



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile ed Ambientale

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA (DICEA)

“Rinforzo di travi con FRP”

“Strengthening of beams with FRP”

RELATORE:

Prof. Ing. Capozucca Roberto

TESI DI LAUREA:

Di Rodi Michele

Anno accademico 2023/2024

INDICE

INTRODUZIONE

Capitolo 1 - CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI COMPOSITI (FRP)

- 1.1 Premessa
- 1.2 Materiali Compositi Rinforzati
 - 1.2.1 Classificazione degli FRP
 - 1.2.2 Materiale Composito FRCM
 - 1.2.3 Caratteristiche Meccaniche delle fibre
 - 1.2.4 Matrice
- 1.3 Normative per l'uso degli FRP
 - 1.3.1 Requisiti di Progetto
 - 1.3.2 Progetto per il Rinforzo
 - 1.3.3 Delaminazione del Rinforzo

Capitolo 2 – IMPIEGO DEI MATERIALI COMPOSITI FRP NEL RINFORZO STRUTTURALE

- 2.1 Premessa
- 2.2 Travi in c.a. con rinforzo NSM in CFRP
- 2.3 Travi in c.a. con rinforzo di lamine in CFRP
- 2.4 Analisi sperimentale di rinforzo di trave in acciaio per danni da corrosione con CFRP
- 2.5 Analisi sperimentale di rinforzo di travi in legno con FRP

Capitolo 3 – ANALISI VIBRAZIONI LIBERE DI TRAVI

- 3.1 Premessa
- 3.2 Analisi teorica del comportamento dinamico
- 3.3 Modello matematico del problema dinamico
- 3.4 Classificazione di sistemi discreti e continui
- 3.5 Sistemi discreti: vibrazioni libere e forzate
- 3.6 Prova di vibrazione per la valutazione delle fessurazioni di una trave in PRC/RC

Capitolo 4 – TECNICHE SPERIMENTALI DI VIBRAZIONI

- 4.1 Premessa
- 4.2 Tecniche di vibrazione sperimentale
- 4.3 Tecniche di controllo non distruttivo basato sulle vibrazioni (NDT)
- 4.4 Teoria di funzionamento alla base dei NDT
- 4.5 Sistema generale di misura delle FRF
- 4.6 Software per le analisi modali

Capitolo 5 – ESAME DEI DATI SPERIMENTALI E CONCLUSIONI

- 5.1 Geometria, condizione di vincolo e dettaglio strutturale della trave
- 5.2 Strumentazione per le analisi dinamiche
- 5.3 Esecuzione della prova
- 5.4 Risultati sperimentali delle prove dinamiche
- 5.5 Confronto tra i risultati sperimentali e teorici
- 5.6 Conclusioni

BIBLIOGRAFIA

RINGRAZIAMENTI

INTRODUZIONE

Il seguente lavoro di tesi si sviluppa nell'ambito dei metodi non distruttivi di monitoraggio e controllo di strutture in cemento armato gettate in opera, precompresso e acciaio. Fra le tecniche sperimentali non distruttive (NDT, Non-Destructive Testing), le analisi di vibrazioni trovano un ampio campo di applicazione.

La sperimentazione condotta ha riguardato un elemento in scala di trave in acciaio di sezione quadrata di dimensioni: 4 x 4 cm e lunghezza 90 cm, con spessore di 1,1 mm, di classe S275 ($f_{yk} \geq 275 \text{ N/mm}^2$). Inizialmente l'elemento è stato caratterizzato in condizione integra, non danneggiata, valutando i modi propri di vibrazione e le frequenze in condizioni di vincolo libera-libera utilizzando un set-up messo a disposizione nel LMPS della sezione strutture del dipartimento DICEA. Successivamente lo stesso modello di trave omogenea è stato sottoposto a vari gradi di danneggiamento ripetendo ad ogni step di danno le stesse analisi sperimentali di vibrazione libera con analoghe condizioni di vincolo. L'attività sperimentale prevede anche il rinforzo con materiali compositi costituiti da matrice polimerica e fibre di carbonio/vetro/basalto (CFRP-GFRP-BFRP). Della seconda parte relativa al rinforzo, questo lavoro non viene presentato in relazione per ovvi motivi di tempo. Comunque nei capitoli che si presentano di seguito, introduttivi all'attività sperimentale, si riporta in sintesi i riferimenti alle caratteristiche meccaniche degli FRP (Cap. 1) e si commentano alcune ricerche teoriche sperimentali (Cap. 2) presenti nella letteratura scientifica internazionale su tecniche di analisi vibrazionali e rinforzo di elementi strutturali con FRP.

In dettaglio, il lavoro è organizzato nel seguente modo: nei primi due capitoli si descrivono le caratteristiche meccaniche dei materiali compositi FRP e il loro impiego nei rinforzi strutturali di edifici in calcestruzzo armato, acciaio e legno.

Nel terzo capitolo si discute di una serie di informazioni basilari relative alle analisi di vibrazioni libere al fine di poter comprendere idoneamente tutti i valori ottenuti dalle prove NDT. Inoltre, è stato riportato un esempio di prova dinamica condotta su una trave in calcestruzzo armato.

Nel quarto capitolo vengono trattate le tecniche sperimentali di vibrazioni di travi e modelli di trave tramite la strumentazione del Pulse.

Nell'ultimo capitolo vengono esaminati e discussi, con le relative conclusioni, tutti i valori ottenuti dalle prove sperimentali.

CAPITOLO 1

CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI MATERIALI COMPOSITI (FRP)

1.1 Premessa

A partire dall'inizio degli anni Novanta l'uso del materiale composito è cresciuto significativamente grazie alle sue proprietà quali: efficacia degli interventi, tempi di esecuzione brevi, peso e ingombro del materiale molto ridotti, non invasività e parziale reversibilità degli interventi. Una struttura necessita di un rinforzo strutturale in determinate condizioni, come ad esempio:

- Adeguamento o miglioramento alle risposte sismiche della struttura;
- Danneggiamento causato da dei carichi eccezionale previsti dalle Norme Tecniche delle Costruzioni del 2018 quali incendio, azioni sismiche o possibili impatti;
- Adeguamenti normativi o cambiamento della destinazione d'uso di una struttura che implica un incremento dei carichi di qualsiasi natura;
- Compensare degli errori di progettazione o esecuzione;
- Degrado del materiale nel tempo come la corrosione delle armature metalliche nelle strutture in conglomerato cementizio.

Gli interventi di rinforzo fatti con il materiale composito fibrorinforzato hanno il fine di migliorare le caratteristiche meccaniche delle componenti strutturali di un edificio. Vengono eseguiti su qualsiasi tipologia di struttura come quelle murarie, in calcestruzzo armato e in acciaio.

Esse sono di svariato tipo:

- Rinforzo di pannelli murari;
- Rinforzo di volte e archi;
- Rinforzo a flessione di travi, pilastri e travetti di solaio;
- Rinforzo a taglio di travi e pilastri;
- Incremento o ripristino della resistenza a trazione di elementi metallici tesi;
- Incremento della resistenza a fatica di elementi metallici.

1.2 Materiali Compositi Rinforzati

I materiali compositi rinforzati FRP (Fibre Reinforced Polymer) sono realizzati con fibre lunghe di vetro, di carbonio, d'acciaio e aramidiche. Quest'ultime sono immerse in delle matrici polimeriche quali ad esempio resine epossidiche. Queste fibre rappresentano la fase discontinua ed è la componente che fornisce l'effettivo rinforzo. Sono dotate di elevata resistenza a trazione e rigidità assiale. Quest'ultimo è immerso in una fase continua chiamata matrice ed è la componente che garantisce l'adesione agli elementi strutturali garantendo l'efficacia del rinforzo. La matrice ha tre funzioni: la prima è di garantire una distribuzione più uniforme possibile degli stati tensionali delle singole fibre. La seconda è

di fungere da legante tra la componente strutturale da rinforzare e le fibre, così da permettere l'aderenza e quindi la trasmissione degli stati tensionali tra il supporto e le stesse fibre. La terza è di proteggere le fibre.

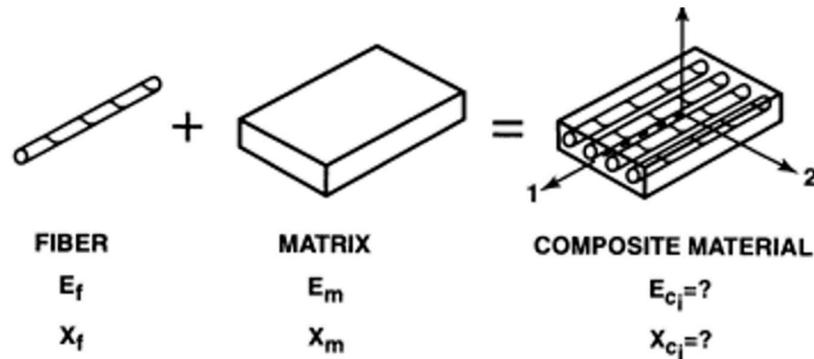


Figura 1.1 Rappresentazione di un generico materiale composito.

1.2.1 Classificazione degli FRP

I materiali compositi FRP possono essere classificati in base a vari criteri tra i quali: la tipologia di fibra usata, la sua matrice polimerica, il processo di produzione e le proprietà finali raggiunte dal materiale.

1. Tipologia di fibra:

- Fibre di vetro, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP). Queste tipologie di fibre sono formate da vetroresina e sono convenzionalmente usate per le applicazioni dove è richiesta una certa resistenza alla corrosione ed all'isolamento termico, come ad esempio strutture marine o condotte;
- Fibre di carbonio, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Le fibre di carbonio sono molto leggere e rigide, garantendo elevate resistenze a basse densità di materiale. Sono utilizzate in campi dove è richiesta alta prestazione meccanica come le componenti automobilistiche o strutturali;
- Fibre di aramide, Aramid Fibre Reinforced Polymer (AFRP). Le fibre di aramide sono molto usate grazie alla loro elevata resistenza meccanica e resistenza agli urti, non a caso sono frequentemente usati nell'uso dei dispositivi di protezione individuale quali caschi e corpi di protezione;
- Esistono anche altre tipologie di fibre come ad esempio di basalto e di rinforzo naturale che sono utilizzate per settori più specifici che richiedono determinate proprietà.

2. Morfologia delle fibre:

- A nastri e fogli, costituite esclusivamente di fibre parallele, di spessori inferiori di 1 mm, a bassa rigidità flessionale;

- A modo di tessuto, costituito di fibre disposte in direzioni diverse, almeno nelle direzioni longitudinale e trasversali, dalle stesse caratteristiche fisiche e dimensionali di quelle a nastri e fogli;
- In reti di fibre, ove le fibre sono raccolte in piccoli mazzi disposti in maniera tale da formare reti a maglia quadrata o rettangolari di dimensioni superiori al centimetro. Anche queste hanno le stesse caratteristiche fisiche e dimensionali delle due morfologie precedentemente menzionate;
- Lamine o lamelle, con fibre disposte in maniera parallela, di spessore maggiore a un millimetro, dotate di grande rigidità flessionale.

3. Matrice polimerica:

- Le matrici polimeriche comunemente usate sono le resine epossidiche, di poliesteri, di poliuretano, di vinilesteri e varie resine termoplastiche. Ogni matrice in base alle rispettive proprietà chimiche garantisce una certa resistenza meccanica, adesione, resistenza chimica e flessibilità.

4. Processo di produzione:

- I materiali compositi possono essere prodotti tramite vari processi di produzione quali: molding a stampo aperto o chiuso, stampaggio a compressione, stampaggio a iniezione, laminazione manuale o automatizzata e avvolgimento filamentare. Ogni tipologia di processo offre vantaggi e svantaggi in termini di velocità di produzione, complessità della forma finale e costo finale del prodotto finito.

5. Proprietà finali:

- I materiali compositi FRP possono anche essere classificati in funzione alle loro proprietà finali quali: resistenza a trazione, resistenza alla fatica, resistenza alla corrosione, densità, conducibilità elettrica, modulo elastico, resistenza alla compressione, etc.

La scelta nell'uso della fibra, della matrice polimerica e del processo di produzione è in funzione delle proprietà specifiche finali che si esigono per un determinato uso.

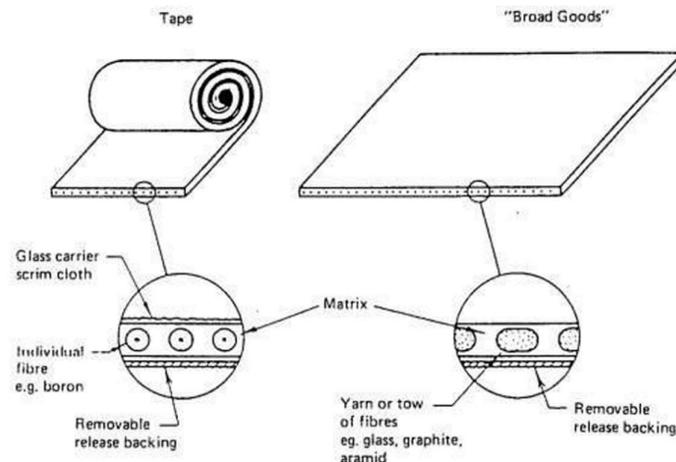


Figura 1.2 Classica fornitura a nastri e lastre di materiali FRP.

1.2.2 Materiale Composito FRCM

Il motivo per cui c'è stato un forte interesse scientifico, soprattutto in Italia, nei confronti delle applicazioni innovative dei compositi fibrorinforzati FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix/Mortar) per la riabilitazione strutturale è stato dettato da due motivi: il primo, per la grande peculiarità del patrimonio edilizio italiano che risulta essere ampiamente variegato soprattutto tra le strutture in muratura e in calcestruzzo armato. Il secondo motivo è dovuto al forte interesse che ha stimolato questo materiale composito nei confronti di numerosi ricercatori operanti in molteplici settori quali: Meccanica delle Strutture e delle Costruzioni, Riabilitazione Strutturale e dell'Ingegneria Sismica.

I compositi fibrorinforzati FRCM sono il risultato dell'accoppiamento di reti realizzati di fibre precedentemente menzionate e di una matrice inorganica a base di malta di calce o di cemento. Questa matrice composta di cemento solitamente Portland, aggregati, additivi ed acqua fornisce la resistenza e la durabilità necessarie per l'applicazione strutturale. Le fibre contribuiscono ad incrementare le resistenze del calcestruzzo, sia a compressione, ma in particolar modo quella a trazione dove la matrice cementizia ne è penalizzata.

1.2.3 Caratteristiche Meccaniche delle fibre

Gli FRP sono un materiale eterogeneo il che vuol dire che in ogni punto non si ha lo stesso materiale. Poiché la scala di applicazione nel campo edilizio risulta essere molto più grande di quello della microstruttura del composito, si può schematizzare il materiale come omogeneo.

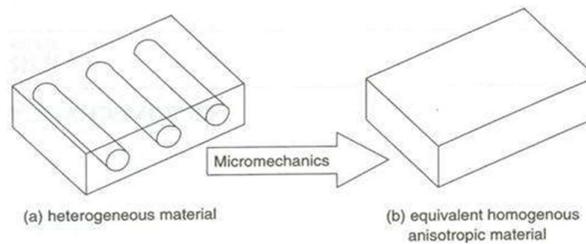


Figura 1.3 Processo micromeccanico del materiale eterogeneo considerato come omogeneo.

Inoltre è anisotropo: non essendo costituito dello stesso materiale nello spazio, anche le sue proprietà meccaniche non sono omogenee in tutte le direzioni. Bisogna precisare che alle fibre in generale vengono affidati solo sforzi di trazione nella direzione delle fibre.

Al fine di eliminare gli effetti dell'anisotropia si possono sovrapporre strati successivi di composito in direzioni diverse delle fibre. È importante considerare che le fibre hanno resistenza a compressione e trazione comunque modeste nelle direzioni ortogonali alle fibre.

In generale i parametri meccanici sono riferiti a una sezione nominale A_f , oppure adottando una larghezza unitaria si può considerare uno spessore nominale t_f , anche definito come spessore di calcolo. In generale l'uso dei materiali FRP in situ (ad esempio nastri o reti) ha

uno spessore nominale che è riferito alle fibre di una certa direzionalità ed è determinata tramite la relazione:

$$t_f = \frac{p_f}{\gamma_{fibre}} \quad (1.1)$$

Il valore p_f fa riferimento al peso delle fibre in una determinata direzione per unità di superficie di rinforzo mentre γ_{fibre} è il peso specifico delle fibre.

Se ad esempio considerassimo un tessuto in fibra di carbonio di peso complessivo $p_f = 300 \text{ g/m}^2$ ed il peso specifico delle fibre γ_{fibre} pari a $1,8 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$, otterremo:

$$t_f = \frac{300}{1,8 \cdot 10^6} = 0,167 \text{ mm}$$

Questo esempio ci permette di capire facilmente quanto poco ingombrante sia un intervento con l'ausilio di materiali compositi.

Considerando inoltre che la sezione degli elementi strutturali resta praticamente invariata come anche il peso.

È importante dire che nel mercato, in generale, si possono trovare composti preformati di spessori nominali fissati e forniti dai produttori comprendenti sia le fibre che la loro matrice.

Metals and Alloys	Density ρ (kg/m ³)	Elastic Modulus E (MPa)	Shear Modulus G (MPa)	Poisson Ratio ν	Tensile Strength σ_{th} (Mpa)	Elongation (%)	Coefficient of Thermal Expansion at 20°C α (°C ⁻¹)	Coefficient of Thermal Conductivity at 20°C λ (W/m°C)	Heat Capacity c (J/kg°C)	Useful Temperature Limit T_{max} (°C)
Steels	7800	205,000	79,000	0.3	400 to 1600	1.8 to 10	1.3×10^{-5}	20 to 100	400 to 800	800
Aluminum Alloy 2024	2800	75,000	29,000	0.3	450	10	2.2×10^{-5}	140	1000	350
Titanium Alloy TA 6V	4400	105,000	40,300	0.3	1200	14	0.8×10^{-5}	17	540	700
Copper	8800	125,000	48,000	0.3	200 to 500		1.7×10^{-5}	380	390	650
Nickel	8900	220,000			500 to 850			70	500	900
Beryllium	1840	294,000		0.05	200		1.2×10^{-5}	150 (20°C) 90 (800°C)	1750 (20°C) 3000 (800°C)	900
Silicon	2200	95,000				5		1.4 (20°C) 3 (1200°C)	750 (20°C) 1200(500°C)	1300

Figura 1.4 Proprietà dei metalli d'impiego comune

Reinforcements	Fiber Diameter $d(\mu\text{m})$	Density $\rho(\text{kg/m}^3)$	Modulus of Elasticity $E(\text{Mpa})$	Shear Modulus $G(\text{Mpa})$	Poisson Ratio ν	Tensile Strength $\sigma_{th}(\text{Mpa})$	Elongation $E(\%)$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda(\text{W/M}^{\circ}\text{C})$	Heat Capacity $c(\text{J/kg}^{\circ}\text{C})$	Useful Temperature Limit $T_{max} (^{\circ}\text{C})$	Price 1993 $(\$/\text{kg})$
"R" glass, high performance	10	2500	86,000		0.2	3200	4	0.3×10^{-5}	1	800	700	14
"E" glass, common applications	16	2600	74,000	30,000	0.25	2500	3.5	0.5×10^{-5}	1	800	700	2
Kevlar 49	12	1450	130,000	12,000	0.4	2900	2.3	-0.2×10^{-5}	0.03	1400		70
"HT" graphite, high strength	7	1750	230,000	50,000	0.3	3200	1.3	0.02×10^{-5}	200 (20 $^{\circ}\text{C}$) 60 (800 $^{\circ}\text{C}$)	800	>1500	70
"HM" graphite, high modulus	6.5	1800	390,000	20,000	0.35	2500	0.6	0.08×10^{-5}	200 (20 $^{\circ}\text{C}$) 60 (800 $^{\circ}\text{C}$)	800	>1500	140
Boron	100	2600	400,000			3400	0.8	0.4×10^{-5}			500	500
Aluminum	20	3700	380,000			1400	0.4		50 (20 $^{\circ}\text{C}$) 7 (800 $^{\circ}\text{C}$)	900	>1000	
Aluminum silicate	10	2600	200,000			3000	1.5					
Silicon carbide	14	2550	200,000			2800	1.3	0.5×10^{-5}			1300	600
Polyethylene		960	100,000			3000					150	

Figura 1.5 Proprietà delle fibre

Resins	Density $\rho(\text{kg/m}^3)$	Elastic Modulus $E(\text{Mpa})$	Shear Modulus $G(\text{Mpa})$	Poisson Ratio ν	Tensile Strength $\sigma_{th}(\text{Mpa})$	Elongation $E(\%)$	Coefficient of Thermal Expansion $\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	Coefficient of Thermal Conductivity $\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$	Heat Capacity $C(\text{J/kg}^{\circ}\text{C})$	Useful Temperature Limit $T_{max} (^{\circ}\text{C})$	Price 1993 $(\$/\text{kg})$
<i>Thermosets</i>											
Epoxy	1200	4500	1600	0.4	130	2 (100 $^{\circ}\text{C}$) 6 (200 $^{\circ}\text{C}$)	11×10^{-5}	0.2	1000	90 to 200	6 to 20
Phenolic	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	1×10^{-5}	0.3	1000	120 to 200	
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8×10^{-5}	0.2	1400	60 to 200	2.4
Polycarbonate	1200	2400		0.35	60		6×10^{-5}		1200	120	
Vinylester	1150	3300			75	4	5×10^{-5}			>100	4
Silicone	1100	2200		0.5	35					100 to 350	
Urethane	1100	700 to 7000			30	100				100	4
Polyimide	1400	4000 to 19,000	1100	0.35	70	1	8×10^{-5}	0.2	1000	250 to 300	
<i>Thermoplastics</i>											
Polypropylene (pp)	900	1200		0.4	30	20 to 400	9×10^{-5}		330	70 to 140	
Polyphenylene sulfone (pps)	1300	4000			65	100	5×10^{-5}			130 to 250	
Polyamide (pa)	1100	2000		0.35	70	200	8×10^{-5}		1200	170	6
Polyether sulfone (pes)	1350	3000			85	60	6×10^{-5}			180	25
Polyetherimide (pei)	1250	3500			105	60	6×10^{-5}	0.2		200	20
Polyether-etherketone (peek)	1300	4000			90	50	5×10^{-5}	0.3		140 to 250	96

Figura 1.6 Proprietà delle resine

Le tabelle (Figura 1.4, 1.5 e 1.6) rappresentano il confronto tra le proprietà delle fibre e delle matrici con dei metalli di impiego comune. Si può notare che le fibre di rinforzo presentano una grande resistenza a trazione a differenza dei metalli, nonostante i materiali FRP abbiano una densità circa tre volte più piccola. Sono materiali che a differenza dei metalli hanno: basso modulo di rigidezza, deformabilità limitate e ridotte capacità di dilatazione termica.

