



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**STUDIO SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO
MECCANICO DI TRAVI IN VETRO RINFORZATE CON LAMINA IN
CFRP**

**EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF
REINFORCED GLASS BEAMS WITH CFRP LAMINA**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Michele Serpilli

Correlatori: Chiar.ma

Prof.ssa Francesca Stazi

Dott.ssa Erica Magagnini

Tesi di Laurea di:

Luca Cartechini

A.A. 2021 / 2022

SOMMARIO

INDICE DELLE FIGURE	6
INDICE DELLE TABELLE	11
ABSTRACT	12
ABSTRACT (English)	13
INTRODUZIONE	14
1. STATO DELL'ARTE	16
2. MATERIALI	24
2.1. PROPRIETA' DEI MATERIALI	25
2.2. PROCESSI DI PRODUZIONE E DI ASSEMBLAGGIO	32
2.3 DESCRIZIONE DEI CAMPIONI DI TRAVE	36
3. METODI SPERIMENTALI	38
3.1. CARATTERIZZAZIONE STATICA	38
3.2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA	43
4. METODI NUMERICI	51
4.1. MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI (FEM)	51
5. RISULTATI	55
5.1. RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE STATICA	55

5.2.	RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE DINAMICA	64
5.2.1.	PROVINO NON RINFORZATO – ASSE FORTE	65
5.2.2.	PROVINO NON RINFORZATO – ASSE DEBOLE.....	66
5.2.3.	PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE FORTE	68
5.2.4.	PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE DEBOLE .	69
5.3.	RISULTATI DELLA MODELLAZIONE FEM	71
5.3.1.	PROVINO NON RINFORZATO – ASSE FORTE	71
5.3.2.	PROVINO NON RINFORZATO – ASSE DEBOLE.....	73
5.3.3.	PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE FORTE	75
5.3.4.	PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE DEBOLE .	77
6.	DISCUSSIONE.....	79
6.1.	DISCUSSIONE CARATTERIZZAZIONE STATICA	79
6.2.	DISCUSSIONE CARATTERIZZAZIONE DINAMICA	90
7.	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	93
	BIBLIOGRAFIA.....	95
	ALLEGATI	97
	PROVINO NON RINFORZATO – ASSE FORTE.....	97
	PROVINO NON RINFORZATO - ASSE DEBOLE	102

PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE FORTE..... 106

PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE DEBOLE..... 111

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Pavimento in vetro strutturale	16
Figura 2 – Sezione trasversale rinforzata con tondini (sx) e con lamine piatte (dx)	19
Figura 3 - Sezione trasversale rinforzata.....	20
Figura 4 - Carico di rottura delle differenti configurazioni	20
Figura 5 – Materiali di rinforzo (sx) e sezione trasversale della trave (dx).....	21
Figura 6 - Sezioni trasversali dei campioni di trave sperimentati	22
Figura 7 - Configurazione vetro laminato	24
Figura 8 - Struttura molecolare del vetro siliceo	26
Figura 9 - Confronto di rigidità e forza tra i due materiali	28
Figura 10 - Confronto tra il modulo di taglio dei due materiali	29
Figura 11 - Processo Float Pilkington.....	34
Figura 12 - Posizionamento delle lastre	35
Figura 13 - Fase di pre-laminazione.....	35
Figura 14 - Processo di autoclave	35
Figura 15 - Vetro laminato finito	35
Figura 16. Configurazioni dei modelli di trave studiati	36
Figura 17 - Schema della prova statica a flessione	39
Figura 18 - Schema della cerniera.....	40
Figura 19 – Trasduttore di spostamento incollato alla staffa, a sua volta incollata alla trave	41
Figura 20 - Pompa manuale ENERPAC	41
Figura 21 - Strumento di acquisizione dati SPIDER 8.....	42
Figura 22 - Software Catman	42
Figura 23 - Martello strumentato l'IMPACT HAMMER 8202+2646 di Brüel & Kjær	46
Figura 24 – Accelerometro ACCELERATION 4508 di Brüel & Kjær	47
Figura 25 - LAN XI TYPE 3050 di Brüel & Kjær.....	47
Figura 26 - Software BK CONNECT – PULSE di Brüel & Kjær	48
Figura 27 - Piani di sollecitazione principali	48
Figura 28 - Schema prova dinamica.....	49

Figura 29 - Battuta del martello strumentato in direzione forte	50
Figura 30 – Battuta del martello strumentato in direzione debole	50
Figura 31 - Workbench Analisi Modale.....	51
Figura 32 - Definizione proprietà del vetro.....	52
Figura 33 - Definizione proprietà del SentryGlas®	52
Figura 34 - Modello geometrico	53
Figura 35 - Definizione della mesh.....	54
Figura 36 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO NR1	55
Figura 37 - Condizione iniziale, PROVINO NR1.....	56
Figura 38 - Condizione intermedia, PROVINO NR1	56
Figura 39 - Condizione finale, PROVINO NR1	56
Figura 40 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO NR2	57
Figura 41 - Condizione iniziale, PROVINO NR2.....	57
Figura 42 - Condizione intermedia, PROVINO NR2	57
Figura 43 - Condizione finale, PROVINO NR2	58
Figura 44 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO NR3	58
Figura 45 –Condizione iniziale, PROVINO NR3	58
Figura 46 - Condizione intermedia, PROVINO NR3	59
Figura 47 - Condizione finale, PROVINO NR3	59
Figura 48 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO RL1	59
Figura 49 - Condizione iniziale, PROVINO RL1	60
Figura 50 - Condizione intermedia, PROVINO RL1	60
Figura 51 - Condizione finale, PROVINO RL1	60
Figura 52 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO RL2.....	61
Figura 53 - Condizione iniziale, PROVINO RL2	61
Figura 54 - Condizione intermedia, PROVINO RL2.....	61
Figura 55 – Condizione finale, PROVINO RL 2	62
Figura 56 - Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO RL3	62
Figura 57 - Condizione iniziale, PROVINO RL3	62
Figura 58 - Condizione intermedia, PROVINO RL3.....	63

Figura 59 - Condizione finale, PROVINO RL3.....	63
Figura 60 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE .	65
Figura 61 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO NON RINFORZATO	65
Figura 62 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE .	66
Figura 63 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO NON RINFORZATO	67
Figura 64 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE.....	68
Figura 65 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO RINFORZATO	68
Figura 66 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE.....	69
Figura 67 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO RINFORZATO	70
Figura 68 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO	71
Figura 69 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO	71
Figura 70 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO.....	72
Figura 71 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO	72
Figura 72 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO	73
Figura 73 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO	73
Figura 74 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO.....	73
Figura 75 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO	74
Figura 76 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO.....	75
Figura 77 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO.....	75
Figura 78 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO	75
Figura 79 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO	76
Figura 80 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO	77
Figura 81 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO.....	77
Figura 82 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO	77
Figura 83 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO	78
Figura 84 – Confronto provini non rinforzati.....	79
Figura 85 - Modalità di rottura PROVINO NR3.....	80
Figura 86 – Confronto provini rinforzati con lamina	81
Figura 87 - Aloni in prossimità dei rulli del ripartitore di carico, PROVINO RL2	82
Figura 88 - Modalità di rottura PROVINO RL2.....	82

Figura 89 - Aloni in prossimità dei rulli del ripartitore di carico, PROVINO RL3	83
Figura 90 - Modalità di rottura PROVINO RL3	84
Figura 91 - Confronto tra i provini rinforzati con tessuto [6].....	85
Figura 92 - Confronto tra i provini NR e RL	86
Figura 93 – Confronto tra i provini NR, RL e RT	86
Figura 94 - Confronto tra i valori medi di carico per le tipologie di provini sperimentati	88
Figura 95 - Confronto del modulo di rigidezza dei provini	88
Figura 96 - Confronto con i valori presenti in letteratura.....	89
Figura 97 - Confronto tra le frequenze relative ai primi modi dei provini NR e RL	92
Figura 98 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M1	97
Figura 99 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M2	97
Figura 100 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M3	98
Figura 101 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M4	98
Figura 102 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M5	99
Figura 103 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M6	99
Figura 104 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M7	100
Figura 105 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M8	100
Figura 106 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M9	101
Figura 107 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M1	102
Figura 108 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M2	102
Figura 109 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M3	103
Figura 110 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M4	103
Figura 111 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M5	104
Figura 112 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M6	104
Figura 113 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M7	105
Figura 114 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M8	105
Figura 115 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M9	106
Figura 116 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M1	106
Figura 117 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M2	107
Figura 118 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M3	107

Figura 119 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M4	108
Figura 120 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M5	108
Figura 121 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M6	109
Figura 122 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M7	109
Figura 123 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M8	110
Figura 124 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M9	110
Figura 125 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M1	111
Figura 126 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M2	111
Figura 127 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M3	112
Figura 128 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M4	112
Figura 129 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M5	113
Figura 130 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M6	113
Figura 131 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M7	114
Figura 132 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M8	114
Figura 133 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M9	115

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Proprietà del vetro.....	27
Tabella 2 - Proprietà del SentryGlas®	29
Tabella 3 - Modulo di Young.....	30
Tabella 4 - Modulo di taglio	30
Tabella 5 - Coefficiente di Poisson	30
Tabella 6 - Proprietà lamina in fibra di carbonio	31
Tabella 7 – Denominazione provini e caratteristiche geometriche	37
Tabella 8 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO NON RINFORZATO	72
Tabella 9 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO NON RINFORZATO	74
Tabella 10 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO RINFORZATO.....	76
Tabella 11 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO RINFORZATO.....	78
Tabella 12 - Risultati sperimentali, provini NR	80
Tabella 13 - Risultati sperimentali, provini RL.....	84
Tabella 14 - Risultati sperimentali, provini RT.....	85
Tabella 15 – Confronto risultati sperimentali dei provini	87
Tabella 16 - Confronto tra frequenze sperimentali e modello FEM	90
Tabella 17 - Confronto tra frequenze dei provini non rinforzati e rinforzati, asse forte	91
Tabella 18 - Confronto tra frequenze dei provini non rinforzati e rinforzati, asse debole	91

ABSTRACT

Al giorno d'oggi, il rinforzo strutturale mediante l'applicazione di materiali compositi rappresenta una realtà consolidata nel panorama tecnico nazionale ed internazionale ed è parte integrante delle opere di recupero degli edifici interessati da fenomeni sismici. Lo scopo principale dell'utilizzo di tali materiali è quello di ottenere delle soluzioni ibride in modo da avere un aumento di resistenza e di rigidezza dell'intero sistema. Nel presente elaborato di tesi, il materiale composito è stato utilizzato in un'applicazione differente rispetto al classico intervento di recupero strutturale; infatti, le sue notevoli caratteristiche meccaniche sono state utilizzate nella realizzazione di travi in vetro strutturale, rinforzate mediante una lamina in fibra di carbonio inserita tra le lastre di vetro. I provini, di lunghezza pari a 1,50 m, sono stati sperimentati dal punto di vista statico e dinamico, rispettivamente con una prova a flessione su quattro punti, con la quale si sono determinati i carichi e gli spostamenti massimi, e con una prova vibrazionale condotta con un martello strumentato, con la quale si sono determinati i modi di vibrare e le relative frequenze. Infine, lo studio dinamico è stato affrontato anche con l'ausilio della modellazione FEM, che ha permesso di ottenere dei risultati utili per la validazione della prova sperimentale. Le soluzioni rinforzate, confrontate con quelle senza rinforzo, costituite semplicemente da vetro stratificato, hanno dimostrato dei miglioramenti dal punto di vista flessionale, con un aumento della resistenza media del 12%. Dal punto di vista dinamico, l'inserimento della lamina in fibra di carbonio all'interno della trave in vetro ha generato un aumento della rigidezza flessionale media del 14%.

ABSTRACT (English)

Nowdays, the structural reinforcement using composite materials represents a common approach in the national and international technical field and it is an integral part of buildings rehabilitation interested by seismic events. The main goal of the use of composite materials is to obtain an hybrid solution in order to enhance the strenght and stiffness of the whole system. In this analysis, the composite material was used differently with respect to the usual structural rehabilitation intervention; indeed, its remarkable mechanics features, were used to generate structural glass beam, reinforced with a CFRP lamina embedded between glass panels. The specimens have 1,50 m lenght, and were subjected to static and dynamic tests. Those are respectively the four point bending test, which determine the maximum loads and displacements, and the vibrational test performed with an impact hammer, that determinated the vibration modes and frequencies. Finally, the dynamic analysis was carried out by using numerical FEM simulation, which evaluated useful results to verify the experiment. The reinforced solutions, compared to the un-reinforced solutions ones having a simple laminated glass, showed an improvement on the flexibility, increasing the mean strenght of 12%. Regarding the dynamic of the beam, the embedded CFRP lamina enhanced its mean flexural stiffness of 14%.

INTRODUZIONE

Il presente elaborato di tesi si concentra sullo studio del comportamento meccanico di travi in vetro rinforzate mediante l'applicazione di materiali compositi. L'obiettivo è quello di definire una nuova tipologia di trave in vetro rinforzata, in aggiunta a quelle già presenti nella letteratura scientifica, capace di resistere ai carichi esterni, coniugando la stabilità meccanica, tipica delle strutture pesanti, ad un design moderno ed innovativo, tipico degli elementi leggeri come il vetro.

Il crescente impiego del vetro nel campo dell'edilizia ha suscitato in me l'interesse verso l'applicazione di tale materiale in ambito strutturale. Sebbene il vetro sia un materiale fragile, se opportunamente rinforzato, può fornire un comportamento adatto ad utilizzi strutturali. Sono stati quindi analizzati degli studi sperimentali già condotti a livello internazionale che hanno rappresentato la base per questo lavoro di tesi e successivamente si è individuata una nuova configurazione da sperimentare.

In particolare, la ricerca è stata affrontata sottoponendo gli elementi ad uno sforzo di flessione, in modo tale da determinare i massimi carichi di rottura. Inoltre, è stato osservato anche il comportamento dinamico delle travi, così da valutarne le frequenze e i modi di vibrare. Successivamente è stata realizzata una modellazione FEM con la quale si determina il comportamento dinamico dal punto di vista numerico.

La tesi si articola in sette capitoli: nel primo viene riportato un quadro generale dello stato dell'arte riguardante l'utilizzo del vetro in ambito edile e le sperimentazioni già condotte su alcune configurazioni di travi. Il secondo capitolo si occupa della definizione dei materiali utilizzati, delle loro proprietà, dei loro processi di produzione

e di assemblaggio e dei provini di travi realizzati. Nel terzo si definiscono le prove sperimentali effettuate e nel successivo si analizza il comportamento dinamico dei campioni in via numerica, mediante l'utilizzo di software di modellazione. Il quinto capitolo si concentra sull'elaborazione dei dati ottenuti a seguito delle prove sperimentali e numeriche. Nel sesto capitolo si discutono i risultati ottenuti nel corso della sperimentazione, confrontandoli con quelli ottenuti mediante la modellazione con il software e con quelli ottenuti dagli altri studi scientifici analizzati, in modo tale da esporre gli elementi più rilevanti della ricerca svolta. Il settimo capitolo contiene le conclusioni e i possibili sviluppi futuri per il proseguimento della sperimentazione.

1. STATO DELL'ARTE

Le caratteristiche principali dell'architettura contemporanea sono la trasparenza e la leggerezza, motivo per cui negli ultimi anni il vetro ha trovato sempre maggior impiego nel campo dell'edilizia. La tendenza a ridurre, o ad eliminare completamente, la separazione tra ambiente interno ed esterno spinge molti progettisti ad utilizzare questo materiale per la realizzazione di coperture e di grandi facciate trasparenti, in modo tale da avere un totale contatto visivo con l'esterno che garantisca una maggiore illuminazione interna e un miglior comfort degli occupanti. Nel caso di una copertura, i grandi pannelli in vetro sono sorretti da travi vetrate, riducendo così al minimo il numero di componenti metallici che, se presenti, andrebbero a ridurre la trasparenza dell'intero sistema.



Figura 1 - Pavimento in vetro strutturale

Dal punto di vista strutturale, questi sistemi vetrati devono offrire delle adeguate prestazioni portanti poiché devono resistere ai carichi di progetto applicati. Nonostante il vetro sia un materiale fragile, esso risulta essere idoneo per applicazioni strutturali,

purché siano rispettati dei criteri progettuali quali la *Gerarchia delle Resistenze*¹ e la *Ridondanza Strutturale*², che garantiscono robustezza, ridondanza, duttilità e sicurezza. Nonostante ciò, le vigenti normative per la progettazione di elementi in vetro strutturale in zona sismica risultano essere poco attente ad un materiale tanto innovativo quanto diffuso in edilizia; infatti, le raccomandazioni per le verifiche degli elementi strutturali in vetro sono assenti nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018). A livello italiano, quello che sembra ad oggi essere l'unico documento in accordo con i principi dell'ingegneria strutturale, stabiliti dagli Eurocodici, è rappresentato dalla CNR-DT 210/2013 – “Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro”. Lo scopo di queste istruzioni è quello di cercare di fornire un panorama il più possibile completo dei vari aspetti che devono essere considerati nella progettazione, esecuzione e controllo di elementi in vetro per quanto riguarda la verifica della loro resistenza meccanica e stabilità [1]. Pur non trattandosi di un documento prescrittivo, il testo CNR-DT 210/2013 rappresenta un valido supporto ai progettisti.

La ricerca negli ultimi anni si è concentrata principalmente su travi in vetro rinforzate con dei tiranti, generalmente posti nella zona di trazione dell'elemento, destinati a sopportare le forze di trazione in caso di rottura del vetro. I risultati di questi studi sperimentali hanno dimostrato un miglior comportamento a cedimento caratterizzato da una significativa resistenza post-rottura e da una sufficiente duttilità.

¹ Per Gerarchia delle Resistenze si intende una divisione dell'organismo strutturale secondo criteri gerarchici basati sulla minore o maggiore importanza dell'elemento; quindi, implica che la sicurezza strutturale aumenti in base all'importanza dell'elemento stesso [10].

² Per Ridondanza Strutturale si intende la capacità della sezione di un elemento strutturale di mantenere una certa capacità resistente residua a seguito della rottura di una sua parte oppure, in modo equivalente, la proprietà per cui la rottura di una parte della sezione non ne provoca la rottura completa [10].

Gli studi presenti in letteratura, consultati per l'elaborazione del seguente lavoro, fanno riferimento a travi in vetro laminato, formate da pannelli di vetro temprato e strati di SentryGlas^{®3} e PVB, rinforzate con differenti tipologie di materiali (GFRP, CFRP, Acciaio, Alluminio) incollati nel lembo teso della trave o inseriti all'interno dell'anima della trave stessa in maniera discontinua. Inoltre, è stato consultato un ulteriore articolo scientifico che fa riferimento a travi in vetro non rinforzate. Tali studi sono volti ad analizzare principalmente il comportamento statico dell'elemento, sottoponendolo a prove di flessione, trascurando però l'analisi del comportamento dinamico. Successivamente sono state svolte anche delle modellazioni FEM in modo da avere una corrispondenza con le prove sperimentali e validare quindi i risultati ottenuti.

C. Louter, C. Leung, H. Kolstein e J. Vambersky, nella loro pubblicazione *“Structural Glass Beams with Embedded Glass Fibre Reinforcement”* [2], hanno affrontato lo studio del comportamento di travi in vetro rinforzate mediante l'utilizzo della fibra di vetro, annegata direttamente nello strato intermedio di SentryGlas[®]. Lo studio si è concentrato sullo sviluppo di due configurazioni di travi, aventi entrambe le stesse dimensioni (1500 mm di lunghezza e 115 mm di altezza), lo stesso numero di vetri di ugual spessore (due da 8 mm) e gli stessi strati di SentryGlas[®] (due da 1,52 mm intervallati da uno da 0,9 mm). L'unica differenza tra le due configurazioni è la modalità di rinforzo, ottenuta in un caso mediante l'inserimento di n° 5 tondini pultrusi, nell'altro caso mediante l'inserimento di n° 3 lamine piatte, entrambi di dimensioni molto ridotte.

³ Il SentryGlas[®] è un ionomero termoplastico trasparente utilizzato nelle applicazioni di vetro stratificato come intercalare. Rispetto ad altri intercalari per applicazioni in vetro (ad es. PVB ed EVA), SG è caratterizzato da maggiore rigidità, maggiore durata e maggiore resistenza meccanica.

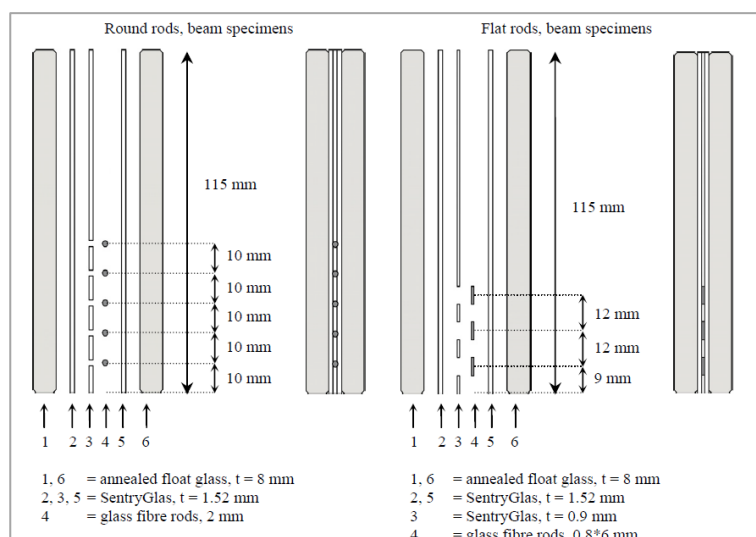


Figura 2 – Sezione trasversale rinforzata con tondini (sx) e con lamine piatte (dx)

Il risultato della prova a flessione su quattro punti ha messo in luce un significativo aumento della resistenza a flessione per la configurazione con le lamine piatte, con dei valori di carico ultimo raddoppiati rispetto a quelli riferiti alla prima fessurazione.

