: 2011 - 2015

Descrizione: La struttura ospita una boutique di alta moda nel centro di Seoul. Per realizzare le pareti strutturali si è scelto come materiale l'FRP, non solo per la facilità di assemblaggio, ma anche per la possibilità di realizzare particolari curvatore. I 12 pannelli esterni, sono stati realizzati utilizzando le tecniche di realizzazione applicati gli scafi delle barche. Le dimensioni totali del rivestimento sono 20 metri di altezza e 8 metri di larghezza.



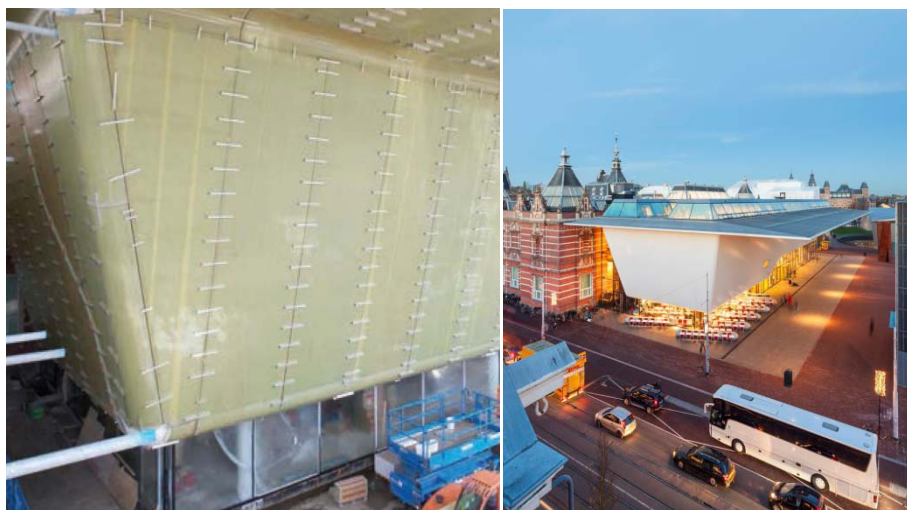
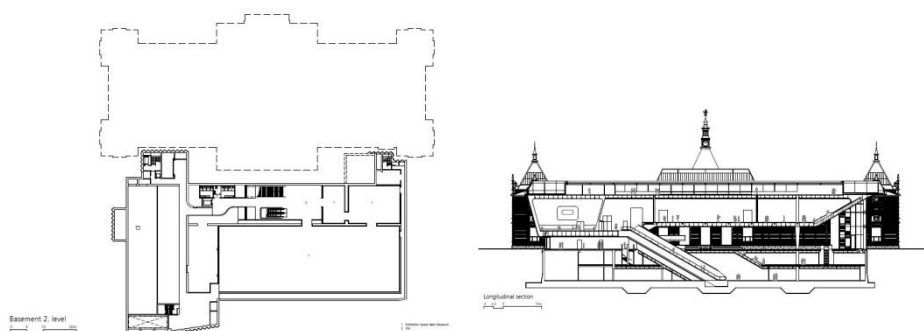
Stedelijk Museum

Progettista: Joost Vos

Ubicazione: Amsterdam, NL

Anno di costruzione: 2007 – 2012

Descrizione: L'intervento è stato realizzato come ampliamento del museo esistente. Per rendere ben visibile l'intervento di ampliamento, si è scelto di lavorare con l'FRP, un materiale innovativo, leggero e facilmente assemblabile. La struttura, di dimensioni 17x4 metri, è stata realizzata con 185 tutti con dimensioni differenti tra loro, il più grande misura 3,5x15 m. Grazie alla leggerezza del materiale l'intera struttura è sorretta solamente da sei elementi di cui cinque pilastri e un setto in cemento.



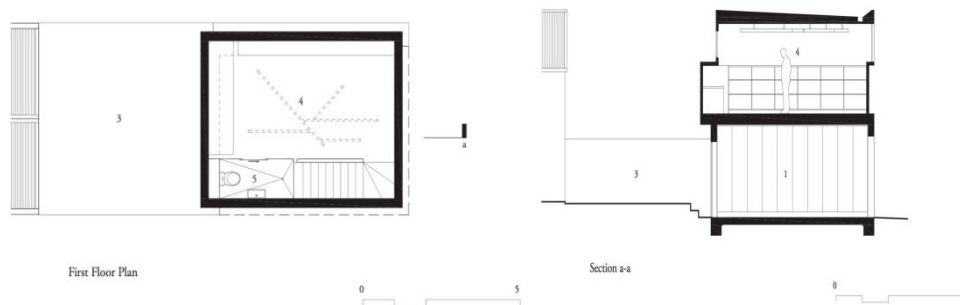
Studio a Middle Park

Progettista: Jean Paulo Rollo

Ubicazione: Middle Park, AU

Anno di costruzione: 2012

Descrizione: L'edificio ospita una residenza unifamiliare. La struttura si sviluppa su quattro pilastri in acciaio connessi ai quattro angoli alla lastra in calcestruzzo prefabbricato che funge da solaio. L'utilizzo dell'FRP non è negli elementi strutturali, ma bensì, nelle tamponature. Sono stati utilizzati dei pannelli in fibra come pareti del volume superiore, per permettere una maggior leggerezza e per caratterizzare la facciata con l'utilizzo di un materiale innovativo che permette l'ingresso della luce naturale all'interno della residenza.



Pèrez Art Museum Miami

Progettista: Christoph Gengnagel, Elisa Lafuente Hernandez

Ubicazione: Roskilde, DK

Anno di costruzione: 2012

Descrizione: Questo progetto esplora l'uso dei compositi rinforzati con fibre al di là del loro quadro attuale. Oltre alle tradizionali qualità di leggerezza e resistenza, i compositi possiedono un'elevata capacità di piegarsi. Questo progetto sviluppa un gridshell attivo per la flessione, prendendo spunto da una richiesta di fornire uno spazio per sedersi e rilassarsi per il Roskilde Festival 2012. Lavorando con la sezione strutturale in polimero rinforzato con fibre (FRP) da 40 mm, il progetto comprende tre "pali" per sedersi che generano un campo più ampio di circa 30x40m, la cui estensione e geometria sono definite da 7 gridshell FRP.