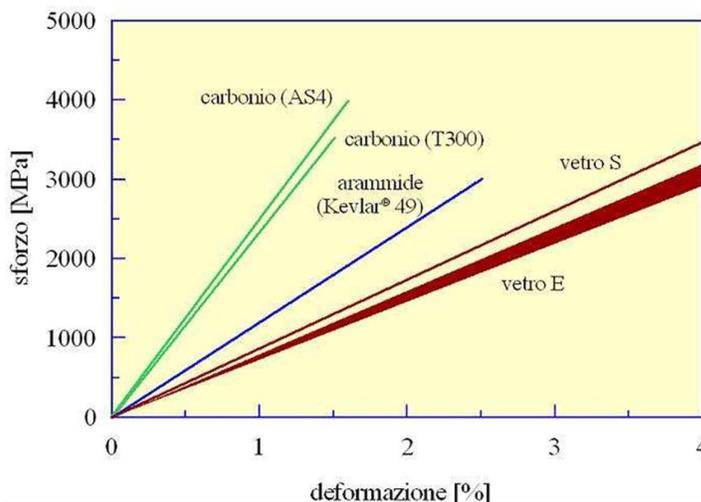


Figura 1.7 Legame costitutivo a trazione degli FRP impiegati in campo edilizio.

Le proprietà meccaniche del composito sono valutate secondo le due relazioni:

$$f_{fu} = \frac{F_{fu}}{A_{fib}} \quad (1.2)$$

$$E_f = \frac{F_{fu}}{A_{fib} \cdot \varepsilon_{fu}} \quad (1.3)$$

Di cui i valori corrispondono a:

f_{fu} = resistenza a trazione

F_{fu} = massima forza di trazione di un rinforzo

E_f = modulo elastico a trazione in direzione delle fibre

ε_{fu} = deformazione di rottura

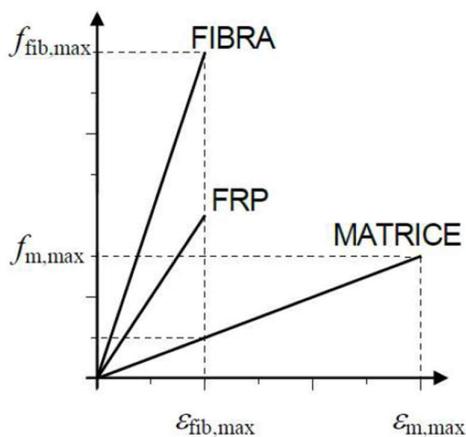


Figura 1.8 Legame costitutivo delle fibre, della matrice e della loro unione data dalla FRP.

Analizzando i legami costitutivi (Figura 1.8) tra le fibre, la matrice e il corrispondente materiale composito, si può notare che il materiale composito in realtà abbia una rigidezza più bassa di quella della fibra a causa del basso modulo elastico della resina (Figura 1.6). Inoltre la rottura del materiale avviene in corrispondenza $\varepsilon_{fib,max}$ ovvero la deformazione massima delle fibre e quindi la sua rottura. Questo avviene perché secondo la Legge di Hooke il materiale più rigido è quello che assorbe il maggiore sforzo e nel nostro caso specifico è proprio la fibra che allo stesso tempo è anche la componente con il modulo di deformazione minore.

Nella (Figura 1.9) viene fornita un'interessante vista sulla resistenza specifica dei principali materiali compositi in funzione della temperatura. La resistenza specifica è definita come la resistenza divisa per la densità, σ_{rup} / ρ .

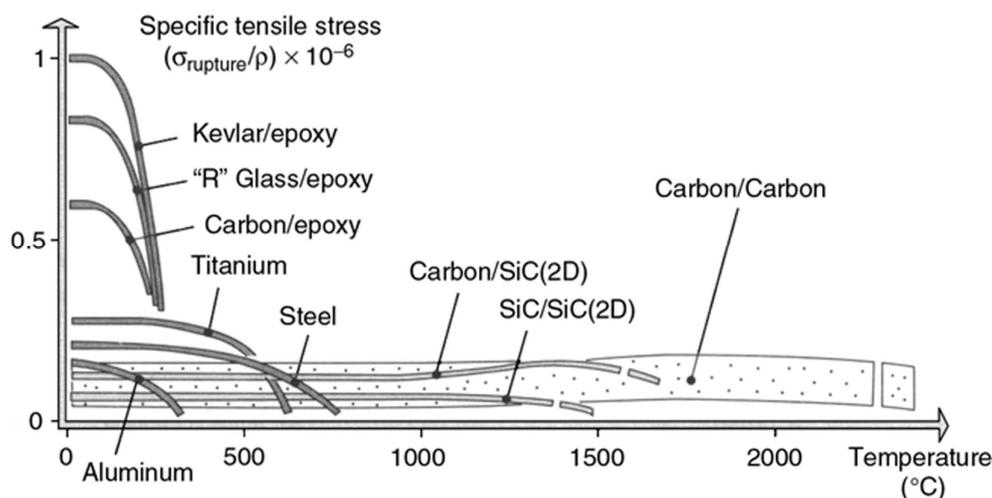


Figura 1.9 Resistenza specifica dei materiali compositi e metallici in funzione della temperatura T.

1.2.4 Matrice

Le matrici più comunemente usate per i compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti e termoplastiche. Le resine sono disponibili sotto forma parzialmente polimerizzata. La loro consistenza è liquida o pastosa a temperatura ambiente. Per polimerizzare necessitano di essere miscelate con determinati reagenti, i quali permettono una reazione di reticolazione. Quest'ultima permette la formazione di macromolecole reticolate lunghe e quindi di ottenere come risultato finale un solido vetroso. Hanno una bassa viscosità allo stato fluido e questo permette una relativa facilità di impregnazione delle fibre. Inoltre gode di ottime proprietà adesive, di una buona resistenza agli agenti chimici e dell'assenza di una temperatura di fusione. Lo svantaggio è derivante dalla bassa temperatura di transizione vetrosa T_g , nella quale il polimero passa da uno stato vetroso a quello gommoso (Figura 1.10), che ne limita il campo di utilizzo. Implica una

modesta tenacità che induce a un comportamento fragile e ad una elevata sensibilità all'umidità, in particolar modo durante l'applicazione sulla struttura.

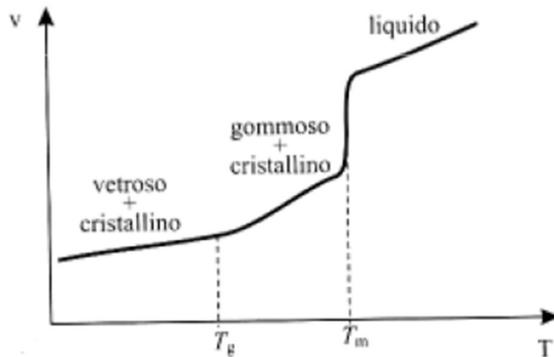


Figura 1.10 Comportamento di un materiale polimerico in funzione della temperatura e del volume specifico.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche, seguite dalle resine poliesteri e vinilesteri.

Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici, inoltre hanno ottime proprietà adesive.

Le resine poliesteri sono caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto a quella delle epossidiche ma sono notevolmente versatili con elevate reattività. Le resistenze meccaniche e le proprietà adesive sono in generale più basse rispetto a quelle epossidiche.

In genere le resine utilizzate come matrice degli FRP devono possedere diverse caratteristiche, tra cui:

- Buona adesione al rinforzo fibroso per garantire un trasferimento efficace del carico;
- Resistenza alla corrosione e agli agenti chimici per garantire la durabilità del composito ed eventualmente delle armature della componente strutturale in calcestruzzo armato rinforzato;
- Buona proprietà meccaniche come: resistenza, rigidità e duttilità al fine di soddisfare i requisiti strutturali dell'applicazione specifica;
- Stabilità dimensionale e resistenza alla deformazione termica per garantire la stabilità del composito sotto varie condizioni di carico e temperatura.

Particolari accortezze sono necessarie durante il processo di produzione per soddisfare una certa compatibilità tra la matrice polimerica e le fibre per il materiale FRP scelto.

1.3 Normative per l'uso degli FRP

Le istruzioni sull'uso dei materiali fibrorinforzati sono studiate ed emanate dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), più precisamente dalla "Commissione di Studio per la Predisposizione e l'Analisi di Norme Tecniche" relative alle costruzioni. Le prime normative che hanno interessato l'uso dei materiali compositi di rinforzo sono state emanate tramite l'Ordinanza P.C.M. 3274 del 20 Marzo del 2003. L'anno successivo è stato emesso il

documento normativo di riferimento, precisamente il “CNR DT 200-201/2004” dove all’interno di questo documento vi sono scritte tutte le specifiche inerenti all’uso dei materiali FRB sulle strutture in calcestruzzo armato, muratura e in legno. Il 03 Maggio del 2005 è stato emanato l’OPCM 3431 che fa riferimento alle istruzioni CNR-DT 200/2004 sui criteri adottati per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico con i materiali FRP. Nello stesso anno è stato emanato un altro documento normativo di riferimento, ovvero la “CNR DT 202/2005”, dove vi sono presenti le specifiche per l’uso dei materiali fibrorinforzati applicati sulle strutture in acciaio. Una normativa importante da sottolineare è la Circolare del Ministero per i Beni e le Attività Culturali del 05 Giugno 2007: *“Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni.”* dove viene riconosciuta come operazione tecnica consentita per il rinforzo strutturale di edifici storici e di importanza culturale quella effettuata con i materiali compositi. In generale, nella lettura di tutti i documenti si evidenzia l’uso degli FRP per il rinforzo al taglio delle travi e i pilastri in conglomerato cementizio armato e per il confinamento degli elementi strutturali. Inoltre si sottolineano le caratteristiche di questo materiale in grado di esaltare le qualità delle strutture, in particolar modo la loro duttilità e resistenza.

All’interno delle attuali Norme Tecniche delle Costruzioni del 2018 [1] non vi sono specifiche al riguardo dell’uso dei materiali fibrorinforzati. Il legislatore scrive solo al capitolo 8.6 “Materiali” dei metodi di consolidamento con l’avvalersi di materiali non tradizionali, infatti scrive la suddetta frase: *« gli interventi sulle strutture esistenti devono essere effettuati con i materiali previsti dalle presenti norme; possono altresì essere utilizzati materiali non tradizionali, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità, ovvero quelle elencati al cap. 12 »* Oggi giorno vi sono altri tre documenti normativi di riferimento per il consolidamento strutturale mediante gli FRP ovvero: “CNR – DT 205/2007”, “DT R1/2013” e “DT 218/2018, revisionato nel 2020”. Lo scopo ultimo dei documenti è di fornire delle istruzioni orientative per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento strutturale mediante l’uso dei materiali compositi fibrorinforzati.

1.3.1 Requisiti di Progetto

Per la progettazione [2] dei materiali fibrorinforzati è necessario che vengano soddisfatti tutti i requisiti in termini di resistenza, allo stato di esercizio e di durabilità nel tempo. Come descritto nei precedenti capitoli, è importante che le fibre siano disposte in maniera tale da essere sottoposte ai soli sforzi di trazione senza che vengano sollecitate a tensioni di compressione. Il rinforzo deve garantire una vita utile pari o superiore a quella prevista e compatibile con quella della struttura. Inoltre, è importante che l’intervento di rinforzo non vada a ridurre le prestazioni della struttura rinforzata sotto quella del livello minimo previsto. Per assicurare la durabilità dell’interventi si considerano vari fattori tra i quali:

- Ambiente di utilizzo: valutare l’ambiente in cui verrà usato il rinforzo, compresi i fattori come la temperatura, l’umidità, l’esposizione a possibili sostanze chimiche;

- Destinazione d'uso della struttura: in funzione dei vari carichi statici applicati alla struttura ed eventuali carichi dinamici;
- Proprietà di isolamento: se richiesto, valutare le proprietà di isolamento termico, elettrico o acustico del materiale fibrorinforzato;
- Compatibilità con altri materiali: assicurarsi che le fibre abbiano una buona compatibilità e affinità chimica con gli altri materiali per evitare problemi di aderenza o comportamento meccanico incompatibile;
- Durabilità e resistenza: assicurarsi che la componente delle fibre abbia la durabilità e resistenze necessarie per coprire tutta la sua vita utile;
- Costi: valutazione dei costi associati all'uso dei materiali fibrorinforzati, comprensivo dei costi dei materiali stessi e della loro messa in opera, quelli di produzione e di manutenzione durante il ciclo di vita del prodotto.

Inoltre, l'intervento non deve essere solo finalizzato al raggiungimento di un appropriato livello di sicurezza della costruzione, ma deve garantire anche:

- Integrazione della struttura senza che venga trasformata;
- Rispetto di concezione e tecniche originarie della costruzione;
- Non-invasività;
- Reversibilità e rimovibilità ove possibile;
- Minimizzazione dell'intervento.

Questi cinque aspetti elencati sono di fondamentale importanza soprattutto per le strutture appartenenti al patrimonio artistico e culturale che devono essere sottoposti ad interventi di rinforzo strutturali atti a conservare l'edificio.

1.3.2 Progetto per il Rinforzo

Per il progetto di rinforzo [3] tramite i materiali fibrorinforzati si fa riferimento come precedentemente menzionato a tutti i documenti normativi di riferimento emessi dal Consiglio Nazionale delle Ricerche. I valori di calcolo delle caratteristiche meccaniche dei rinforzi con l'uso di materiali compositi si determinano con l'ausilio dei coefficienti parziali. Devono essere verificate le seguenti condizioni: Stato Limite di Esercizio (SLE) e Stato Limite Ultimo (SLU):

$$E_d \leq R_d \quad (1.4)$$

Con E_d che corrisponde al valore di progetto delle azioni e R_d il valore di progetto delle resistenze. Queste due componenti fanno riferimento alla generica sollecitazione oggetto di studio per la capacità dello stato limite di riferimento. I valori di calcolo devono essere moltiplicati se si tratta di azioni di progetto, divisi se al contrario si fa riferimento alle resistenze di progetto. I coefficienti parziali di sicurezza sono scelti in funzione dello stato limite da verificare e alla natura del carico.

Il valore di calcolo, X_d , della generica proprietà di resistenza o di deformazione di un sistema di rinforzo in FRP è espresso mediante una relazione del tipo:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (1.5)$$

Dove η è un opportuno fattore di conversione che tiene conto di specifici problemi, X_k è il valore caratteristico della proprietà in questione e γ_m è il fattore parziale del materiale che tiene conto della corrispondente applicazione. Quest'ultimo è pari a 1,5 per gli Stati Limite Ultimi (SLU); 1,0 per gli Stati Limite di Esercizio.

Il fattore di conversione η si ottiene come prodotto del fattore di conversione ambientale η_a , il fattore di conversione relativo ad effetti di lunga durata η_l .

La capacità resistente di calcolo, R_d , è esprimibile come:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{R,d}} R\{X_{d,i}; a_{d,i}\} \quad (1.6)$$

La $R\{\cdot\}$ è un'opportuna funzione riconducibile allo specifico modello meccanico considerato (ad esempio quello per la flessione o per il taglio, per l'ancoraggio, etc.) e $\gamma_{R,d}$ è un coefficiente parziale che tiene conto delle rigidzze insite nel suddetto modello, il quale se non espressamente indicato è assunto pari ad 1. Gli argomenti della funzione $R\{\cdot\}$, ovvero $X_{d,i}$ e $a_{d,i}$ corrispondono: $X_{d,i}$ ai valori di calcolo dei materiali/prodotti usati per il rinforzo, oppure dei materiali preesistenti, mentre $a_{d,i}$ ai valori nominali riferiti ai parametri geometrici chiamati in causa nel modello. Per l'elemento rinforzato con il materiale FRP non può essere considerato l'incremento della resistenza di progetto superiore al 60% rispetto al medesimo elemento strutturale se non subisse rinforzo. Queste limitazioni non sono applicate per le azioni eccezionali e sismiche.

Per gli Stati Limite Ultimo, possibili valori da attribuire ai coefficienti parziali γ_m , che nel caso dei materiali e dei prodotti di composito fibrorinforzati vengono denotati con γ_f , si distinguono in casi in cui il collasso avviene per rottura o distacco del composito (Figura 1.11).

Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione tipo A	Applicazione tipo B
Rottura	γ_f	1.10	1.25
Distacco	$\gamma_{f,d}$	1.20	1.50

Figura 1.11 Coefficienti parziali γ_m per i materiali ed i prodotti.

Dove si definiscono applicazioni di tipo A i sistemi completi di rinforzo di cui sono certificati sia il materiale che il sistema completo applicato. Le applicazioni di tipo B sono sistemi in cui è certificato solo il materiale. Il motivo per cui le seconde applicazioni sono molto più penalizzanti di quelle di tipo A è dovuto proprio all'incertezza del sistema applicato.

Inoltre per gli Stati Limite Ultimo ci sono vari valori suggeriti per il coefficiente parziale γ_m dei diversi modelli di resistenza (Figura 1.12).

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Figura 1.12 Coefficienti parziali $\gamma_{R,d}$

Per la progettazione del rinforzo si considera la resistenza che i materiali FRP incrementano, ovvero la trazione che si calcola con la seguente formula:

$$f_{fRd} = (\eta_a \cdot \eta_I) \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (1.7)$$

Al quale corrispondono

f_{fRd} = resistenza a trazione di progetto

f_{fk} = resistenza a trazione caratteristica

γ_f = coefficiente parziale di sicurezza del materiale

η_a = fattore di conversione ambientale

η_I = fattore di conversione legato agli effetti di durata

Le proprietà meccaniche di alcuni sistemi di FRP degradano in presenza di determinate condizioni ambientali quali: ambiente alcalino, umidità (in particolare acqua e soluzioni saline), temperature estreme, cicli termici, cicli di gelo e disgelo e radiazioni ultraviolette (UV). Questi effetti sono considerati mediante il fattore di conversione ambientale η_a (Figura 1.13).

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

Figura 1.13 Fattore di conversione ambientale η_a per varie fibre/resine e la rispettiva condizione di esposizione.

Inoltre le proprietà meccaniche (quali la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo elastico normale) dei materiali FRP degradano per l'effetto di fenomeni reologici, ovvero: la viscosità, il rilassamento e la fatica.

Nei materiali FRP la fatica statica, la viscosità ed il rilassamento dipendono dalle proprietà della matrice e delle fibre di rinforzo. La presenza delle fibre diminuisce la viscosità della matrice. Tali fenomeni sono più pronunciati quando il carico è applicato trasversalmente alle fibre o quando il composito è caratterizzato da una bassa percentuale in volume di fibre. Il rischio di innesco del fenomeno della fatica può essere mitigato assicurando, in condizioni di esercizio, un livello tensionale adeguatamente basso. Al fine di evitare la rottura dei materiali fibrorinforzati sotto tensioni prolungate nel tempo, o eventualmente sotto condizioni di cicli di carico, si considerano questi fattori all'interno del fattore di conversione η_I (Figura 1.13).

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	η_I (SLE)	η_I (SLU)
Quasi permanente e/o ciclico (viscosità, rilassamento e fatica)	Vetro / Vinilestere o epossidica	0.30	1.00
	Arammidica / Vinilestere o epossidica	0.50	1.00
	Carbonio / Vinilestere o epossidica	0.90	1.00

Figura 1.13 Fattore di conversione per effetti di lunga durata η_I per vari sistemi di FRP.

Inoltre i materiali compositi fibrorinforzati sono particolarmente sensibili all'esposizione delle alte temperature, per cui è necessaria la verifica in caso di incendio. La struttura deve verificare anche in assenza di rinforzo con le azioni previste dalle NTC 2018.

Infine, qualora si verificassero le condizioni di elasticità lineare degli sforzi, nella resistenza di calcolo f_{fRd} corrisponde la deformazione di rottura di calcolo, ovvero:

$$\varepsilon_{fRd} = \frac{f_{fRd}}{E_f} = (\eta_a \cdot \eta_I) \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \quad (1.8)$$

Nel quale E_f corrisponde al valore medio del modulo elastico del materiale FRP ed ε_{fk} alla deformazione di rottura caratteristica.

1.3.3 Delaminazione del Rinforzo

La delaminazione è il fenomeno che rappresenta molto spesso il meccanismo di crisi dominante delle strutture che hanno subito un intervento di rinforzo con l'uso dei materiali compositi fibrorinforzati. La delaminazione consiste nel distacco del materiale di rinforzo dal supporto, quali: calcestruzzo, legno, acciaio e muratura. Questo avviene perché gli stati tensionali e deformativi sono molto inferiori a quelli dello Stato Limite Ultimo a rottura del materiale della componente strutturale che deve essere sottoposta a rinforzo. Di conseguenza, è necessario adottare particolare attenzione alle sollecitazioni resistenti degli elementi strutturali che devono essere determinati in funzione alle formule (1.7) e (1.8), o eventualmente se inferiori, ai limiti dipendenti dal fenomeno della delaminazione.

La deformazione ultima viene calcolata nel seguente modo:

$$\varepsilon_{fd} = \min \{ \varepsilon_{fRd}; \varepsilon_{d,db} \} \quad (1.9)$$

Dove $\varepsilon_{d,db}$ è la deformazione del rinforzo alla quale corrisponde la sua delaminazione dal supporto, detta anche dilatazione di delaminazione.

Una volta stabilite le opportune relazioni di calcolo e note le caratteristiche meccaniche dell'elemento strutturale da rinforzare, le resistenze di calcolo dell'elemento rinforzato sono determinate tramite l'utilizzo di un opportuno modello di calcolo meccanico. Le sollecitazioni resistenti, al fine di considerare le incertezze del modello di calcolo, vengono ridotte del rispettivo coefficiente parziale γ_{Rd} in funzione della resistenza da verificare (Figura 1.14).

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1.00
Taglio/Torsione	1.20
Confinamento	1.10

Figura 1.14 Coefficiente parziale di modello γ_{Rd}

CAPITOLO 2

IMPIEGO DEI MATERIALI COMPOSITI FRP NEL RINFORZO STRUTTURALE

2.1 Premessa

Come è stato citato anche nel precedente capitolo, i materiali compositi fibrorinforzati godono di una notevole resistenza a trazione, la quale permette di essere utilizzata nelle varie strutture. Ad esempio, le strutture in calcestruzzo armato hanno un'elevata resistenza a compressione data dal conglomerato cementizio e a trazione date dalle armature. A volte le strutture in calcestruzzo armato per varie cause, tra le quali la corrosione delle armature o una cattiva progettazione, potrebbero non soddisfare i requisiti richiesti dalle normative tecniche. A questo fine per soddisfare tali richieste, si fa ricorso all'uso di materiali FRP.

Queste tecniche di intervento che sfruttano le proprietà dei materiali fibrorinforzati permettono di preservare le capacità strutturali dell'edificio, a volte anche incrementandole, e di poter essere usate anche su materiali diversi dal calcestruzzo armati, quali acciaio, legno e muratura.

Anche le strutture realizzate con i materiali appena citati possono presentare molteplici problemi.

Ad esempio le strutture in acciaio presentano il problema della corrosione che induce a una riduzione delle sue capacità strutturali. Questi ammaloramenti possono essere compensati con l'uso dei materiali FRP.

In egual modo può essere riproposto questo intervento per le strutture in legno, il quale molto spesso presenta problemi legati ai difetti di crescita delle piante dal quale si ricava il materiale.

In sostanza l'impiego degli FRP permette di prolungare la vita utile in esercizio delle strutture, in particolare quelle di importanza storica e patrimoniale, senza necessariamente doverle demolire o effettuare interventi troppo invasivi.