E. Cagnacci, M. Orlando e P. Spinelli, nella loro pubblicazione *“Experimental campaign and numerical simulation of the behaviour of reinforced glass beam”* [3], hanno esaminato il comportamento meccanico di travi in vetro rinforzate mediante l’applicazione di barre in FRP. Il rinforzo delle travi, formate da tre pannelli in vetro alternate da strati in PVB, è stato applicato nel pannello centrale, di dimensioni minori rispetto ai due esterni, inserendo delle barre in CFRP incollate mediante una resina epossidica bicomponente.

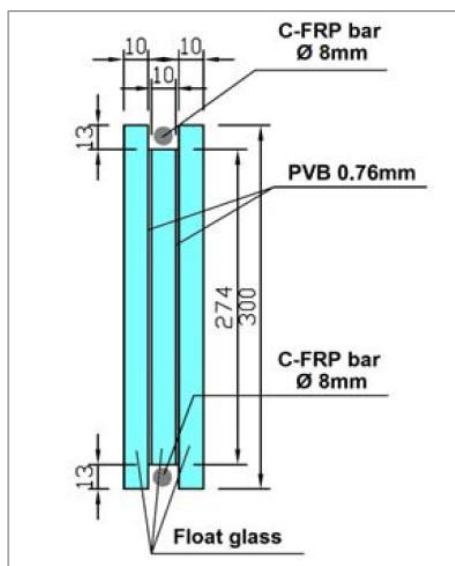


Figura 3 - Sezione trasversale rinforzata

I risultati della sperimentazione, avvenuta mediante la prova a flessione in quattro punti, hanno dimostrato un comportamento lineare fino a rottura, con un notevole aumento della capacità di carico della configurazione rinforzata (RINF) rispetto alla configurazione non rinforzata (NR)

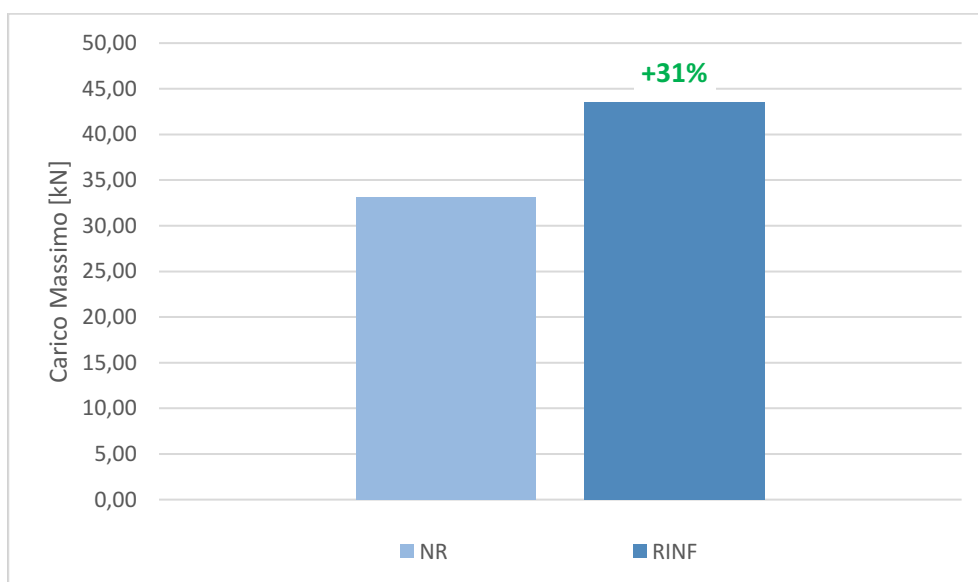


Figura 4 - Carico di rottura delle differenti configurazioni

C. Bedon e C. Louter, nella loro pubblicazione “*Structural glass beams with embedded GFRP, CFRP, or steel reinforcement rods: Comparative experimental, analytical and numerical investigations*” [4] hanno esaminato delle travi strutturali in vetro stratificato che includono al loro interno delle barre di rinforzo, costituite da GFRP, CFRP e acciaio, ponendo particolare attenzione all’effetto delle caratteristiche di tali elementi rinforzanti. Lo studio è stato affrontato testando tre configurazioni di travi e tre campioni per ogni tipologia. Il campione di base è costituito da due lastre di vetro, con 10 x 100 mm le dimensioni nominali della sezione trasversale, tenute insieme da uno strato di SentryGlas® (spessore 1,52 mm), per una lunghezza totale di 1000 mm.

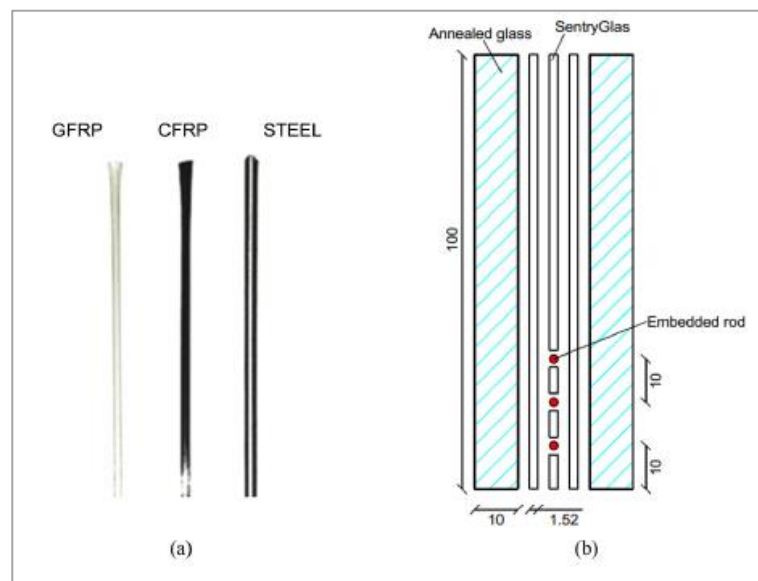


Figura 5 – Materiali di rinforzo (sx) e sezione trasversale della trave (dx)

I risultati della sperimentazione hanno dimostrato un comportamento migliorativo in termini di rigidità, resistenza post-frattura e ridondanza. Infatti, i provini contenenti i materiali compositi incorporati, hanno fatto registrare delle deflessioni post-rottura almeno pari a dieci volte la prima deformazione fessurativa.

X. Centelles, J. Ramon Castro, F. Pelayo, M. Aenlle-López, L. F. Cabeza, nella pubblicazione “*Experimental study and comparison of different fully transparent laminated glass beam design*” [5], hanno analizzato differenti configurazioni di travi in vetro stratificato senza l’aggiunta di materiali di rinforzo. I campioni di travi, aventi le stesse dimensioni (30x300x3100 mm), sono costituiti da tre pannelli in vetro e due strati di SentryGlas[®], e da cinque pannelli in vetro e quattro strati di SentryGlas[®]. Lo studio si completa poi con la realizzazione delle stesse travi ma con la sostituzione del SentryGlas[®] con strati di PVB.

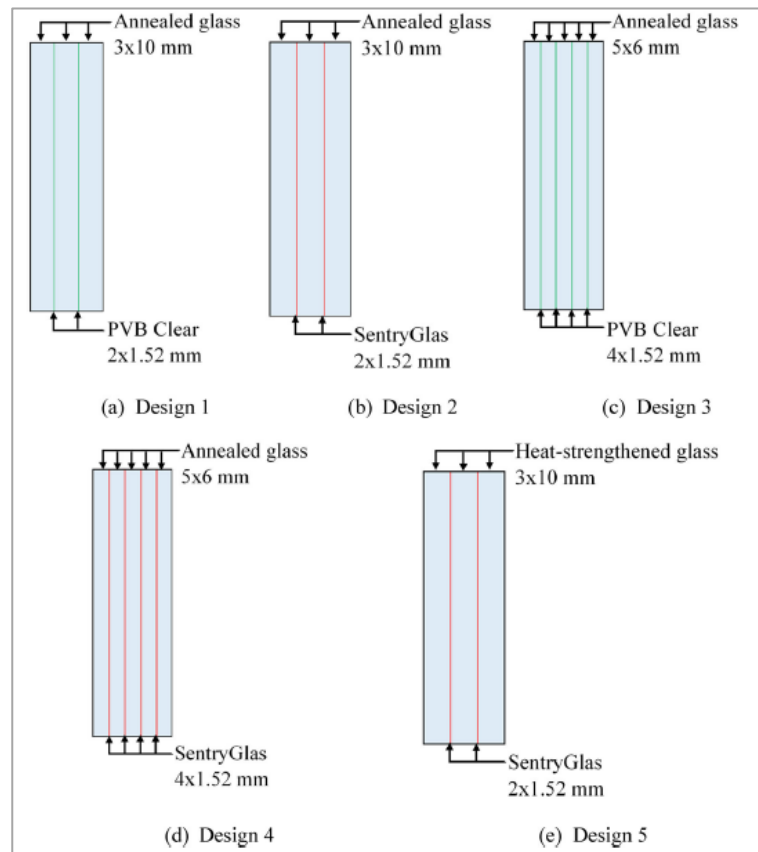


Figura 6 - Sezioni trasversali dei campioni di trave sperimentati

I risultati della sperimentazione hanno dimostrato un comportamento lineare fino a rottura, con dei valori di resistenza maggiore per la configurazione contenente al loro interno lo strato di SentryGlas[®] e formata da lastre di vetro temprato.

Il presente lavoro di tesi si aggiunge agli studi già esistenti in letteratura e si concentra su un'ulteriore specifica configurazione. Dalle pubblicazioni analizzate e commentate precedentemente, sono state estrapolate le configurazioni migliori da ognuna di esse e si è deciso quindi di realizzare una trave in vetro rinforzata, costituita da due pannelli in vetro, tenuti insieme da due strati di SentryGlas[®], alternati da una lamina in fibra di carbonio che si sviluppa per tutta l'altezza. Così facendo si perde la totale trasparenza del vetro, ma si mantiene l'eleganza e il design tipico di tali materiali, ottenendo un aumento della resistenza alla prima fessurazione rispetto alla configurazione non rinforzata e un irrigidimento dal punto di vista dinamico.

Lo studio segue le sperimentazioni viste negli studi presenti in letteratura; viene quindi analizzato il comportamento statico mediante la prova a flessione in quattro punti, focalizzando l'attenzione sul comportamento elastico fino alla prima fessurazione, trascurando gli effetti dati dal rinforzo in termini di rigidità e duttilità post-frattura, osservabili in caso di studio del comportamento plastico. In aggiunta, viene studiato il comportamento dinamico mediante un'analisi vibrazionale della trave, con la quale si determinano le proprietà dinamiche dell'elemento, quali modi di vibrare e relative frequenze proprie. Successivamente, il comportamento dinamico viene valutato anche in via numerica mediante una modellazione FEM (Finite Element Method).

2. MATERIALI

I campioni sperimentati nel presente elaborato di tesi sono dei modelli di travi in vetro laminato, comunemente chiamato anche stratificato. L'obiettivo fondamentale del vetro laminato è quello di combinare vari strati di materiali, aventi caratteristiche differenti, in modo tale da ottenere un unico elemento avente un comportamento migliore rispetto a quello dei singoli materiali. La configurazione più comune consiste nell'interporre tra due pannelli in vetro un foglio in materiale plastico, conferendo così all'elemento particolari caratteristiche di sicurezza. Infatti, in caso di frattura, il materiale plastico interposto tra i due pannelli è in grado di trattenere i frammenti di vetro.

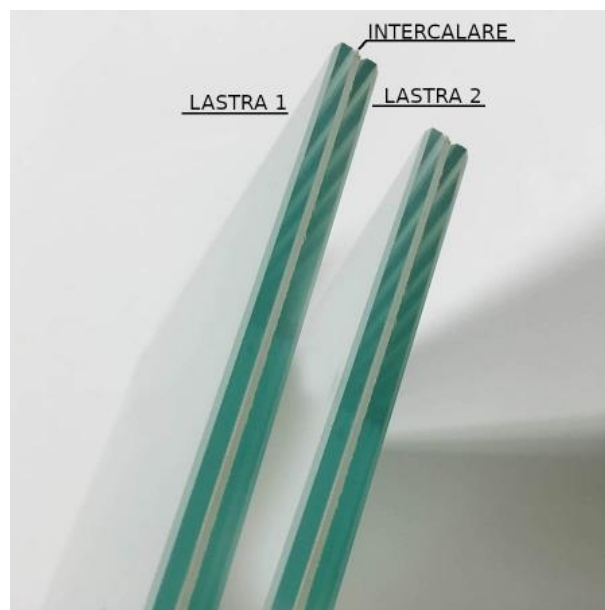


Figura 7 - Configurazione vetro laminato

Alla configurazione base sopraindicata, nel presente elaborato di tesi viene aggiunta la configurazione rinforzata con una lamina di fibra di carbonio. Di seguito vengono quindi riportate le caratteristiche dei singoli materiali.

2.1. PROPRIETA' DEI MATERIALI

VETRO

Il vetro è per definizione chimica un ossido organico ottenuto mediante la solidificazione di un liquido ad altissima viscosità, non accompagnata dalla cristallizzazione. Il risultato è quindi un solido amorfo, avente una struttura chimica disordinata, rappresentato dalla mancanza di una temperatura di fusione ben definita, presente invece nei solidi cristallini. Infatti, quando una sostanza cristallina viene riscaldata, essa conserva la sua struttura regolare, con alterazioni relativamente piccole delle proprietà meccaniche fino ad una determinata temperatura, alla quale si verifica improvvisamente il passaggio allo stato liquido. Al contrario, riscaldando una sostanza amorfa, come il vetro, si osserva un graduale rammollimento e una progressiva diminuzione della viscosità, senza che si possa individuare una netta temperatura di fusione. Tale comportamento viene indicato come stato di transizione vetrosa e rappresenta l'incapacità del sistema di trasformarsi secondo stati di equilibrio. La temperatura alla quale si verifica questo comportamento viene chiamata temperatura di transizione vetrosa, indicata con T_g , e dipende dalla velocità di raffreddamento. La composizione chimica influisce fortemente sulle proprietà fisiche del materiale; infatti, l'assenza della struttura cristallina non consente alcuna dislocazione interna e di conseguenza nessuna plasticità del materiale; pertanto, il vetro può deformarsi solo elasticamente e rompersi improvvisamente.

In generale, il vetro è composto dalle seguenti materie prime: le sostanze "formatori", ossia capaci di formare da soli una struttura vetrosa, come la silice (SiO_2), l'anidride borica (B_2O_3), l'anidride fosforica (O_{10}P_4); le sostanze "fondenti", utilizzate

per abbassare il punto di rammollimento, come l'ossido di sodio (Na_2O), l'ossido di potassio (K_2O), l'ossido di calcio (CaO); le sostanze “intermedie”, che possono formare la struttura vetrosa solo in presenza di silice, come l'allumina (Al_2O_3).

Nel mondo industriale e nel linguaggio comune, con il termine vetro vengono indicati i vetri di tipo sodico-calcico, costituiti prevalentemente da ossido di silicio (70-75%). Essi sono anche i più utilizzati in edilizia a causa dei minori costi di produzione. Possiedono una buona durabilità se soggetti ad agenti chimici, una grande resistenza elettrica, una buona trasmissione spettrale nel raggio del visibile ed inoltre risultano essere stabili all'acqua. La silice al suo interno causa il reticolo a carattere amorfo e disordinato descritto precedentemente.

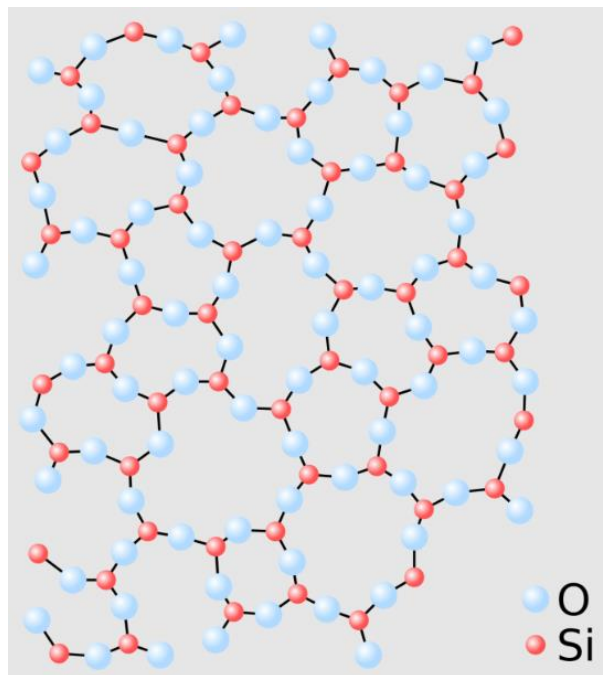


Figura 8 - Struttura molecolare del vetro siliceo

La caratteristica principale del vetro è indubbiamente la trasparenza, ossia la capacità di trasmettere le radiazioni nel campo del visibile, che permette di utilizzarlo in ambiti in cui la visibilità è fondamentale, come per oggetti di utilizzo comune o per

le finestre presenti negli edifici. Se si intende utilizzarlo come materiale da costruzione in ambito edilizio, occorre tenere presente anche delle caratteristiche fisiche e meccaniche. Nella seguente tabella vengono indicate le proprietà del vetro.

CARATTERISTICHE GENERALI			
Composizione	Diossido di silicio (SiO ₂) e altri ossidi		
Aspetto	Trasparente		
Stato di aggregazione	Solido (liquido sottoraffreddato)		
Cristallinità	amorfo		
PROPRIETA' CHIMICO-FISICHE			
	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità	ρ	Kg/cm ³	2500
Indice di rifrazione	η	/	1,458÷1,86
Capacità termica	c	J/Kg·K	795
Coeff. dilatazione termica lineare	k	K ⁻¹	30÷90·10 ⁻⁷
Temperatura di transizione vetrosa	T _g	°C	530
Conduttività termica	λ	W/m·K	1
Emissività	ε	/	0,837
PROPRIETA' MECCANICHE			
	Simbolo	Unità di misura	Valore
Resistenza a compressione	R _c	MPa	1000
Resistenza a flessione	R _f	MPa	120÷200
Modulo di elasticità longitudinale	E	Gpa	37,67÷99,14
Modulo di elasticità tangenziale	E	GPa	14,86÷38,81
Coefficiente di Poisson	ν	/	0,2
Durezza (Knoop)	KK	GPa	6

Tabella 1 - Proprietà del vetro

SENTRYGLAS®

Il SentryGlas® è un ionomero termoplastico trasparente, utilizzato nelle applicazioni di vetro stratificato come intercalare, che contribuisce a creare un vetro più leggero, più sicuro e più strutturale, in grado di resistere a carichi maggiori e a livelli di minaccia più elevati. Per tale motivo, l'utilizzo del vetro laminato nelle

applicazioni strutturali ha acquisito notevole importanza, tale da essere preferito ad un semplice vetro monolitico temprato.

Originariamente sviluppato per la protezione dell'involucro edilizio richiesta per le vetrate anti-uragano negli Stati Uniti, l'uso dell'intercalare ionoplastico si è notevolmente ampliato nel corso degli anni. Infatti, le prestazioni vantaggiose mostrate per la protezione anti-uragano, hanno spinto gli ingegneri ad utilizzare questo materiale anche per altri aspetti di un edificio, come per le facciate, per le coperture, per le balaustre, per le porte e per le pareti divisorie.

Realizzato utilizzando i polimeri ionoplastici, il SentryGlas® è chimicamente differente dal PVB (l'altro intercalare utilizzato per la stratificazione dei vetri), come il Butacite®; infatti, confrontando i due materiali, si nota che il SentryGlas® è più resistente, più rigido e offre prestazioni migliori in un intervallo di temperature più ampio.

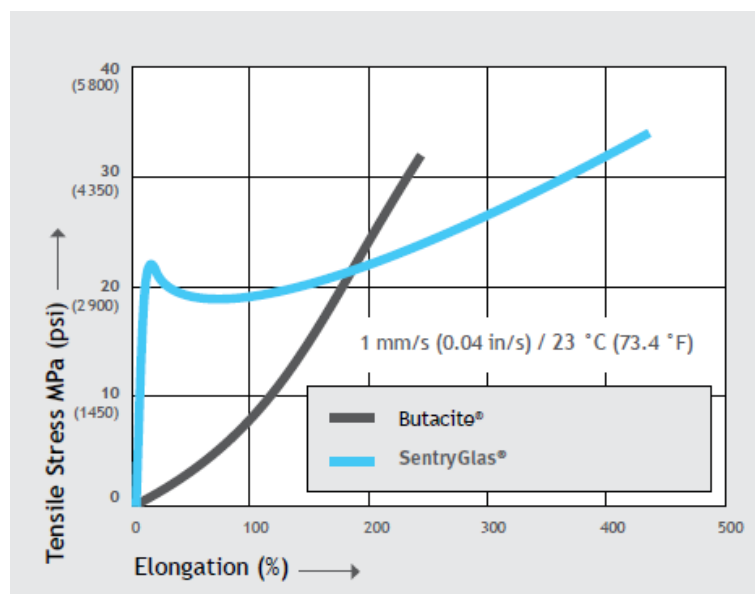


Figura 9 - Confronto di rigidità e forza tra i due materiali

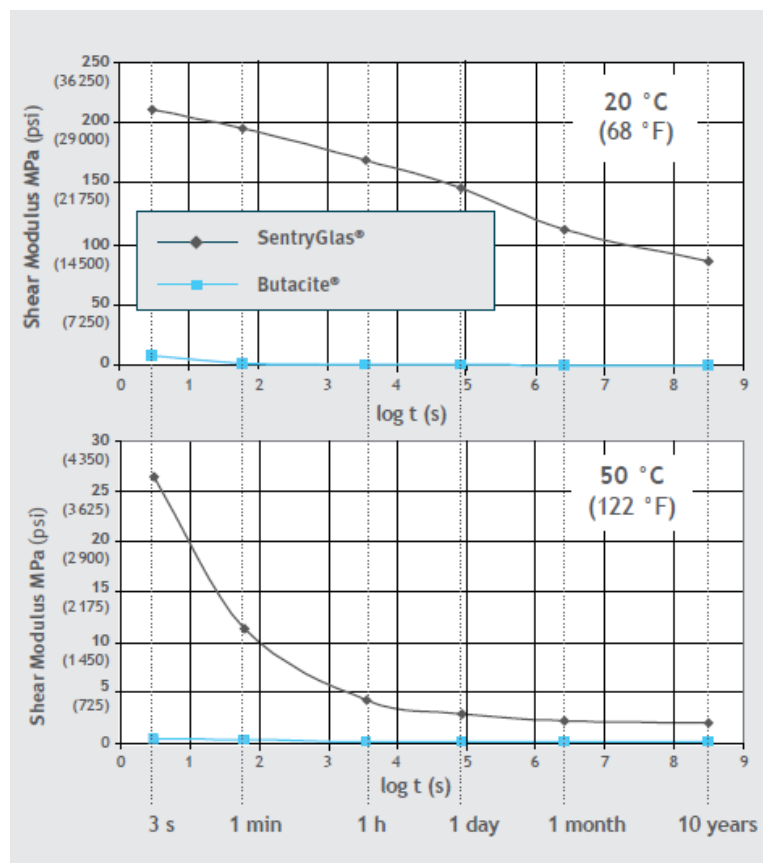


Figura 10 - Confronto tra il modulo di taglio dei due materiali

Nella seguente tabella vengono indicate le caratteristiche del SentryGlas®.