The Royal Pavilion Southend

Progettista: White arkitekter AB

Ubicazione: Southen on Sea, UK

Anno di costruzione: 2012

Descrizione: Il progetto, pluripremiato, è uno degli esempi di edifici a emissioni zero. Il centro culturale, il teatro e il ristorante occupano uno spazio di 1100mq e si affiancano all'area esterna che si sviluppa per 3000mq. Gli elementi strutturali caratterizzanti, riprendo una forma curvilinea, resa possibile dall'utilizzo dell'FRP. I materiali tradizionali utilizzati sono il legno, acciaio Corten e vetro, a cui si affianca il rivestimento di facciata traslucido in composito FRP, scelto per le sue ottime capacità di resistenza negli ambienti alcalini.



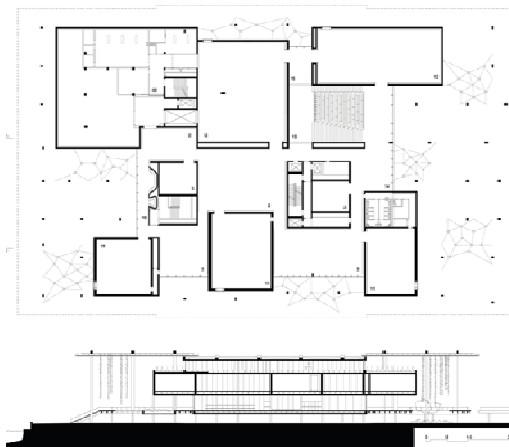
Pèrez Art Museum Miami

Progettista: Herzog & de Meuron

Ubicazione: Miami, USA

Anno di costruzione: 2013

Descrizione: All'interno di questo museo si ha un uso decorativo dell'FRP. Sono stati utilizzati 87 tubi in GFRP con diametro di 45 cm e lunghezza compresa tra 8 e 10 metri per realizzare una sovrastruttura collocata all'ingresso dello stesso. All'interno di questi tubi sono contenute 80 specie di piante provenienti dalla Florida. La leggerezza del materiale permette di collocare al suo interno la vegetazione e grazie alle sue proprietà meccaniche il materiale non viene danneggiato dall'acqua necessaria per l'irrigazione.



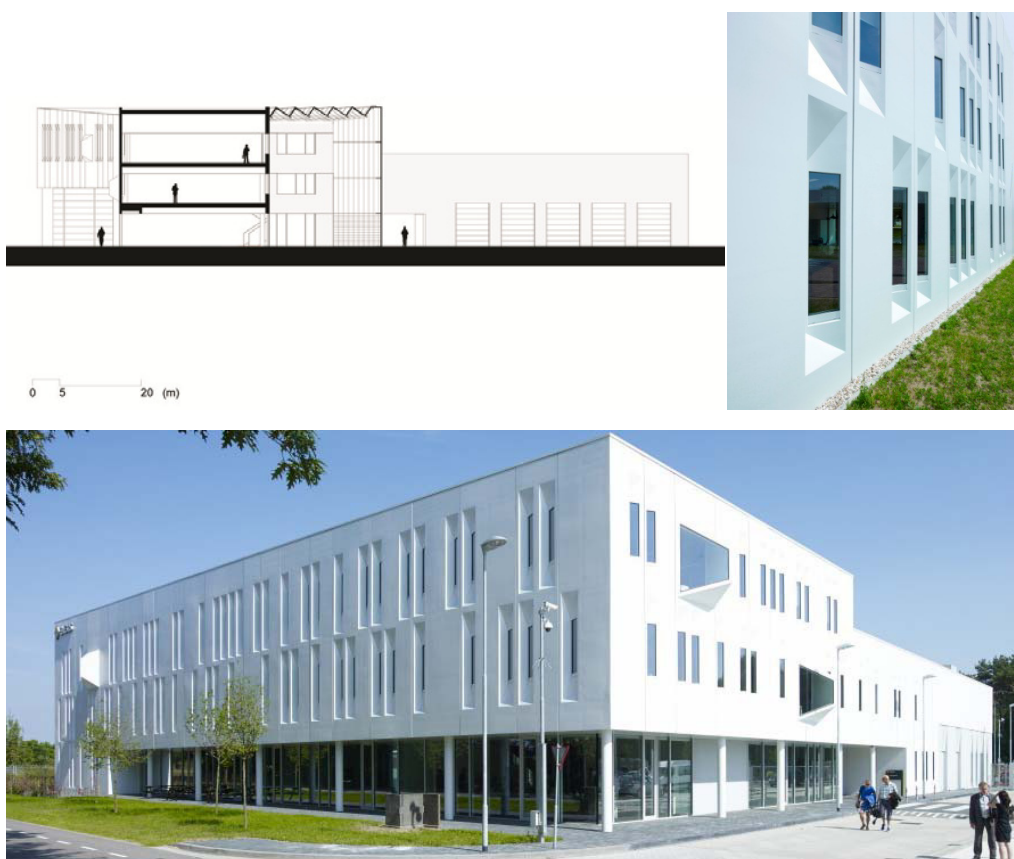
Ufficio Regionale Enexis

Progettista: Atelier PRO architetti

Ubicazione: Zwolle, NL

Anno di costruzione: 2013

Descrizione: L'ufficio regionale sostenibile di Enexis a Zwolle si trova nel mezzo di un campus preesistente, e si estende per 9.000 m². Le facciate scultoree, sono realizzate in materiale composito e sono prefabbricate, per un'installazione efficiente su un sistema costruttivo modulare, smontabile e riciclabile al termine del suo ciclo di vita. La forma e il posizionamento delle finestre limitano la luce solare diretta verso mezzogiorno durante l'estate, fornendo al contempo una generosa e piacevole luce diurna per lavorare tutto l'anno. L'edificio grazie all'utilizzo di materiali e tecniche di progettazione ambientale riesce a raggiungere un coefficiente di prestazione energetica pari a zero.



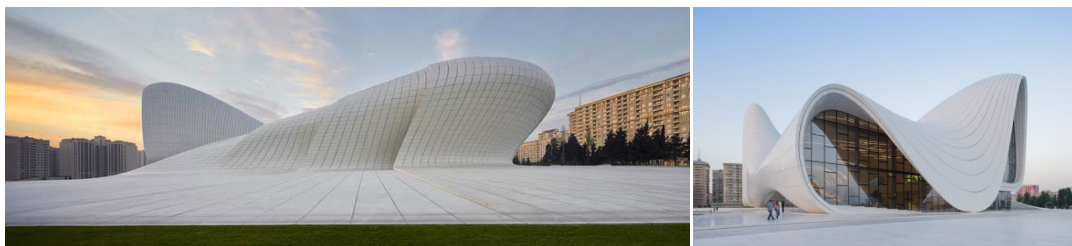
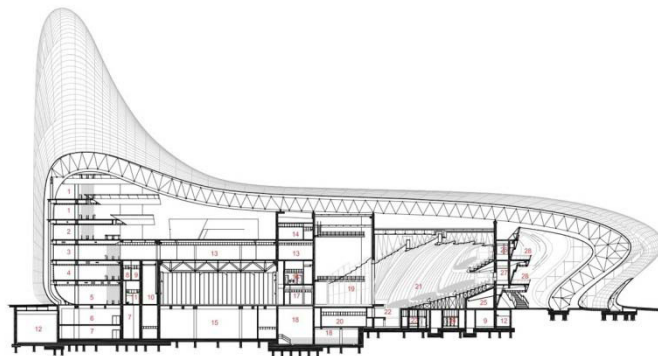
HEYDAR ALIYEV CENTER