In questo capitolo vedremo vari esempi e sperimentazioni dell'impiego dei materiali compositi FRP nel rinforzo di strutture composte di diversi materiali e ciò che comporta da un punto di vista delle resistenze strutturali.

2.2 Travi in c.a. con rinforzo NSM in CFRP

Al fine di capire quanto sia valido ed efficace un rinforzo di un elemento strutturale con l'ausilio dei materiali fibrorinforzati, viene mostrata e commentata la sperimentazione del rinforzo tramite delle barre di acciaio rinforzate con materiale in CFRP di travi in calcestruzzo armato, la quale è stata svolta dai seguenti autori: Capozucca R. e Bossoletti S. nel 2015.[4] Le prove sono state condotte presso la Sezione Strutturale DICEA dell'Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia. Lo studio ha trattato delle risposte dinamiche di travi a differenti scale con un i rinforzati precedentemente menzionati.

La sperimentazione è stata condotta su due travi reali e i loro rispettivi modelli di trave. La prima denominata B0, la quale è una trave rinforzata con delle barre d'acciaio con il rispettivo modello di trave BM0. La seconda denominata B1, la quale è una trave rinforzata con delle barre di acciaio e aste rettangolari montate in prossimità della superficie (Near Surface Mounting, NSM) in CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers, materiali plastici rinforzati in fibra di carbonio) e il suo rispettivo modello di trave BM1. Tutte le travi a differenti scale sono state sottoposte a prove statiche a diversi livelli di flessione per creare danni crescenti e successivamente controllate tramite vibrazioni libere. L'involuppo delle funzioni di risposta in frequenza (Frequency Response Functions, FRFs) si correlano e mostrano il grado di danno alle due tipologie di travi.

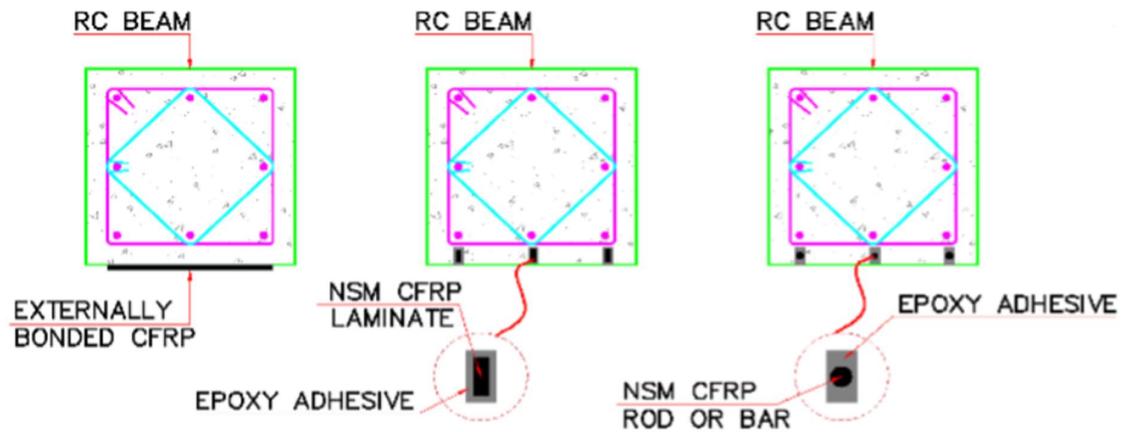


Figura 2.1 Esempio di tecnica di rinforzo del CFRP [5].

Questa sperimentazione sottopone le travi diversamente rinforzate agli stessi carichi applicati in maniera graduale in due punti ad una stessa distanza dal centro della trave.

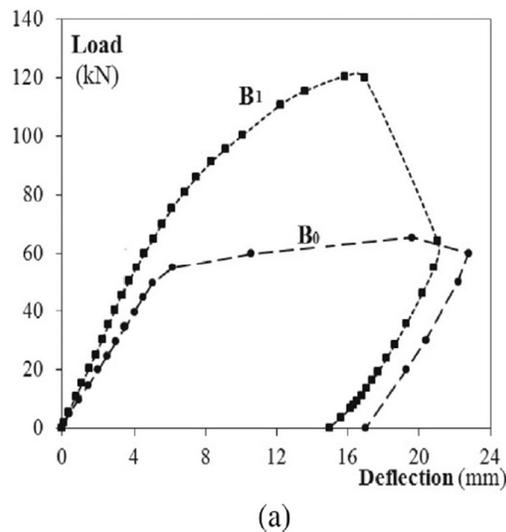


Figura 2.2 Diagrammi sforzo-deflessione che mette a confronto le due travi a scala reale.

Si nota molto bene dal diagramma (Figura 2.2, a) che la trave B1 rinforzata con barre in materiale fibrorinforzati mostra una resistenza molto maggiore a differenza della B0. Inoltre si è deformata a carichi più alti. È importante dire che la trave B1 si sarebbe potuta deformare maggiormente ma a causa della delaminazione del materiale la sperimentazione è stata parzialmente compromessa. Si nota inoltre dalla foto (Figura 2.2, b) il momento della rottura della trave.

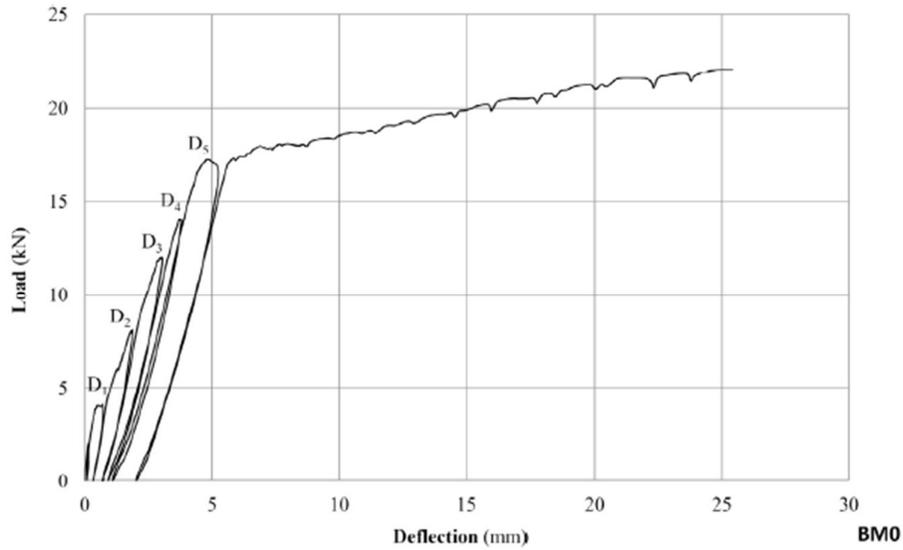
Successivamente le due travi sono state sottoposte a prove di vibrazione libera con il fine di ottenere parametri dinamici sperimentali a differenti condizioni di danneggiamento. I valori di frequenza diminuiscono all'incrementare del carico perché si ha un aumento del grado di danno che comporta una riduzione della rigidità della trave.

Figura 2.3 Valori di frequenza e le sue variazioni (%) per la trave non rinforzata BM0.

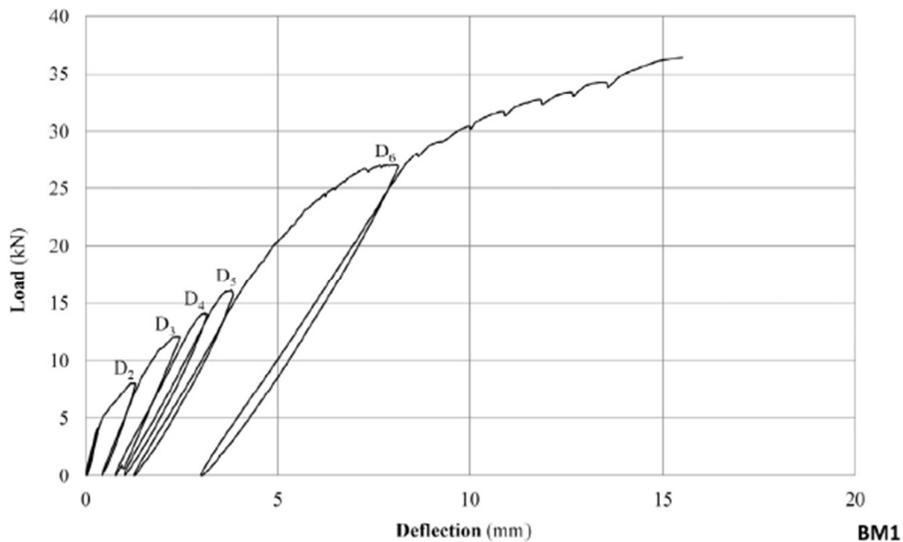
Damage	P	f_1	Δf_1	f_2	Δf_2	f_3 (Hz)	Δf_3
degree	(kN)	(Hz)	$\frac{\Delta f_1}{f_1^{D_0}}$ (%)	(Hz)	$\frac{\Delta f_2}{f_2^{D_0}}$ (%)	(Hz)	$\frac{\Delta f_3}{f_3^{D_0}}$ (%)
D_0	0.0	384.2	0.00	1000.0	0.00	1803.3	0.00
D_1	4.0	380.0	1.1	992.8	0.7	1794.4	0.5
D_2	8.0	337.1	12.3	915.0	8.5	1711.1	5.1
D_3	12.0	319.9	16.7	865.8	13.4	1626.7	9.8
D_4	14.0	313.7	18.3	841.7	15.8	1580.0	12.4
D_5	16.0	311.2	19.0	830.4	17.0	1557.8	13.6
D_6	36.44	260.3	32.2	732.7	26.7	1390.0	22.9

Figura 2.4 Valori di frequenza e le sue variazioni (%) per la trave rinforzata BM1.

Nelle tabelle (Figura 2.3 e 2.4) sono contenuti i valori medi di frequenza registrati durante la prova dinamica ad ogni gradino di carico. Le variazioni sono date dal rapporto della risposta che ha in frequenza la trave pre-carico e post-carico. Si nota chiaramente che il modello di trave B1 abbia una variazione dei valori di frequenza inferiore a quelli registrati dalla trave non rinforzata, così dimostrando la validità e l'efficacia che ha un intervento di rinforzo con i materiali compositi CFRP tramite la tecnica NSM per le travi in calcestruzzo armato.



(a)



(b)

Figura 2.5 Diagramma carico-deformazione dei modelli di trave sotto azioni di carico flessionale alle fasi D_i fino a rottura; (a) trave BM0; (b) trave BM1.

Possiamo quindi concludere affermando: le travi rinforzate con metodo NSM con materiali CFRP mostrano una maggiore capacità strutturale con una riduzione della deflessione e un aumento della rigidità. Inoltre, la rottura delle travi avviene a causa della compressione del calcestruzzo ancor prima della delaminazione delle barre in materiale fibrorinforzato. Infine, le travi rinforzate presentano una variazione dei valori di frequenza in percentuale minori di quelle delle travi senza rinforzo.

2.3 Travi in c.a. con rinforzo di lamine in CFRP

La seguente prova di laboratorio, a differenza di quella precedentemente menzionata, segue uno studio sperimentale di un modello di trave rinforzata con dei fogli di CFRP. La trave oggetto di studio è stata sottoposta ad azioni statiche e dinamiche, inoltre è stata condotta da: Capozucca R. e Nilde Cerri M. nel 2002 [6], presso l'Università degli Studi di Ancona, Facoltà di Ingegneria, Italia.

Nella seguente prova si fa uso delle lastre in fibra di carbonio. Questo tipo di applicazione risulta essere molto comodo per gli interventi di rinforzo strutturale di edifici esistenti, grazie al fatto che risulta essere piuttosto veloce da eseguire con un miglioramento delle caratteristiche di resistenza della stessa trave. L'iter e i vari passaggi effettuati per ottenere i dati sperimentali sono i seguenti: raccolta di dati iniziali della salute delle due travi (Figura 2.6) prima di essere sottoposte ad azioni di carico. Applicazione di azioni che portano i modelli di trave ad uno stato di fessurazione permanente sulla zona tesa della sezione. Successivo rinforzo delle travi danneggiate rispettivamente con una lastra (B1) e due lastre (B2) in CFRP (Figura 2.7). Infine in funzione del carico e della deformazione si individua il comportamento delle due travi non rinforzate e quelle dopo il loro successivo rinforzo.

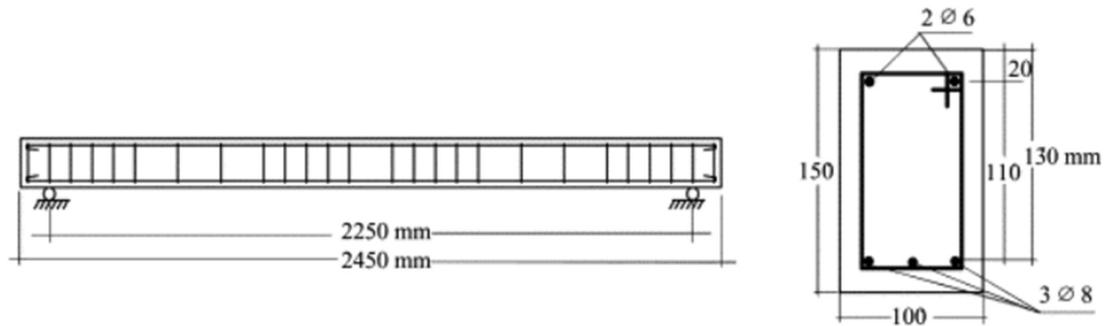


Figura 2.6 Modello di trave in c.a. non rinforzata.

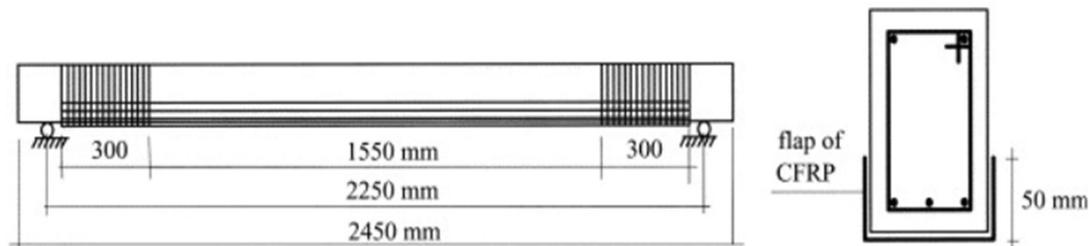


Figura 2.7 Modello di trave in c.a. con rinforzata con lastre CFRP.

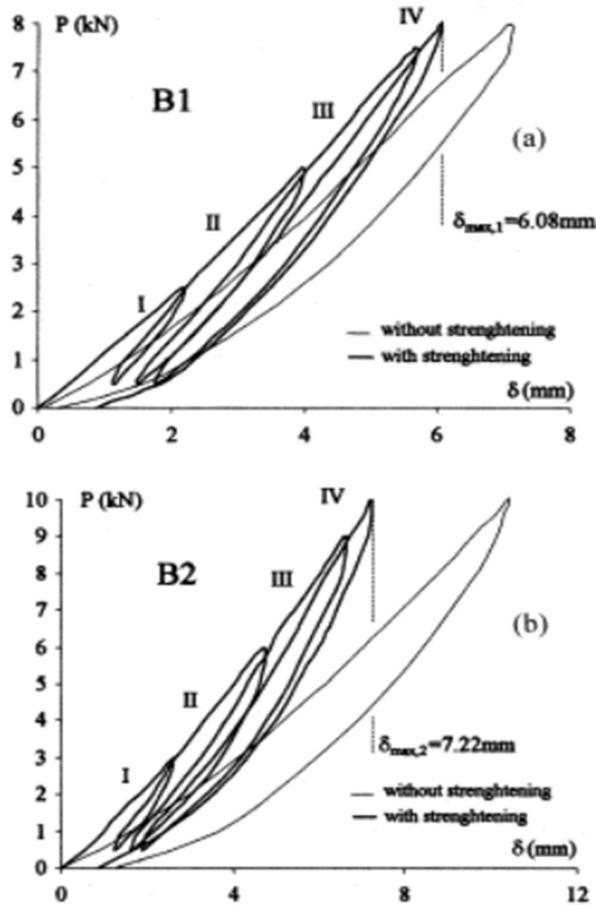


Figura 2.8 Diagrammi in funzione del carico P e della deformazione δ per: (a) modello di trave B1; (b) modello di trave B2 entrambi con e senza rinforzo.

Si può osservare (Figura 2.8) che le travi rinforzate con le lastre CFRP presentano dei valori nettamente minori di spostamento sotto le azioni di carico rispetto le medesime travi senza rinforzo. Infatti, nel caso della trave B1 si nota che per il carico massimo $P=8$ KN si ottiene una riduzione dello spostamento pari al 13,5%; nel caso B2, per il carico massimo $P=10$ KN, la riduzione di spostamento è stata pari al 30%.

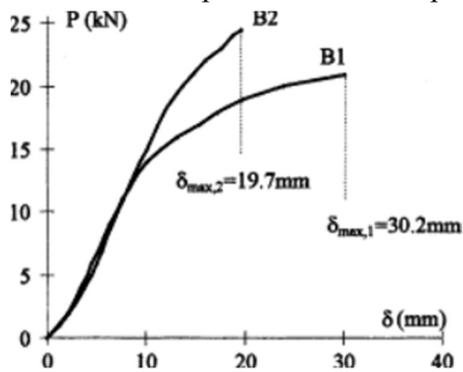


Figura 2.9 Diagramma in funzione del carico P e della deformazione δ all'aumentare del carico di flessione fino a rottura.

Il diagramma $P-\delta$ (Figura 2.9) mette a confronto i due modelli di trave rinforzati con le lastre CFRP e soggetti a carico monotono fino a rottura. Nel caso del modello di trave B2,

rinforzata con due strati di CFRP, il diagramma $P-\delta$ evidenzia una resistenza maggiore rispetto al modello B1 rinforzato con una singola lastra, ma presentando una duttilità ridotta.

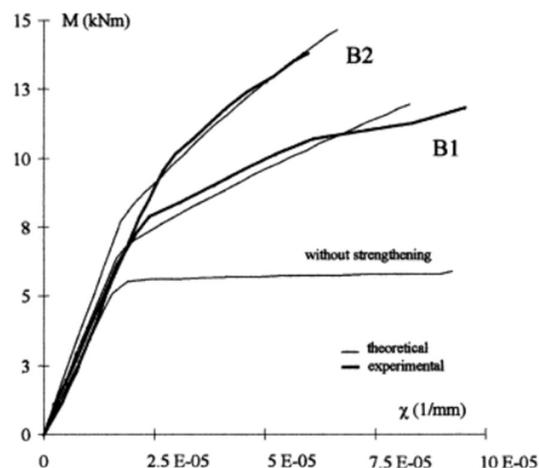


Figura 2.10 Confronto tra diagrammi del momento sollecitante M e la curvatura ultima χ teorici e sperimentali.

Si può notare dal grafico (Figura 2.10) che la trave B2 rinforzata con due strati di CFRP presenta un valore di curvatura ultima inferiore rispetto alla curvatura ultima del modello B1.

In conclusione si può affermare: il rinforzo delle travi danneggiate mediante lastre in CFRP aumenta la capacità di resistenza riducendo la deflessione. Inoltre, dai dati sperimentali, la rigidezza a flessione delle travi rinforzate risulta essere incrementata pure rispetto alle stesse travi in c.a. non danneggiate. Infine il modello B2 rinforzato con due strati di lastre CFRP presenta una maggiore resistenza rispetto alla B1 ma mostra minore duttilità.

Quindi si può affermare che l'ausilio dei materiali fibrorinforzati nel campo del rinforzo delle componenti strutturali di un edificio in calcestruzzo armato siano efficaci.

2.4 *Analisi sperimentale di rinforzo di trave in acciaio per danni da corrosione con CFRP*

La seguente sperimentazione riguardante l'indagine numerica del rinforzo di travi in acciaio da fenomeni di corrosione, con l'ausilio di lamine in CFRP, è stata svolta dai ricercatori Silwal P.K., Parvin A. e Alhusban M. nel 2024. [7] Queste prove sono state condotte presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Toledo, USA.

La sperimentazione si dimostra essere un interessante che indaga sull'effetto della corrosione sulla resistenza a flessione delle travi in acciaio, sottoposte a carichi statici, e la sua resistenza dopo un successivo ripristino con l'uso di lastre in CFRP.

La corrosione è stata introdotta in questa prova come l'assottigliamento della flangia inferiore (Figura 2.11) che ha ridotto lo snervamento e la capacità di carico ultima della trave

stessa. Il livello del danno da corrosione è stato simulato con un graduale assottigliamento della flangia inferiore fino ad un 20%.

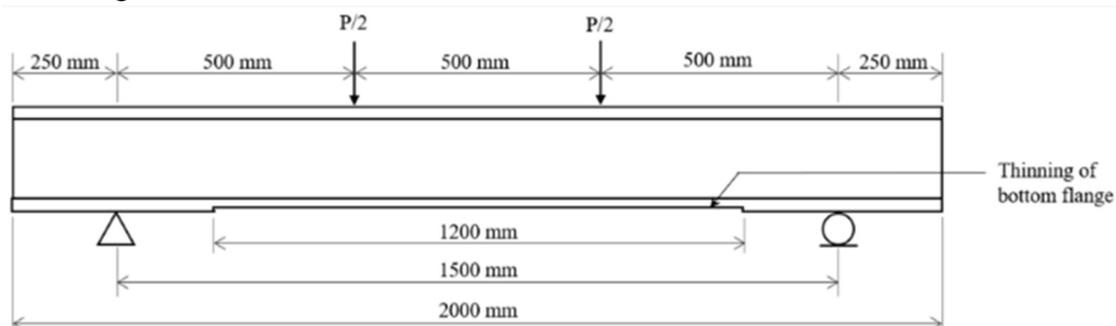


Figura 2.11 Trave sottoposta ad assottigliamento in corrispondenza dell'ala inferiore.

Si può notare (Figura 2.12) come la resistenza al carico della trave maggiormente corrosa, ovvero quella denominata D20, sia più bassa a differenza di quella non corrosa (CV00).

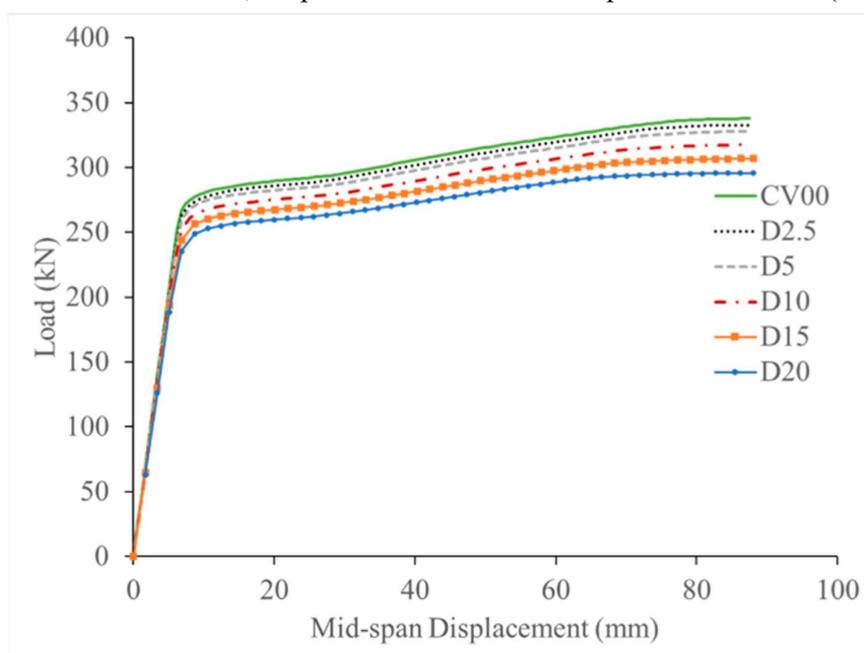


Figura 2.12 Comportamento del carico rispetto allo spostamento a metà campata delle travi in acciaio corrose.