CARATTERISTICHE GENERALI			
Aspetto	Trasparente		
Stato di aggregazione	Solido		
PROPRIETA' FISICHE			
	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità	ρ	g/cm^3	0,95
Temperatura di deflessione	HDT	°C	43
Punto di fusione	MP	°C	94
Conduttività termica	k	W/mK	0,246
PROPRIETA' MECCANICHE			
Modulo di Young	E	MPa	300
Resistenza di trazione	R_t	Mpa	34,5
Allungamento	El	%	400
Modulo di flessione	FM	Mpa	345

Tabella 2 - Proprietà del SentryGlas®

Il modulo di Young, il modulo di taglio e il coefficiente di Poisson dipendono dalla temperatura e dal tempo di applicazione del carico. Di seguito vengono riportate le tabelle contenenti tali parametri.

E - MODULO DI YOUNG (Mpa)							
TEMPERATURA	DURATA DEL CARICO						
°C	1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
10	692	681	651	597	553	499	448
20	628	612	567	493	428	330	256
24	581	561	505	416	327	217	129
30	442	413	324	178	148	34,7	15,9
40	228	187	91,6	27,8	13,6	9,86	8,84
50	108	78,8	33,8	12,6	8,45	6,54	6,00
60	35,3	24,5	10,9	5,10	3,87	3,24	2,91
70	11,3	8,78	5,64	2,52	1,77	1,44	1,35
80	4,65	3,96	2,49	0,96	0,75	0,63	0,54

Tabella 3 - Modulo di Young

G - MODULO DI TAGLIO (Mpa)							
TEMPERATURA	DURATA DEL CARICO						
°C	1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
10	240	236	225	206	190	171	153
20	217	211	195	169	146	112	86,6
24	200	193	173	142	111	73,2	43,3
30	151	141	110	59,9	49,7	11,6	5,31
40	77	63,0	30,7	9,28	4,54	3,29	2,95
50	36,2	26,4	11,3	4,20	2,82	2,18	2,00
60	11,8	8,18	3,64	1,70	1,29	1,08	0,97
70	3,77	2,93	1,88	0,84	0,59	0,48	0,45
80	1,55	1,32	0,83	0,32	0,25	0,21	0,18

Tabella 4 - Modulo di taglio

ν - COEFFICIENTE DI POISSON							
TEMPERATURA	DURATA DEL CARICO						
°C	1 s	3 s	1 min	1 h	1 day	1 mo	10 yrs
10	0,442	0,443	0,446	0,450	0,454	0,458	0,463
20	0,448	0,449	0,446	0,459	0,464	0,473	0,479
24	0,452	0,453	0,458	0,465	0,473	0,482	0,489
30	0,463	0,466	0,473	0,485	0,488	0,497	0,499
40	0,481	0,484	0,492	0,498	0,499	0,499	0,499
50	0,491	0,493	0,497	0,499	0,499	0,500	0,500
60	0,497	0,498	0,499	0,500	0,500	0,500	0,500
70	0,499	0,499	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
80	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500

Tabella 5 - Coefficiente di Poisson

LAMINA IN FIBRA DI CARBONIO

Il materiale di rinforzo, utilizzato nella presente sperimentazione, è una lamina in fibra di carbonio, ottenuta mediante l'incollaggio di tre strati di tessuto costituito da fibre di tipo T700S. Di seguito viene riportata una tabella contenente le caratteristiche del materiale utilizzato, avente un peso di 384 g/m^3 per uno spessore totale di circa 1,27 mm.

CARATTERISTICHE GENERALI			
Composizione	Carbonio, resina epossidica		
Aspetto	Opaco		
Stato di aggregazione	Solido		
PROPRIETA' MECCANICHE			
	Simbolo	Unità di misura	Valore
Modulo di trazione	TM	GPa	65,7
Modulo di compressione	CM	GPa	61,6
Coefficiente di Poisson	ν	/	0,07
Resistenza a trazione	R_t	Gpa	1102
Resistenza a compressione	R_c	Mpa	729
Modulo di taglio	SM	GPa	4,22
Resistenza al taglio	R_s	MPa	73,4

Tabella 6 - Proprietà lamina in fibra di carbonio

2.2. PROCESSI DI PRODUZIONE E DI ASSEMBLAGGIO

La realizzazione dei modelli di trave è avvenuta mediante fasi e processi standardizzati. In primo luogo, sono state realizzate le lastre di vetro, successivamente si è inserita la lamina e il SentryGlas® all'interno di un processo di assemblaggio.

La fabbricazione e la lavorazione del vetro si articolano in diverse fasi:

- Macinazione, dosaggio e miscelazione delle materie prime
- Fusione, in forni di tipo continuo
- Affinazione e omogeneizzazione, mediante sostanze affinanti
- Raffreddamento, fino alla temperatura di formatura
- Formatura
- Ricottura
- Tempra

La produzione del vetro avviene mediante il processo float (in inglese galleggiamento) sviluppato nel 1959 dall'azienda inglese Pilkington. Le materie prime, una volta macinate, vengono pesate ed opportunamente miscelate. Così facendo si ottiene una miscela vetrificabile che viene canalizzata, mediante dei nastri trasportatori, direttamente nei forni, all'interno dei quali la temperatura raggiunge i 1500 °C. A questa temperatura avviene l'evaporazione dell'acqua presente all'interno dei componenti, la dissociazione dei carbonati e dei solfati con sviluppo di anidride carbonica o solforosa, così da formare una massa fusa il più possibile omogenea. Per eliminare le bolle di gas si introducono all'interno della miscela delle sostanze affinanti che, quando riscaldate, rilasciano dei gas in grado di trasportare le bolle presenti nella

massa vetrosa in superficie, operando inoltre ad un efficace rimescolamento che rende la massa ulteriormente omogenea. La miscela così ottenuta viene versata su un bagno di stagno fuso, avente una temperatura di circa 1000 °C, sul quale, presentando una densità maggiore, galleggia. Lo stagno leviga la superficie inferiore del vetro per contatto diretto, mentre la superficie superiore si appiattisce per gravità essendo il materiale ancora allo stato semifuso. Lo spessore delle lastre di vetro è dato dalla velocità dei rulli, chiamati tops, situati ai lati della vasca. Infatti, un'accelerazione dei tops determina una stesura del vetro liquido ad una velocità maggiore e la formazione di un nastro di vetro di minore consistenza. La situazione si inverte se si ha un rallentamento dei tops, con un conseguente aumento dello spessore della lastra. Alla fine di questa fase, il vetro ha raggiunto una temperatura di circa 600 °C e, trovandosi quindi ad uno stato semisolido, è pronto per essere sollevato e posizionato in un tunnel di raffreddamento. Segue quindi la fase di taglio trasversale del vetro in lastre ed un ulteriore taglio longitudinale per eliminare le tracce dei rulli. I pezzi di vetro di scarto verranno reintrodotti nel processo produttivo come rottame di vetro. Il vetro, depositato nel tunnel di raffreddamento, si raffredda sotto controllo fino alla temperatura ambiente, acquistando intorno ai 500 °C le proprietà di un solido perfettamente elastico. Per ottenere il tipo di vetro utilizzato nella presente sperimentazione, si è effettuata la fase di tempra, che consiste nell'incrementare notevolmente la resistenza meccanica dell'elemento tramite un iniziale riscaldamento fino a circa 640 °C, seguito da un brusco raffreddamento con getti di aria fredda. In questo modo si incrementa da tre a cinque volte la resistenza meccanica a trazione, all'urto ed allo sbalzo termico del vetro. La resistenza più elevata è dovuta al fatto che le tensioni meccaniche, imposte dal processo termico, mantengono "chiusi" i difetti superficiali.

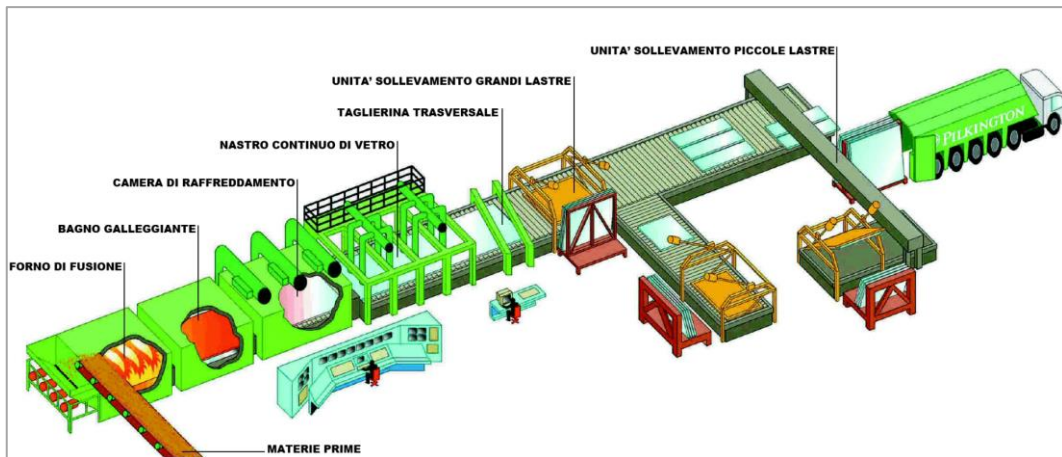


Figura 11 - Processo Float Pilkington

Al fine di ottenere i modelli di travi utilizzati nella presente sperimentazione, una volta ottenute le lastre di vetro esse vengono prima lavate, vengono poi interposti tra di esse i due strati di SentryGlas® e la lamina in fibra di carbonio. Il pacchetto così ottenuto viene sottoposto ad un processo di pre-laminazione, ossia viene scaldato e pressato, prima di essere posto all'interno dell'autoclave, con la quale si ottiene il risultato finale. In questa fase gli strati vengono definitivamente uniti grazie all'uso di alte pressioni e di una temperatura di circa 140 °C. Il processo in autoclave risulta essere molto importante, poiché i parametri dell'autoclave, descritti di seguito, influenzano le proprietà fisiche e meccaniche dell'elemento finito.

I parametri raccomandati per il processo di autoclave sono i seguenti:

- Temperatura: 130 – 140 °C
- Pressione: 180 – 200 psi
- Tempo di attesa: min 60 minuti, o superiore a seconda dello spessore del laminato
- Velocità di raffreddamento: minimo di 2,2 °C/minuto

È importante che il tempo di ammollo dell'autoclave sia abbastanza lungo in modo che l'intercalare raggiunga la temperatura desiderata per il tempo necessario a garantire un'adeguata adesione. I vetri laminati che non ricevono il tempo richiesto possono avere un buon comportamento ottico, ma possono avere una bassa adesione a causa dell'incollaggio incompleto tra il vetro e l'intercalare, e di conseguenza scarse proprietà meccaniche. Di seguito viene riportata la rappresentazione schematica del processo di autoclave.

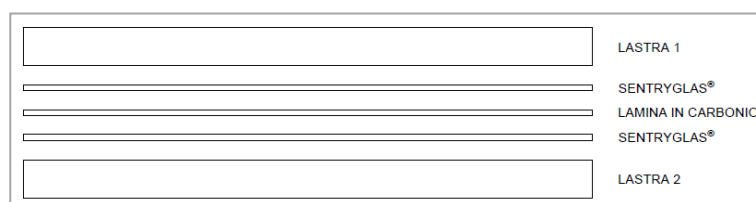


Figura 12 - Posizionamento delle lastre

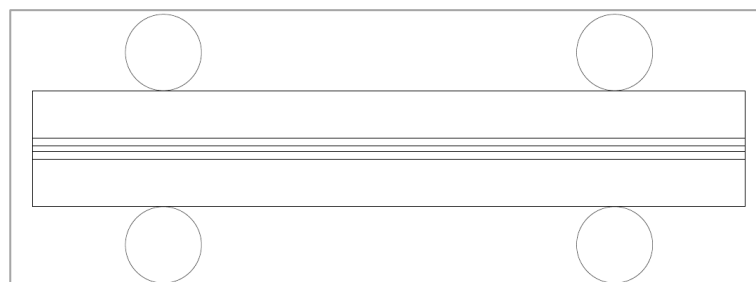


Figura 13 - Fase di pre-laminazione

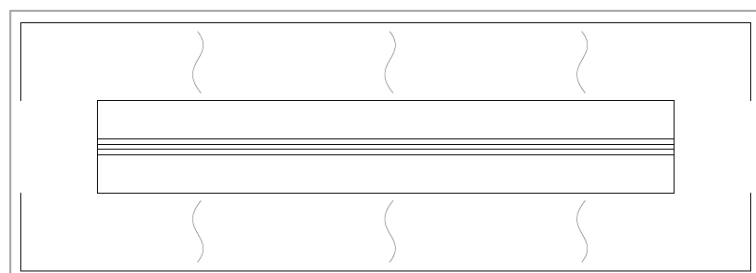


Figura 14 - Processo di autoclave

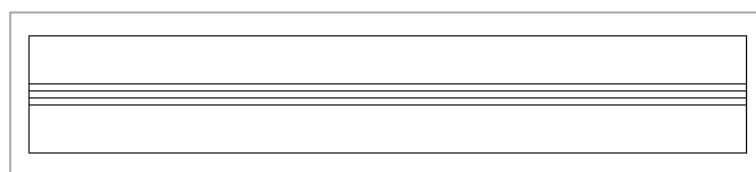


Figura 15 - Vetro laminato finito

2.3 DESCRIZIONE DEI CAMPIONI DI TRAVE

I modelli di trave, studiati in questo lavoro, si rappresentano sotto tre differenti configurazioni, come di seguito riportate:

- a) NR_NON RINFORZATA
- b) RL_RINFORZO LAMINA
- c) RT_RINFORZO TESSUTO

Le tipologie di travi A) e B) sono state analizzate nel presente elaborato di tesi, mentre la tipologia C) è stata studiata nell'elaborato di tesi "Comportamento meccanico di travi in vetro stratificato rinforzate con tessuti in fibra di carbonio" [6] di Donati Alessio.

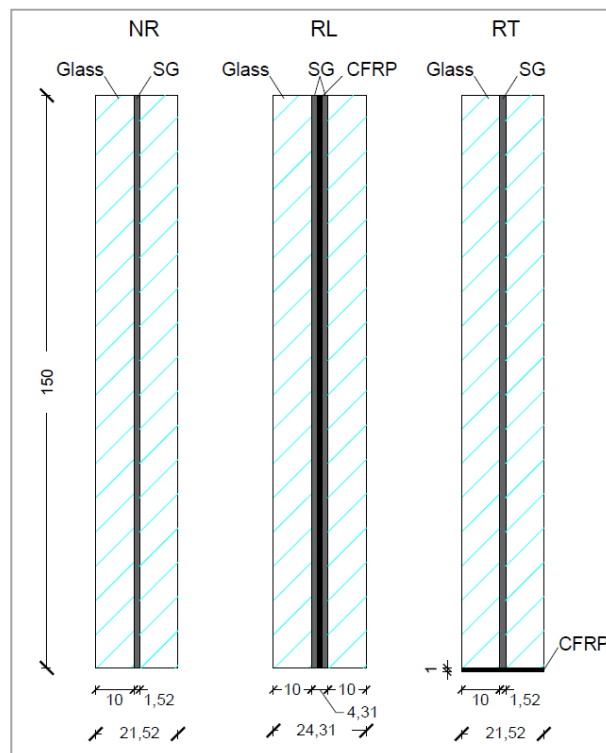


Figura 16 - Configurazioni dei modelli di trave studiati

La configurazione di tipo NR è una trave formata da due lastre di vetro temprato, di spessore 10 mm, tenute insieme da uno strato di SentryGlas[®], avente spessore di 1,52 mm. La configurazione RL è una trave formata da due lastre di vetro temprato, di spessore 10 mm, tenute insieme da due strati di SentryGlas[®], aventi spessore di 1,52 mm, alternati da una lamina in fibra di carbonio (CFRP), di spessore 1,27 mm. La configurazione di tipo RT è la stessa di quella NR, con l'unica differenza che in questo caso è presente uno strato di tessuto in fibra di carbonio incollato nel lembo teso della trave mediante resina epossidica bicomponente. Tutte le tipologie di travi hanno le stesse dimensioni, 150 mm di altezza e 1500 mm di lunghezza.

Provini	Num. provini	Materiali	Num. strati	Spessore	Spessore tot.	Altezza	Lunghezza
ID	/	/	/	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
NR	3	Vetro	2	10	21,52	150	1500
		SentryGlas	1	1,52		150	1500
RL	3	Vetro	2	10	24,31	150	1500
		SentryGlas	2	1,52		150	1500
		CFRP	1	1,27		150	1500

Tabella 7 – Denominazione provini e caratteristiche geometriche

I modelli di trave sono stati realizzati grazie alla collaborazione di tre aziende che hanno fornito materiali e lavorazioni. In particolare, SEICO COMPOSITI S.r.l, con sede a Forlì (FC), ha fornito il tessuto in fibra di carbonio, incollato poi in laboratorio nel lembo teso della trave mediante l'adesivo epossidico bicomponente DP490 dell'azienda 3M; HP Composites S.p.A., con sede ad Ascoli Piceno (AP), ha realizzato la lamina pultrusa in fibra di carbonio, inserita poi all'interno trave direttamente dall'azienda Novavetro S.r.l., con sede a San Severino Marche (MC), che ha realizzato tutte le travi descritte precedentemente.

3. METODI SPERIMENTALI

La sperimentazione è stata organizzata secondo due fasi: le prove statiche di flessione e le prove dinamiche vibrazionali. Lo studio sperimentale del comportamento flessionale delle travi è stato effettuato mediante prove di flessione in quattro punti, nella quale sono stati misurati gli spostamenti e i carichi di rottura. Il comportamento dinamico è stato studiato mediante una prova che, con l'utilizzo di sistemi di eccitazione e sistemi di misura e analisi dei segnali, ha permesso di ricavare le frequenze e i modi di vibrare dell'elemento. Le prove sperimentali sono state svolte presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche.

3.1. CARATTERIZZAZIONE STATICA

Il vetro è un materiale isotropo omogeneo che presenta un comportamento elastico-lineare quasi perfetto in tutto il suo campo di resistenza a trazione. Il vetro ha una resistenza alla compressione molto elevata e teoricamente una resistenza a trazione molto elevata, ma la sua superficie ha molte irregolarità che rappresentano il suo punto debole, quando il vetro è sottoposto ad uno sforzo di trazione. Grazie all'elevata resistenza a compressione, il vetro si rompe sempre sotto sforzi di trazione. Dato che i vetri nelle applicazioni edilizie sono raramente utilizzati in tensione diretta, la proprietà più importante per la resistenza al carico è la resistenza a flessione [7].

L'obiettivo della prova a flessione è quello di determinare il valore del carico di fessurazione mediante l'applicazione progressiva della forza. Si ottiene così un diagramma forza-spostamento, dal quale si può osservare la forza che serve per generare la frattura dell'elemento e lo spostamento massimo che raggiunge quando si

trova nella medesima condizione. Da esso si determinano i livelli massimi di carico sopportabili dall'elemento in vetro, in condizioni elastiche, utili durante la fase di progettazione e verifica della struttura. Al fine di avere un risultato attendibile e quindi poter prescindere dall'aleatorietà della prova, sono stati studiati tre campioni di travi per ogni configurazione con lo stesso setup sperimentale.

La prova a flessione è stata effettuata consultando la normativa UNI EN 1288-3 “Determinazione della resistenza a flessione del vetro – prova con provino supportato in due punti (flessione in quattro punti)” [8]. Il montaggio del provino sottoposto a flessione segue la sperimentazione affrontata da X. Centelles in [5]. Infatti, il provino è stato sperimentato verticalmente, sollecitandolo nel piano di sollecitazione principale, a differenza della normativa che indica di testarlo nel piano di sollecitazione secondario. Le condizioni di vincolo alle due estremità sono state realizzate con due cerniere, in modo tale da bloccare gli spostamenti torsionali.

I modelli sperimentati vengono quindi inseriti nel seguente sistema composto da due cerniere, con interasse pari a 1400 mm, e da un ripartitore di carico che distribuisce la forza impressa su due punti, ad un interasse di 300 mm. Tra il ripartitore e la trave vengono posizionate delle strisce in gomma, dello spessore di 3 mm.