Progettista: ZAHA HADID ARCHITECTS

Ubicazione: Baku, Az

Anno di costruzione: 2013

Descrizione: L'Heydar Aliyev Center (101.801 m²) si contraddistingue a livello progettuale per la fluidità e la continuità con cui gli interni si legano e fondono alla piazza circostante. L'edificio si fonda principalmente su due sistemi in cooperazione tra loro, una struttura in cemento combinata con un sistema a telaio tridimensionale. Il sistema a telaio tridimensionale ha consentito una completa libertà nelle forme e la riduzione delle tempistiche in fase di costruzione, mentre la sottostruttura è stata sviluppata per favorire la flessibilità nel rapporto tra griglia rigida del telaio e giunti esterni a forma libera. La scelta dei materiali è strategica, infatti cemento, poliestere rinforzati con fibra di vetro sono ottimali per garantire un edificio dall'aspetto plastico e rispondere al contempo a svariate esigenze funzionali legate alla molteplicità di contesti.



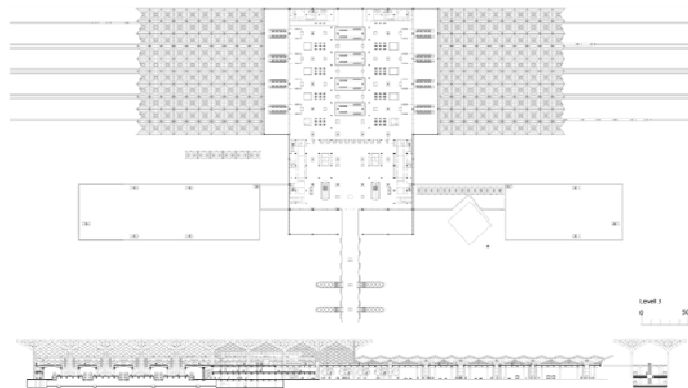
Al Haramain Rail Station

Progettista: Foster + Partners

Ubicazione: Al Haramain, Arabia Saudita

Anno di costruzione: 2014

Descrizione: La stazione è parte di una rete di stazioni ad alta velocità, presenti nelle principali città dell'Arabia Saudita. Le stazioni sono progettate per ospitare nelle ore di punta 200.000 passeggeri, necessitando così di ampi spazi che offrano riparo dalla luce solare. Per realizzare queste pensiline ad ombrello, il cui aspetto doveva risultare leggero ed elegante, sono stati utilizzati pannelli sandwich in GFRP dalle dimensioni 27x27 metri. Lo stesso materiale è stato impiegato anche per sistemi di sospensione e per la passerella.



Japanese House

Progettista: Frank la Rivière

Ubicazione: JP

Anno di costruzione: 2014

Descrizione: Il progetto di una residenza tradizionale giapponese si fonde con materiali innovativi. La residenza ha dimensioni 9.10x9.10x10 m con una struttura esclusivamente in legno. Tra le tipologie abitative in Giappone, la casa a un piano è una tipologia popolare per la sua compattezza, l'economia e la resistenza ai terremoti. Anche nell'architettura tradizionale giapponese questa tipologia è stata ampiamente utilizzata e ha creato un'architettura dominata dal tetto piuttosto che dalle facciate. Proprio per la costruzione del tetto, grazie alla sua leggerezza e resistenza sono stati usati dei pannelli in fibra di vetro che, grazie alle caratteristiche meccaniche permettono di rendere la copertura calpestabile.



Serpentine Pavilion

Progettista: Smiljan Radic

Ubicazione: Londra, UK

Anno di costruzione: 2014

Descrizione: Struttura espositiva il cui guscio è realizzato da pannelli curvilinei in GFRP. Il padiglione ha una dimensione totale di 160 mq con un'altezza interna che varia da 2.68/3.90 metri. All'interno della struttura uno spazio organizzato intorno a un patio crea la sensazione che l'intero volume sia flottante. Anche in questo caso l'FRP è stata una scelta che si integra perfettamente all'architettura, donando un aspetto caratterizzante al padiglione.



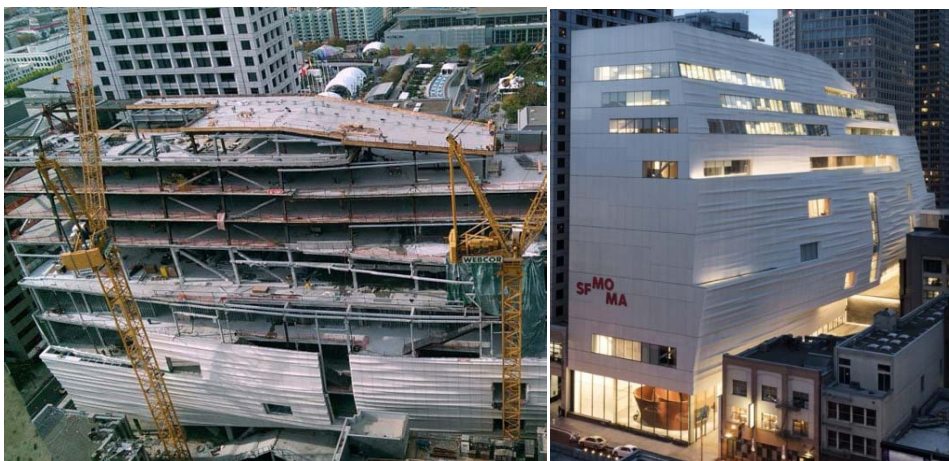
Museo Di Arte Moderna Di San Francisco

Progettista: Snøhetta

Ubicazione: San Francisco, USA

Anno di costruzione: 2015

Descrizione: L'intervento rappresenta un intervento di ampliamento di un edificio in stile postmoderno disegnato nel 1995 dall'architetto svizzero Mario Botta; L'ampliamento del Museo è stato realizzato rivestendo il prospetto est dell'edificio esistente con pannelli in GFRP. I pannelli hanno dimensioni differenti, la lunghezza varia da 1.5 m fino ad arrivare a 9 metri con un'altezza complessiva di 5 metri. Anche questo intervento mette in dialogo materiali innovativi come l'FRP con materiali tradizionali.