Dopo questa fase le travi sono state rinforzate con strati successivi di fogli CFRP alla faccia inferiore dell'ala, coprendo così l'area danneggiata (Figura 2.13).

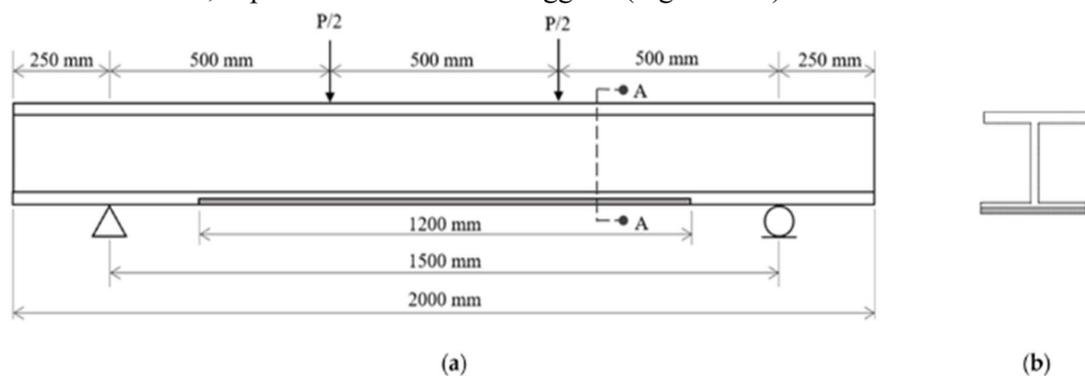


Figura 2.13 Rinforzo in CFRP in travi soggette ad assottigliamento dell'ala inferiore: (a) prospetto; (b) sezione AA.

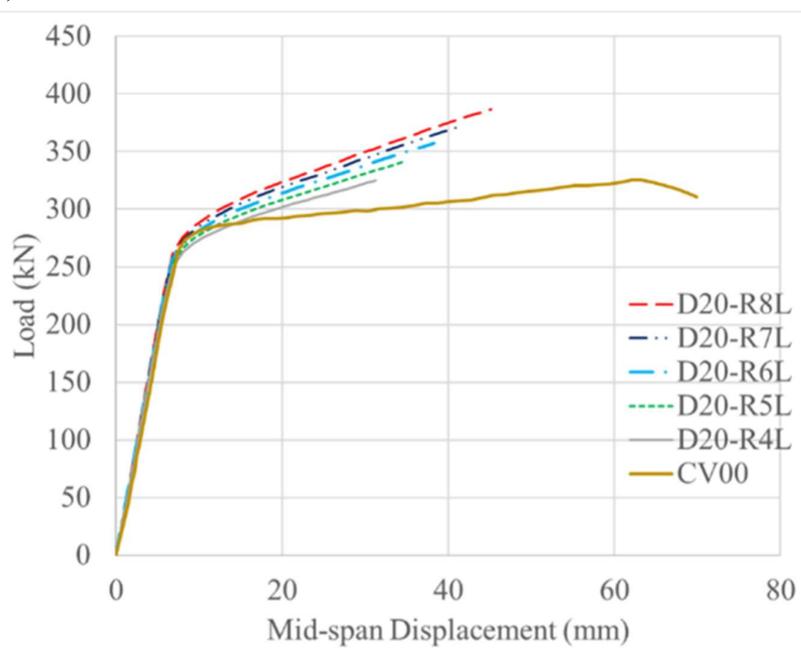


Figura 2.14 Comportamento del carico rispetto allo spostamento a metà campata della trave.

Si può notare dal diagramma (Figura 2.14) come la trave non corrosa (CV00) abbia una maggiore duttilità ma allo stesso tempo una ridotta capacità di sopportare il carico rispetto alla trave con la sezione maggiormente ridotta (D20) rappresentante la trave corrosa. Inoltre, si può affermare che un numero maggiore di strati permette di aumentare la capacità di carico ultimo.

In conclusione si può dire che un adeguato numero di strati di lastre di CFRP potrebbero ripristinare sia lo snervamento che la capacità di carico ultima della trave sottoposta a danni da corrosione, aumentando allo stesso tempo la rigidità complessiva della trave. Inoltre, un uso inferiore del numero di lastre, comporta la rottura delle medesime prima ancora che venga raggiunto il livello di carico desiderato, a causa della sollecitazione eccessiva delle lastre sottili.

Possiamo quindi affermare che i materiali compositi hanno la capacità di migliorare la risposta meccanica non solo di strutture in calcestruzzo armato, ma anche quelle di strutture in acciaio, con un eventuale possibile stato aggravato di corrosione che comporta una riduzione non indifferente delle caratteristiche meccanico-strutturali dell'elemento.

2.5 *Analisi sperimentale di rinforzo di travi in legno con FRP*

Questa prova riguardante il rinforzo localizzato degli FRP su travi di legno. L'esperimento è stato condotto da Corradini M. con i rispettivi colleghi: Vemury C.M., Edmondson V., Poologanathan K., E Nagaratnam B. nel 2021.[8]

Le travi in legno negli edifici, in particolar modo quelli storici, tendono a mostrare segni di degrado meccanico sotto forma di grandi deformazioni di flessione e capacità ridotta, spesso causate da difetti del legno (ad esempio allargamenti o nodi morti, etc.).

Di seguito si parla e si commenta di uno studio sperimentale che valuta la resistenza a flessione delle travi in legno di piccole e grandi dimensioni soggette a dei carichi statici, prima e dopo essere state rinforzate con l'utilizzo di fogli polimerici fibrorinforzati FRP.

È importante dire che l'applicazione dei fogli FRP vengono impiegati non su tutta la trave, ma solo in corrispondenza dei nodi del legno. La seguente scelta è giustificata dal fatto che i nodi causano fessurazioni e influenzano in modo significativo la rigidità e la capacità flessionale delle travi. Inoltre, è noto che l'effetto di indebolimento provocato dalla presenza di nodi è molto più grave quando il legno è sottoposto a flessione o tensioni parallele alle fibre piuttosto che a forze di compressione nella direzione parallela delle medesime.

Nella foto (Figura 2.15) possiamo notare come la presenza di un nodo nella trave interrompa significativamente la continuità delle fibre del legno. Questo fenomeno induce a una riduzione delle capacità strutturali dell'elemento soprattutto se soggetta a sollecitazioni flessionali.



Figura 2.15 Sezione di una trave in legno che mostra l'effetti di un nodo.

Nell'esperimento menzionato si sono usate due tipologie di travi: una di piccola dimensioni e una di grandi (Figura 2.16).

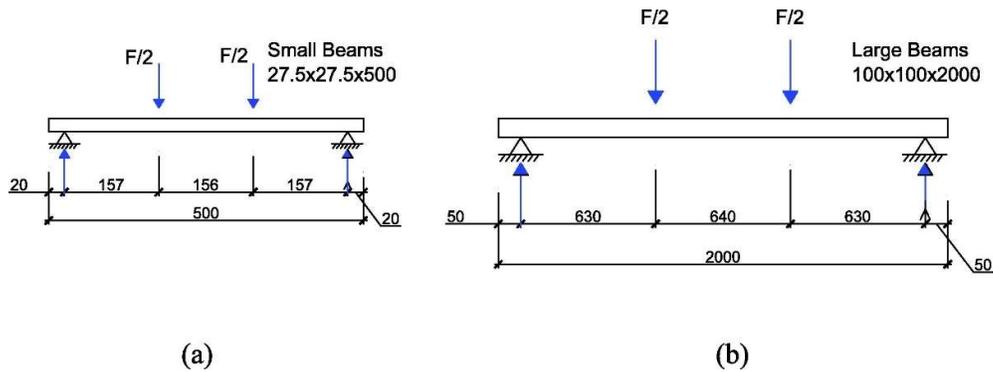


Figura 2.16 Piegatura a quattro punti: (a) travi piccole; (b) travi di grandi dimensioni (travetti) (dimensioni riportate in mm).

Le travi sono state classificate con un aggiuntivo sottogruppo: le travi di legno difettose con i nodi (difetto naturale), le travi danneggiate artificialmente con un taglio trasversale e le travi non difettose (in assenza di difetti).

Dopo aver effettuato le prove statiche di flessione delle travi a grandi e piccole dimensioni con e senza i rispettivi rinforzi in corrispondenza dei difetti si è ottenuto un grafico che mostra chiaramente la grande efficacia nell'uso degli FRP per le travi in legno.

Il grafico (Figura 2.17) in funzione del carico rispetto alla deflessione a metà campata mostra come l'applicazione dei rinforzi in CFRP ha causato un incremento sia della rigidità della trave che della risposta non lineare sotto carico di flessione. Questi cambiamenti possono essere considerati come degli effetti positivi del rinforzo in CFRP.

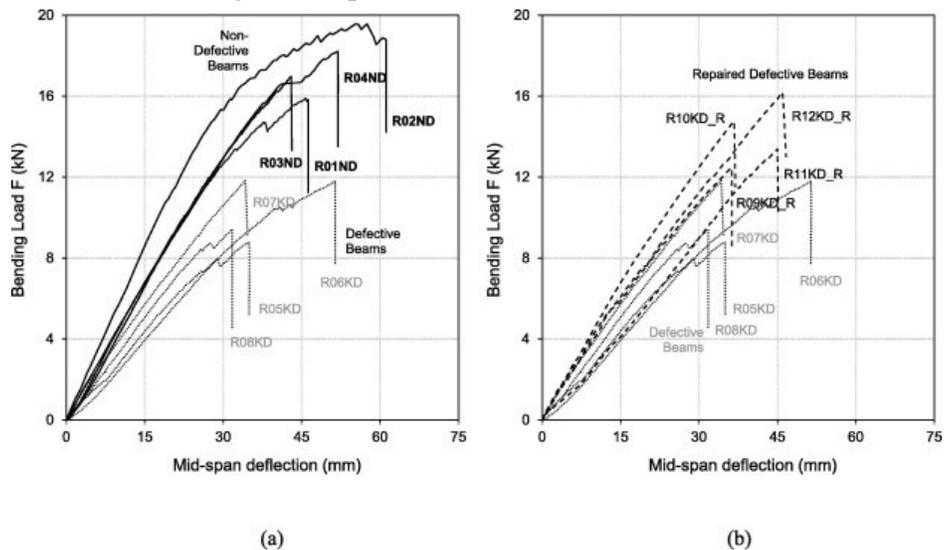


Figura 2.17 Prove di flessione a quattro punti. Curve rispetto alla deflessione della mezziera di campata: (a) per travi grandi non difettose (serie ND) e difettose non rinforzate (serie KD) e (b) rinforzate con CFRP (serie KD_R) e difettose non rinforzate (serie KD).

Inoltre l'applicazione puntuale delle lastre in CFRP ha confinato efficacemente il nodo, prevenendo fessurazioni e deformazioni locali. Ciò ha un effetto considerevole non solo sulla resistenza alla flessione, ma anche sulla rigidità della trave.

In conclusione possiamo fare molte osservazioni interessanti: l'elevata forza di adesione tra il legno e gli FRP garantisce un elevato trasferimento delle forze di trazione da un lato all'altro del materiale in legno sano in prossimità di un difetto, utilizzando una lunghezza di adesione ridotta. L'applicazione degli FRP come rinforzo locale consente di ottenere un migliore utilizzo delle risorse meccaniche del composito. Applicando il materiale di rinforzo nella regione in cui è necessario assorbire le sollecitazioni di trazioni permette di ottenere caratteristiche più elevate in termini di "intervento minimo". La rigidità alla flessione degli elementi in legno è aumentata grazie al rinforzo in CFRP. L'applicazione locale della lastra CFRP ha confinato il difetto del legno, prevenendo fessurazioni e deformazioni locali. Infine, l'uso degli FRP localizzato ai difetti piuttosto che "globale" applicato all'intero lato teso della trave, permette un'implementazione efficace di soluzioni pratiche per tenere conto di considerazioni estetiche e una metodologia di rinforzo conveniente che limita i costi utilizzando piccole quantità di CFRP.

La sperimentazione allegata ci permette di dimostrare che l'efficacia degli FRP non è solo valida per strutture in calcestruzzo armato ma anche di quelle in legno.

Com'era stato anche anticipato, questo tipo di intervento permette di preservare soprattutto le strutture storiche di importanza culturale e patrimoniale del territorio.

Risulta essere anche un intervento di rinforzo limitato e non invasivo, permettendo di preservare l'esteticità degli elementi in legno e sfruttare al massimo le caratteristiche meccaniche del materiale stesso.

CAPITOLO 3

ANALISI VIBRAZIONI LIBERE DI TRAVI

3.1 Premessa

Per poter analizzare e comprendere correttamente le risposte delle travi tramite i metodi di analisi non distruttiva sotto vibrazione è necessario capire il funzionamento teorico di queste prove.

Lo studio delle vibrazioni libere è molto utile per calcolare, in maniera analitica o sperimentale su prove di edifici reali o modelli, le caratteristiche dinamiche della struttura ovvero: periodo, frequenza naturale e smorzamento.

Non a caso queste tipologie di analisi sono condotte soprattutto per capire come la struttura si comporti sotto azioni sismiche.

Nel nostro caso analizzeremo semplicemente il comportamento in vibrazione libera di travi omogenee, nello specifico un modello di trave in acciaio.

Studiare in vibrazioni libere permette ad un sistema meccanico in vibrazione di non essere soggetto a forzanti e quindi di isolare il comportamento della trave da azioni esterne.

Inoltre, la presenza di possibili danni all'interno di una generica struttura influenza in maniera significativa la sua risposta dinamica, facendo variare le sue frequenze naturali e i modi di vibrare. I cambiamenti che avvengono, rappresentano una variazione delle proprietà meccaniche e di resistenza della stessa struttura.

3.2 Analisi teorica del comportamento dinamico

Lo studio teorico del comportamento dinamico e statico delle strutture viene effettuato con l'ausilio di modelli matematici che hanno lo scopo di semplificare il problema reale. Per struttura si intende quell'insieme di elementi interconnessi ed in grado di interagire con l'ambiente esterno.

L'analisi teorica del fenomeno vibratorio si esegue attraverso tre fasi al quale corrisponde a ciascuno un relativo modello. La prima fase consiste nel descrivere le caratteristiche geometriche e fisiche della struttura in oggetto e le relative azioni esterne che gravano su di essa. Questi parametri andranno a costruire il modello matematico del problema dinamico. La seconda fase consiste nell'eseguire un'analisi modale teorica del modello spaziale relativo ottenuto, con il quale si determina il comportamento della struttura descritta con una serie di modi di vibrare. Il modello modale descrive, in assenza di sollecitazione, come vibra la struttura in maniera naturale. L'ultima fase consiste nell'unire i due modelli e applicare alla struttura una forza esterna da cui si ottiene una risposta in termini di ampiezza. Ovviamente il valore dell'ampiezza dipende non solo dalle caratteristiche intrinseche della struttura ma anche dalla natura e l'intensità delle sollecitazioni delle forze esterne. L'analisi della risposta viene eseguita con un'eccitazione standard imposta, ottenendo così un modello di risposta formato da una serie di funzioni di risposta in frequenza, denominata FRF.

Per poter verificare che il modello e le ipotesi formulate siano corrette, è necessario ottenere una congruenza dei risultati sperimentali. A questo fine si parte dalle proprietà di risposta della struttura per ricavare i parametri modali e spaziali, infine verificare che siano quelli ipotizzati.

3.3 Modello matematico del problema dinamico

Per strutturare il modello matematico della struttura reale è necessario introdurre tre modelli: il primo è il modello geometrico o strutturale, il secondo è meccanico o reologico e il terzo è il modello delle azioni esterne. Questi tre modelli rappresentano gli aspetti più significativi del fenomeno vibratorio.

Tramite il modello geometrico o strutturale si fa riferimento alla rappresentazione delle condizioni di vincolo, delle caratteristiche geometriche e di distribuzione della massa nello spazio.

Il modello meccanico o reologico schematizza le caratteristiche dei materiali di cui è composta la struttura la quale è soggetta a carichi esterni attraverso le relazioni di sollecitazione-deformazione ed eventualmente le relazioni di sollecitazione-velocità di deformazione (leggi costitutive elastiche, viscosi e viscoelastici).

La struttura complessa viene semplificata in una struttura semplice, per essere precisi elementare, facilitandone il suo studio nei seguenti sistemati elementari: massa, molla e smorzatore. (Figura 3.1)

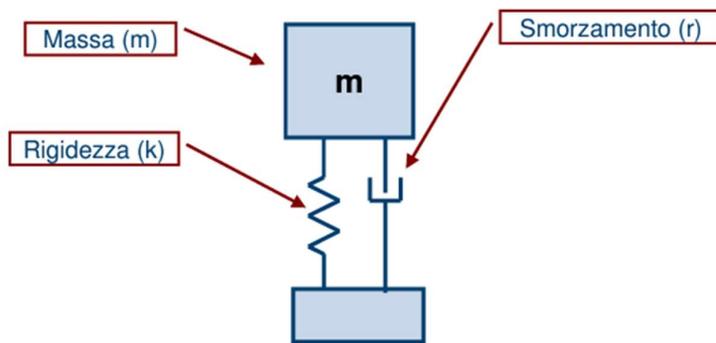


Figura 3.1
Rappresentazione del modello semplificato nei sistemi: molla, massa e smorzatore.

- La massa m rappresenta e riassume in sé le proprietà inerziali del sistema meccanico. Normalmente, ma non necessariamente, queste coincidono con la massa vera e propria. Le forze che la massa scambia con l'esterno sono dovute unicamente all'accelerazione che la massa stessa subisce. Ne deriva che la massa m può essere considerata la costante dell'equazione costitutiva.

$$F_I = m\ddot{u} = m(\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1) \quad (3.1)$$

nel quale esprime la seconda legge della dinamica, con $\ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2}$ accelerazione della massa m e F_I la risultante delle forze agenti sulla medesima massa.

- La molla (detta anche Spring) rappresenta e riassume in sé le proprietà elastiche del sistema meccanico. Normalmente, ma non necessariamente, questa coincide con un elemento elastico o con qualche forza che richiama la “massa” verso la posizione di riposo. La molla fornisce una forza proporzionale allo spostamento rispetto alla sua posizione di “riposo”.

$$F_s = ku = k(u_2 - u_1) \quad (3.2)$$

Nel quale F_s esprime la forza di richiamo elastico e u lo spostamento relativo tra due punti. Invece k rappresenta la costante di rigidità la quale permette di produrre uno spostamento relativo unitario.

- Lo smorzatore (Damper) rappresenta e riassume in sé le proprietà dissipative del sistema meccanico. Normalmente questa coincide con fenomeni viscosi quali attrito fra elemento o all’interno di singoli elementi del sistema, ad esempio resistenze aereodinamiche. Lo smorzatore fornisce una forza proporzionale alla velocità.

$$F_D = c\dot{u} = c(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \quad (3.3)$$

Nel quale F_D è la forza di richiamo viscosa ed è proporzionale alla velocità $\dot{u} = \frac{du}{dt}$. Il valore c rappresenta il coefficiente di smorzamento.

I materiali usati nelle strutture hanno un comportamento in parte elastico ed in parte viscoso. Per capire come si comportano queste tipologie di materiali insieme è necessario unire i modelli, e quindi le formule, delle componenti che li rappresentano, ovvero quella della molla (2.2) e dello smorzatore (2.3). La loro combinazione mi dà quello che è chiamato il “modello di Voight-Kelvin”, la quale fornisce l’equazione costitutiva viscoelastica:

$$F = F_D + F_s = c\dot{u} + ku \quad (3.4)$$

In conclusione i carichi di natura statica e dinamica agenti sulla struttura sono definiti secondo il modello delle azioni esterne. Per quanto riguarda i carichi dinamici, variabili nel tempo, la struttura è soggetta ad un’accelerazione che comporta la formazione di forze d’inerzia, proporzionali alle masse e alle accelerazioni, di verso opposto alle azioni sollecitanti.

3.4 *Classificazione di sistemi discreti e continui*

Ogni struttura può essere schematizzata tramite un modello strutturale o geometrico, definito sistema. In base al numero dei gradi di libertà, denominato Degrees Of Freedom (DOF), esso può essere classificato come continuo o discreto. I gradi di libertà di un qualsiasi sistema permettono di individuare la posizione della massa rispetto alla sua configurazione a riposo. Sia il sistema discreto che quello continuo rappresentano dei modelli matematici dello stesso sistema fisico.

La caratteristica dei sistemi continui è quella di avere infiniti gradi di libertà, di conseguenza, infiniti modi propri di vibrare. Il comportamento dinamico dei sistemi continui viene descritto tramite equazioni differenziali alle derivate parziali. Questo avviene perché i parametri che vengono determinati sono in funzione dello spazio e del tempo, da cui si ottengono infiniti parametri o coordinate, le quali però individuano sempre un generico punto della struttura. L'unico caso in cui è possibile ottenere una soluzione in forma chiusa di un sistema continuo vibrante è: massa e proprietà elastiche uniformemente distribuite.

A differenza dei sistemi continui, nei sistemi discreti si ha un sistema solo in funzione del tempo grazie ad un numero finito di gradi di libertà. Essendo una sola la variabile, si ottiene un'equazione differenziale del moto alle derivate totali.

3.5 *Sistemi discreti: vibrazioni libere e forzate*

I sistemi discreti si suddividono ulteriormente in due categorie in base al numero di gradi di libertà della struttura.

- Vibrazioni libere, ovvero sistemi ad un grado di libertà (Single Degree Of Freedom, SDOF): la posizione della massa viene definita rispetto un unico parametro;
- Vibrazioni forzate, ovvero sistemi a più gradi di libertà (Multiple Degree Of Freedom, MDOF): la posizione della massa viene definita rispetto molteplici punti e quindi espressi in forma matriciale.

3.6 *Prova di vibrazione per la valutazione delle fessurazioni di una trave in PRC/RC*

Il verificarsi dei danni dati dalle fessurazioni in un elemento in conglomerato cementizio armato porta a dei cambiamenti nella sua risposta dinamica. Infatti, il tipico comportamento non lineare delle travi in calcestruzzo armato precompresso (PRC) e in calcestruzzo armato (CA) è dovuto dalla presenza delle fessurazioni, causate dalla bassa resistenza a trazione del calcestruzzo.

Per poter capire adeguatamente come studiare una struttura fessurata, è necessario condurre delle prove di vibrazione. Di seguito è stato riportato uno studio sperimentale [9], condotto dal Professore Ingegnere Capozucca Roberto presso il dipartimento DICEA dell'Università

Politecnica delle Marche di Ancona, riguardante gli effetti della fessurazione attraverso uno studio di modelli di travi in PRC/RC in scala reale, i quali sono stati sottoposti a prove di carico statico crescente e di vibrazione naturale.