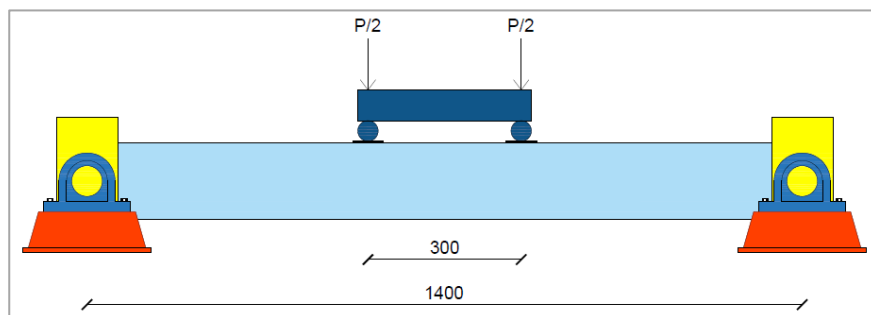


Figura 17 - Schema della prova statica a flessione

Dopo aver posizionato la trave, essa viene incernierata con l'ausilio di due blocchi in legno e due strati di gomma posizionati direttamente a contatto. Di seguito viene riportato lo schema dettagliato della cerniera.

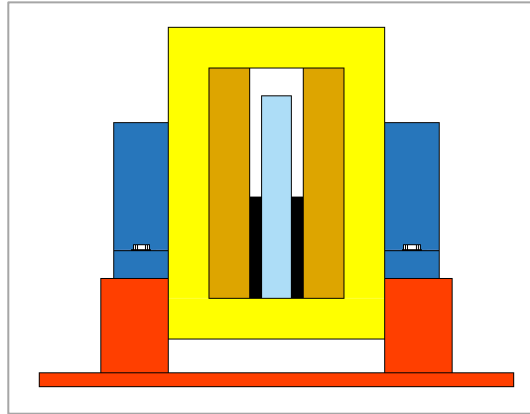


Figura 18 - Schema della cerniera

Successivamente viene applicata ed utilizzata la seguente strumentazione per completare il setup e svolgere la prova.

Uno degli strumenti di misura predisposti, per rilevare ed acquisire i dati necessari, è il trasduttore di spostamento LVDT (Linear Variable Differential Transformer), ossia un sensore di posizione lineare utilizzato per misurare lo spostamento lineare e la posizione su distanze relativamente brevi. Gli step effettuati per l'applicazione del sono i seguenti:

- Pulizia del punto di applicazione
- Applicazione della staffa di alluminio alla trave tramite colla a caldo
- Montaggio del trasduttore di spostamento, fissato con dei morsetti su un cavalletto e svincolato dal telaio della prova
- Fissaggio del trasduttore alla staffa di alluminio tramite colla a caldo



Figura 19 – Trasduttore di spostamento incollato alla staffa, a sua volta incollata alla trave

L'altro strumento essenziale, per rilevare la forza utilizzata nella prova, è il trasduttore di pressione AEP, montato direttamente sul martinetto in grado di applicare una forza pari a 98066,5 N, circa 10 ton. La pompa manuale, di tipo ENERPAC, che presenta una pressione massima esercitabile pari a 700 bar, serve ad azionare il martinetto posizionato al di sopra del ripartitore di carico su cui verrà impressa la forza.



Figura 20 - Pompa manuale ENERPAC

Una volta predisposti tutti gli elementi, si procede al cablaggio dei cavi dei trasduttori con lo strumento di acquisizione dati DAQ SPIDER 8 di HBM, mediante il quale si riesce ad ottenere un campionamento con una frequenza da 1/s fino a 9800/s.



Figura 21 - Strumento di acquisizione dati SPIDER 8

L'hardware di acquisizione viene poi collegato ad un laptop nel quale è presente il software DAQ CATMAN di HBM, che consente di visualizzare, analizzare ed archiviare dati durante la misurazione ed elaborare dei file di output, di tipo .xls, dai quali si ricavano valori utili per la determinazione del diagramma forza-spostamento.

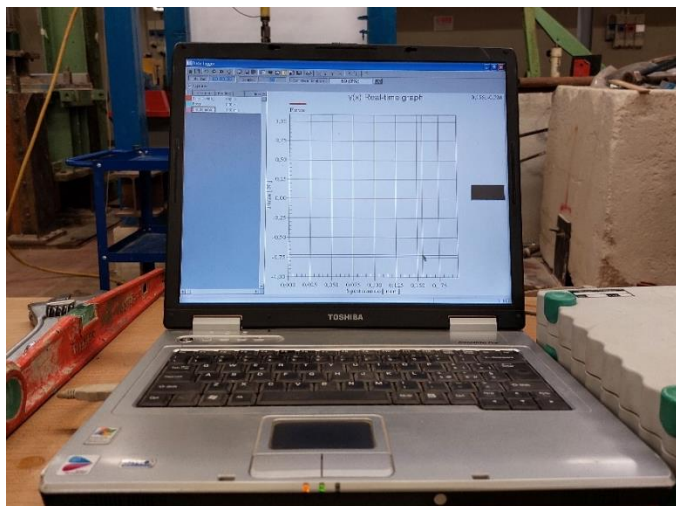


Figura 22 - Software Catman

3.2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA

La caratterizzazione dinamica di una struttura è l'insieme delle prove, analitiche e sperimentali, volte a determinare il comportamento dinamico della struttura stessa. Imponendo quindi una generica forzante alla struttura si individuano i modi di vibrare, le frequenze proprie e i coefficienti di smorzamento. Per determinare la risposta di una struttura soggetta ad una forzante si risolvono analiticamente le equazioni differenziali del moto, imponendo delle condizioni iniziali. La soluzione può essere ottenuta, in maniera più semplice, definendo le funzioni di risposta in frequenza (FRF), ottenute analizzando il segnale mediante la tecnica Fast Fourier Transform (FFT). Le funzioni di risposta in frequenza sono costituite da matrici complesse dalle quali è possibile ottenere i parametri caratterizzanti il comportamento dinamico della struttura stessa.

L'approccio analitico permette di ricavare i parametri caratterizzanti il comportamento modale di una struttura partendo dalla conoscenza preliminare di alcune informazioni di base, quali: la geometria dell'elemento, le caratteristiche dei materiali e le relative proprietà, le condizioni al contorno, le matrici della massa, dello smorzamento e della rigidità; risolvendo poi un problema agli autovalori è possibile determinare i parametri modali della struttura.

L'approccio sperimentale consente di determinare le informazioni riguardanti il comportamento modale di una struttura misurando la risposta del sistema ad un'eccitazione nota; in sostanza si applica in un punto i -esimo una forzante avente una pulsazione ω e si misura in un punto j -esimo la risposta in termini di accelerazione, velocità o spostamento. Così facendo si ottiene una funzione complessa $H_{ij}(\omega)$, relativa a quella forzante, che rappresenta la funzione di trasferimento tra la risposta della

struttura lungo il grado di libertà j , ed un'eccitazione applicata in i e di pulsazione ω . Unendo le risposte ottenute, ripetendo l'operazione negli altri punti della trave, si ottiene la matrice di risposte in frequenza $H(\omega)$ dalla quale è possibile determinare il comportamento dinamico della struttura, quindi estrarre i parametri modali. La funzione di risposta in frequenza (FRF) è, infatti, esprimibile come rapporto tra la trasformata di Fourier della risposta, $X(\omega)$, che rappresenta l'output, e la trasformata di Fourier dell'ingresso $F(\omega)$, che rappresenta l'input.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \quad (1)$$

Negli ultimi anni la ricerca ha approfondito notevolmente il tema dell'analisi modale, soprattutto grazie all'evoluzione tecnologica che ha portato alla realizzazione di strumentazioni sempre più precise. L'interesse verso questo tipo di analisi è legato al fatto che il comportamento dinamico di una struttura dipende esclusivamente dalle sue caratteristiche intrinseche e non dal carico applicato. Quindi, se non avvengono modificazioni all'interno della struttura, il comportamento dinamico rimane lo stesso.

L'analisi modale sperimentale, affinché possa restituire un buon esito, deve essere compiuta attraverso un'adeguata strumentazione. I principali strumenti necessari per la misura della risposta di funzione in frequenza sono:

- Sistema di eccitazione
- Trasduttori di forza e di spostamento
- Sistema di misura e analisi dei segnali

Il sistema di eccitazione ha il compito di trasmettere una forza alla struttura; i trasduttori misurano l'entità della forza e lo spostamento che la struttura subisce e li

trasformano in segnali elettrici; tali segnali vengono poi registrati dal sistema di misura che ne analizza il contenuto in frequenza. I sistemi di eccitazione si suddividono in due categorie: sistemi di eccitazione fissi, collegati direttamente alla struttura da analizzare, e sistemi di eccitazione non fissi che non hanno nessun collegamento diretto con la struttura. Tra i sistemi di eccitazione fissi si collocano più comunemente gli shaker elettro-idraulici e gli shaker elettro-dinamici, che si differenziano in relazione all'entità di forza che riescono ad esercitare e al range di frequenza in cui operano. Gli shaker elettro-idraulici, costituiti da attenuatori controllati elettronicamente, vengono utilizzati in prove condotte a bassa frequenza in cui si richiedono elevati livelli di forza o spostamento; gli shaker elettro-dinamici sono anch'essi controllati elettronicamente ma, a differenza dei precedenti, operano su una gamma di frequenze più ampia. Il sistema di eccitazione non fisso più comunemente utilizzato, adottato anche in questa sperimentazione, è il martello strumentato, costituito da un semplice martello su cui è montato un trasduttore di forza. Il livello di energia e il contenuto in frequenza trasmesso alla struttura dipendono dalla forza dell'impatto, dal peso del martello, dal tipo di punta e dalla deformabilità del punto di contatto. Il limite di questo strumento è costituito dalla non facile ripetibilità dell'impulso trasmesso. I trasduttori di forza più comuni nell'analisi modale sono quelli piezoelettrici. Essi hanno al loro interno un cristallo piezoelettrico, come il quarzo, che genera una differenza di carica elettrica tra le sue facce sotto l'effetto di sollecitazioni meccaniche. Questa differenza di carica viene convertita in un segnale, in termini di tensione, da un amplificatore. Il trasduttore di spostamento più comune è l'accelerometro, ossia un piccolo sistema vibrante costituito dal sistema massa-molla. A seguito della vibrazione della sua carcassa, collegata alla struttura soggetta alla vibrazione, inizia ad oscillare. L'accelerometro restituisce un segnale proporzionale

all'accelerazione (e quindi allo spostamento) della sua carcassa, valido in un range di frequenza ben al di sotto della frequenza di risonanza. Il sistema di misura e di analisi dei segnali ha il compito di acquisire i dati provenienti dalla prova sperimentale, registrarli e successivamente analizzarli, in modo tale da poter estrarre i parametri modali della struttura. Il sistema è costituito sostanzialmente da un software di acquisizione dati e da un software di gestione dei segnali.

Le prove sperimentali, eseguite per determinare il comportamento dinamico della trave oggetto di esame, sono state condotte utilizzando la seguente strumentazione specifica.

Il sistema di eccitazione utilizzato è l'IMPACT HAMMER 8202+2646 di Brüel & Kjær. Si tratta di un martello strumentato collegato ad un elaboratore dati, collegato a sua volta ad un computer in cui è presente il software necessario per l'analisi dinamica. Le punte disponibili per questo strumento sono di tre tipologie: acciaio, plastica e gomma. In questa sperimentazione si è utilizzata la punta in plastica, poiché quella in gomma, inizialmente scelta a causa della fragilità del materiale da testare, risultava essere troppo morbida e causava degli input "sporchi".



Figura 23 - Martello strumentato l'IMPACT HAMMER 8202+2646 di Brüel & Kjær

L'accelerometro utilizzato per l'acquisizione di dati delle prove sperimentali è l'ACCELERATION 4508 di Brüel & Kjær. Si tratta di un accelerometro piezoelettrico mono assiale ad alta sensibilità che opera in un range di frequenza da 0,4 Hz a 6000 Hz.



Figura 24 – Accelerometro ACCELERATION 4508 di Brüel & Kjær

Il sistema di acquisizione dei dati utilizzato è la LAN XI TYPE 3050 di Brüel & Kjær. La sua funzione è quella di acquisire, elaborare e trasmettere i segnali provenienti dal martello strumentato e dall'accelerometro, inviandoli via collegamento ethernet al computer in cui è installato il software di analisi.



Figura 25 - LAN XI TYPE 3050 di Brüel & Kjær

Il software BK CONNECT – PULSE di Brüel & Kjær è stato utilizzato per eseguire e l'analisi del comportamento dinamico in vibrazione della trave, estraendo i parametri modali delle funzioni di risposta in frequenza (FRF) ottenute mediante il sistema di eccitazione.

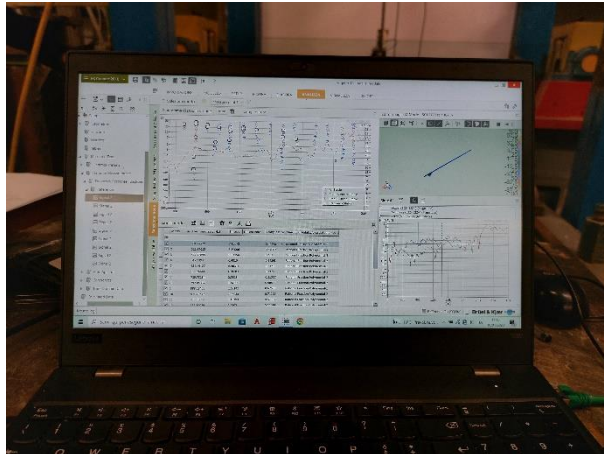


Figura 26 - Software BK CONNECT – PULSE di Brüel & Kjær

La trave è stata testata dinamicamente nei suoi due piani di sollecitazione principali, forte (YY) e debole (XX), in condizioni di estremi libero-libero.

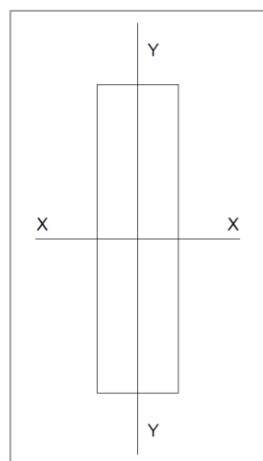


Figura 27 - Piani di sollecitazione principali

Per simulare tali condizioni di estremi, nella direzione forte, la trave è stata appesa con delle corde ad una struttura in acciaio collegata a terra, nella direzione debole è stata appoggiata sopra due strati di gomma piuma. Sulla faccia superiore del campione

sono stati individuati 9 punti, chiamati Mark (M), nei quali è stato applicato di volta in volta l'accelerometro mediante dei pezzi di nastro biadesivo, ed un ulteriore punto di battuta (H) in cui è stato utilizzato il martello strumentato:

- H: punto di battuta
- M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9: punti di risposta

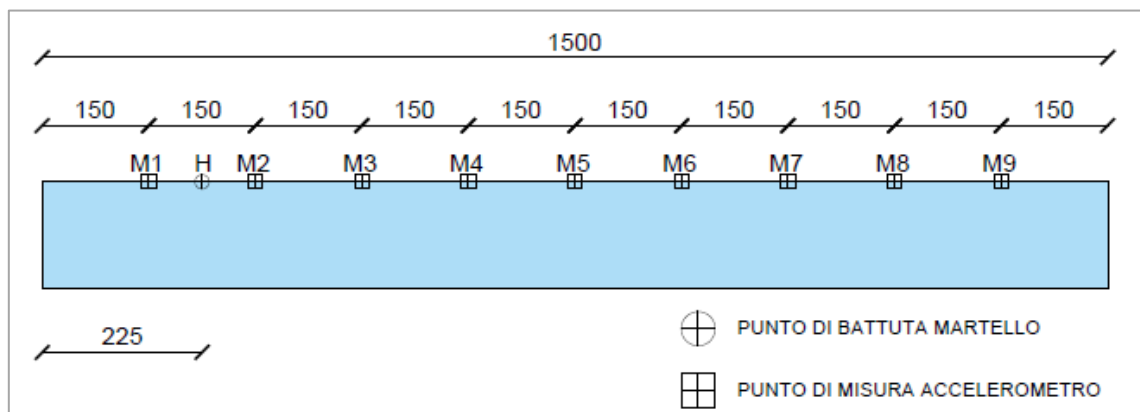


Figura 28 - Schema prova dinamica

Successivamente si è proceduto al settaggio del software di acquisizione dei dati, costruendo in primis l'oggetto sulla griglia, modificato poi inserendo le dimensioni di lunghezza, altezza e spessore. In seguito, è stata creata la mesh con la quale vengono definiti i Mark, identificati come punti di acquisizione e punto di battuta, poi combinati automaticamente fra loro. È stato successivamente settato il livello del trigger del martello strumentato tramite quattro colpi, ed uno successivo, in modo tale da utilizzare la maggior parte dei segnali misurati riducendo il più possibile al minimo il rumore. Si è eseguito quindi un pre-test di dieci colpi, per poi iniziare la prova vera e propria. L'elemento è stato sollecitato effettuando dieci colpi nel punto per ogni set di misurazione.

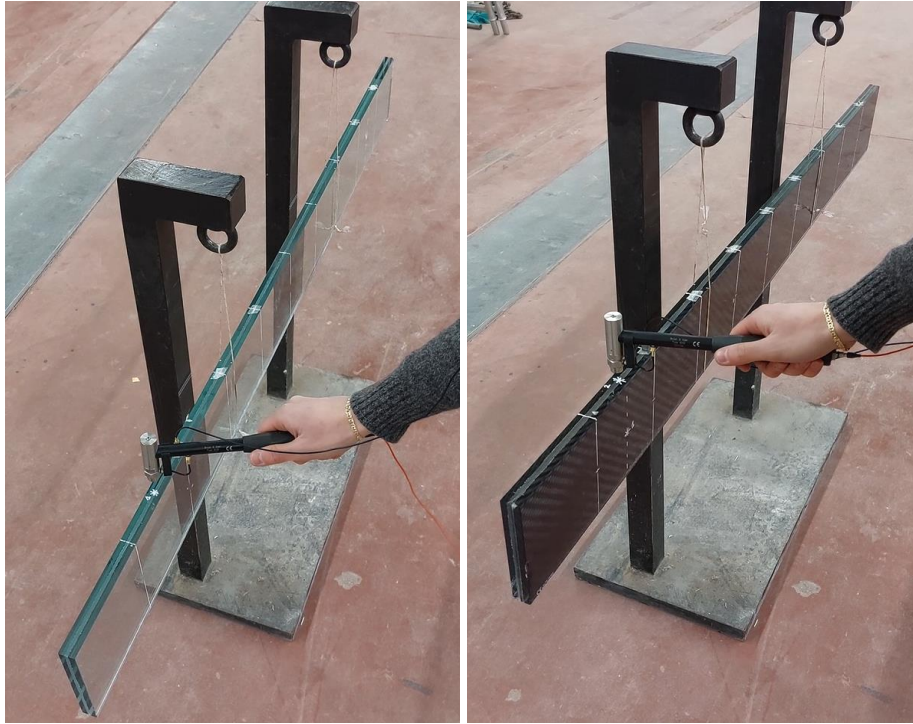


Figura 29 - Battuta del martello strumentato in direzione forte

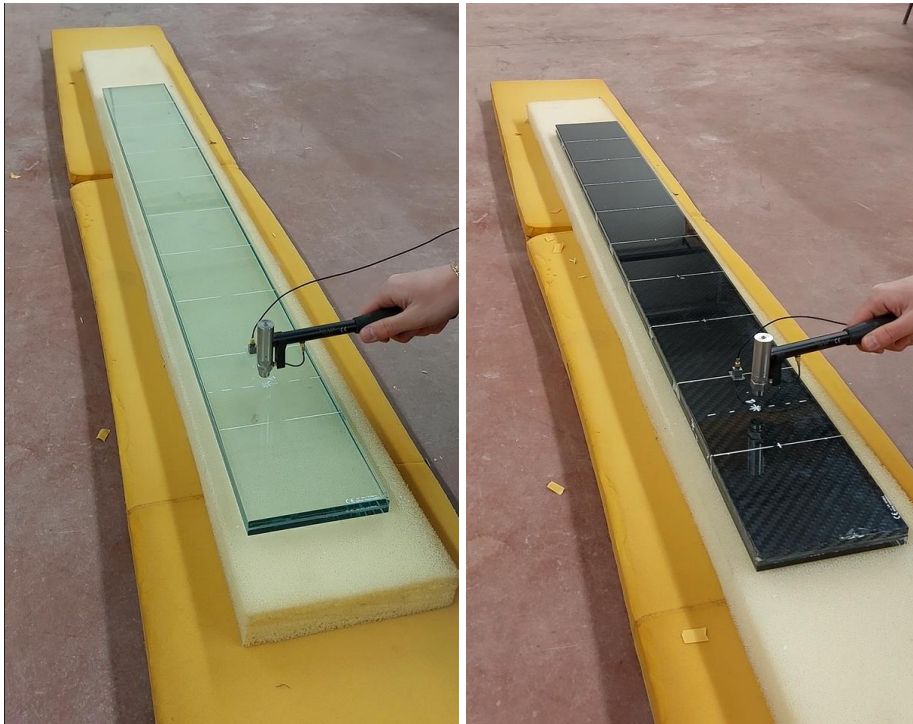


Figura 30 – Battuta del martello strumentato in direzione debole

4. METODI NUMERICI

I metodi numerici si pongono l'obiettivo di approssimare la soluzione del problema al contorno dato con una sua approssimazione opportunamente definita e costruibile con l'ausilio di un elaboratore elettronico. Nel presente caso di studio, il comportamento dinamico dei campioni è stato analizzato mediante un modello FEM (Finite Element Method) costruito con il software ANSYS, implementato per lo studio dei modi di vibrare e delle relative frequenze attraverso un'analisi dinamica.