Porto di Naoshima

Progettista: SANAA / Kazuyo Sejima + Ryue Nishizawa

Ubicazione: Honmura, Naoshima / JP

Anno di costruzione: 2016

Descrizione: La struttura è stata realizzata come terminal di biciclette nel nuovo porto di Naoshima. Il terminal presenta una forma tridimensionale con un'altezza di 8 m e diametro di 4 m. Gli elementi portanti sono in legno e il rivestimento è totalmente realizzato in FRP. L'utilizzo di particolari forme è possibile grazie all'uso di questo materiale, rendendo l'edificio particolarmente riconoscibile. Questi oggetti sferici tridimensionali, semitrasparenti hanno uno spessore di 5 mm. La struttura è particolarmente leggera e grazie all'utilizzo di queste tecnologie costruttive lo ha reso di facile e veloce costruzione.



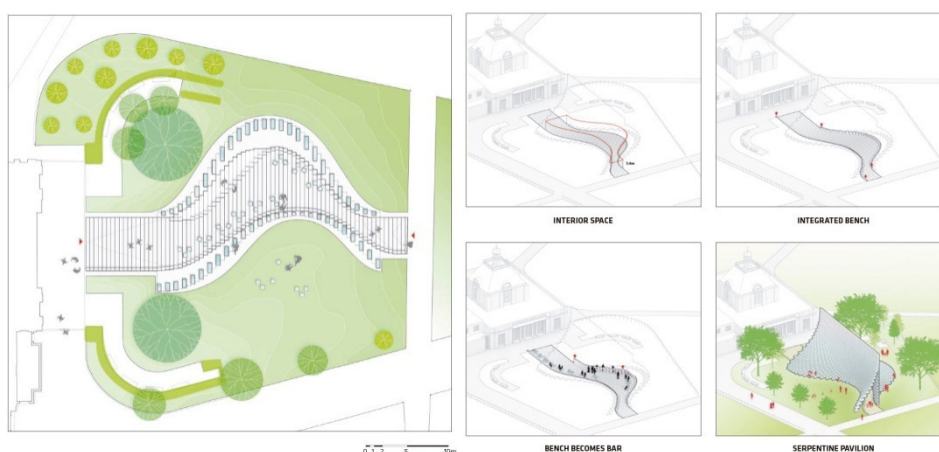
Serpentine Pavilion

Progettista: BIG

Ubicazione: Londra, UK

Anno di costruzione: 2016

Descrizione: Il padiglione espositivo rappresenta il secondo caso di padiglione espositivo realizzato con l'utilizzo di un materiale composito. La struttura è realizzata da telai in GFRP accostati l'uno sopra l'altro. La dimensione di ogni singolo telaio è di 40x50 cm. La struttura risulta avere una forma libera ma rigorosa, modulare ma anche scultorea, trasparente e allo stesso tempo opaca, il risultato è una scatola con una forma morbida.



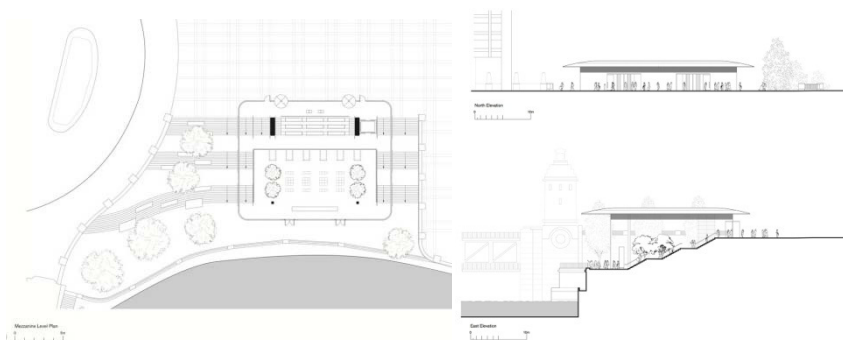
Apple Store

Progettista: Foster + Partners

Ubicazione: Chicago, USA

Anno di costruzione: 2017

Descrizione: L'intera struttura è supportata da quattro pilastri interni che consentono una continuità visiva delle facciate, realizzate interamente in vetro strutturale con un'altezza di 9 m. Il tetto è stato progettato per essere il più sottile possibile, si è scelto così di realizzarlo in FRP (33x29x0,4 metri) applicando un rivestimento in legno. Caratterizzante per il progetto è la copertura, in quanto, la sua leggerezza dona alla struttura un aspetto estremamente moderno e paragonabile ad un MacBook.