L'obiettivo principale delle prove è quello di mettere in relazione il cambiamento delle risposte dinamiche nelle travi PRC/RC a diversi momenti flettenti, valutando al contempo l'idoneità della tecnica di monitoraggio delle vibrazioni nella valutazione delle stesse successivamente danneggiate.

Inoltre, come menzionato precedentemente, le caratteristiche dinamiche sono funzione delle proprietà fisiche delle strutture, questo implica che qualsiasi cambiamento causato dal danno si traduce in un cambiamento della risposta dinamica.

Per raggiungere l'obiettivo prefissato, la prova è stata svolta su un modello di trave PRC e tre modelli di trave RC, tutti semplicemente appoggiati, in condizioni non danneggiate e successivamente danneggiate.

La trave PRC ha una sezione trasversale a doppia "T" (Figura 3.2).

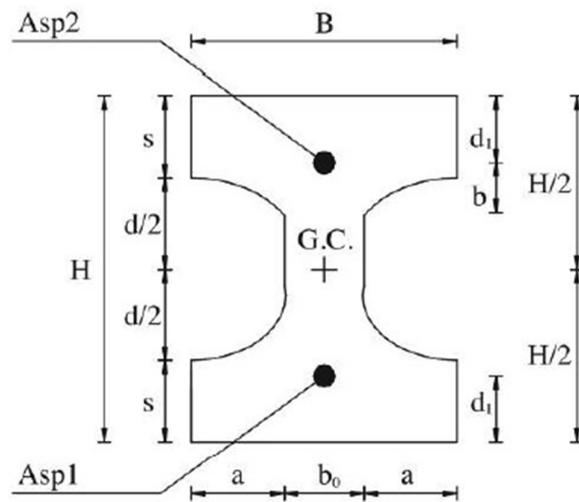


Figura 3.2 Sezione trasversale della trave sperimentale in PRC.

La seguente trave è stata sottoposta a vibrazioni libere sia allo stato non fessurato D0, prima della prova di flessione, e dopo ogni ciclo di carico. Inoltre, per i primi quattro modi di vibrare sono state misurate le frequenze naturali. Nelle prove dinamiche, le travi vengono appese a delle molle flessibili, in maniera tale che simulino una condizione al contorno libera (Figura 3.3).

Le travi sono state eccitate da un carico impulsivo utilizzando un martello a percussione e al contempo sono state misurate le accelerazioni in 27 punti differenti. (Figura 3.4)

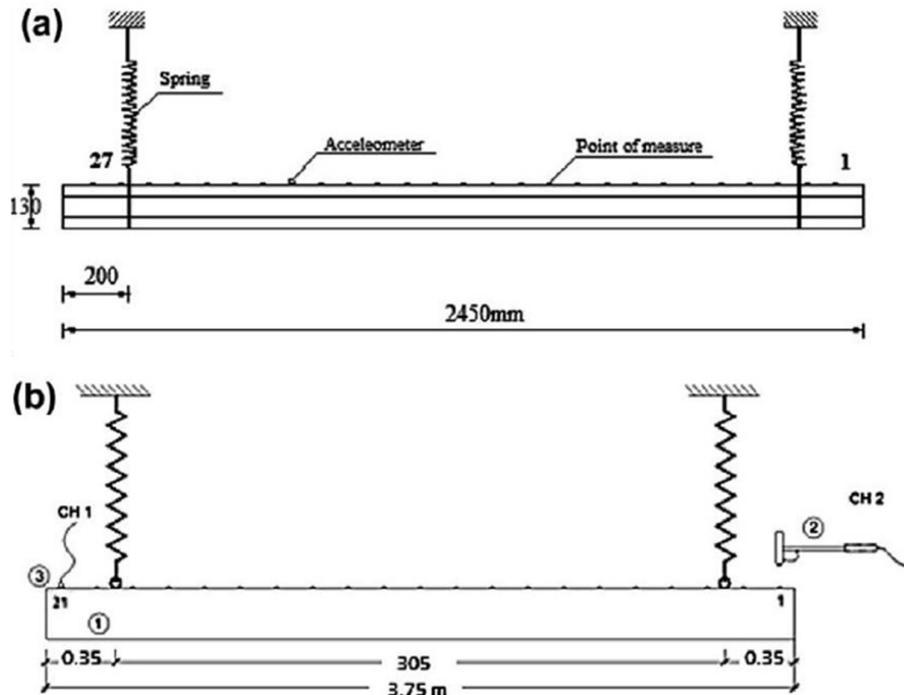


Figura 3.3 Impostazione per il test dinamico del fascio PRC/RC, (a) posizione dei punti (27) dell'accelerometro per il fascio PRC; (b) posizione dell'accelerometro nei vari punti (21) per la trave RC; accelerometri CH1 e CH2: canali per l'analizzatore FFT.

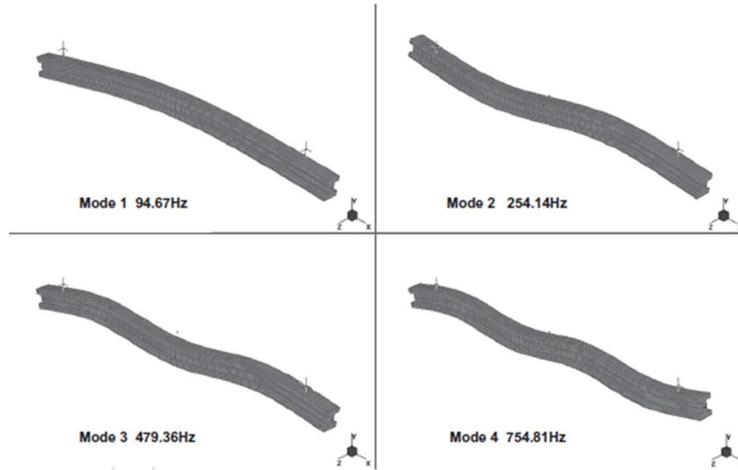
PRC beam	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Frequency values of undamaged beam (Hz)	96.931	255.99	476.34	724.40
D_1	After first cycle of bending tests $M_1 = 1.20 \text{ kN m}$			
1st set frequency values	96.596	255.79	475.70	723.54
2nd set frequency values	96.636	255.86	475.70	723.58
Average values (Hz)	96.616	255.83	475.70	723.56
D_2	After second cycle of bending tests $M_2 = 1.81 \text{ kN m}$			
1st set frequency values	94.098	254.09	469.79	717.25
2nd set frequency values	94.230	254.13	470.03	717.49
Average values (Hz)	94.164	254.11	469.91	717.37
D_3	After third cycle of bending tests $M_3 = 2.26 \text{ kN m}$			
1st set frequency values	92.388	251.41	466.83	709.48
2nd set frequency values	92.547	251.55	467.11	709.93
Average values (Hz)	92.468	251.48	466.97	709.70

Figura 3.4 Tabella dei valori sperimentali di frequenza naturale per il fascio PRC mediante prove dinamiche.

Inoltre, è stata eseguita anche una modellazione FEM della trave PRC non danneggiata (Figura 3.5). Sono stati calcolati i valori di frequenza in maniera teorica (Figura 3.6) e sono stati paragonati a quelli ottenuti dalle prove sperimentali. (Figura 3.7)

Sono stati riportati i valori di variazione di frequenza per il fascio PRC ai suoi diversi stadi di danno D_1 , D_2 e D_3 . (Figura 3.8)

Figura 3.5
Rappresentazione delle quattro modalità di vibrazione della modellazione della trave PRC ad estremità libere mediante la FEM.



Theoretical and FE values	$r = 1$	2	3	4
ψ	0.9968	0.9977	0.9994	0.9996
f_r Euler-Bernoulli beam model (Hz)	92.820	256.221	504.198	833.410
f_r Euler-Bernoulli beam model ($N_p = 0$)	93.470	257.590	505.160	834.60
f_r FEM	94.670	254.140	479.360	754.810

Figura 3.6 Valori teorici e FE per la trave PRC.

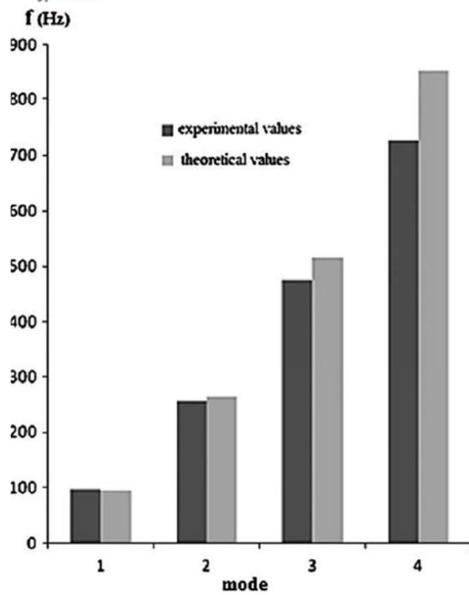
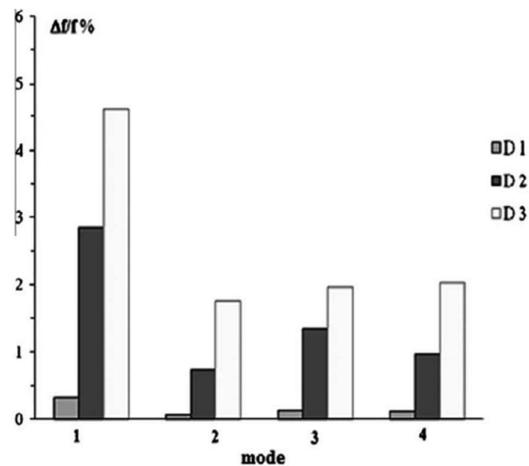


Figura 3.7 Confronto tra i valori di frequenza teorici e sperimentali per la trave PRC non fessurata.

Figura 3.8 Istogrammi dei valori di variazione della frequenza per il fascio PRC.



Infine sono stati messi a paragone i valori di frequenza ai vari stadi di carico, ovvero i valori di momento flettente e quelli di curvatura, i quali implicano una determinata condizione di fessurazione. (Figura 3.9)

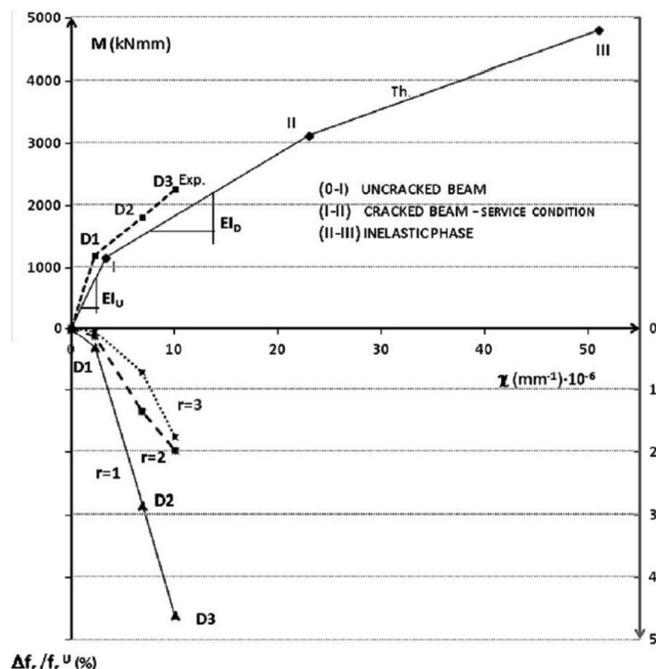


Figura 3.9 Confronto tra momento M e curvatura χ , valori di frequenza della trave PRC.

Si denota che la massima riduzione percentuale della frequenza per ciascun grado di fessurazione è stato registrato nel primo modo di vibrare. ($r = 1$)

Inoltre, facendo un confronto tra i diagrammi teorici e sperimentali del momento M , rispetto alla curvatura χ , il valore M è stato assunto come un diagramma trilineare con una diminuzione della rigidezza flessionale nelle tre regioni di comportamento tipico della sezione PRC, ovvero: (0-I) fase elastica non fessurata e lineare; (I-II) fase fessurata ed elastica delle condizioni di servizio; (II-III) fase anelastica. Confrontando i valori di frequenza, ci permettono di verificare che la massima riduzione percentuale delle frequenze è avvenuta in corrispondenza del grado di fessurazione più critico, ovvero la D3.

Si denota anche un altro comportamento di risposta dinamica della trave: la riduzione della frequenza più alta corrisponde al primo modo di vibrare ($r = 1$). A differenza del primo modo di vibrare, il secondo modo di vibrare ($r = 2$) presenta meno variazione percentuale di frequenza a ciascun grado di fessurazione.

Per le travi in c.a. è stata eseguita la stessa procedura sopra menzionata, ma su tre differenti travi. Le travi B1 e B2 sono state rinforzate con quattro barre longitudinali in acciaio di misura rispettivamente 10 mm e 14 mm di diametro; la trave B3 è stata rinforzata con due barre di acciaio da 10 mm e due da 16 mm di diametro. Sono stati calcolati i valori di frequenza teorici per le travi in c.a. non danneggiate (Figura 3.10) e misurati quelli delle prove sperimentali (Figura 3.11).

Frequency values (Hz)	f_1	f_2	f_3	f_4
Undamaged beam model (theor.)	71.180	196.160	384.690	635.540
Undamaged degree: $D_0 - B1$ (exp.)	71.847	194.245	367.693	579.737
Undamaged degree: $D_0 - B2$ (exp.)	70.300	192.676	362.492	577.280
Undamaged degree: $D_0 - B3$ (exp.)	72.074	196.482	372.389	588.058

Figura 3.10 Dati di frequenza teorici per travi in c.a. non danneggiate.

Beam	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
<i>B1</i>				
D_1	67.066	184.908	353.627	554.470
D_2	67.066	184.908	353.627	554.470
D_3	61.228	167.207	320.924	514.152
D_4	55.630	159.185	298.607	478.812
<i>B2</i>				
D_1	66.695	186.588	355.41	559.278
D_2	56.130	154.523	309.481	498.929
D_3	60.242	163.263	311.987	507.002
D_4	56.907	161.357	301.027	489.529
<i>B3</i>				
D_1	67.575	189.714	361.790	568.310
D_2	55.501	155.842	309.320	497.314
D_3	61.872	167.402	319.240	511.588
D_4	58.508	165.265	308.399	491.661

Figura 3.11 Valori di frequenza sperimentali per le travi B1, B2 e B3.

Con l'applicazione di carico si genera il momento flettente che induce uno stato fessurativo nella parte di calcestruzzo tesa. (Figura 3.12)

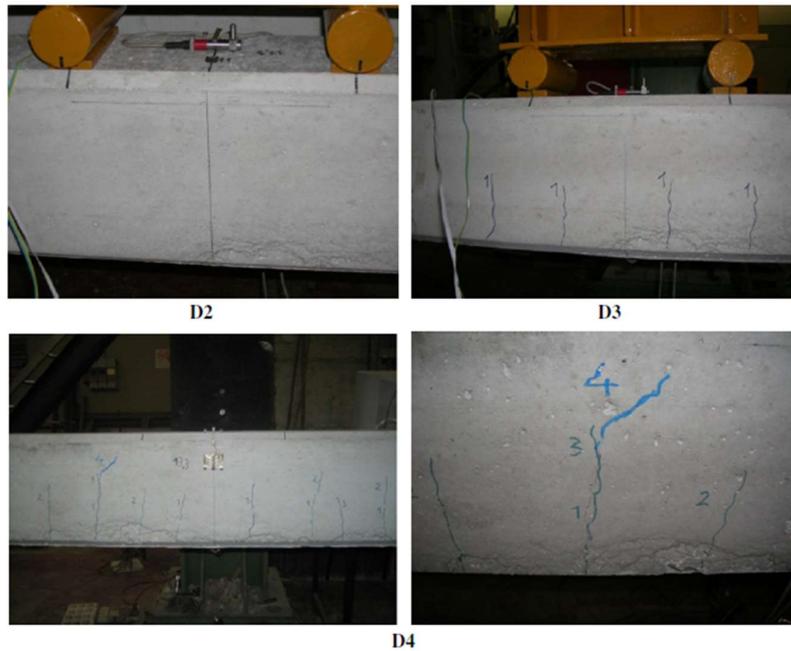


Figura 3.12 Vista delle fessurazioni a diversi gradi di danno D2, D3 e D4.

Per capire quanto le fessurazioni influenzino la risposta dinamica della trave, vengono riportate le variazioni di frequenza per i quattro diversi modi di vibrare a condizioni di fessurazioni differenti. (Figura 3.13)

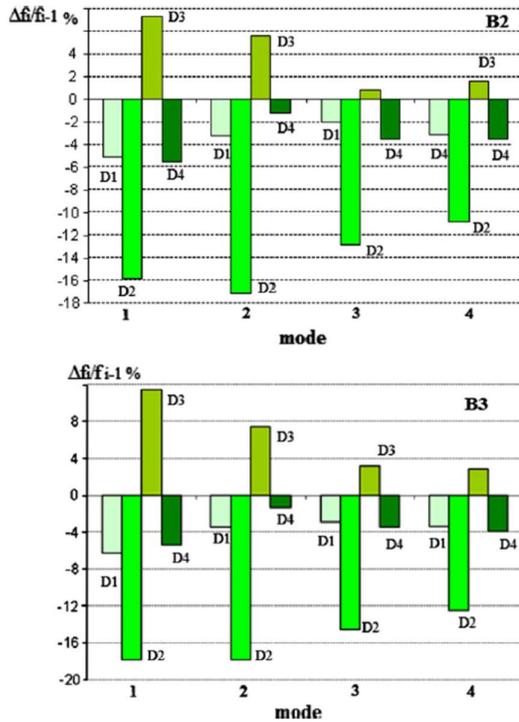


Figura 3.13 Variazione dei valori di frequenza per i raggi B2 e B3 ai gradi di danno da D1 a D4 per le quattro diverse modalità di vibrare.

Infine, come per le travi PRC, si riporta il grafico dove sono messe in correlazione i valori di momento, curvatura e vibrazione. (Figura 3.14)

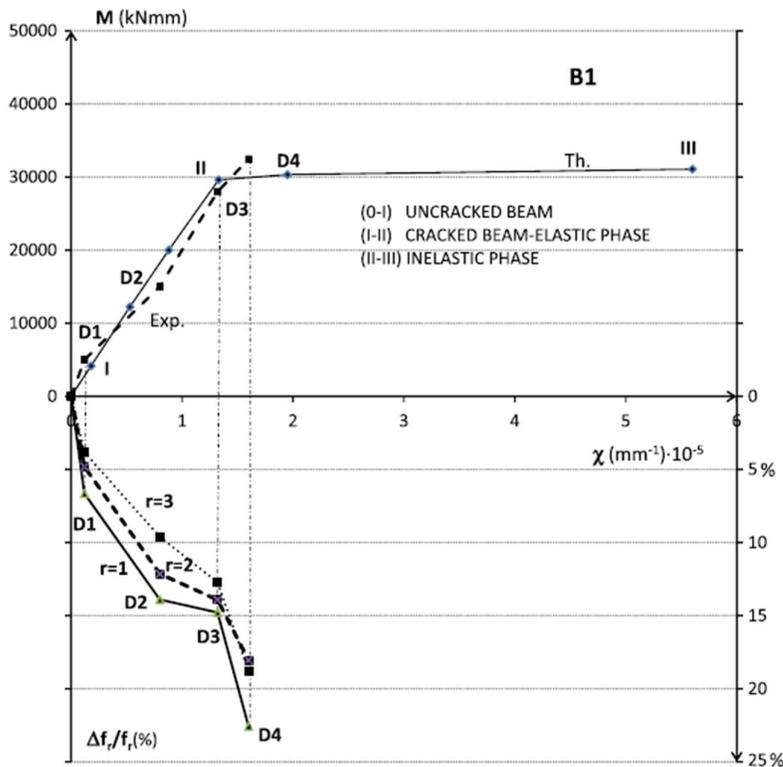


Figura 3.14 Confronto tra momento M e curvatura χ , valori di variazione di frequenza per la trave B1.

In funzione ai risultati ottenuti dalla ricerca sperimentale si possono dedurre le seguenti conclusioni: il comportamento non lineare delle travi in calcestruzzo armato sono dovute allo sviluppo di fessurazioni nel calcestruzzo teso, con una seguente riduzione dei valori di frequenza che sono valutate sperimentalmente nelle travi PRC/RC. I valori di frequenza registrati nelle prove dinamiche delle travi in PRC variano linearmente tra l'1% e il 5% per il primo modo di vibrare, mantenendo la trave in fase elastica anche se il momento flettente $M > M_{cr}$. Nelle travi in c.a., a differenza di quelle in PRC, la riduzione delle vibrazioni può arrivare anche al 15-20%. Il comportamento non lineare delle travi in c.a. influisce notevolmente la risposta dinamica. Si sono verificati cambiamenti dalle sezioni non fessurate a quelle fessurate sia in fase elastica che non elastica registrando un andamento decrescente dei valori di frequenza. Infine, la tecnica di monitoraggio basata sulle vibrazioni utilizzate per la valutazione del degrado delle travi in c.a. deve essere correlata al grado di carico. Infatti, si è registrata una diminuzione della frequenza ad ogni fase delle prove di carico di flessione.

In conclusione, è possibile affermare che lo studio vibrazionale delle travi, sia in PRC che in c.a., contribuisce a fornire informazioni piuttosto precise relative allo stato fessurativo delle travi.

CAPITOLO 4

TECNICHE SPERIMENTALI DI VIBRAZIONE

4.1 *Premessa*

Le tecniche di analisi modale sperimentale delle strutture, negli ultimi decenni, hanno subito un importante sviluppo tecnologico nel campo della strumentazione perché risulta essere più precisa e meno costosa a differenza di altre usali tecniche di raccolta dati delle caratteristiche delle strutture.

La conoscenza sia delle proprietà statiche, sia di quelle dinamiche, è un aspetto indispensabile per comprendere adeguatamente e il più realisticamente possibile il funzionamento strutturale di edifici complessi o con delle caratteristiche meccaniche dei materiali di difficile valutazione. Questa conoscenza permette di realizzare modelli affidabili, tarati su comportamenti reali, così da poter essere utilizzati ai fini di valutazione di scenari di comportamento in presenza di azioni di diverso tipo. Le interpretazioni del comportamento sperimentale non sono di facile interpretazione ma permettono, se valutati correttamente, di effettuare efficaci interventi di miglioramento alla struttura interessata.

4.2 *Tecniche di vibrazione sperimentale*

La risposta e l'analisi modale di una struttura sottoposta a una generica eccitazione impressa, viene messa appunto tramite la definizione di un suo modello matematico che mette in correlazione la forzante, la deformazione e la risposta della struttura in termini di spostamenti, velocità e accelerazione. È necessario risolvere le equazioni differenziali del moto con le corrette condizioni al contorno per poter correlare la risposta del sistema, quindi il suo spostamento, alla forzante.