4.1. MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI (FEM)

La modellazione agli elementi finiti è un metodo che consiste nel suddividere il modello geometrico in tanti piccoli elementi di facile risoluzione. La soluzione finale viene trovata dal sistema “sommando” tutte le soluzioni parziali calcolate per ogni elemento. Il software impiegato nel presente elaborato di tesi è dotato di un foglio di lavoro, denominato workbench, nel quale si può creare lo schema del proprio modello numerico. Ad ogni fase è legato un sottoprogramma a cui si può accedere per definire i dati, la geometria, il modello di calcolo, le condizioni al contorno, la soluzione e la fase di post-processing dei risultati.

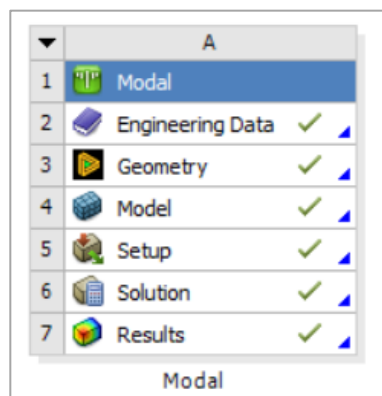


Figura 31 - Workbench Analisi Modale

La definizione dei materiali è stata effettuata assegnando ad ognuno i valori di densità, di modulo elastico e del coefficiente di Poisson, indicati precedentemente nel §2.1.

Outline of Schematic A2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source		Description
2	Material				
3	Glass				
4	SentryGlas				
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 3: Glass					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2500	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modul...			
6	Young's Modulus	70000	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,23			
8	Bulk Modulus	4,321E+10	Pa		
9	Shear Modulus	2,8455E+10	Pa		

Figura 32 - Definizione proprietà del vetro

Properties of Outline Row 4: SentryGlas					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	0,95	g cm ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modul...			
6	Young's Modulus	585	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,449			
8	Bulk Modulus	1,9118E+09	Pa		
9	Shear Modulus	2,0186E+08	Pa		

Figura 33 - Definizione proprietà del SentryGlas®

Per la definizione del modello geometrico è stato utilizzato DesignModeler. Nella definizione del modello tridimensionale è stata posta attenzione alla definizione dei vari strati che costituiscono l'elemento.

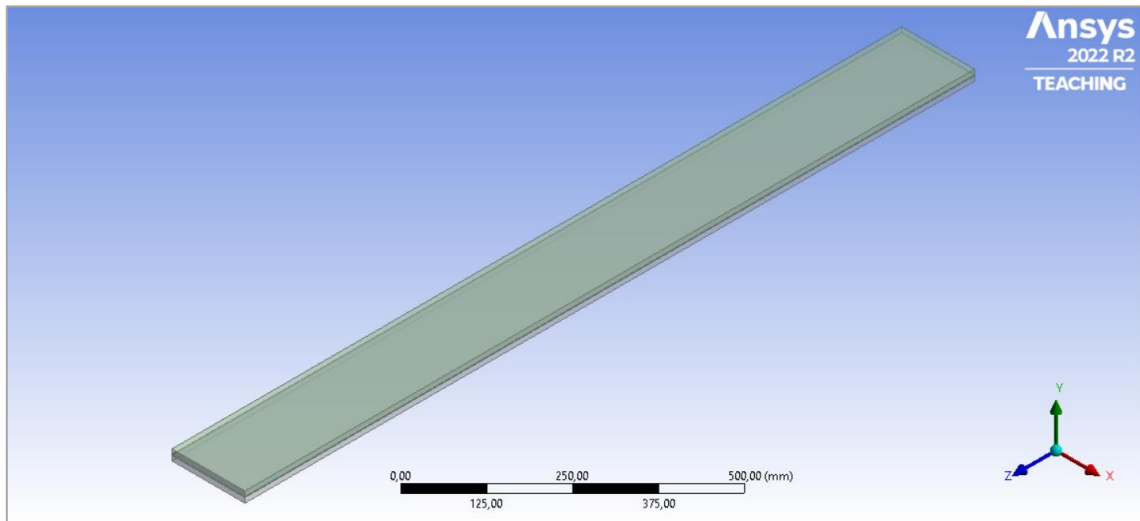


Figura 34 - Modello geometrico

Successivamente viene definita la mesh, il passo fondamentale per la risoluzione del problema. Infatti, discretizzando la geometria del modello in tanti elementi, si riesce ad ottenere una soluzione più accurata, riducendo così gli errori di approssimazione. Occorre però tenere in considerazione il fatto che, all'aumentare della mesh aumenta il costo computazionale, poiché aumenta il tempo di calcolo. È dunque fondamentale trovare un compromesso tra la qualità complessiva dell'analisi e l'onere computazione che essa richiede. Nel caso in esame, si è realizzata una mesh di 3 mm, analizzando in questo modo 225000 elementi.

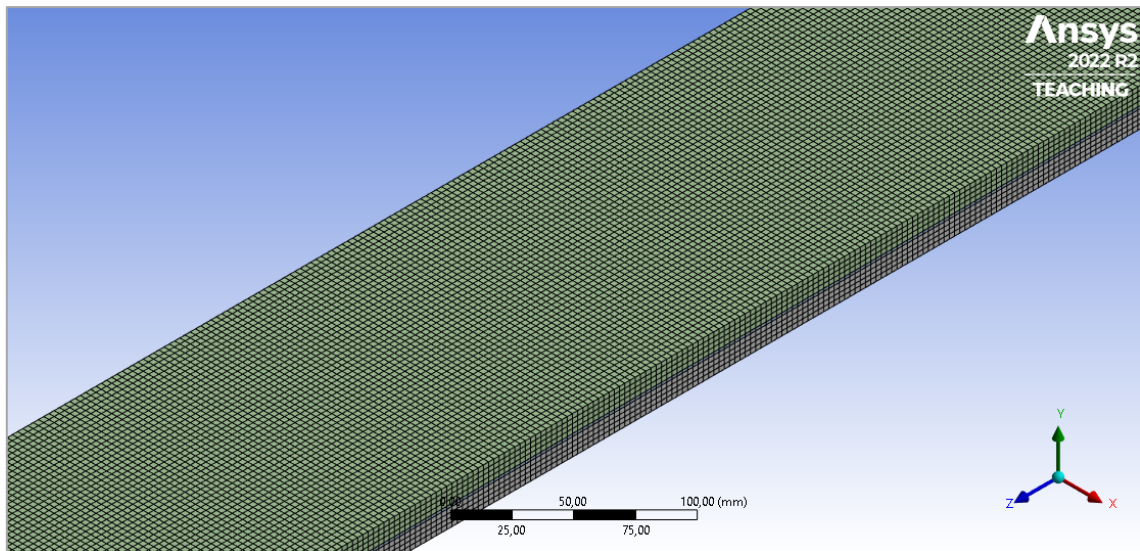


Figura 35 - Definizione della mesh

Sono state poi applicate le condizioni di vincolo del sistema, considerando le due estremità nella condizione libero-libero e successivamente sono state definite le impostazioni di analisi, definendo il massimo numero dei modi da trovare, quaranta in questo caso, così da individuare i primi quattro modi di vibrare in entrambe le direzioni.

5. RISULTATI

In questo capitolo vengono riportati i risultati ottenuti dalle sperimentazioni e dalle analisi, in modo da avere una panoramica completa del lavoro di ricerca svolto.

5.1. RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE STATICA

Di seguito vengono riportati i diagrammi forza-spostamento ottenuti da ogni singola sperimentazione, per ogni tipologia di trave. I modelli analizzati hanno dimostrato un comportamento elastico lineare fino alla rottura (*vedi Figura 36, Figura 40, Figura 44, Figura 48, Figura 52, Figura 56*), che è stata di tipo fragile ed esplosiva, senza dimostrare alcun preavviso (*vedi Figura 39, Figura 43, Figura 47, Figura 51, Figura 55, Figura 59*).