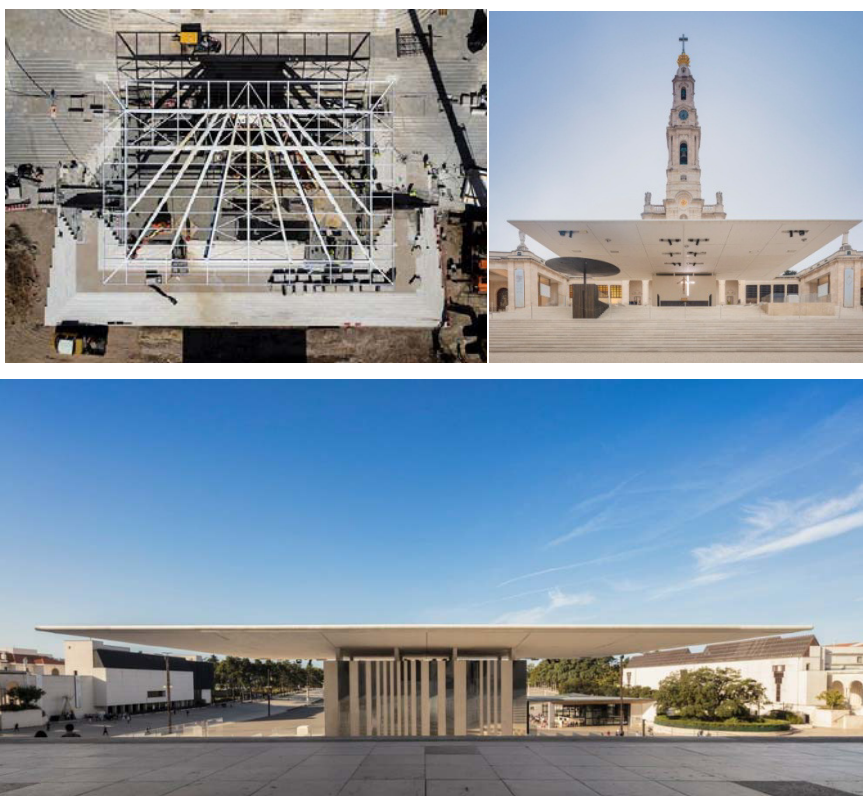
Altare all'aperto

Progettista: Paula Santos

Ubicazione: Fatima, PR

Anno di costruzione: 2017

Descrizione: La costruzione di un altare all'aperto all'aperto, ha di conseguenza richiamato la realizzazione di una pensilina di copertura. La copertura, sulla quale sembra poggiare il campanile retrostante, è sorretta da un blocco centrale di cemento attorno al quale sono collocati i cavedi contenenti gli impianti tecnici della struttura. Il piano orizzontale ha una superficie di circa 600 mq e, attraverso le travi reticolari che ne sorreggono l'impalcato, prevede uno sbalzo pronunciato atto ad esaltare la leggerezza dell'intervento. Anche in questo progetto si è scelto di lavorare con pannelli in FRP per il rivestimento della struttura portante, grazie alla sua leggerezza, alle caratteristiche meccaniche ed estetiche, risulta essere uno dei materiali più validi da poter utilizzare.



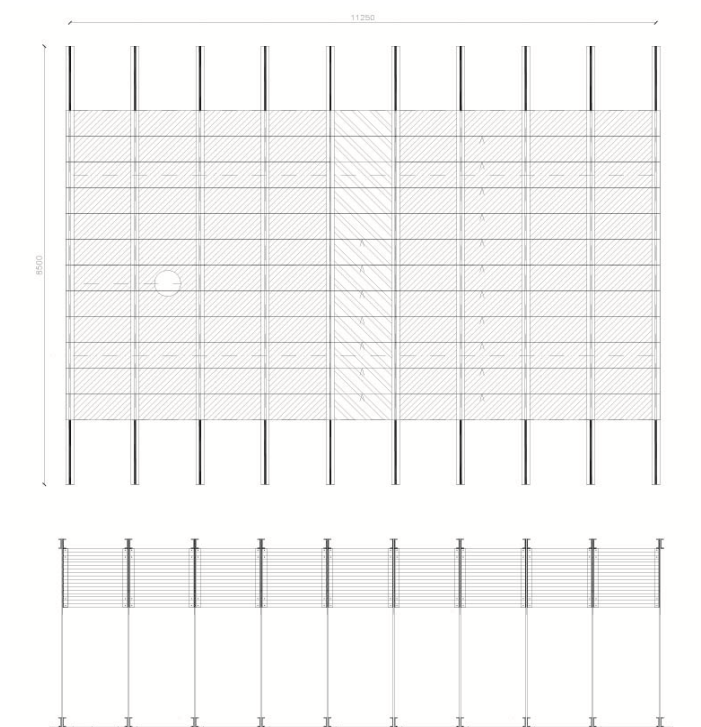
Glass House

Progettista: Davide Del Sante e Damiano Mazzocchini

Ubicazione: Venezia, IT

Anno di costruzione: 2018

Descrizione: La struttura rappresenta l'unico caso in Italia di Padiglione realizzato interamente in FRP. La Glass House, le cui dimensioni sono 10x8x4 m, è realizzata da profili pultrusi scatolari e chiusure a secco. La struttura era stata assemblata in occasione di un evento, all'interno dell'Università Iuav di Venezia; attualmente ha mostrato la sua resilienza, in quanto è stata trasportata in Grecia per diventare uno spazio educativo all'interno di un campo profughi.



Padiglione di ricerca ICD/ITKE

Progettista: B. Felbrich, N. Früh, M. Prado, D. Reist, S. Saffarian, J. Solly, L. Vasey

Ubicazione: Stoccarda, DE

Anno di costruzione: 2018

Descrizione: Il Padiglione della ricerca ICD/ITKE 2016-17 è stato realizzato posando un totale di 184 km di fibra di vetro impregnata di resina e fibra di carbonio. Il sistema di materiali leggeri è stato impiegato per creare e testare un unico cantilever a campata lunga con una lunghezza complessiva di 12 m come scenario strutturale estremo. La superficie copre una superficie di circa 40 mq e pesa circa 1000 Kg. La geometria complessiva del padiglione dimostra le possibilità di fabbricare morfologie strutturali attraverso l'avvolgimento di fibre volumetriche multistadio.



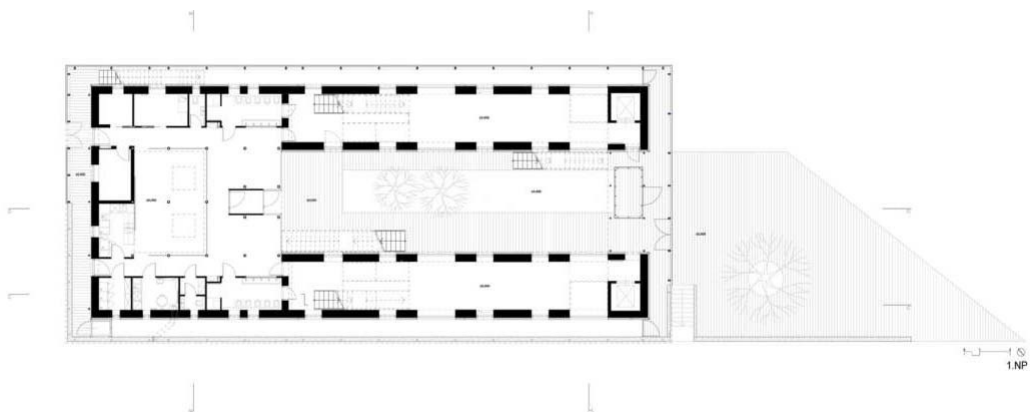
Nová Ruda

Progettista: Petr Stolin Architekt

Ubicazione: Liberec, ZC

Anno di costruzione: 2018

Descrizione: Il progetto racchiude la nuova scuola elementare di Liberec. La struttura è composta da due volumi all'interno del quale si svolge l'attività didattica, con elementi portanti in legno e strutture e pannelli in fibra di vetro che permettono di vedere anche dall'esterno l'orditura della struttura. Il guscio esterno invece è sorretto da una maglia regolare in tubi di acciaio sui quali vengono ancorati i pannelli di fibra. I pannelli in FRP, permettono di creare dei percorsi intorno alla scuola ed offrono la possibilità di affacciarsi sul paesaggio circostante senza però uscire dall'edificio.