La risoluzione delle equazioni risulta essere complessa da adottare per alcuni problemi. Per cui si ricorre alla ricerca della soluzione mediante l'ausilio di funzioni di risposta in frequenza FRF, dalle quali è possibile ricavare il comportamento dinamico della struttura. Le risposte in frequenza si ottengono grazie alle analisi del segnale mediante la *Fast Fourier Transform*. Il processo generico di identificazione sperimentale dei parametri dinamici di una struttura è rappresentato nel diagramma di flusso di (Figura 4.1).

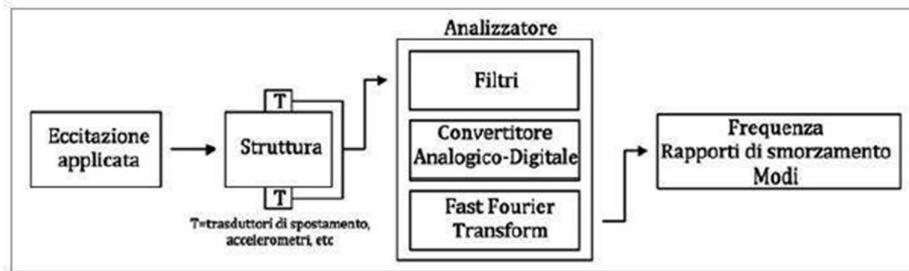


Figura 4.1 Rappresentazione dello schema dell'analisi modale sperimentale.

Queste tecniche di sperimentazione si fondano sull'ipotesi che le strutture abbiano un comportamento lineare. Questo implica che esaminare queste tipologie di sistemi, assumono un comportamento in modo lineare nel campo delle piccole deformazioni, per cui la risposta è proporzionale all'eccitazione. Inoltre, nel campo elastico è applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti che comporta: la risposta ad una certa combinazione di ingressi al sistema uguale alla medesima combinazione delle rispettive risposte.

Grazie all'ipotesi della linearità del sistema, le funzioni di risposta in frequenza godono di tre proprietà:

- Omogeneità: le FRF sono indipendenti dal livello di eccitazione applicato;
- Sovrapponibilità: le funzioni di risposta in frequenza non dipendono dal tipo di eccitazione indotta al sistema (sinusoidale, a banda larga o ad impatto);
- Reciprocità: grazie alla simmetria dei sistemi lineari (teorema di Maxwell) la FRF misurata fra due qualsiasi dei gradi di libertà non dipendono dal fatto che uno di essi sia usato per l'applicazione dell'eccitazione o per misurare le risposte.

Inoltre, a tutte le condizioni indotte dall'ipotesi della linearità, si aggiungono altre ipotesi semplificative del comportamento della struttura, ovvero:

- Causale: l'eccitazione è l'unica causa della vibrazione;
- Stabile: alla rimozione dell'eccitazione, la vibrazione termina;
- Invariante: le caratteristiche dinamiche rimangono invariate durante la prova. Questa ipotesi implica che i coefficienti delle equazioni differenziali che rappresentano il problema, sono indipendenti dal tempo;
- Osservabile: la misurazione di eccitazione e risposta che vengono effettuati sul sistema permettono di produrre una quantità di informazioni sufficienti da poter generare un corretto modello di comportamento della struttura. Essendo il sistema una componente quasi totalmente libera e assente di vincoli, il suo moto non può essere eccitato dai sensori posizionati sulla struttura e per questo rappresentano la componente inosservabile della struttura.

Le caratteristiche intrinseche quali: massa, rigidità, gradi di vincolo e smorzamento di una struttura sono quelle che definiscono il suo comportamento dinamico. Infatti, il comportamento dinamico non è in funzione del tipo ed entità di carico, motivo per cui le risposte dinamiche rappresentano un inequivocabile metodo di riconoscimento della struttura. Questo avviene solo se la struttura non ha subito alterazioni, come danni strutturali, altrimenti queste frequenze e modi propri di vibrare saranno alterati.

4.3 *Tecniche di controllo non distruttivo basate sulle vibrazioni (NDT)*

Le tecniche di controllo non distruttivo hanno il fine di controllare che la struttura sia integra, senza doverla necessariamente danneggiare irreversibilmente, individuando eventualmente le discontinuità geometriche nella struttura quali: fessure, cricche o porosità. Le vibrazioni NDT (anche chiamate in italiano: Controlli Non Distruttivi, CND) possono anche essere usate a fini di monitoraggio nelle condizioni di esercizio o durante eventi particolari come le azioni sismiche. Grazie all'analisi della risposta dinamica di una struttura, si è in grado di paragonare i valori dei parametri modali dell'edificio studiato in una determinata condizione degradata o danneggiata rispetto alla stessa in condizione integra. Una qualsiasi struttura, a parità di carico, subisce una maggiore deformazione quando è danneggiata piuttosto che quando integra. Questo implica che il danno incrementa la cedevolezza della struttura, il quale è funzione delle caratteristiche geometriche del difetto. Dalla seguente relazione:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.1)$$

Di cui il valore k rappresenta la rigidezza e il suo reciproco c la cedevolezza, è possibile riscrivere la (4.1) in maniera diversa:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{cm}} \quad (4.2)$$

Dove il valore c rappresenta la cedevolezza della stessa struttura.

Dall'equazione (4.2) si deduce: a parità di massa della stessa struttura, un incremento della cedevolezza provocato da un danneggiamento dell'edificio comporta la riduzione delle sue pulsazioni naturali. In maniera corrisposta, le altre caratteristiche modali legate alla pulsazione naturale quali: smorzamenti e modi propri di vibrare subiscono delle variazioni a causa della presenza del danno.

Inoltre, sempre dalla (4.2), l'espressione è indipendente dal carico e questo comporta che la differenza delle deformazioni in campo dinamico, come quelle in campo statico, fra la struttura integra e danneggiata è solo funzione dell'incremento della cedevolezza e quindi delle caratteristiche geometriche del danno.

Al fine di capire bene questi comportamenti, si fa ricorso all'uso di tecniche NDT di caratterizzazione dinamica con lo scopo di correlare la variazione di risposta dinamica, in funzione dei parametri modali (smorzamento, frequenze naturali e modi propri di vibrare), con le caratteristiche geometriche del danno.

4.4 Teoria di funzionamento alla base dei NDT

Tramite l'acquisizione dei dati degli FRF, è possibile usare un mezzo che permette di calcolare la risposta di un sistema a più gradi di libertà ad una eccitazione generata da una serie di forze armoniche della stessa frequenza, ma con differenti ampiezze e fasi.

Le proprietà delle FRF possono essere ottenute partendo dalle misurazioni effettuate con prove vibrazionali non sinusoidali, dove non c'è più diretta relazione tra input e output. Il mezzo più semplice per calcolare la risposta in un caso come questo è senza dubbio la *serie di Fourier*.

4.5 Sistema generale di misura delle FRF

Il comportamento del sistema testato, riconducibile alla relazione che si trova alla base delle tecniche di misura delle FRF, è determinabile solo se vengono misurati due o tre parametri.

Le tecniche di misurazione sono divise in due gruppi:

- Il primo include dei metodi che misurano solo i dati di output. Questo implica che non si è in grado di effettuare un'analisi completa. A causa della mancanza dei dati di input, non si è in grado di affermare se un livello di risposta eccessivamente alto sia dovuto ad una forte eccitazione o alla risonanza della stessa struttura.
- Il secondo, a differenza del primo, assimila informazioni di input e output. Questo consente di poter determinare le proprietà dinamiche del sistema direttamente dall'analisi dei dati misurati.

All'interno del seguente lavoro di tesi, è stata usata la tecnica di misurazione comprensiva del secondo gruppo. Questo metodo ci permette di ricavare le funzioni di risposta in frequenza FRF dividendo le risposte misurate per la forza di eccitazione impartita.

In funzione del numero di input e output, visto che le posizioni delle forzanti e dei punti in cui viene misurata la risposta possono essere singoli o molteplici, si può redigere un'ulteriore suddivisione delle tecniche di analisi modale. Si hanno le seguenti casistiche:

- SISO (single-input; single-output): una risposta dovuta ad una sola forzante;
- SIMO (single-input; multiple-output): molteplici risposte dovute ad una sola eccitazione;
- MIMO (multiple-input; multiple-output): molteplici risposte dovute a varie forzanti;
- MISO (multiple-input; single-output): una risposta dovuta a molteplici forzanti.

L'uso di un singolo punto di eccitazione risulta essere la più semplice. Al confronto, l'utilizzo di più punti usati simultaneamente, permettono di distribuire in maniera più uniforme l'energia della struttura, permettendo di diminuire la probabilità di perdere la visualizzazione di modi propri qualora l'eccitazione avvenga in corrispondenza dei punti nodali.

Nel seguente lavoro di ricerca è stato utilizzato il metodo SISO, con la quale si ha una sola risposta dovuta ad una sola forzante. Le funzioni di risposta in frequenza sono state

ottenute con un analizzatore bicanale FFT, fornito dal programma PULSE BK CONNECT 2018.

Un generico sistema di misura delle FRF (Figura 4.2) deve disporre dei seguenti strumenti:

- Sistema di eccitazione: ha il compito di trasmettere il segnale alla struttura;
- Sistema di analisi e misura dei segnali: ha il compito di registrare i segnali elettrici che sono inviati dai trasduttori con il fine di determinare l'ampiezza delle forze eccitanti e delle risposte;
- Amplificatori di condizionamento: hanno il compito di amplificare il segnale creato dai trasduttori. Quest'ultimi infatti generano un segnale debole che se non fosse amplificato, risulterebbe difficile da captare per l'analizzatore.
- Trasduttori di forza e spostamento: hanno il compito di misurare la forza applicata alla struttura e lo spostamento, o eventualmente le accelerazioni che essa subisce, convertendoli in segnali elettrici.

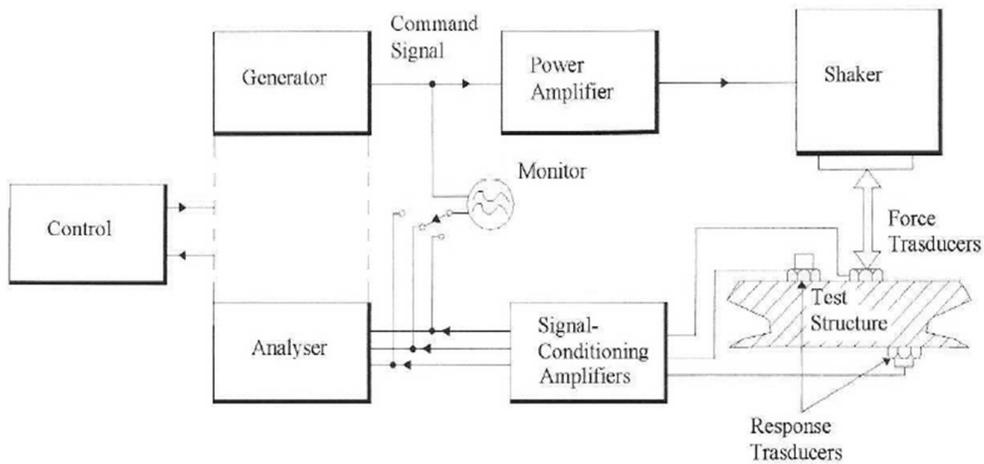


Figura 4.2 Sistema generale di misura delle FRF.

4.6 Software per le analisi modali

Nel seguente lavoro di tesi, per l'acquisizione dei dati, è stato utilizzato il software *Pulse BK CONNECT 2018*. Quest'ultimo ha la capacità di eseguire l'analisi modale ed è in grado di ricavare i parametri modali delle funzioni di risposta in frequenza (FRF) acquisite tramite la strumentazione usata. (Figura 4.3)



Figura 4.3 Modulo di acquisizione dati Brüel & Kjær Pulse, Type 3050-A-040; Impact Hammer 8202+2646.

La trave sottoposta alle prove sperimentali viene disposta secondo lo schema di vincolo libero-libero, ovvero viene sospesa mediante delle funi elastiche che sono disposte in maniera simmetrica ad una certa distanza dalle estremità (Figura 4.4). Il motivo per il quale il vincolo scelto è quello libero-libero è dato dal fatto che non condizionano il modo di vibrare della struttura.



Figura 4.4 Condizione di vincolo libero-libero

Successivamente si procede con l'installazione delle configurazioni riguardanti la strumentazione usata: il martello (Figura 4.3) e l'accelerometro (Figura 4.5). Inoltre, viene attivato un canale di comunicazione IP, mediante un cavo Ethernet, per collegare il dispositivo di acquisizione al computer nel quale è installato il software Pulse BK CONNECT.

Bisogna verificare che il collegamento assegnato alla porta IP comune ai due dispositivi funzioni, infine gli strumenti sono pronti all'uso.



Figura 4.5 Accelerometro 4508 usato per raccogliere i dati di frequenza della trave.

Per effettuare l'analisi modale si procede tramite i seguenti passaggi:

A) Model

Dal menu iniziale del software Pulse BK CONNECT si va a selezionare la funzione dell'analisi modale. (Figura 4.6)



Figura 4.6 Pagina di avvio del software Pulse BK CONNECT.

Successivamente si va a modellare la geometria tridimensionale dell'elemento di trave che si sta studiando: nella schermata "MODELLO", dal menù a tendina si seleziona il comando "SUPERFICIE", poi si clicca su "Crea cilindro" o "Crea cubo"; sulla griglia del software si costruisce l'oggetto tridimensionale e si inseriscono le sue rispettive dimensioni nelle voci "Lunghezza", "Larghezza" e "Altezza" (Figura 4.7)

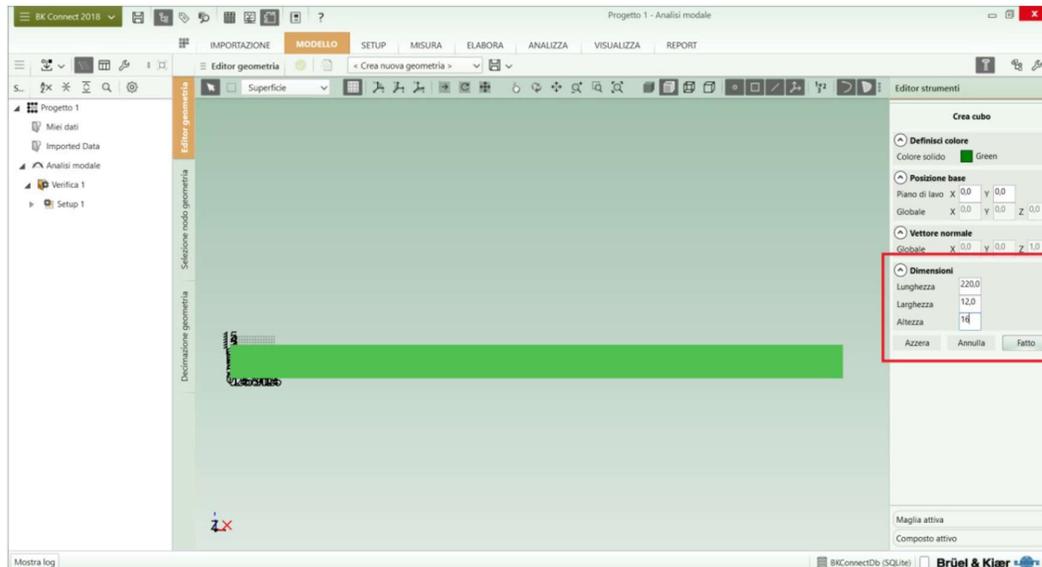


Figura 4.7 Schermata "Modello" per l'inserimento delle dimensioni della trave studiata.

Si seleziona l'oggetto tridimensionale, si assegnano i punti nodali tramite la voce "Maglia", in "Distribuzione elemento" sulla voce "Lunghezza" si inserisce il valore di 0,9 (questo sta a significare che i nodi sono fissati a una distanza di 9 mm l'uno dall'altro). Il numero di punti nodali N si assegnano in un sistema di riferimento rispetto X-Y-Z con l'origine in corrispondenza di uno dei due estremi della trave. La trave del seguente lavoro di tesi è di una lunghezza di 90 mm, in cui i nodi sono fissati ognuno a 9 mm, questo comporta che si ha un numero totale di 10 nodi totali disposti per tutta la lunghezza della trave rispetto tutte le sei facce dell'elemento tridimensionale. Ogni nodo quindi avrà una terna di coordinate concordi all'origine. (Figura 4.8)

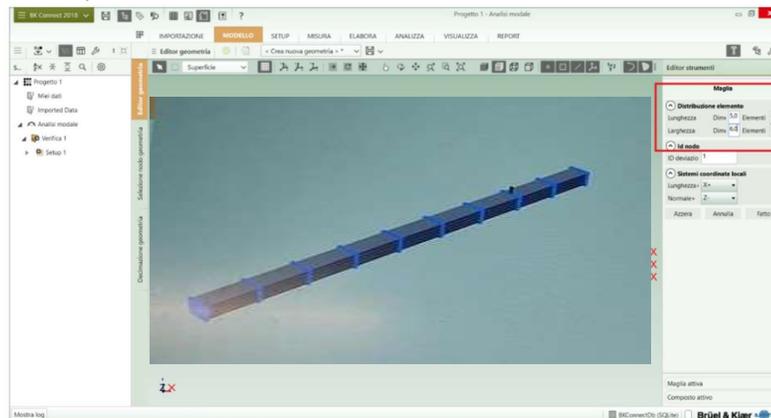


Figura 4.8 Schermata "Modello" per le dimensioni della maglia e la terna di coordinate ad ogni nodo.

B) Setup

Una volta che è stato definito il modello si passa all'identificazione della strumentazione usata per la prova. Dalla pagina principale del software si deve selezionare la voce "Setup". Nel menu a tendina, tra le varie voci si deve selezionare quella denominata come "Gestione trasduttori", successivamente "Tipi" dove compaiono tutti le possibili strumentazioni utilizzabili con il software, dove si va a scegliere dalla voce "tabella tipo trasduttori" le strumentazioni impiegate per la prova ovvero:

- Accelerometro 4508 nel canale di ingresso del modulo di acquisizione dati (Figura 4.3) con il rispettivo canale di ingresso, ovvero CH2; (Figura 4.9)
- Impact Hammer 8202+2646 (Figura 4.3) nel medesimo modulo di acquisizione dati ma con il canale d'ingresso CH1. (Figura 4.10)

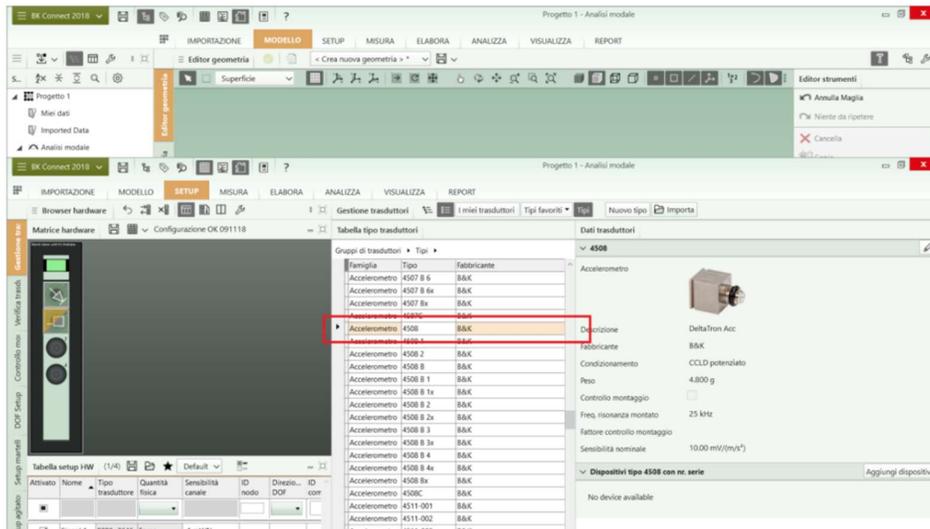


Figura 4.9 Impostazione "Setup" per la selezione dell'accelerometro 4508

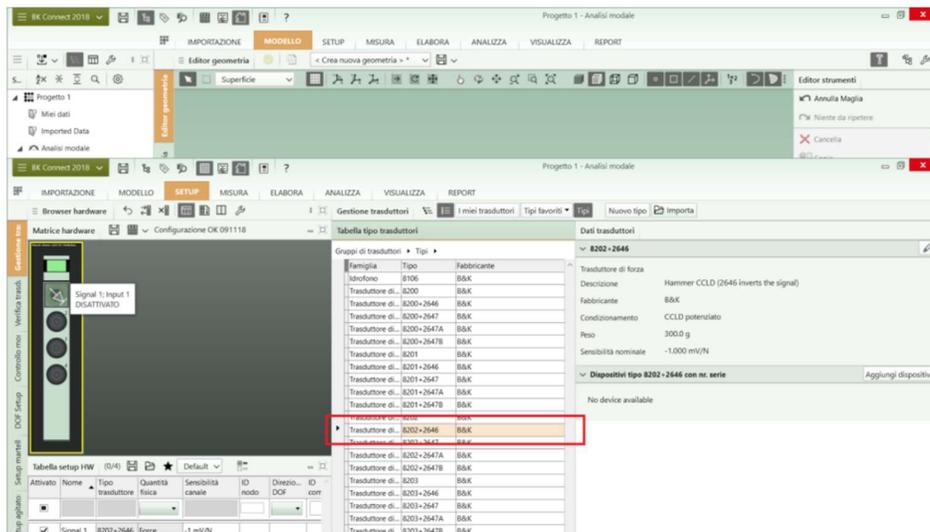


Figura 4.10 Impostazione "Setup" per selezione dell'Impact Hammer 8202+2646

È importante prestare molta attenzione alla definizione della sensibilità della strumentazione dei trasduttori utilizzati perché se non, i valori misurati potrebbero non corrispondere a quelli reali. Dalla voce “Sensibilità canale” si deve selezionare il valore di 10,09 mV/(m/s²) per l’accelerometro, mentre per l’Impact Hammer una sensibilità di -1 mV/N.

C) Dof Setup

Nella sezione “Gestione trasduttori” si deve cliccare sul tasto “Copia da setup HW”. (Figura 4.11)

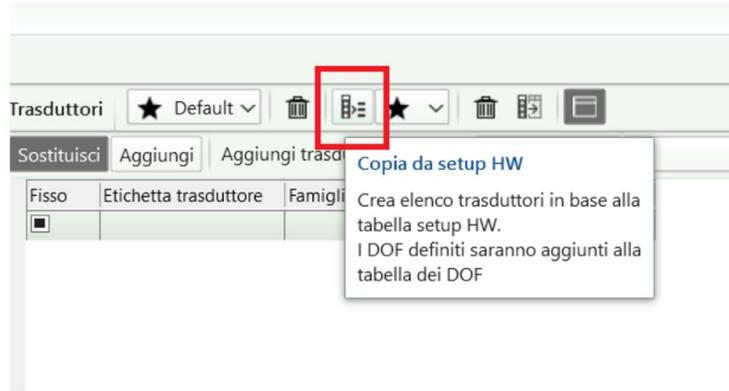


Figura 4.11 Dof Setup, “Copia da setup HW”

Questo ci permette, dal modello tridimensionale creato precedentemente, di individuare quali sono i 3 nodi corrispondenti all’accelerometro e invece qual è il punto dalla quale si generano le sollecitazioni, ovvero il punto di battuta del martello. Ad ogni punto dove sarà applicato l’accelerometro, si ha l’asse di riferimento sul quale lavorano i due trasduttori, ovvero: l’asse Z+ per l’accelerometro nelle sue diverse posizioni, per il martello Z- (Figura 4.12). Finito il settaggio si clicca la voce “Percorsi tra i nodi più vicini”.