PROVINO NR1

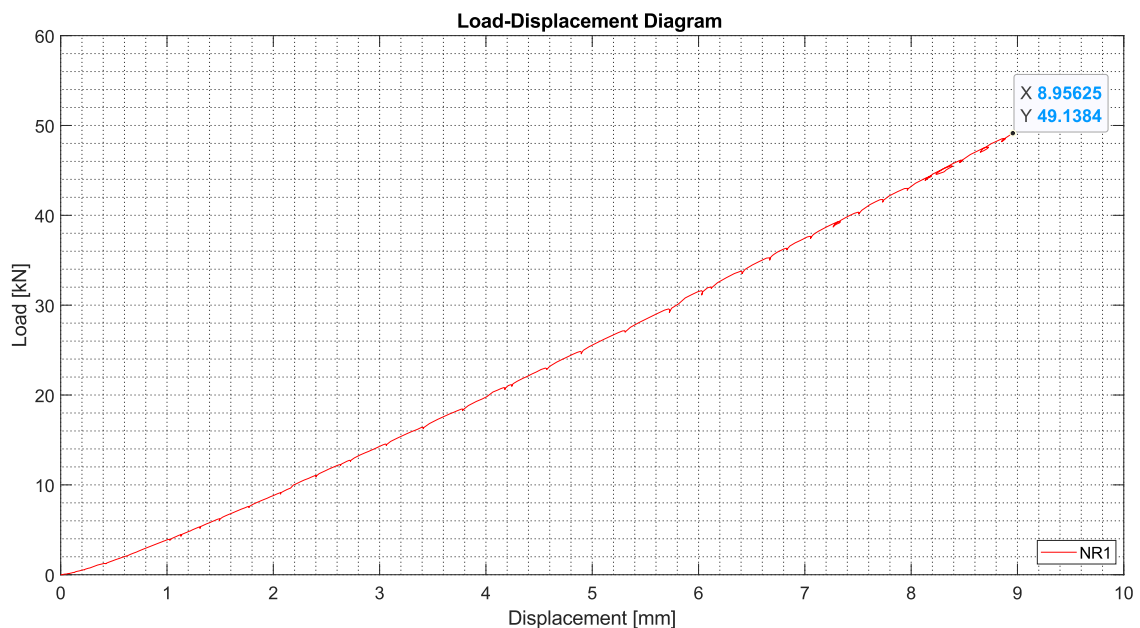


Figura 36 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO NR1



Figura 37 - Condizione iniziale, PROVINO NR1



Figura 38 - Condizione intermedia, PROVINO NR1



Figura 39 - Condizione finale, PROVINO NR1

PROVINO NR2



Figura 40 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO NR2

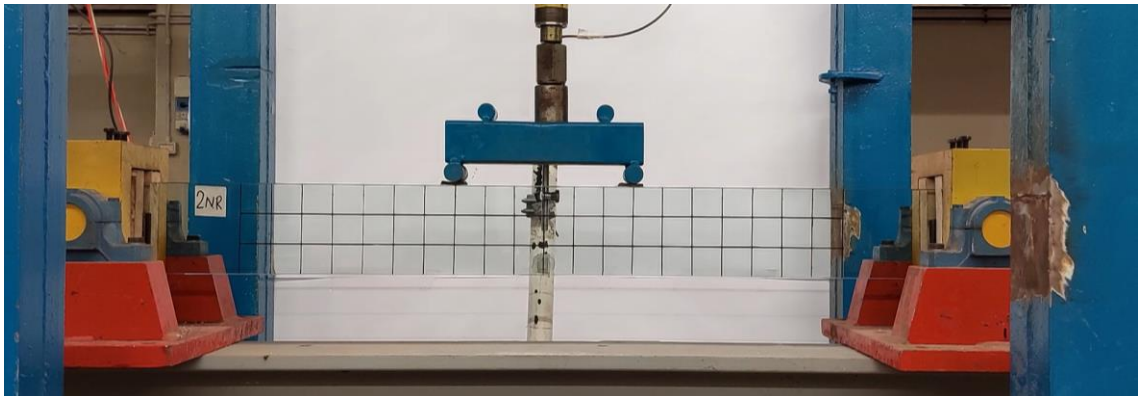


Figura 41 - Condizione iniziale, PROVINO NR2

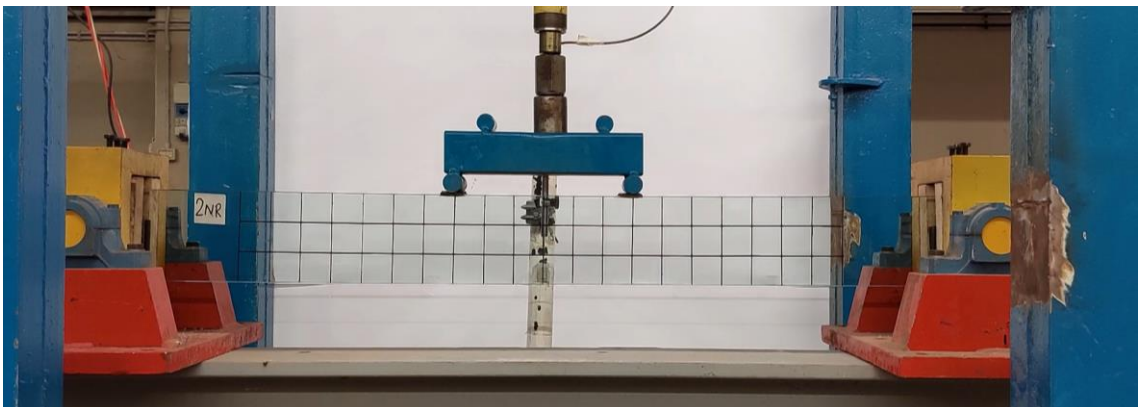


Figura 42 - Condizione intermedia, PROVINO NR2

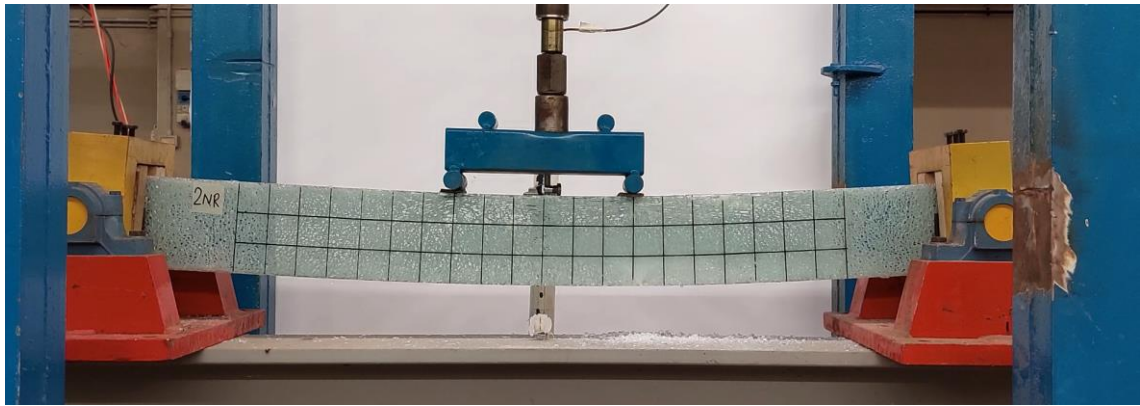


Figura 43 - Condizione finale, PROVINO NR2

PROVINO NR3

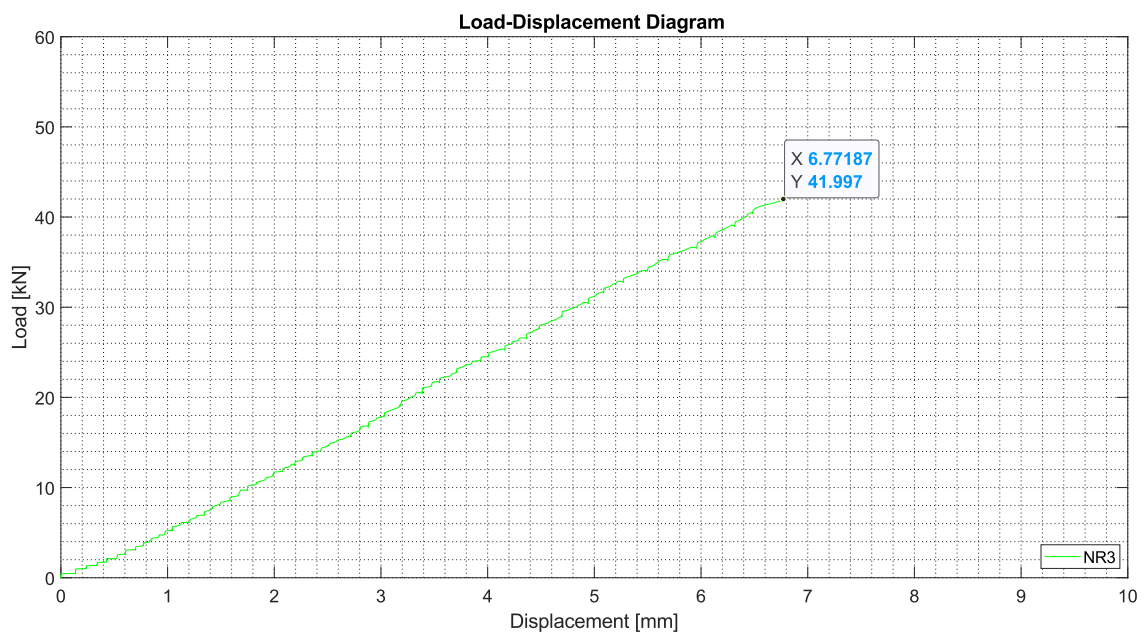


Figura 44 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO NR3



Figura 45 – Condizione iniziale, PROVINO NR3

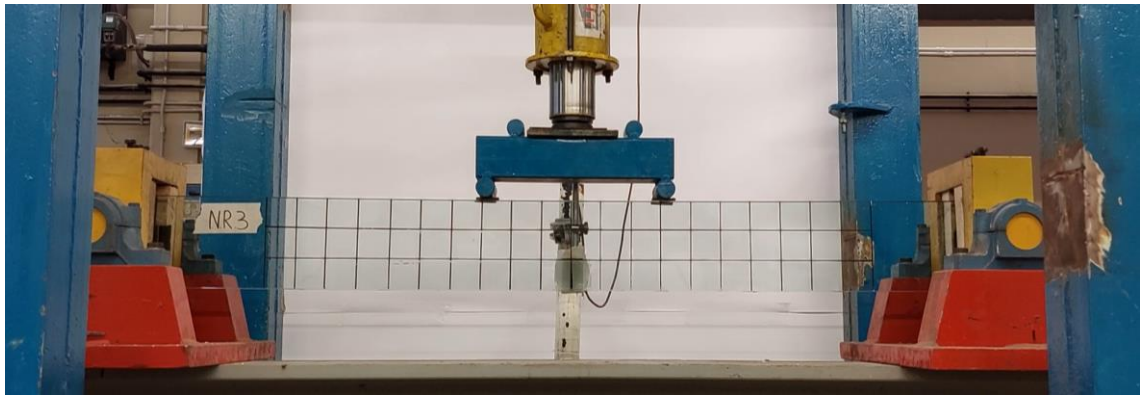


Figura 46 - Condizione intermedia, PROVINO NR3

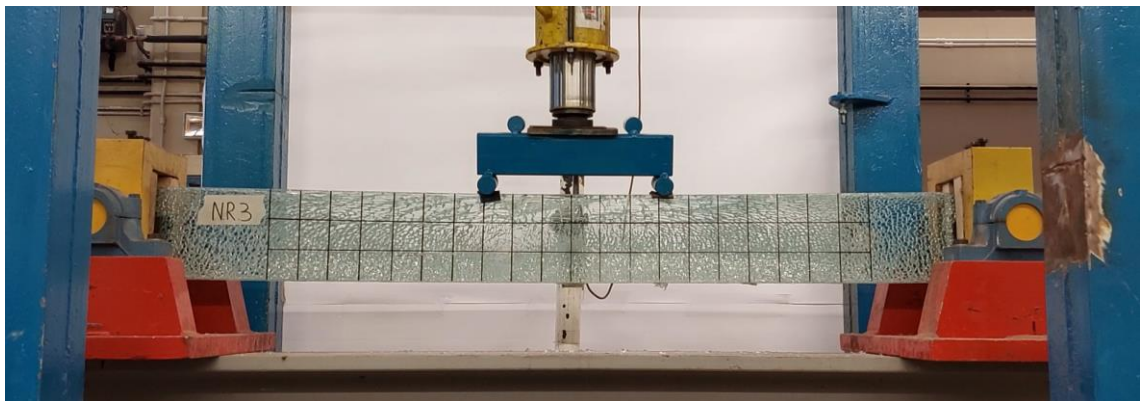


Figura 47 - Condizione finale, PROVINO NR3

PROVINO RL1

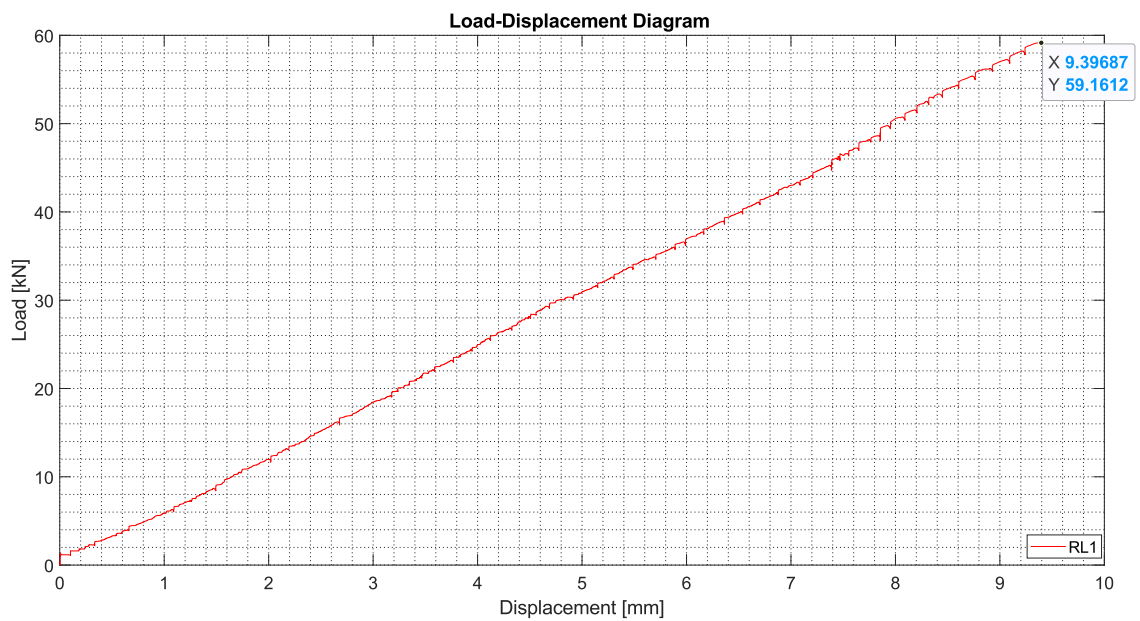


Figura 48 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO RL1

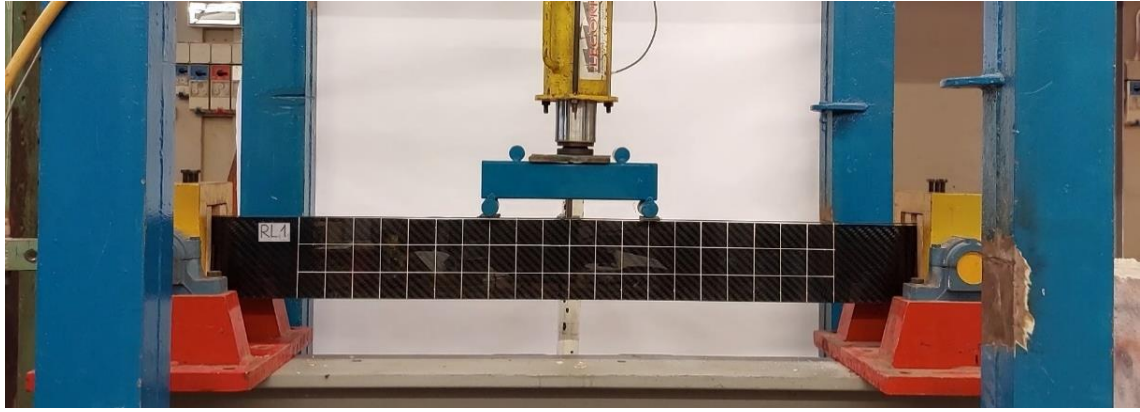


Figura 49 - Condizione iniziale, PROVINO RL1

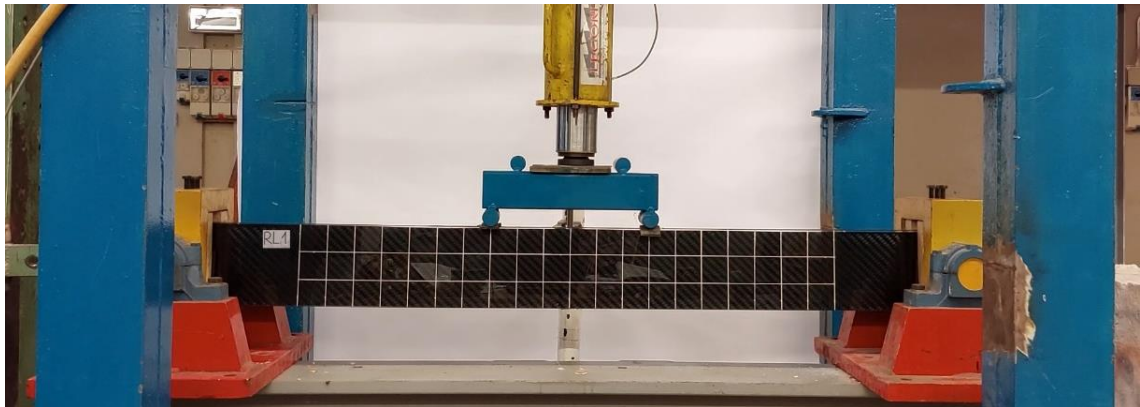


Figura 50 - Condizione intermedia, PROVINO RL1

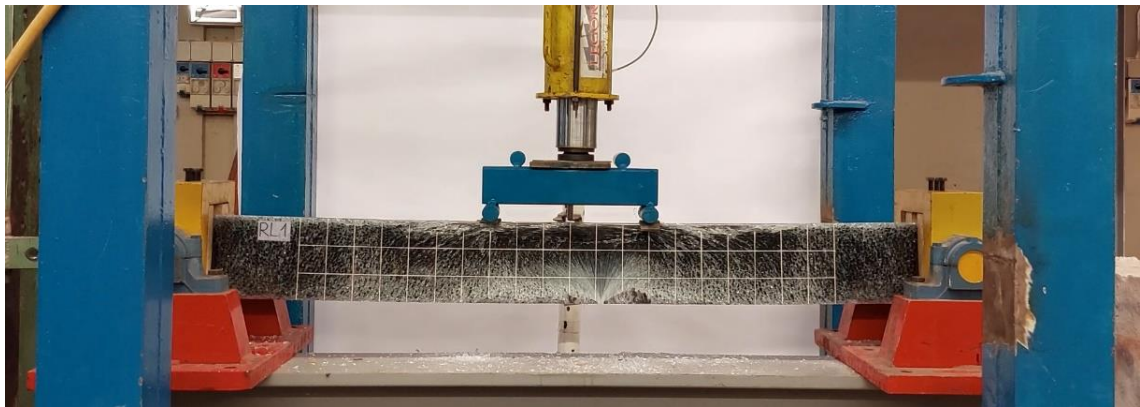


Figura 51 - Condizione finale, PROVINO RL1

PROVINO RL2

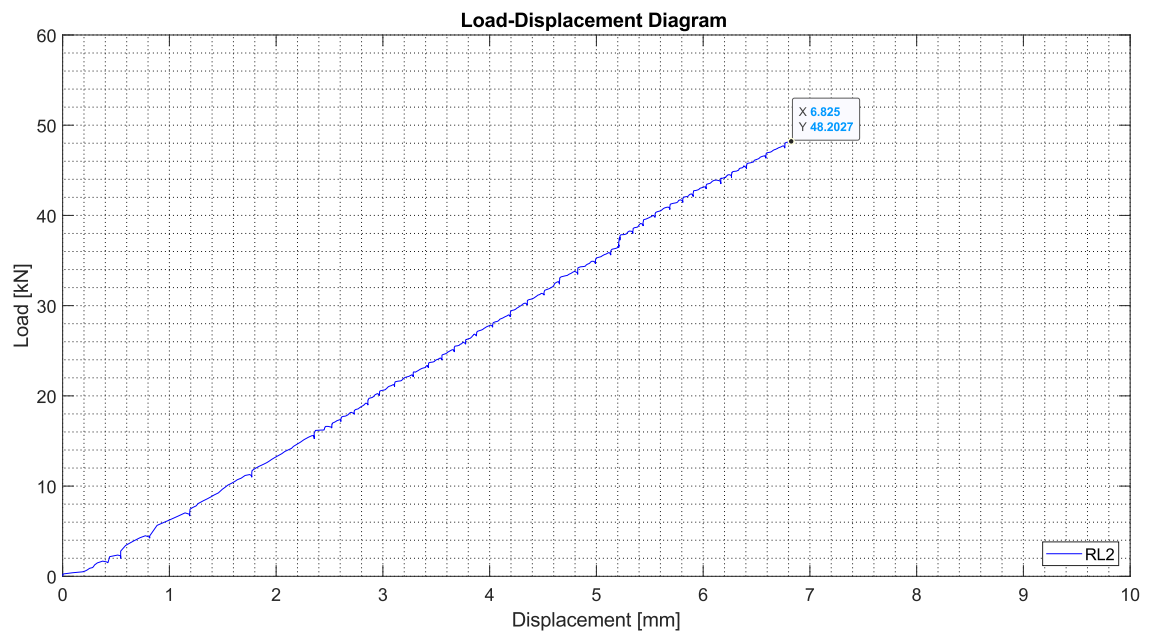


Figura 52 – Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO RL2

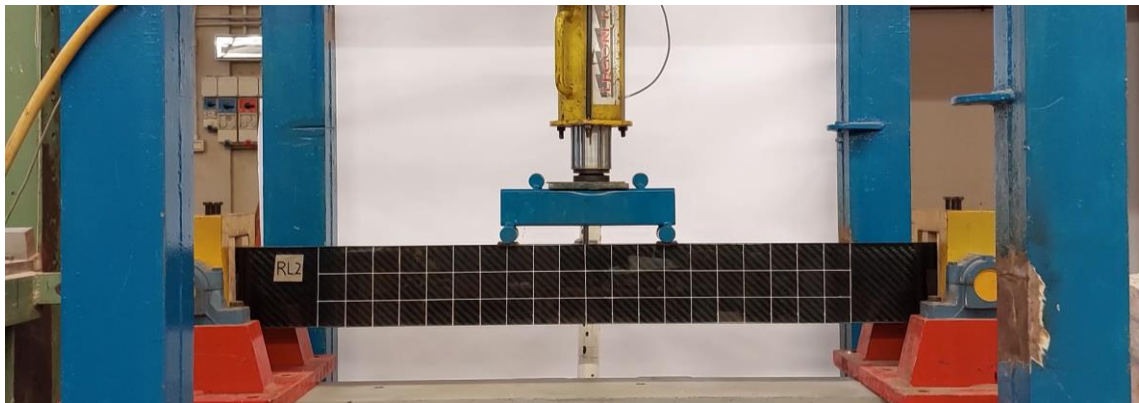


Figura 53 - Condizione iniziale, PROVINO RL2

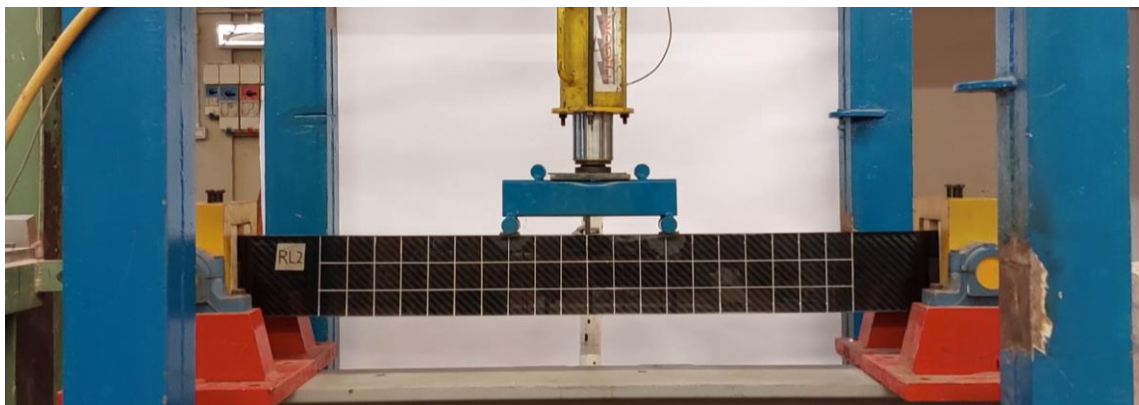


Figura 54 - Condizione intermedia, PROVINO RL2

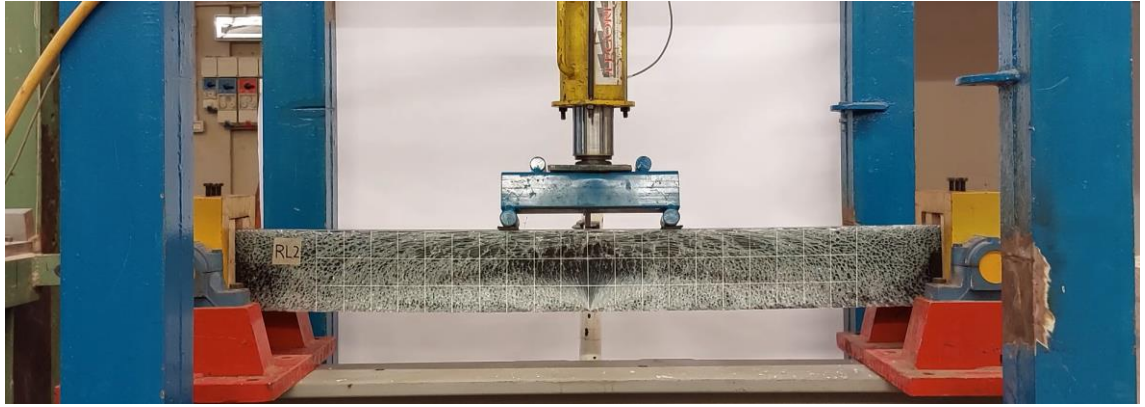


Figura 55 – Condizione finale, PROVINO RL 2

PROVINO RL3



Figura 56 - Diagramma Forza-Spostamento, PROVINO RL3

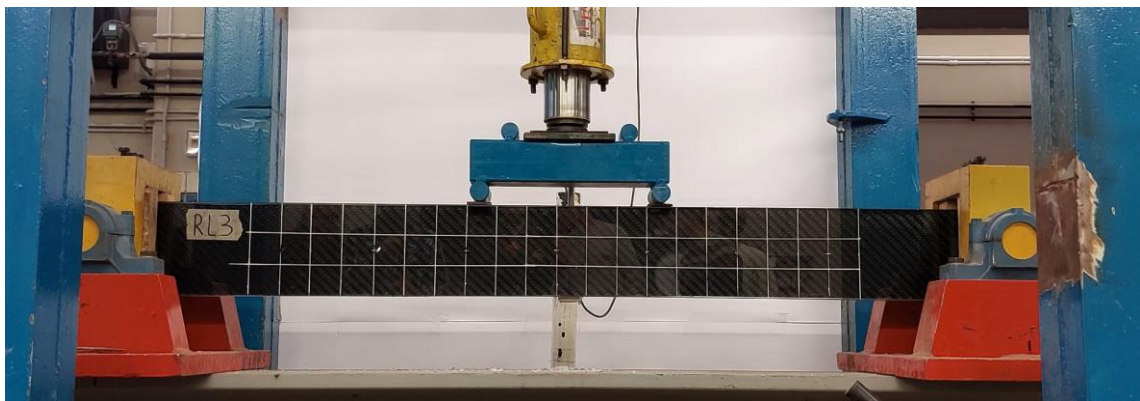


Figura 57 - Condizione iniziale, PROVINO RL3

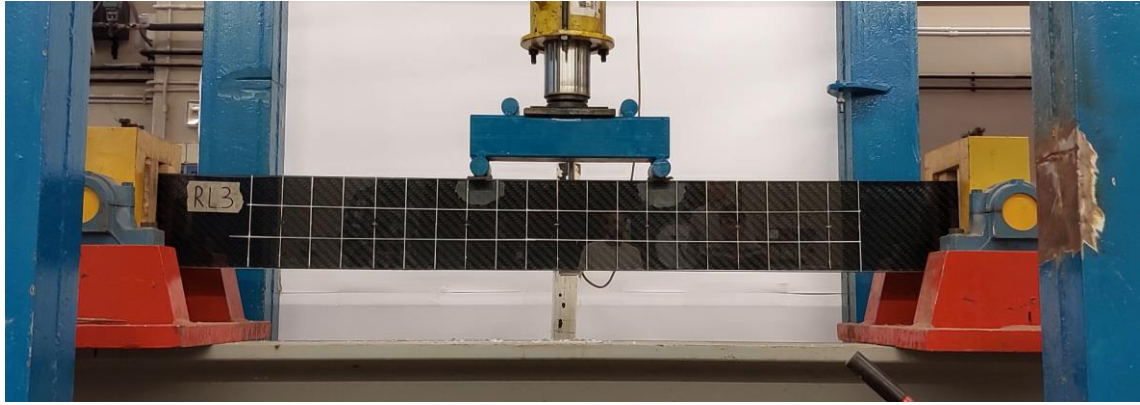


Figura 58 - Condizione intermedia, PROVINO RL3

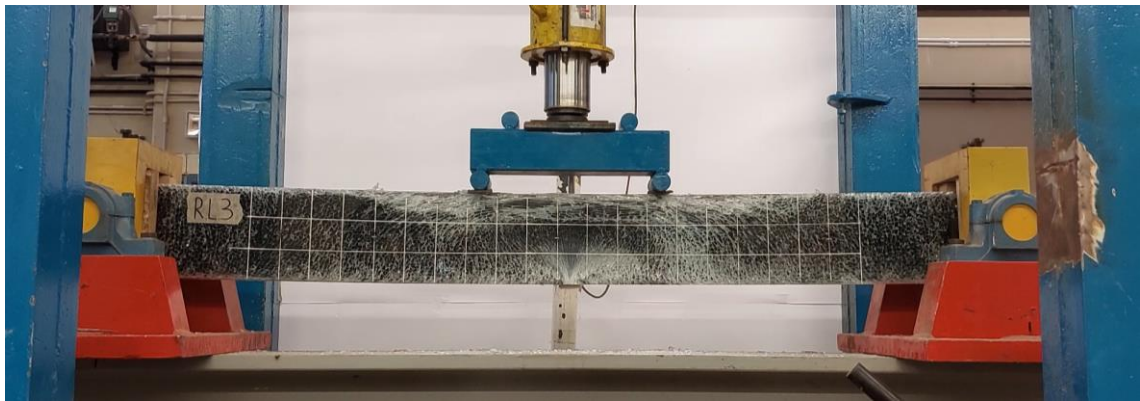


Figura 59 - Condizione finale, PROVINO RL3

5.2. RISULTATI DELLA CARATTERIZZAZIONE DINAMICA

Per ogni campione di trave sono stati ottenuti nove diagrammi di risposta in frequenza, uno per ogni posizione dell'accelerometro. L'analisi è stata condotta in termini di accelerazione, con un range di frequenza di 0-3200 Hz per la prova svolta nel piano di sollecitazione forte, e con un range di 0-1200 Hz per la prova nel piano di sollecitazione debole. A partire dalle curve restituite dal software, considerando poi i valori in cui si è registrata un'accelerazione consistente, è stato possibile ricavare le frequenze proprie relative ai primi quattro modi di vibrare. Nei grafici seguenti si riportano i risultati della sperimentazione in forma grafica del modulo del complesso della FRF. Nelle ascisse sono riportati i valori della frequenza, nelle ordinate sono riportati i valori dell'ampiezza delle FRF in termini di accelerazione, in scala logaritmica per quanto riguarda il modulo del complesso. Infatti, il file di output dei risultati, generato dal software utilizzato per la sperimentazione, è formato da due valori numerici per ogni accelerometro, relativi ad ogni singola frequenza. Tali valori, rappresentanti la parte reale e la parte immaginaria del numero complesso, sono stati opportunamente combinati in modo tale da ottenere i grafici sotto riportati. Vengono quindi riportati i grafici contenenti le sovrapposizioni delle frequenze relative ad ogni mark, ottenute per ogni sperimentazione.