Museo di George Lucas

Progettista: Ma Yansong di MAD Architects

Ubicazione: Los Angeles, USA

Anno di costruzione: 2020

Descrizione: L'edificio, da 25.000 m² di superficie è stato costruito nell'area del Parco delle Esposizioni, Los Angeles. Il suo esterno, è stato realizzato con uno schermo antipioggia realizzato con pannelli GFRP, ciascuno con una dimensione di 2.50x9 m. I compositi consentivano pannelli molto più grandi di quelli che sarebbero stati costruibili in acciaio inossidabile, risultando in un'estetica più uniforme. Il GFRP era più leggero del rivestimento in pietra o prefabbricato, rendendolo non solo più facile da installare ma anche una scelta migliore per un edificio in zona sismica.



Lleida Pedestrian Bridge

Progettista: Juan Sobrino and Javier Jordan

Ubicazione: Leida, ES

Anno di costruzione: 2001

Descrizione: Il ponte è un arco legato con lunghezza di 38 m, altezza di 6.2 m e larghezza 3m. Interamente realizzato con profili pultrusi in FRP, presenta una configurazione scelta in modo da ridurre al minimo i problemi di funzionalità dovuti al basso modulo elastico dei profili in GFRP. La struttura è stata progettata per il passaggio pedonale e per l'attraversamento della ferrovia elettrificata, la scelta del materiale è stata influenzata dal fatto che le fibre sono un isolante elettrico ed eliminano le interferenze magnetiche. Gli elementi pultrusi sono stati fabbricati in tre mesi ed il montaggio è stato realizzato mediante una gru, in sole tre ore.



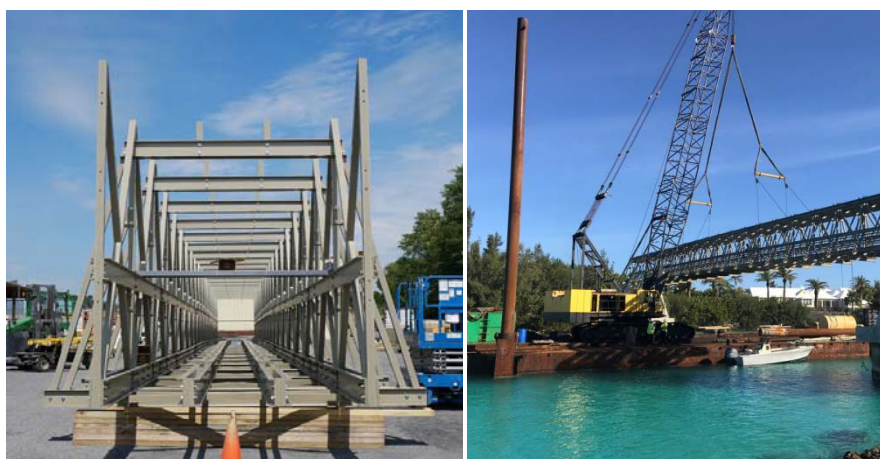
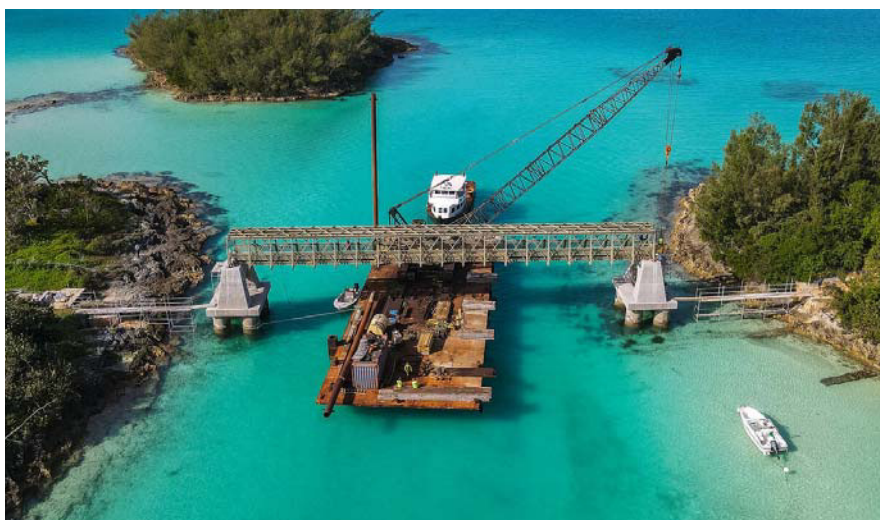
Bermuda railway trail

Progettista: Creative Composites Group

Ubicazione: BM

Anno di costruzione: 2021

Descrizione: La struttura è stata realizzata per ricollegare la vecchia ferrovia delle Bermuda in un unico percorso continuo per escursionisti e ciclisti. Il ponte è realizzato interamente da travi pultruse in FRP, le dimensioni sono di 46 m di lunghezza e 2.50 m di larghezza. Il ponte è realizzato a campata unica sorretto da due moli laterali in calcestruzzo. La capacità di resistere all'atmosfera alcalina e i minori costi di trasporto e montaggio, ha reso il materiale una scelta interessante. I minori costi di trasporto e la facilità di installazione offrivano altri vantaggi. L'intero ponte è stato assemblato vicino alla posizione del progetto. Seguendo le istruzioni, l'intera campata è stata sollevata da una gru e posizionata su una chiatta da dove è stata traghettata al sito di installazione.



Ponte Marshal Jozef Pilsudski

Progettista: Fibrolux

Ubicazione: Torun, PL

Anno di costruzione: 2021

Descrizione: Il ponte Marshal Jozef Pilsudski collega la parte meridionale della città con il centro storico di Torun, patrimonio mondiale dell'UNESCO. La struttura del ponte è costituito da un pannello ad incastro per l'impalcato pedonale formato da otto massicci profili pultrusi a tripla cavità di 500 mm x 150 mm di sezione. Ciò ha permesso di espandere le passerelle su ciascun lato del ponte da 2 m a 4,5 m di larghezza, creando uno spazio maggiore e più sicuro per i ciclisti. La struttura del ponte esistente non era però in grado di sostenere il peso di passerelle in acciaio più larghe ma, grazie all'utilizzo dell'FRP è stato possibile.



Passarella nautica in FRP

Progettista: P-Trex

Ubicazione: Palermo, IT

Anno di costruzione: 2021

Descrizione: La necessità di migliorare la funzionalità e la sicurezza degli impianti portuali, ha individuato la necessità di dotarsi di ormeggio o bricole da collegare alla banchina. È stata così necessaria la realizzazione di una passarella che dovesse essere resistente agli agenti atmosferici, leggera e di facile assemblaggio, richieste che hanno portato all'utilizzo dell'FRP. La struttura, con un peso complessivo di circa 4 tonnellate per una lunghezza di 22 metri, misura 140 cm di larghezza per un'altezza delle travi reticolari di 180 cm, è stata inviata in 2 elementi che sono stati preassemblati negli stabilimenti di produzione e poi montati in loco in sole tre ore.