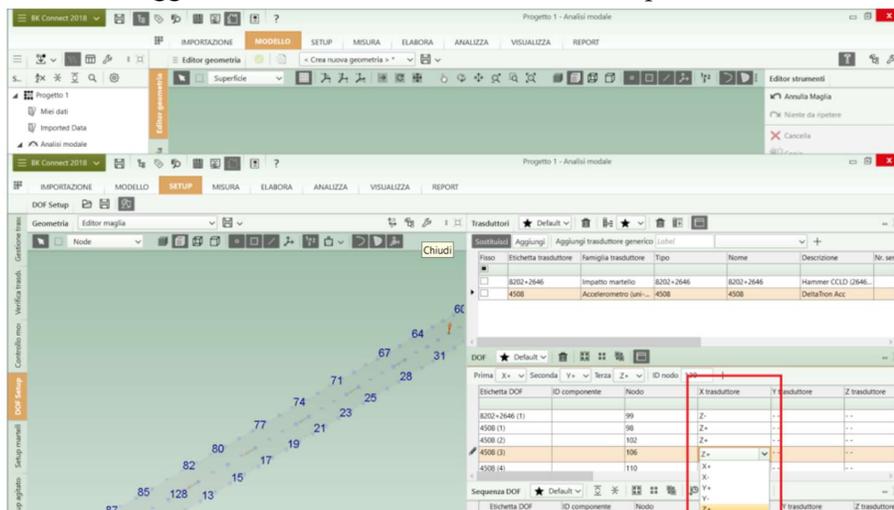


Figura 4.12 “Dof Setup” per la selezione degli assi di riferimento dei trasduttori.

D) Setup del martello

In questa fase si va a calibrare l'Hammer Impact per la sua acquisizione dati. Questo ci permetterà di ottenere dei risultati più attendibili. La fase è definita con il seguente procedimento:

- 1) Trigger: nella fase iniziale si danno 5 colpi con il martello strumentato e si clicca sulla spunta che compare nella sezione sopra a sinistra della finestra. L'isteresi è impostata usando una serie di prove di impatti la quale si individua sul grafico superiore della schermata. Gli effetti di trigger variabile impostati, come da pre-delay, vengono osservati in maniera interattiva dai grafici inferiori della stessa schermata di quella dei grafici di isteresi. Il pre-delay deve essere impostato al valore di 30. (Figura 4.13)

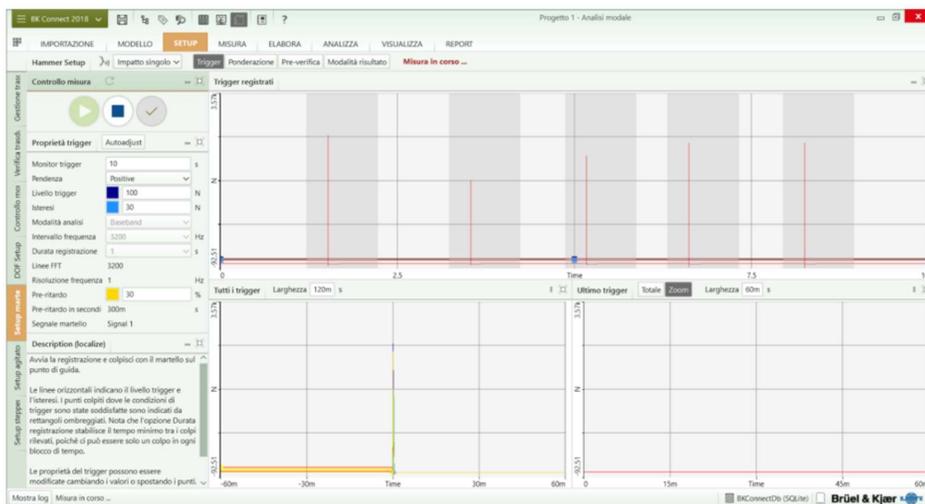


Figura 4.13 Fase di Setup del martello, “Trigger”.

- 2) Weighting: per questa fase è necessario dare un colpo e ripremerla la stessa spunta della fase di “Trigger”. È possibile impostare in maniera interattiva la ponderazione temporale. La forza di input derivante dal martello e la risposta all'accelerazione, dei grafici superiori, sono paragonati ai dati ponderati che compaiono nel grafico inferiore. La risposta dell'accelerometro presenta una curva di decadenza. La linea tratteggiata presente sul grafico trasla i valori al 66% del segnale captato. (Figura 4.14)

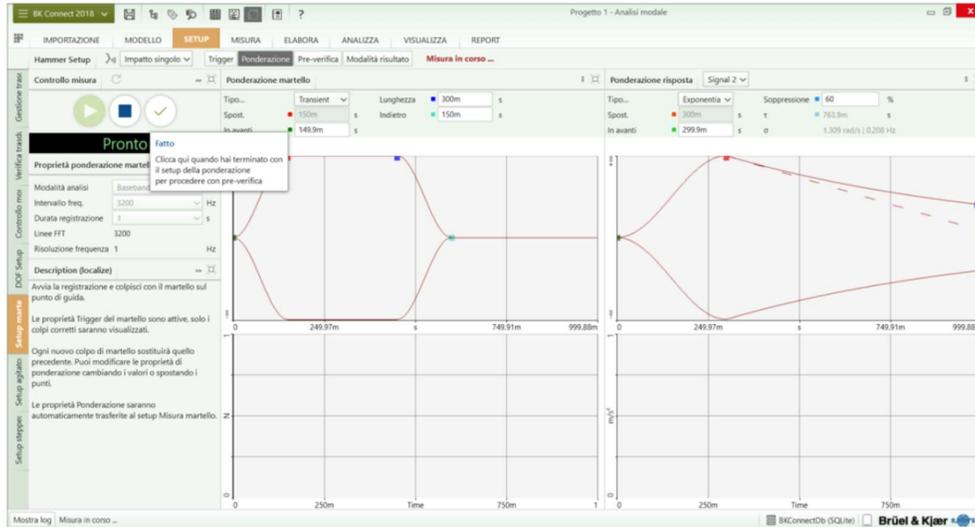


Figura 4.14 Fase di Setup del martello, “Weighting”.

3) Pre-verifica: in questa fase è necessario dare 10 colpi per verificare se l’Hammer Impact funzioni adeguatamente; durante la fase di raccolta delle informazioni è possibile notare in corrispondenza nella casella “Convalida impatto” (Figura 4.15) una delle seguenti voci:

- “Proper Hit”: sta ad indicare che il colpo è stato eseguito correttamente e quindi è possibile proseguire le prove dinamiche andando a sollecitare nuovamente la struttura con il colpo successivo;
- “Double Hit”: questa scritta sta ad indicare che il colpo non è stato eseguito correttamente a causa di un rimbalzo;
- “Soft Hit”: sta a significare che il colpo non è stato dato con una potenza adeguata perché troppo debole.



Figura 4.15 Fase di Setup del martello, “Pre-verifica”.

E) Fase dell'esecuzione delle battute

Una volta eseguite correttamente tutte le fasi precedentemente menzionate, è possibile passare all'acquisizione dei dati per l'analisi dinamica della trave studiata. In questa fase è necessario selezionare la voce "Misura" nel software BK CONNECT e così facendo iniziare la prova sperimentale sulla trave in acciaio, fissando la posizione del punto di battuta del martello e spostando la posizione dell'accelerometro nei punti designati.

È importante dire che durante l'esecuzione della prova è presente sempre la finestra "Convalida impatto" che ci ragguaglia sull'affidabilità della raccolta dei dati in funzione dei colpi di battuta che vengono applicati durante l'acquisizione dei dati. Nel caso in cui dovesse comparire la voce "Proper Hit" vale a dire che il colpo è stato dato correttamente, in caso contrario sarà necessario ripetere la battuta. Per iniziare l'acquisizione dei dati è necessario premere il tasto "Start" e applicare 10 colpi a ogni posizione degli acceleratori lungo la trave.

F) Fase dell'esecuzione delle battute

Per la fase di esportazione dei dati è necessario cliccare il tasto "Visualizza dati", dalla voce "Visualizza", che appare nel menu a tendina. Tramite il seguente percorso è possibile esportare tutti i dati in file Excel e rielaborarli in forma grafica: "Setup 1", "Measured Data", "Hammer Measurements", "Frequency Response Functions", "Esporta a Microsoft Excel". Si lasciano le spunte anche per la raccolta dei dati dell'acceleratore posto nelle differenti posizioni (Figura 4.16). Una volta terminata questa fase di esportazione è possibile visualizzare i dati in numeri immaginari che dovranno essere trasformati e riportati in forma grafica: (Figura 4.17)

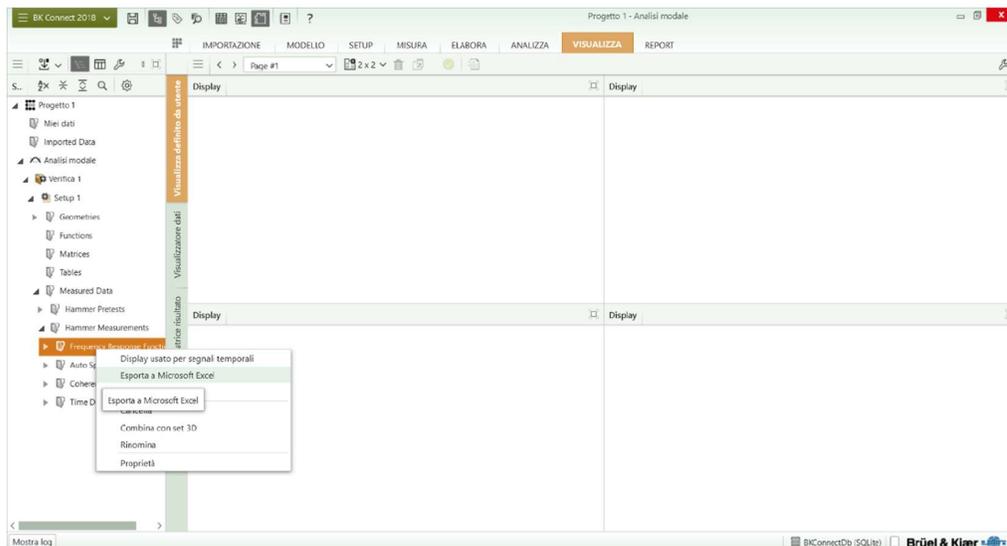


Figura 4.16 Esportazione dei dati delle FRF dal software BK CONNECT ad un file Microsoft Excel.

Row	Column	Signal 1	Signal 2	Signal 3
1	A	Signal 1	Signal 2	Signal 3
2	B	SpectrumFrffH1	SpectrumFrffH1	SpectrumFrffH1
3	C	FFT System	FFT System	FFT System
4	D	(m/s ²)/N	(m/s ²)/N	(m/s ²)/N
5	E	Complex	Complex	Complex
6	F	FFT (FRF H1) - ref. 9	FFT (FRF H1) - ref. 9	FFT (FRF H1) - ref. 93Z-
7	G	93Z-	93Z-	93Z-
8	H	99Z+	105Z+	111Z+
9	I	1	2	3
10	J	Hammer Measuremer	Hammer Measuremer	Hammer Measuremer
11	K	X	X	X
12	L	Linear	Linear	Linear
13	M	Hz	Hz	Hz
14	N	0	-46.6299	0
15	O	1	103.0985	58.86481
16	P	2	77.63052	-10.7776
17	Q	3	66.98923	-11.9741
18	R	4	76.39261	-2.69455
19	S	5	106.4113	7.504373
20	T	6	154.2627	5.853463
21	U	7	217.3693	-8.78032
22		8	290.588	-49.6616
23		9	360.0213	-111.351
24		10	438.6174	-185.675
25		11	545.6133	-298.934
26		12	666.5215	-504.698
27		13	738.5605	-869.747
28		14	567.6185	-1411.3
29		15	-101.096	-1880.51
30		16	-1141.43	-1628.53
31		17	-1326	-468.906
32		18	-665.294	-540.627
33		19	-816.525	-475.696
34		20	-825.587	-283.07
35		21	-654.046	-232.467

Figura 4.17 Esportazione dei dati FRF dal software BK CONNECT con la rispettiva elaborazione dei dati sul foglio di Excel.

CAPITOLO 5

ESAME DEI DATI SPERIMENTALI E CONCLUSIONI

5.1 *Geometria, condizione di vincolo e dettaglio strutturale della trave*

La trave oggetto delle prove sperimentali del seguente lavoro di tesi ha la seguente geometria:

- Lunghezza: 900 mm;
- Sezione: 40x40 mm, forma quadrata, sezione aperta con spessore di 1,1 mm.

La trave è realizzata in acciaio di classe S275 ($f_{yk} \geq 275 \text{ N/mm}^2$) che sta a rappresentare un acciaio strutturale a basso tenore di carbonio, il che implica meccanicamente grandi capacità duttili e bassa fragilità.

La struttura è libera, ovvero non è vincolata a terra, difatti la sua condizione è di vincolo libero-libero. (Figura 5.1) Questa condizione ci permette di studiare le frequenze della trave in funzione esclusivamente delle sue proprietà di massa e di inerzia, trascurando quelle di frequenza naturale perché nulle. Per realizzare la condizione di vincolo descritta si è fatto uso di due funi elastiche che permettono alla struttura di essere sospesa e di ridurre al minimo le interferenze del sistema sospeso con le condizioni di vincolo. Inoltre è riportato in dettaglio la sezione dell'oggetto di studio. (Figura 5.2)



Figura 5.1 Foto della trave in condizione di vincolo libero-libero, oggetto dello studio sperimentale.

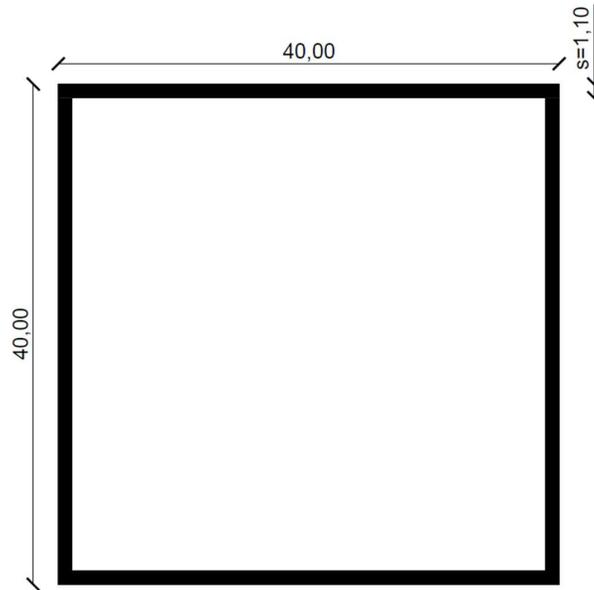


Figura 5.2 Rappresentazione della sezione della trave con le rispettive quote.

5.2 *Strumentazione per le analisi dinamiche*

Per generare un fenomeno di eccitazione alla struttura si è fatto uso del martello strumentato 8202+2646, prodotto dall'azienda elettronica danese Brüel & Kjær. (Figura 5.3) Nella strumentazione è presente il martello, fornito inoltre di 3 diverse punte e una massa aggiuntiva le quali svolgono la funzione di estendere il range di forza e frequenza. Questi elementi permettono di fare studi di analisi dinamiche su strutture di differenti caratteristiche come ad esempio: strutture dal basso peso e sufficientemente rigide hanno bisogno di un ampio contenuto di frequenza, il quale può essere generato da un martello dalla punta dura e dal peso contenuto.



Figura 5.3 Impact Hammer 8202 + 2646, Brüel & Kjær

L'accelerometro utilizzato per i test sperimentali è il modello 4508 – Piezoelectric CCDLD accelerometer, 100mV/g, 1 slot, top connector, della Brüel & Kjær. Copre un range di frequenza compreso tra i 0,3 Hz e gli 8000 Hz. Inoltre dispone di una sensibilità di 10,09 mV/g (Figura 5.4). L'accelerometro viene collocato in tre diversi punti lungo tutta la trave,

distanziati di 200 mm l'uno dall'altro. La risposta in frequenza viene misurata come la media delle dieci misurazioni che vengono fatte ad ogni punto di collocazione di misura dello strumento.



Figura 5.4 Accelerometro 4805, Brüel & Kjær

5.3 Esecuzione della prova

L'obiettivo principale della prova è quello di andare ad individuare, tramite le prove dinamiche, come variano le frequenze proprie e i relativi modi di vibrare della trave in condizioni integre, ovvero in assenza di danneggiamento, e con diversi gradi di danno. Per raggiungere tale scopo, di seguito sono descritte le varie fasi sperimentali seguite.

La trave in acciaio è stata posata in condizioni di vincolo libero-libero su due funi elastiche ad una distanza dalle rispettive estremità di 165 mm.

Di seguito, una volta impostata correttamente tutta la strumentazione dell'analisi dinamica e il software BK CONNECT 2018, sono stati tracciati i punti in cui viene sollecitata la struttura tramite il martello e i punti di appoggio dell'accelerometro. Il punto di battuta dell'Impact Hammer è stato posto a una distanza dall'estremità di destra della trave a 200 mm, mentre l'acceleratore è stato posto a una distanza dal punto di eccitazione del martello a 200 mm, per tre diversi punti posti alla stessa distanza. (Figura 5.5)

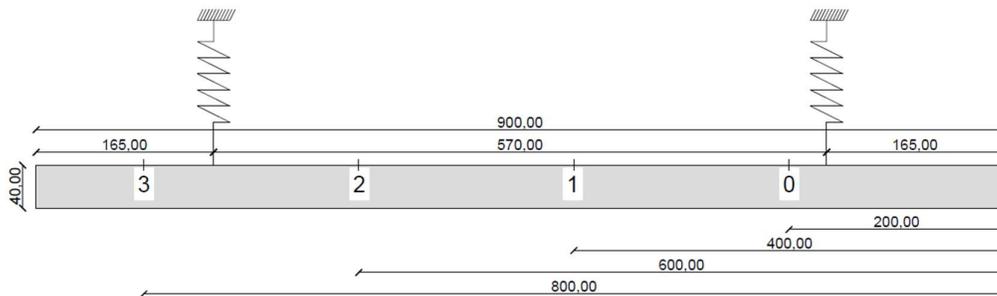


Figura 5.5 Rappresentazione in prospettiva della trave dove: il punto 0 è la posizione di battitura del martello, punti 1,2 e 3 dove viene posizionato l'acceleratore.

Una volta posizionato l'accelerometro a partire dal punto 1, sono stati eseguiti un numero di 3 colpi di martello nella posizione 0. È stato eseguito lo stesso iter con l'unica differenza che è stata cambiata la posizione del solo accelerometro dal punto 1 ai punti 2 e 3.

Una volta che sono state effettuate tutte le misurazioni, sono stati esportati tutti i dati acquisiti in un file Excel direttamente dal software del Pulse, sono stati rielaborati tutti i dati dalla loro forma di numeri immaginari in rappresentazioni grafiche mono logaritmiche degli andamenti delle frequenze della trave. Dai grafici è stato possibile ricavare in funzione dei primi tre picchi, escludendo il primo, i tre modi di vibrare della trave. (Figura 5.6)

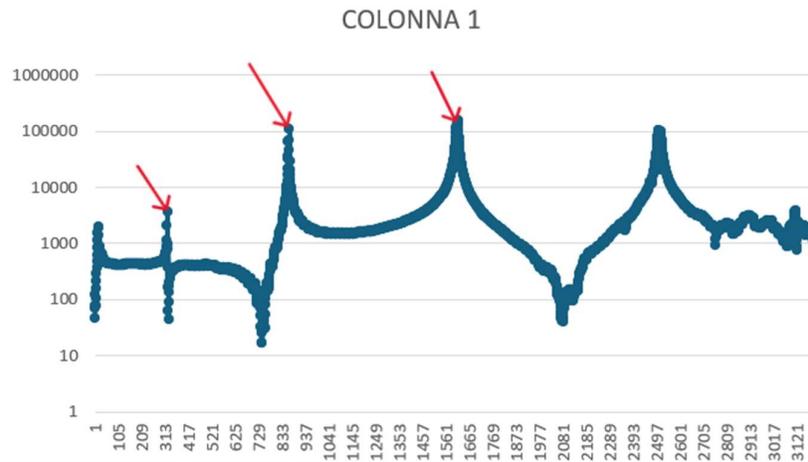


Figura 5.6 Esempio rappresentativo dei picchi considerati per individuare i modi di vibrare della trave studiata.

È importante da esplicitare che solo nella prova della trave integra sono stati dati un numero di 3 colpi di martello per ogni posizione dell'accelerometro. Nelle successive prove in presenza del danneggiamento della trave il numero di colpi effettuato è stato di 10 per ogni posizione dell'accelerometro. Inoltre, un'altra distinzione tra le prove della trave danneggiata e non danneggiata è stata l'eccitazione indotta alla struttura non solo sul lato superficiale della struttura, ma anche su quella laterale. Insieme ai colpi laterali della trave, anche gli stessi accelerometri sono stati posizionati sullo stesso lato (Figura 5.7).



Figura 5.7 Esecuzione dell'analisi dinamica della trave rispetto la sua faccia laterale.

Questo al fine di dimostrare che indipendentemente dalla posizione di eccitazione e la raccolta dati degli accelerometri, il modo di vibrare della trave resta invariato.

Abbiamo nominato la trave non danneggiata come D0. Successivamente, agli stadi di danno la trave è stata nominata con: D1, D2 e D3. Lo stato D1 rappresenta l'entità di danno più lieve e man mano crescente fino allo stadio D3.

Per generare il grado del danno sono stati effettuati dei tagli. La loro collocazione allo stato D1 è posta a 20 mm dalla mezzeria sia nella direzione di destra che di sinistra. Il danno taglia la trave per metà della sua sezione. (Figura 5.8 a-b)

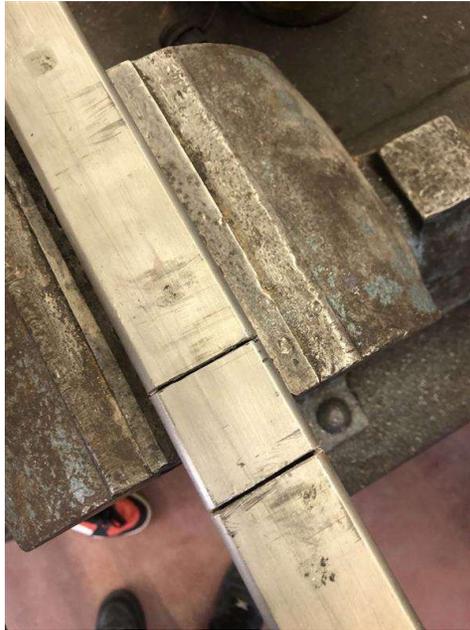


Figura 5.8 (a) Vista dall'alto del danno D1 della trave.



Figura 5.8 (b) Vista laterale del danno D1 della trave.