5.2.1. PROVINO NON RINFORZATO – ASSE FORTE

PROVINO NON RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE

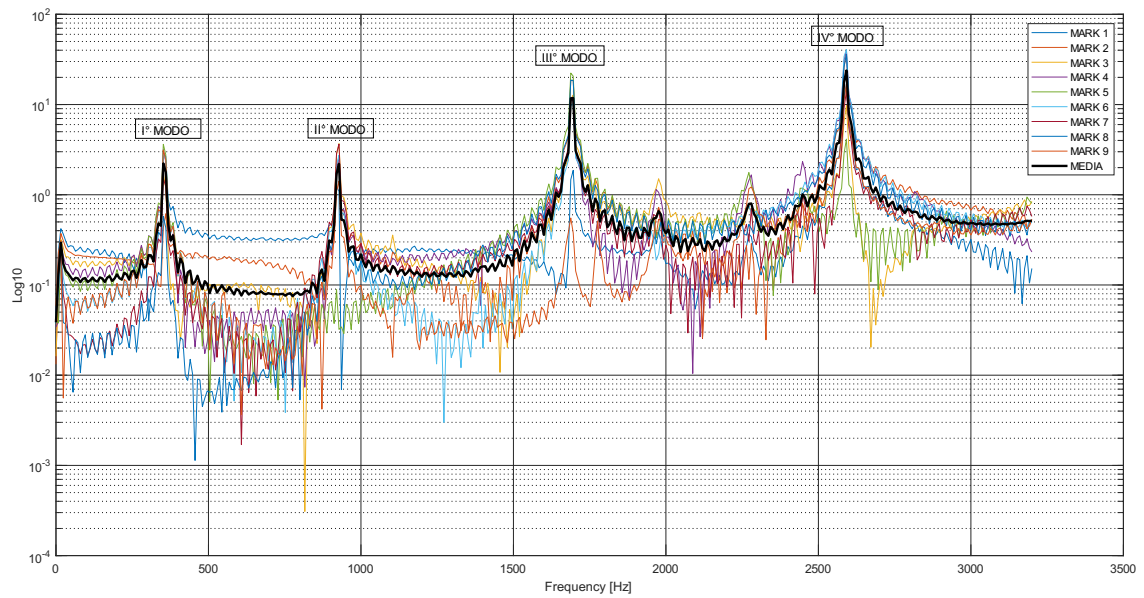


Figura 60 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE

PROVINO NON RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE COERENZE

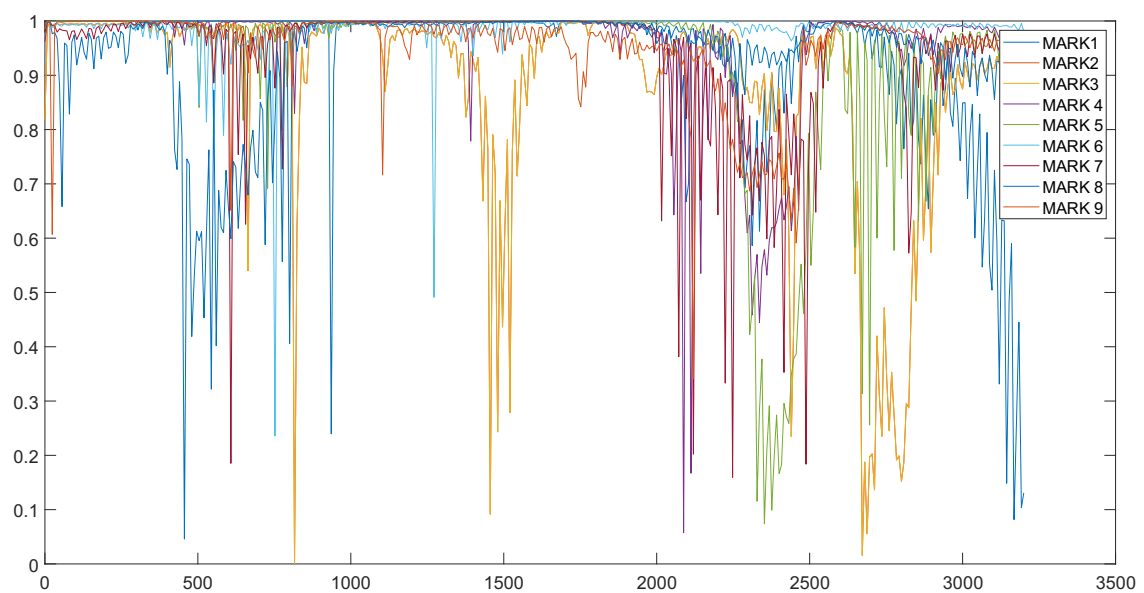


Figura 61 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO NON RINFORZATO

MODI DI VIBRARE	FREQUENZE	AMPIEZZE
-	[Hz]	[(m/s ²)/N]
I° MODO	352,00	2,22
II° MODO	928,00	2,20
III° MODO	1696,00	11,79
IV° MODO	2592,00	23,84

Tabella 8 - Risultati provino NON RINFORZATO, ASSE FORTE

5.2.2. PROVINO NON RINFORZATO – ASSE DEBOLE

PROVINO NON RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE

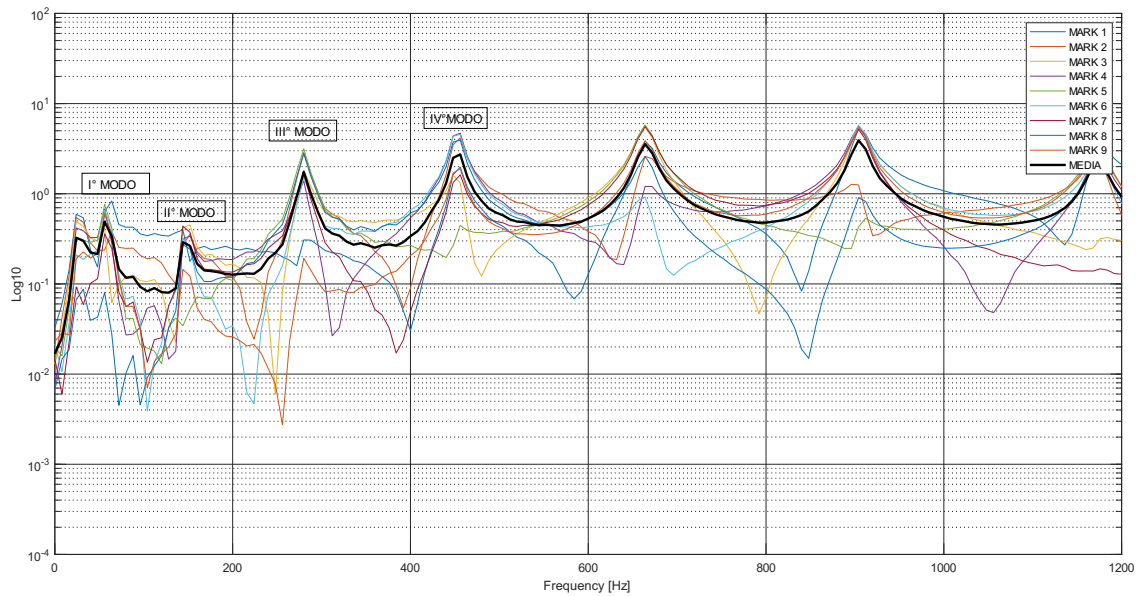


Figura 62 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE

PROVINO NON RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE COERENZE

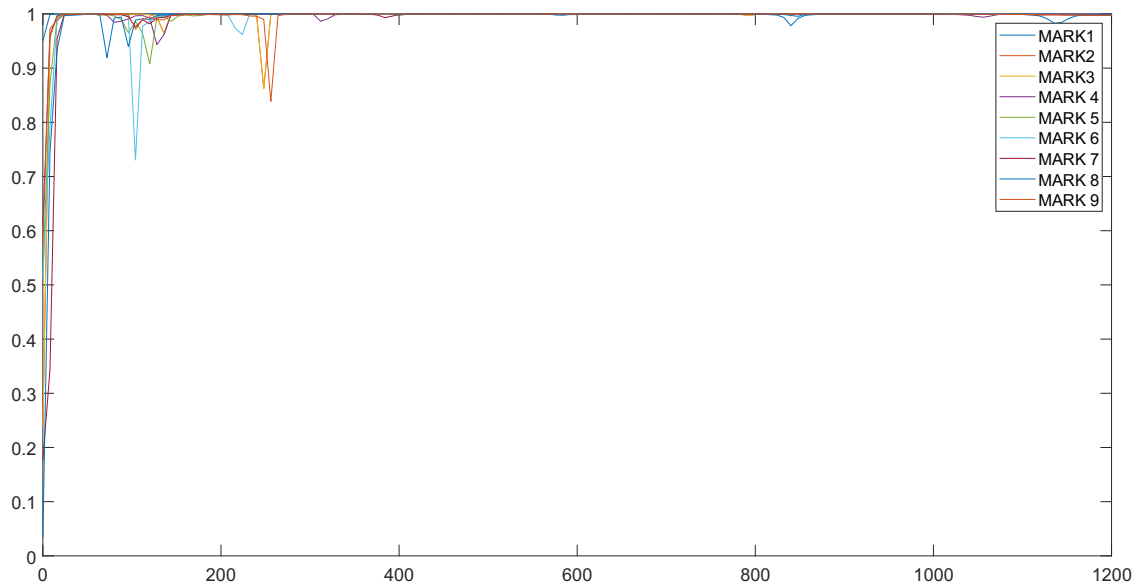


Figura 63 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO NON RINFORZATO

MODI DI VIBRARE	FREQUENZE	AMPIEZZE
-	[Hz]	[(m/s ²)/N]
I° MODO	56,00	0,49
II° MODO	144,00	0,29
III° MODO	280,00	1,74
IV° MODO	456,00	2,73

Tabella 9 - Risultati provino NON RINFORZATO, ASSE DEBOLE

5.2.3. PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE FORTE

PROVINO RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE

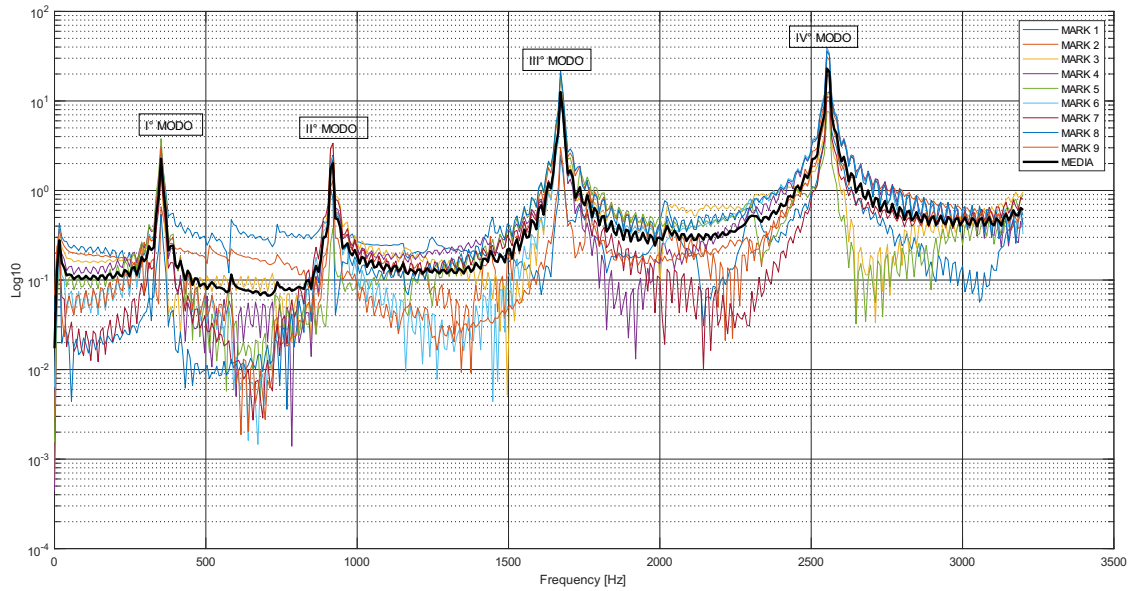


Figura 64 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE

PROVINO RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE COERENZE

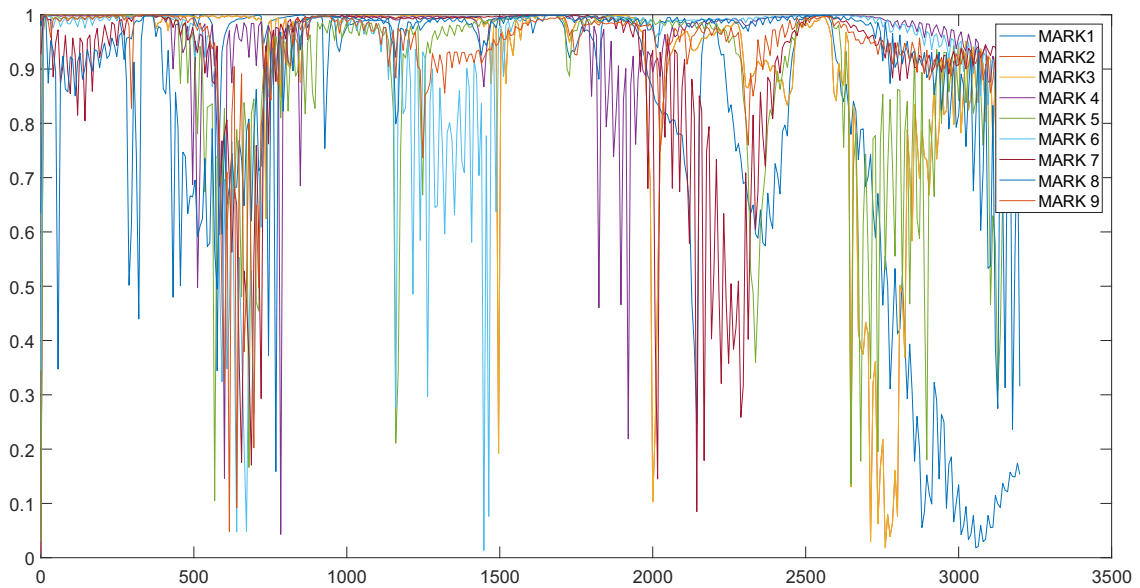


Figura 65 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO RINFORZATO

MODI DI VIBRARE	FREQUENZE	AMPIEZZE
-	[Hz]	[(m/s ²)/N]
I° MODO	352,00	2,26
II° MODO	920,00	2,02
III° MODO	1672,00	12,59
IV° MODO	2552,00	22,99

Tabella 10 - Risultati provino RINFORZATO, ASSE FORTE

5.2.4. PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE DEBOLE

PROVINO RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE

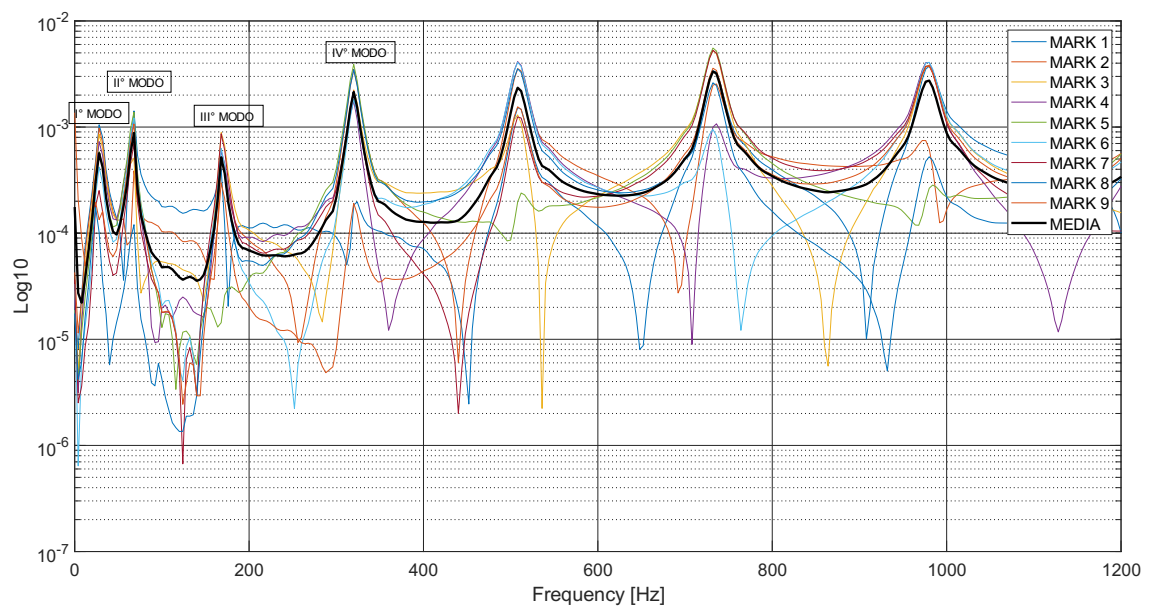


Figura 66 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, SOVRAPPOSIZIONE

PROVINO RINFORZATO – SOVRAPPOSIZIONE COERENZE

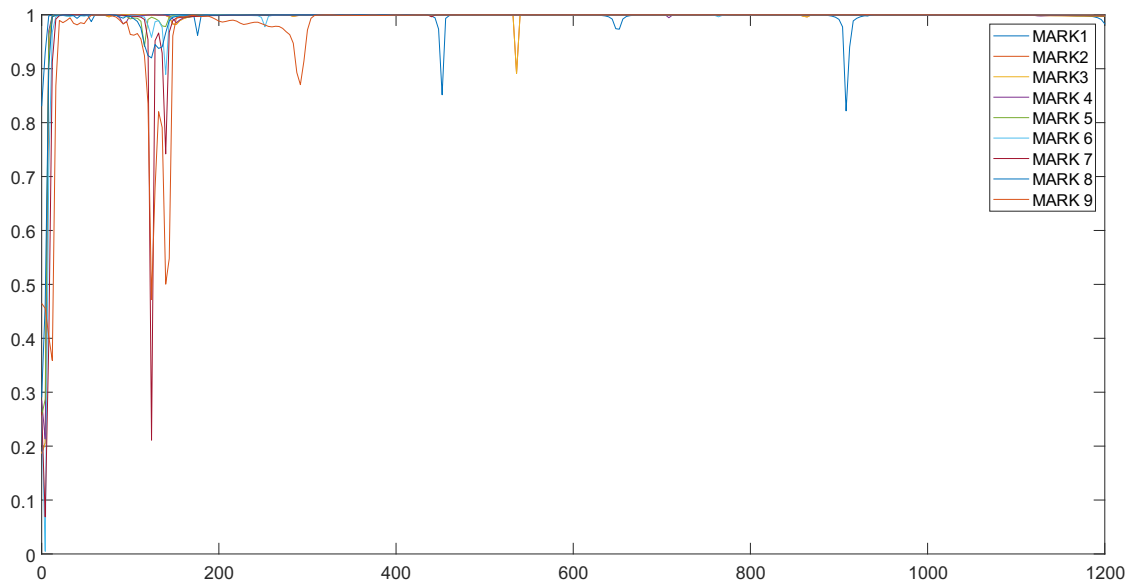


Figura 67 - Sovrapposizione Coerenze, PROVINO RINFORZATO

MODI DI VIBRARE	FREQUENZE	AMPIEZZE
-	[Hz]	[(m/s ²)/N]
I° MODO	28,00	0,00056
II° MODO	68,00	0,00088
III° MODO	158,00	0,00052
IV° MODO	320,00	0,0021

Tabella 11 - Risultati provino RINFORZATO, ASSE DEBOLE

5.3. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE FEM

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalla modellazione FEM, con particolare riferimento ai primi quattro modi di vibrare, alle relative forme e frequenze.

La modellazione è stata condotta con un massimo di 40 modi.