Pedestrian Bridge

Progettista: Fiberline

Ubicazione: Kosino, RU

Anno di costruzione: 2004

Descrizione: Il ponte è realizzato interamente da travi pultruse in FRP, le cui dimensioni sono 41.4 m di lunghezza e 3.00 m di larghezza. Il ponte è stato assemblato presso l'azienda – due sezioni da 15 metri e una sezione da 13 metri – poi trasportato sul luogo di installazione ed in sole tre ore è stato installato. La facilità di installazione è stato uno dei vantaggi che hanno portato alla realizzazione del ponte in FRP. Il ponte è un passaggio pedonale, posizionato su una ferrovia e bloccare il passaggio dei treni per molte ore avrebbe causato un disagio. Un altro vantaggio del materiale è la bassa corrosione, caratteristica che, a causa delle bassissime temperature russe, aggrediva la maggior parte delle strutture realizzate in acciaio, necessitando così di un'attenta manutenzione.



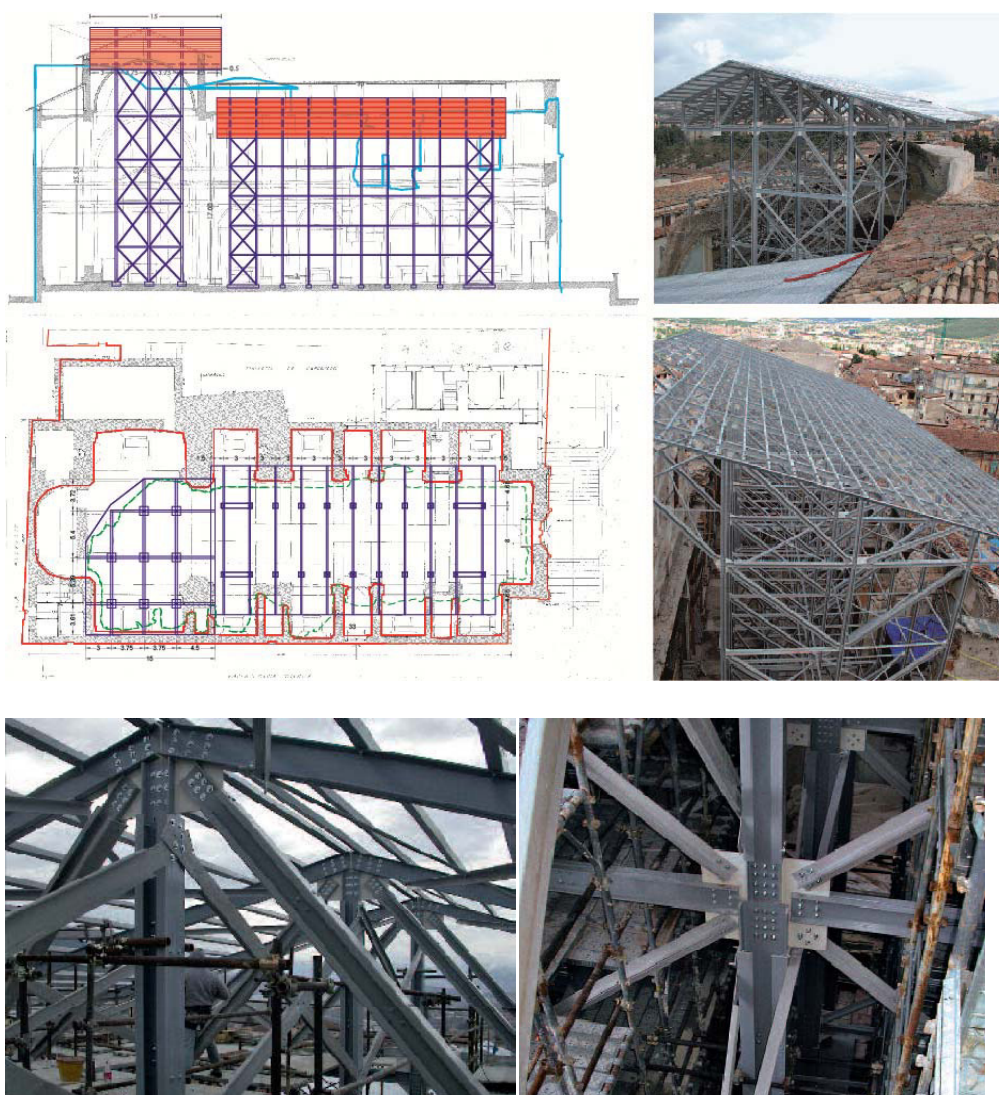
Chiesa di Santa Maria Paganica

Progettista: Salvatore Russo

Ubicazione: L'Aquila, IT

Anno di costruzione: 2011

Descrizione: A seguito del sisma che ha colpito la città dell' Aquila nel 2009, si è intervenuto con lavori di messa in sicurezza di edifici storici mediante l'utilizzo dell' FRP. Si è scelto l'utilizzo di travi in FRP per la messa in sicurezza della struttura; è stata inoltre costruita una copertura provvisoria (18x10x16 m), per proteggere la Chiesa. La struttura, realizzata interamente in fibra di vetro, con chiusure a secco è stata assemblata in loco.