Dopo aver generato il danno D1 alla struttura l'abbiamo riposizionata sulle due funi elastiche. Le posizioni delle funi restano invariati alla distanza di 165 mm dalle estremità della trave.

Nella fase dell'analisi vibrazionale, il procedimento seguito è stato lo stesso della trave non danneggiata D0. Come menzionato precedentemente l'unica differenza è che i colpi di martello insieme all'acquisizione dei dati degli accelerometri sono stati fatti in corrispondenza della faccia superiore (Figura 5.9). Inoltre, il numero di colpi per l'acquisizione dei dati degli accelerometri è stato di 10, a differenza dei 3 colpi per la trave D0 (Figura 5.10 a-b). Una volta raccolte tutte le informazioni di vibrazioni dal software, abbiamo esportato i dati in formato Excel e rielaborato i dati ricavando i grafici. Tramite i picchi è stato possibile individuare i modi di vibrare della trave che sono ovviamente diversi rispetto quelli della trave in condizioni D0, precisamente più bassi.

Figura 5.9 Sollecitazione della trave nel punto designato per il martello e i rispettivi punti per il posizionamento degli accelerometri allo stato di danno D1.

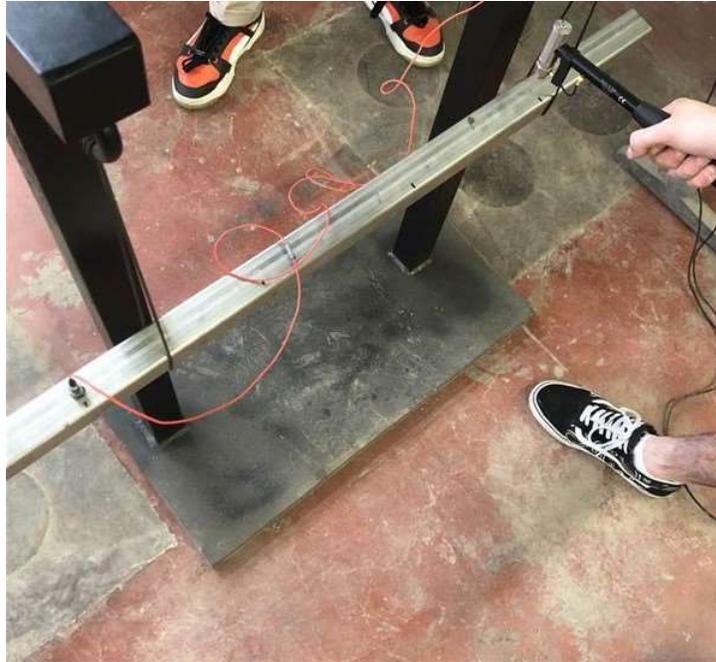


Figura 5.10 (a) Posizione dell'accelerometro nel punto 1 con la trave danneggiata allo stadio D1.

Figura 5.10 (b) Posizione dell'accelerometro nel punto 2 con la trave danneggiata allo stadio D1.



Successivamente abbiamo danneggiato nuovamente la trave, in condizioni D2, riproducendo i tagli delle stesse dimensioni ma collocate entrambe a 20 mm di distanza dai primi due tagli iniziali della trave D1. (Figura 5.11 a-b)



Figura 5.11 (a) Vista dall'alto del danno D2 della trave.

Figura 5.11 (b) Vista laterale del danno della trave.



D2

Una volta che eseguiti gli stessi passaggi per la trave allo stato del danno D2 siamo passati a creare l'ultima condizione di danno D3 della trave.

I tagli sono stati prodotti a distanza di 20 mm dalle precedenti lesioni del danno D2 della trave (Figura 5.12 a). Abbiamo riposizionato la trave sulle funi elastiche (Figura 5.12 b) e infine abbiamo ripetuto lo stesso procedimento di acquisizione dei dati dinamici della struttura.



Figura 5.12 (a) Vista dell'alto del grado di danno D3 della trave.

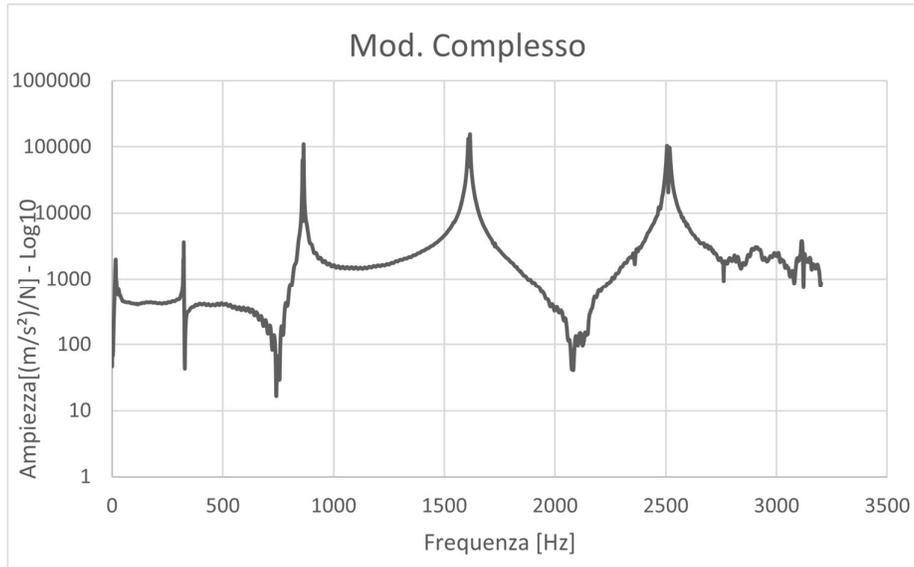
Figura 5.12 (b) Posizionamento della trave
allo stato di danno D3 per la raccolta dei
dati dinamici.



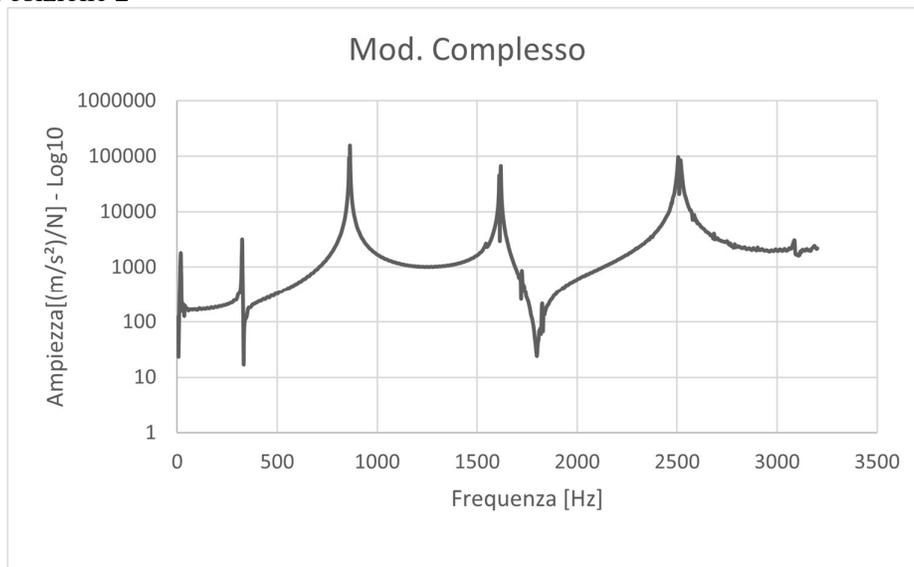
5.4 Risultati sperimentali delle prove dinamiche

Stato di danno D0 (colpi sul lato superiore)

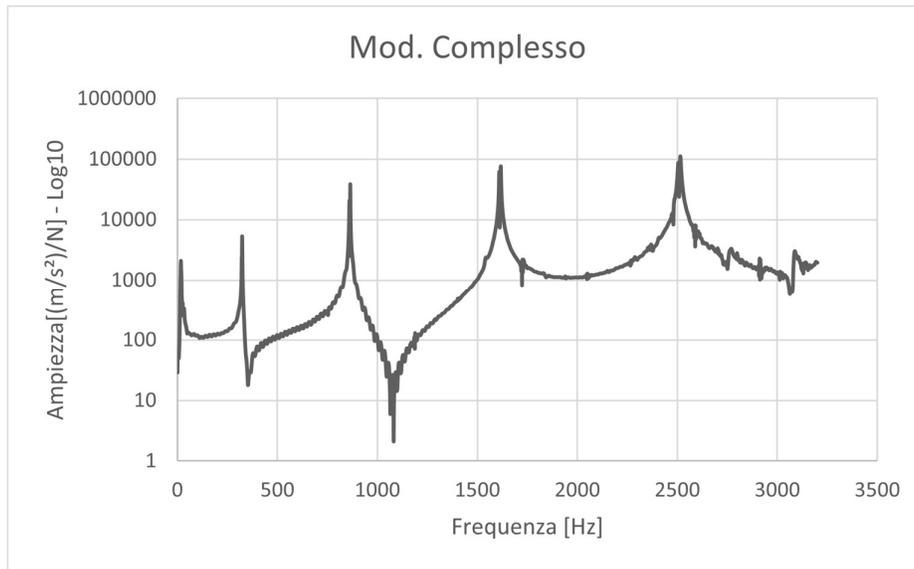
- Posizione 1



- Posizione 2

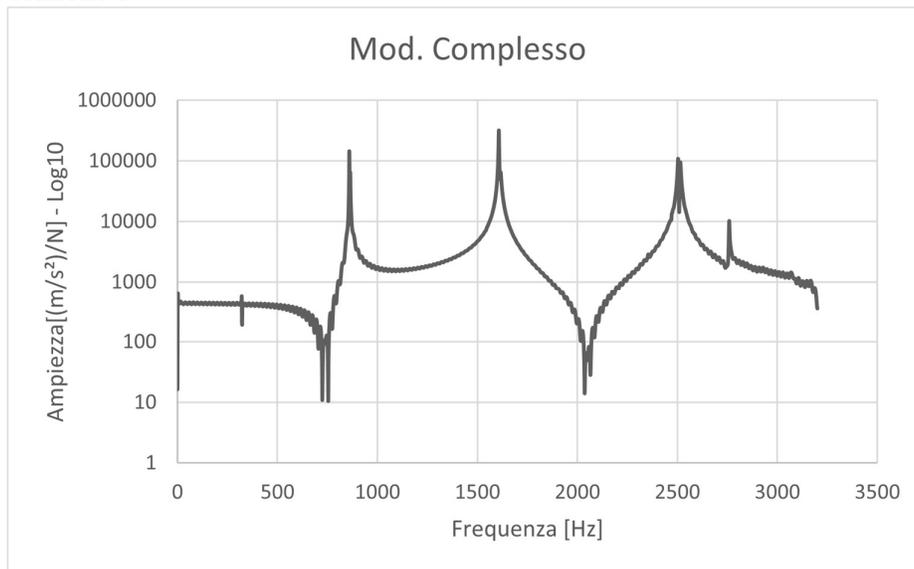


- Posizione 3

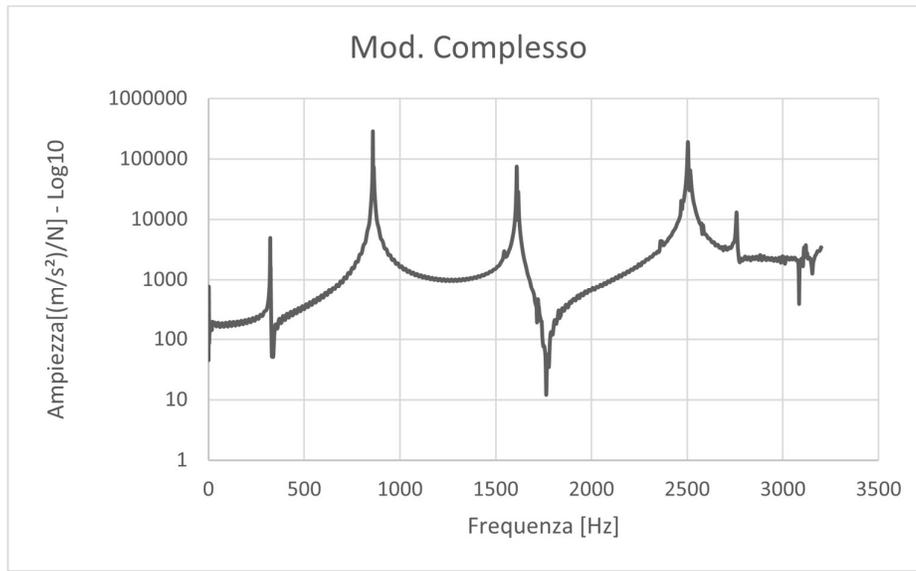


Stato di danno D0 (colpi sul lato laterale)

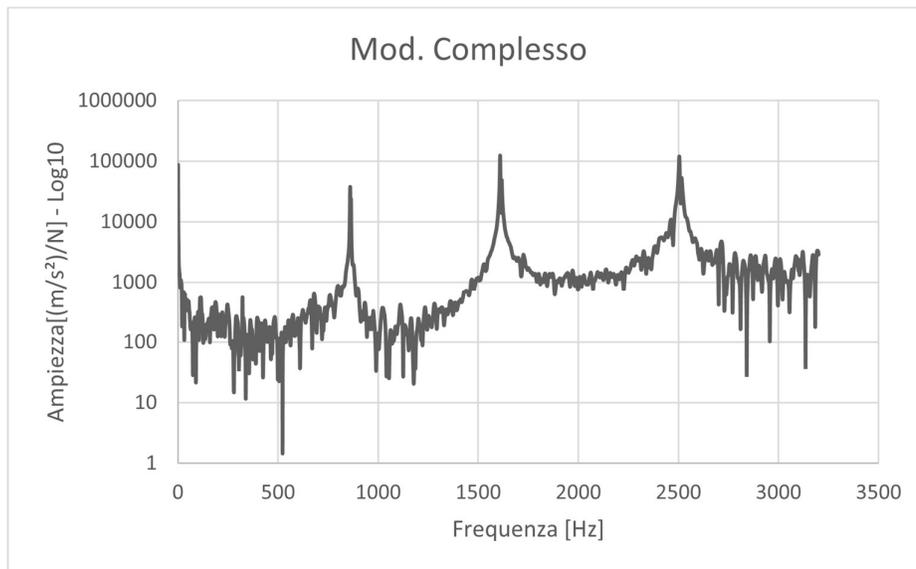
- Posizione 1



- Posizione 2



- Posizione 3



5.5 Confronto tra i risultati teorici e sperimentali

Al fine di poter individuare le frequenze naturali teoriche relative ai primi tre modi di vibrare, viene usata la teoria di Eulero-Bernoulli per la trave in acciaio, nella condizione di vincolo libera-libera. Le ipotesi alla base di tale modello sono:

- Materiale omogeneo e comportamento elastico-lineare (validità della legge di Hooke);
- Stato tensionale di flessioni prevalentemente descritto dalle tensioni normali nella direzione dell'asse della trave; stato tensionale trascurabile nelle direzioni normali ($\sigma_z = \sigma_y = 0; \sigma_x \neq 0$);
- Il piano di flessione coincide con il piano della trave;
- Inerzia rotazionale trascurabile;
- Validità della legge di Bernoulli per la conservazione della sezione piana normale all'asse della trave nella configurazione deformata.

Tramite queste ipotesi di base e una procedura dimostrativa per un concio infinitesimo di trave di lunghezza dx (Figura 5.13) è possibile ricavare il valore degli autovalori del modo di vibrare r in determinate condizioni di vincolo.

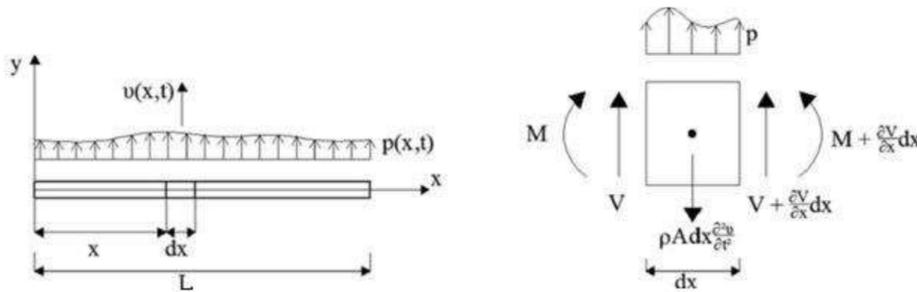


Figura 5.13 Concio infinitesimo di trave di lunghezza dx .

L'autovalore λ_r^f nelle condizioni di vincolo libero-libero del modo di vibrare r_i , si determina dall'autovalore per una trave semplicemente appoggiata $\lambda_r = r \cdot \pi/L$ attraverso la seguente espressione:

$$\lambda_r = \xi_r \cdot \lambda_r \tag{5.1}$$

Dove il valore di ξ_r è un coefficiente che dipende dal modo di vibrare r e dalle condizioni al contorno (Figura 5.14).

Condizioni al contorno	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
libero-libero	1,506	1,25	1,167	1,125
appoggio-appoggio	1	1	1	1
incastro-incastro	1,5066	1,5066	1,166	1,122
incastro-appoggio	1,249	1,122	1,081	1,063
incastro-libero	0,6	0,74	0,83	0,87

Figura 5.14 Coefficiente ξ_r relativo alla formula di Eulero-Bernoulli per il calcolo delle frequenze.

Quindi per una trave snella, omogenea, di rigidezza flessionale EI e densità ρ , il valore delle frequenze relative ai modi trasversali si calcola con la seguente formula di Eulero-Bernoulli applicabile per qualsiasi condizione al contorno:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{r\xi_r\pi}{L} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \text{ con } r = 1, 2 \text{ e } 3. \quad (5.2)$$

Al fine di calcolare le frequenze teoriche è necessario individuare le caratteristiche della trave in acciaio studiata (Figura 5.15)

B, larghezza sezione [mm]	40
H, altezza sezione [mm]	40
S, spessore [mm]	111
L, lunghezza [mm]	900
Area [mm ²]	171,16
ρ , densità [Ns ² /mm ⁴]	7,84744E-09
E, modulo di Young [N/mm ²]	210000
I, momento di inerzia [mm ⁴]	43201

Figura 5.15 Caratteristiche della trave in acciaio.

Andando ad usare la formula (5.2), si ricavano per i tre modi di vibrare i seguenti valori delle frequenze naturali relative ai primi tre modi di vibrare (Figura 5.16):

Frequenze naturali	
f_r (Modo 1)	361,47329 [Hz]
f_r (Modo 2)	996,10766 [Hz]
f_r (Modo 3)	1953,48682 [Hz]

Figura 5.16 Valori delle frequenze naturali dei primi tre modi per la condizione di vincolo libero-libero.

Di seguito si mostra il confronto tra i dati delle vibrazioni raccolte al livello sperimentale e quelle calcolate teoricamente tramite la legge di Eulero-Bernoulli per la trave integra. (Figura 5.17)

Valori teorici e sperimentali	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
f_{exp} – superficie superiore	322,333	864,333	1615,667
f_{exp} – superficie laterale	322,667	860,00	1609,667
f_{th} – Eulero Bernoulli	361,473	996,108	1953,487

Figura 5.17 Confronto dei dati sperimentali e teorici della trave allo stato integro D0.

5.6 Conclusione

Il lavoro di tesi è stato sviluppato con un'analisi dinamica di una trave in acciaio in condizioni integre e successivamente danneggiate. A causa della mancanza di tempo non è stato possibile effettuare le prove dinamiche anche sulla trave rinforzata tramite l'ausilio dei materiali polimerici. L'obiettivo finale è lo studio dell'efficacia che comporta l'uso delle tecniche di rinforzo dei materiali FRP.

Le analisi dinamiche condotte con le prove dinamiche di vibrazioni libere hanno permesso di monitorare la variazione delle frequenze della trave dallo stato integro a quello danneggiato. Come menzionato precedentemente, a causa della carenza di tempo, non è stato possibile ottenere i dati di frequenza vibrazionale relativi alla trave rinforzata.

Dalla valutazione dei risultati delle prove sperimentali, è stato possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Il calcolo delle frequenze teoriche dalla formula di Eulero-Bernoulli dà dei valori orientativi sui quali potrebbero essere i possibili valori di frequenza di una trave o un elemento strutturale in una determinata condizione di vincolo, con una determinata forma geometrica, densità e modulo elastico.
- Nonostante la mancanza dei dati sperimentali del seguente lavoro di tesi inerente ai valori di frequenza della trave rinforzata, è possibile affermare grazie anche alle prove sperimentali riportate all'interno del secondo capitolo di tesi sull'esempio dei possibili utilizzi dei rinforzi in FRP, le frequenze aumentano di valore grazie all'incremento della rigidità, portando quindi ad un incremento delle capacità strutturali dell'elemento studiato.
- La trave, indipendentemente da quale punto venga effettuata l'eccitazione, presenta le stesse misure di frequenza anche se ad ampiezze diverse. Questo perché le onde stazionarie formate all'interno del sistema si distribuiscono uniformemente. Infatti, come si può notare dai grafici sperimentali, i valori di picco delle frequenze in corrispondenza delle prove condotte con i colpi sul lato superiore o laterale della trave danno gli stessi valori di picco.
- All'aumentare del danno è possibile notare che i valori di frequenza si riducono molto, in particolar modo rispetto il primo modo di vibrare, a causa della perdita di rigidità in corrispondenza delle sezioni della trave danneggiata. Questo ci permette di affermare che l'analisi modale sperimentale è molto utile per valutare, in funzione

delle variazioni di frequenza, la risposta dinamica ai vari stati di danno. Di conseguenza, risulta una tecnica non distruttiva molto utile per valutare lo stato di danneggiamento e l'efficacia di un eventuale rinforzo applicato ad una qualsiasi struttura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Norme Tecniche delle Costruzioni dal supplemento ordinario della “Gazzetta Ufficiale” n.42 del 20 Febbraio 2018.
- [2] Istruzioni CNR-DT 203/2006.
- [3] Istruzioni CNR-DT 215/2018.
- [4] Capozucca R., Bossoletti S. (2015). Dynamic response of RC beams – in different scale – with near mounted CFRP rectangular rods. COMPOSITE STRUCTURES, vol 131, p. 516-529, ISSN: 0263-8223, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.05.043>
- [5] <https://www.rhinocarbonfiber.com/cfrp-strengthening-of-rc-structures-using-the-nsm-technique>
- [6] Capozucca R., Nilde Cerri M. (2002). Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP-sheets. COMPOSITE STRUCTURES, vol, 16, Issue 2, p. 91-99, PII: S0950-0618(01)00036-8, doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00036-8)
- [7] Silwal P.K., Parvin A., Alhusban M. (2024). Numerical Investigation on Strengthening of Steel Beams for Corrosion Damage or Web Openings Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets. BUILDINGS 2024, 14, 1069, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings14041069>
- [8] Corradini M., Vemury C.M., Edmondson V., Poologanathan K., Nagaratnam B. (2021). Local FRP reinforcement of existing timber beams. COMPOSITE STRUCTURES, vol. 258, p. 1-13, ISSN: 0263-8223, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113363>
- [9] Capozucca R. (2013). A reflection on the application of vibration tests for the assessment of cracking in PRC/RC beams. ENGINEERING STRUCTURES, vol 48, p. 508-518, ISSN: 0141-0296, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.022>