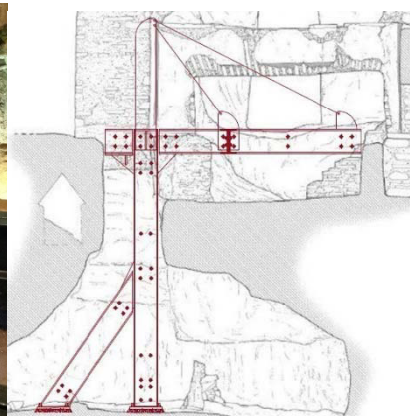
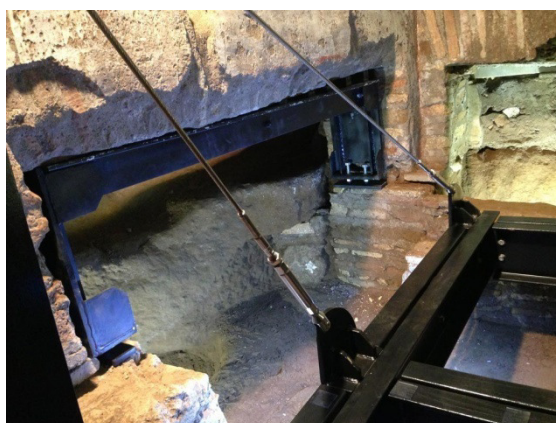
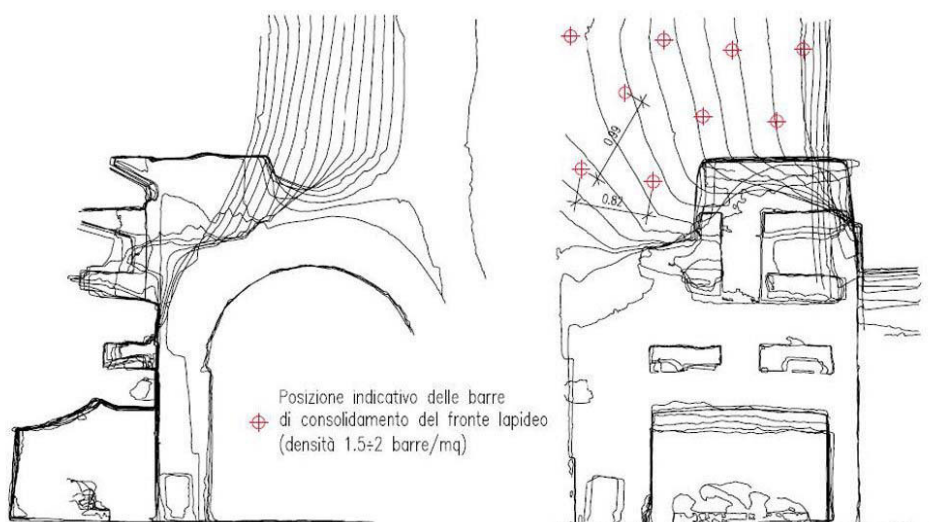
Catacombe San Callisto

Progettista: Allen Dudine, Enrico Zanello

Ubicazione: Roma, IT

Anno di costruzione: 2015

Descrizione: La struttura è una passerella realizzata all'interno del Cubicolo di Orfeo, costituita da un'intelaiatura di profili pultrusi in materiale composito GFRP, che sostengono altri elementi, anche essi in composito, sui quali poggia uno strato di vetro strutturale (spessore pari a 27 mm) per permettere la pedonabilità della passerella e di minimizzare l'impatto della stessa all'interno dell'angusto cunicolo. Durante il processo di messa in sicurezza della catacomba, si sono installate anche delle barre pultruse come consolidamento del fronte tufaceo.



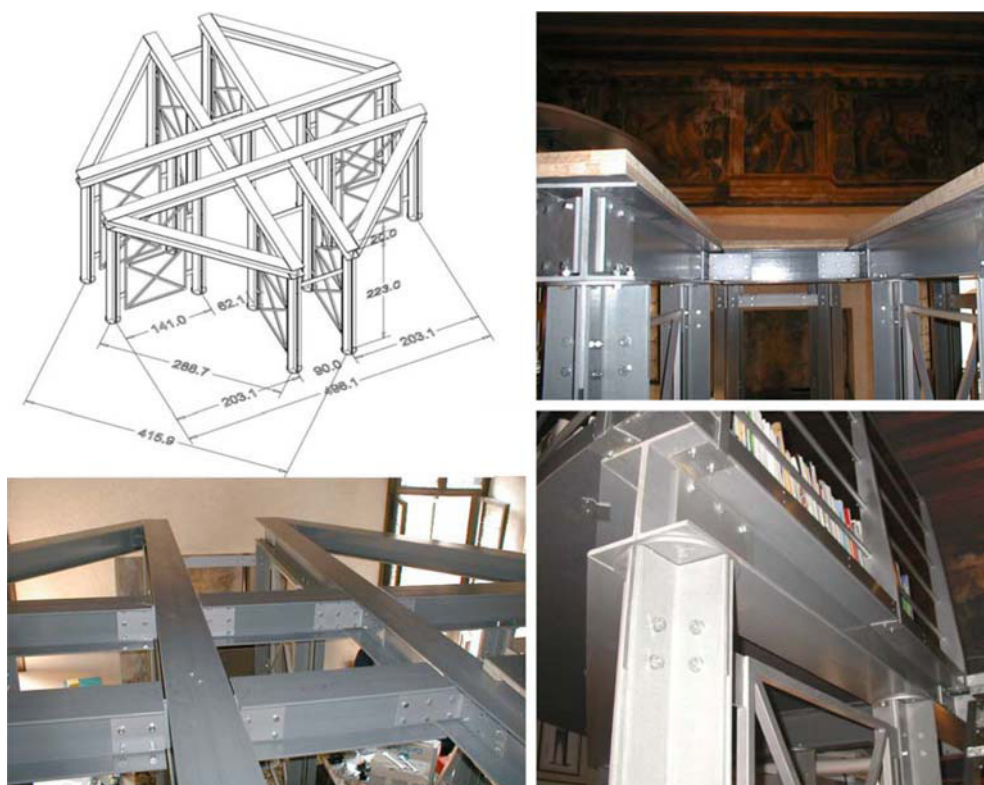
Casa di Cogollo(Casa del Palladio)

Progettista: Salvatore Russo

Ubicazione: Vicenza, IT

Anno di costruzione: 2007

Descrizione: La struttura proposta è stata richiesta per ragioni funzionali al fine di incrementare la superficie utile all'interno del palazzo. La tecnologia impiegata risponde al meglio ai requisiti richiesti attraverso una soluzione leggera e reversibile, quindi per nulla invasiva. L'impalcato ha forma ottagonale (4.50x4.90x2.70 m), realizzato con profili in FRP e controventato con profili in acciaio. Il piano di calpestio della struttura è stato realizzato con un tavolato in legno dallo spessore di 5 cm. Sono stati utilizzati per la realizzazione tutti materiali leggeri e poco invasivi, in modo integrare maggiormente l'istallazione.



Ponte Paludo

Progettista: Salvatore Russo

Ubicazione: Venezia, IT

Anno di costruzione: 2008

Descrizione: Il ponte è una costruzione della fine del XIX secolo, con schema statico ad arco (12.7x3.25 m) costruito interamente in acciaio e legno. La struttura portante è costituita da due travi reticolari in ferro collegate da profili a sezione composta in ferro; sulle travi trasversali appoggia l'impalcato in legno. L'intervento di riabilitazione strutturale ha previsto l'incremento della rigidità flessionale per mezzo dell'inserimento di travi GFRP nell'impalcato con un ridotto aumento del peso proprio.