5.3.1. PROVINO NON RINFORZATO – ASSE FORTE

PROVINO NON RINFORZATO

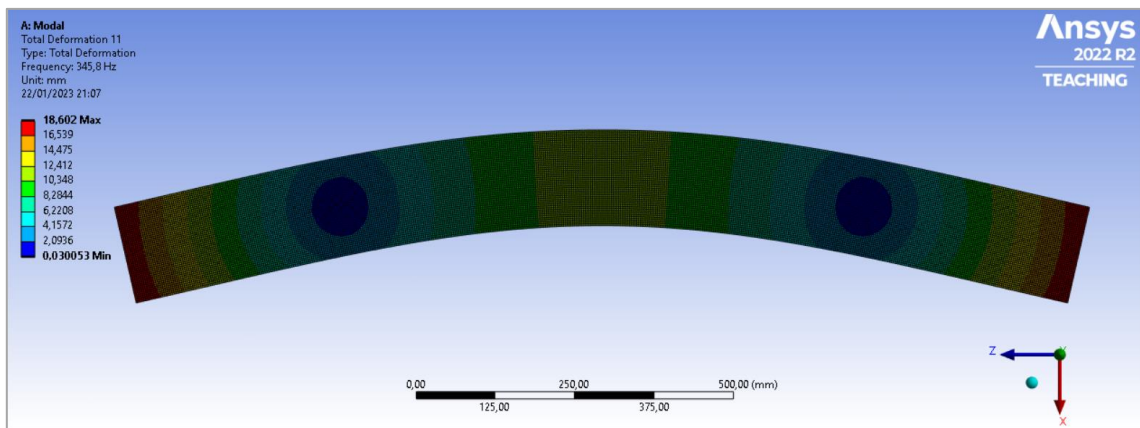


Figura 68 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

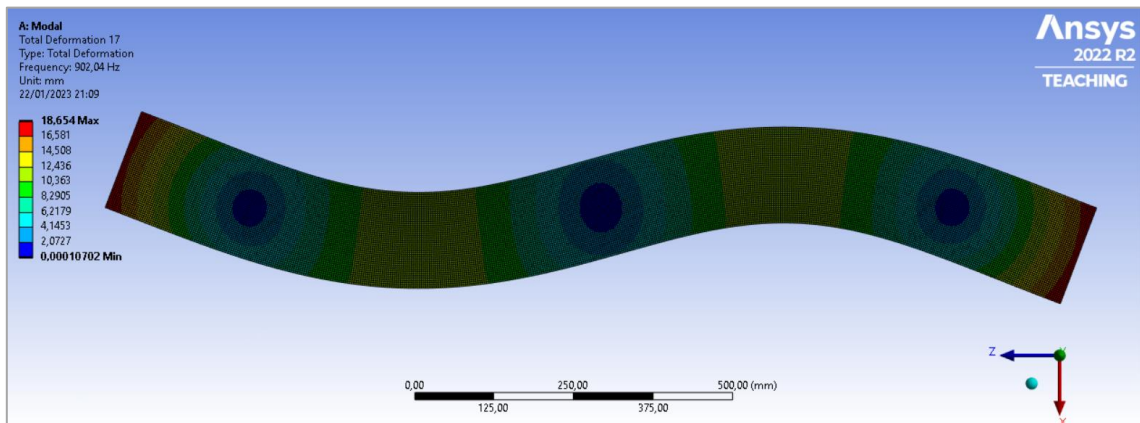


Figura 69 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

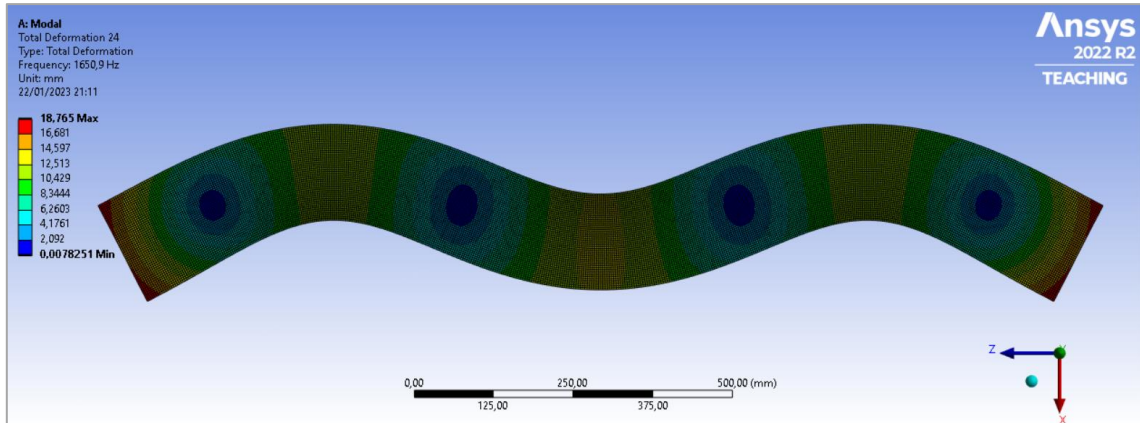


Figura 70 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

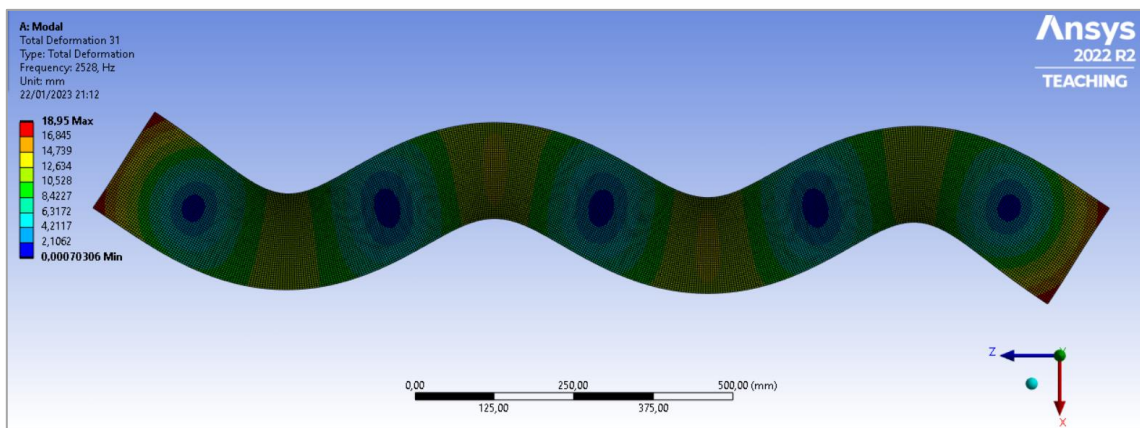


Figura 71 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

MODI DI VIBRARE FLESSIONALI	FREQUENZE [Hz]
I MODO	345,80
II MODO	902,04
III MODO	1650,90
IV MODO	2528,00

Tabella 12 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO NON RINFORZATO

5.3.2. PROVINO NON RINFORZATO – ASSE DEBOLE

PROVINO NON RINFORZATO

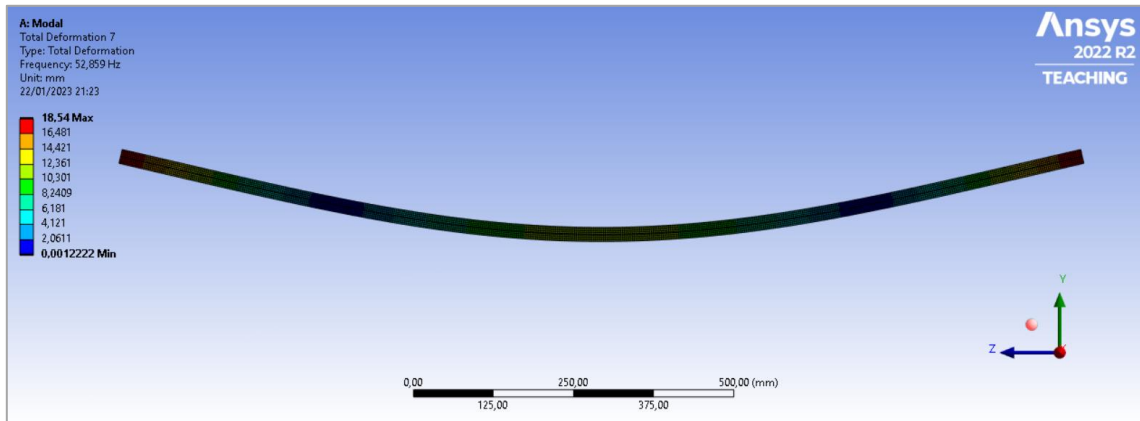


Figura 72 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

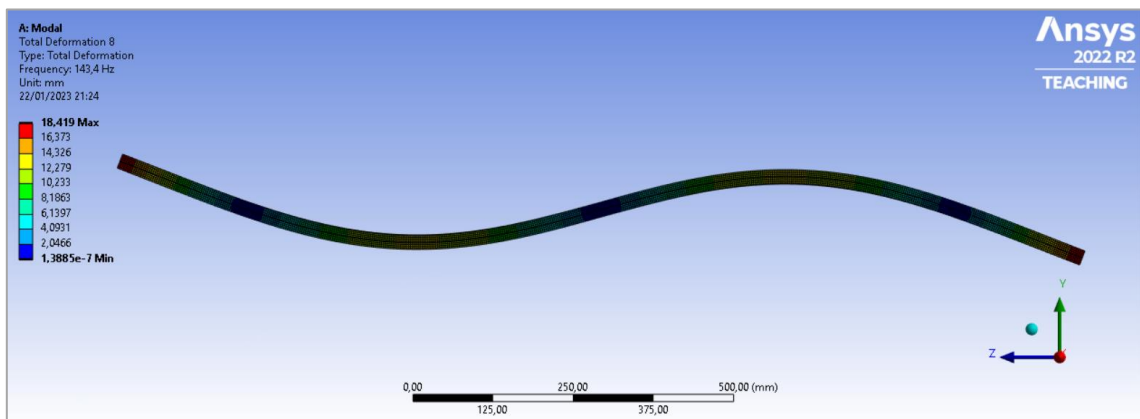


Figura 73 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

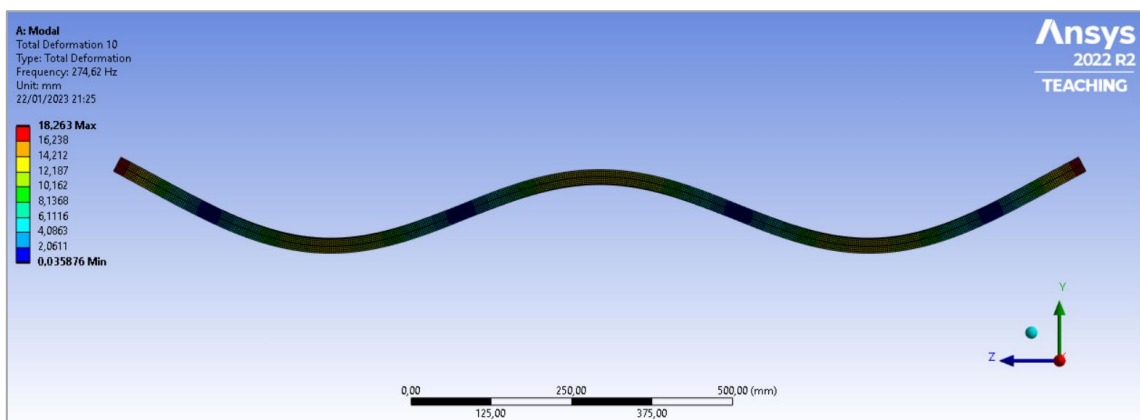


Figura 74 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

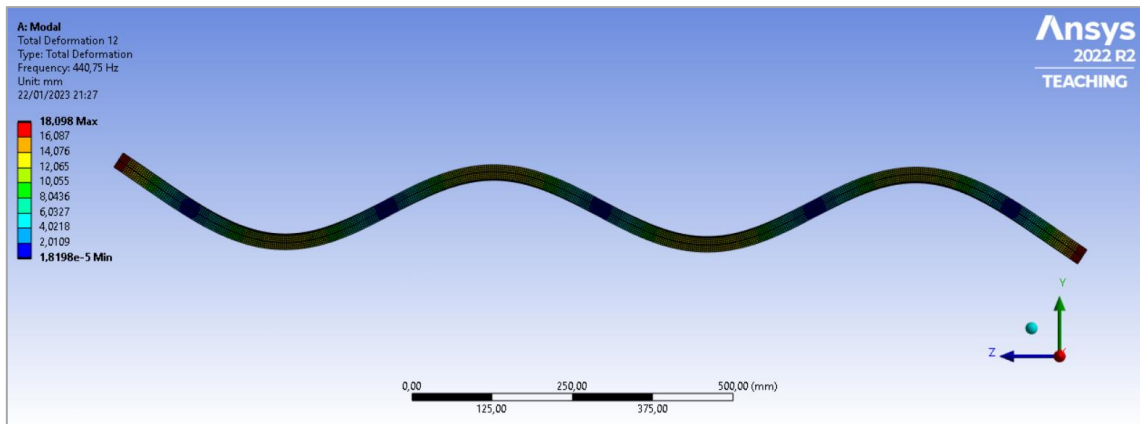


Figura 75 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO NON RINFORZATO

MODI DI VIBRARE FLESSIONALI	FREQUENZE [Hz]
I MODO	52,86
II MODO	143,40
III MODO	274,62
IV MODO	440,75

Tabella 13 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO NON RINFORZATO

5.3.3. PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE FORTE

PROVINO RINFORZATO

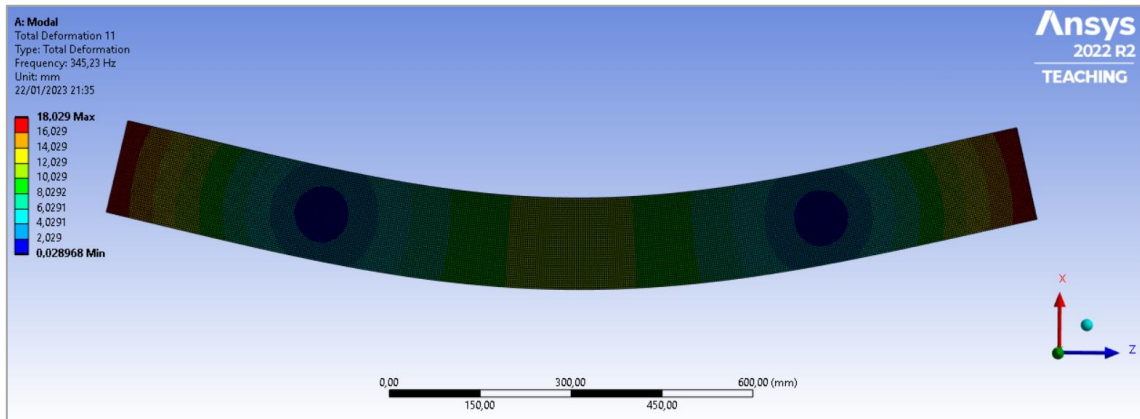


Figura 76 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

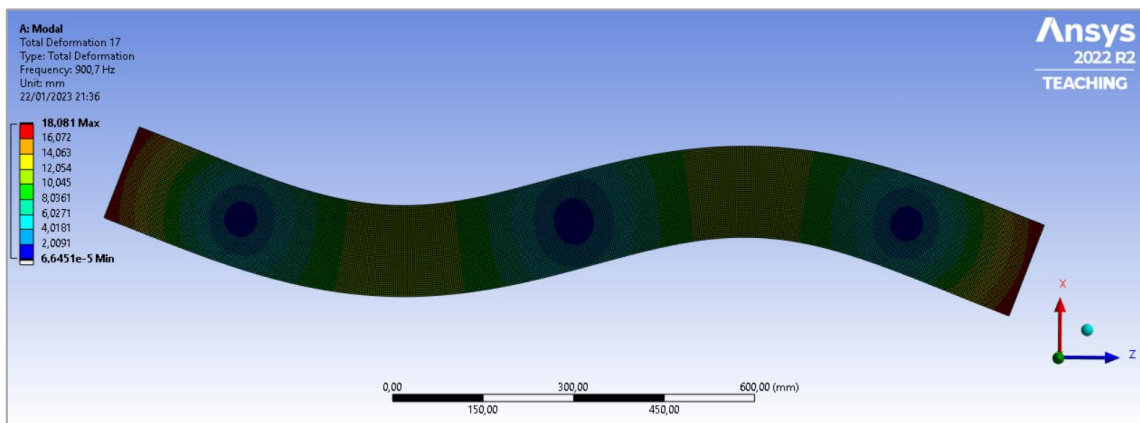


Figura 77 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

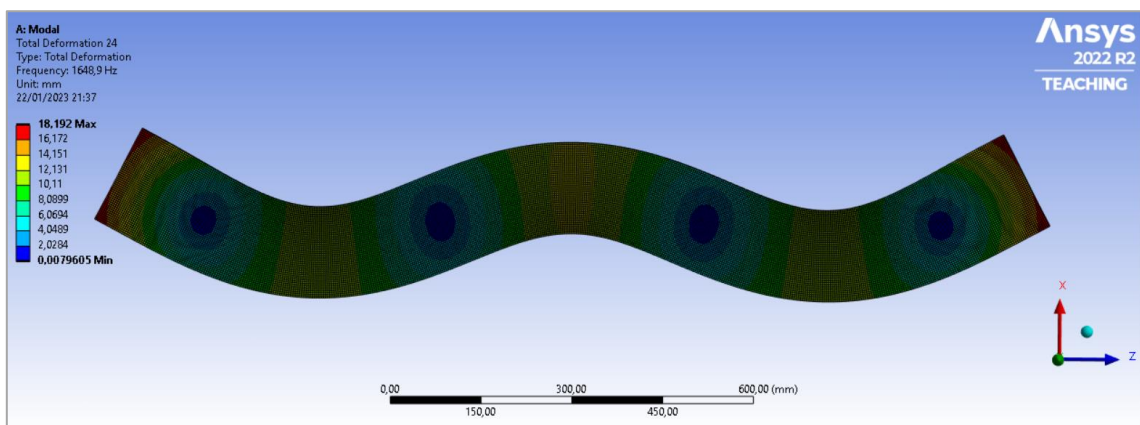


Figura 78 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

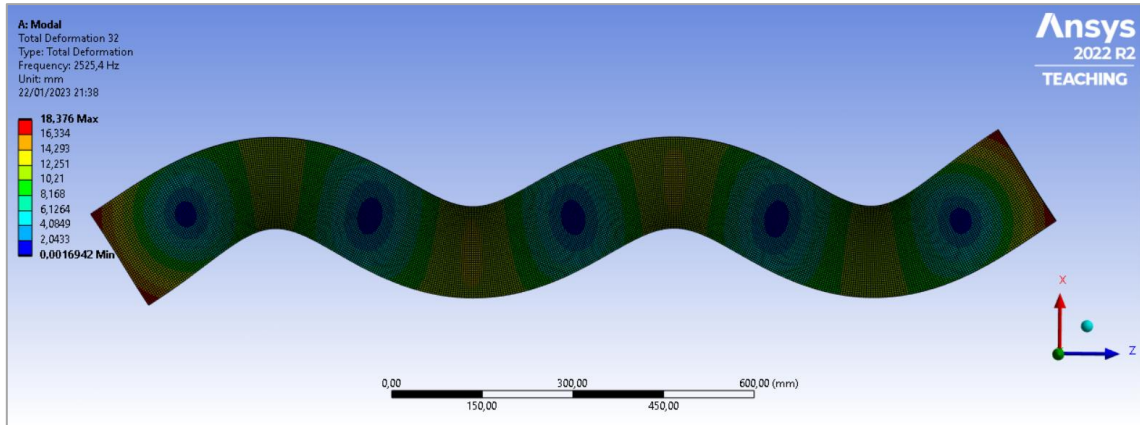


Figura 79 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

MODI DI VIBRARE FLESSIONALI	FREQUENZE [Hz]
I MODO	345,23
II MODO	900,70
III MODO	1648,90
IV MODO	2525,40

Tabella 14 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO RINFORZATO

5.3.4. PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE DEBOLE

PROVINO RINFORZATO

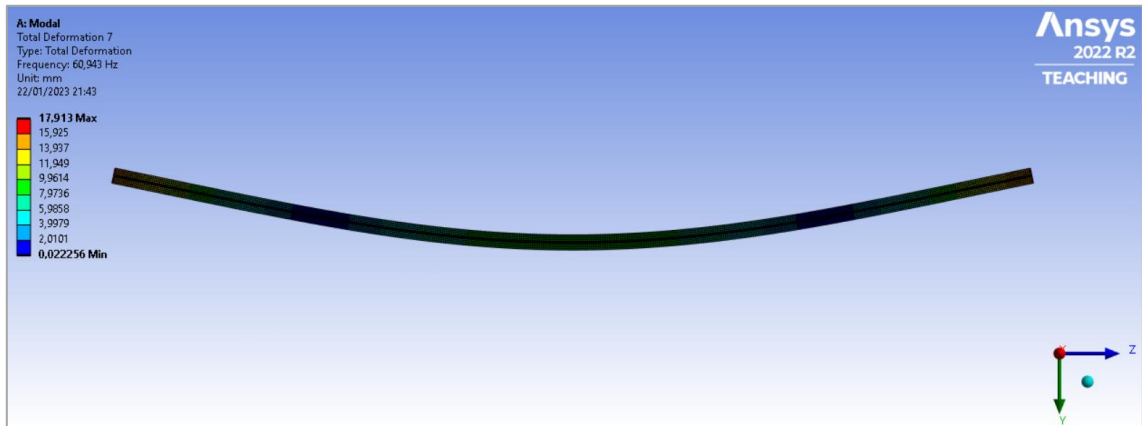


Figura 80 - I MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

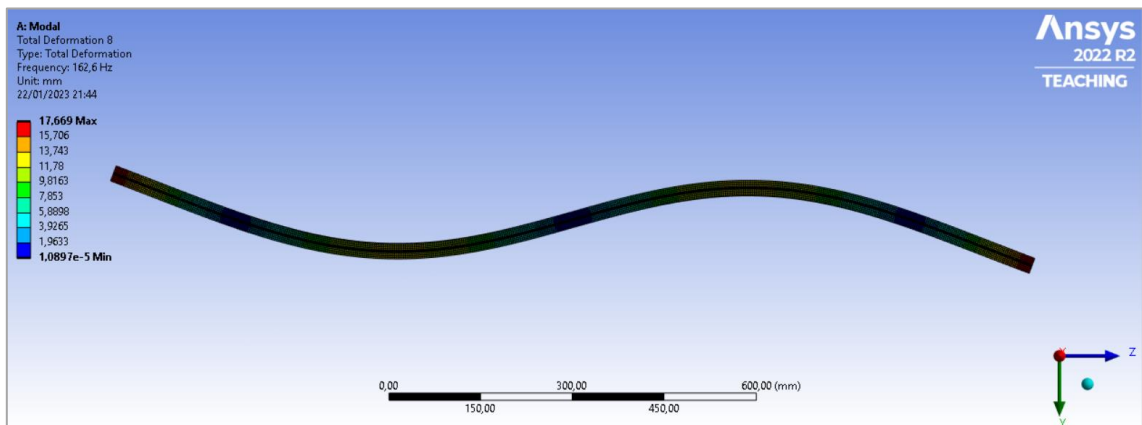


Figura 81 - II MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

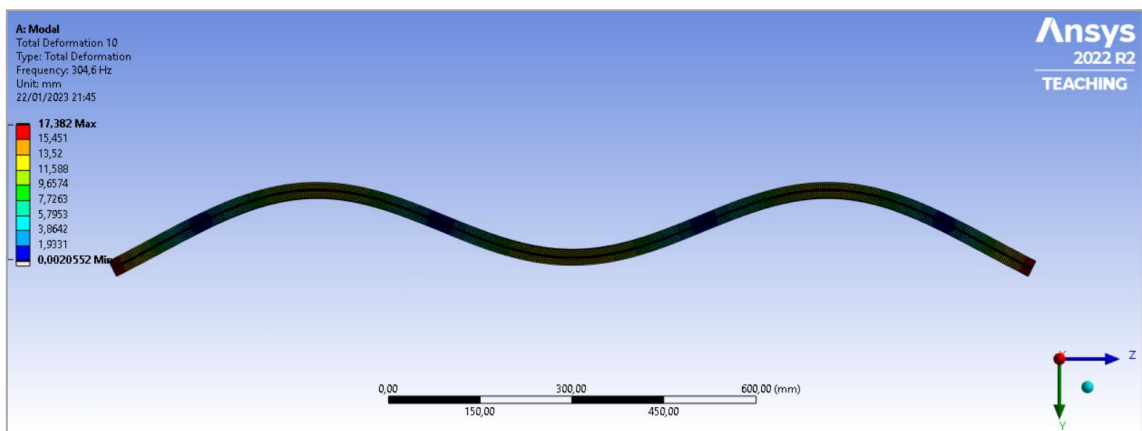


Figura 82 - III MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

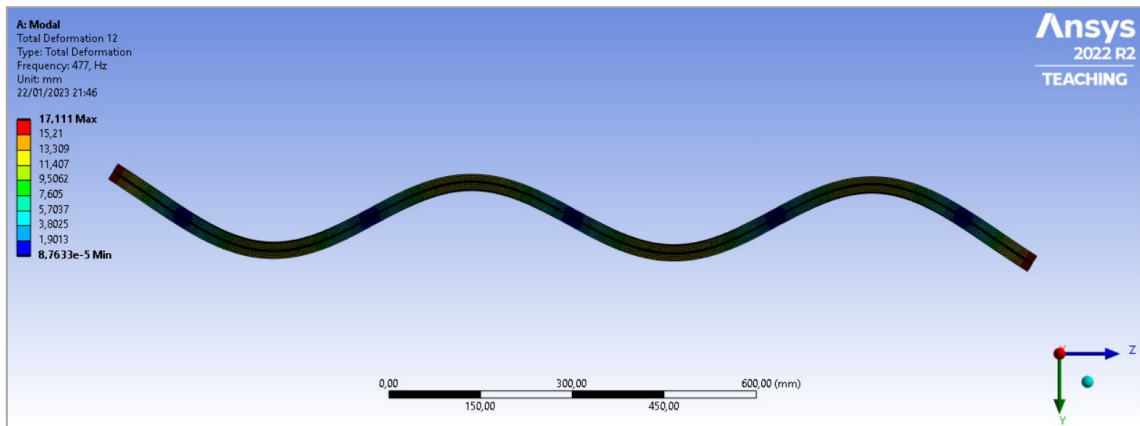


Figura 83 - IV MODO DI VIBRARE, PROVINO RINFORZATO

MODI DI VIBRARE FLESSIONALI	FREQUENZE [Hz]
I MODO	60,94
II MODO	162,60
III MODO	304,60
IV MODO	477,00

Tabella 15 - Frequenze relative ai modi di vibrare – PROVINO RINFORZATO

6. DISCUSSIONE

6.1. DISCUSSIONE CARATTERIZZAZIONE STATICA

Di seguito vengono riportati i grafici contenenti i confronti tra i provini di ogni tipologia di trave sperimentata e le tabelle riassuntive contenenti i valori numerici delle sperimentazioni. I provini dimostrano in generale un comportamento elastico lineare fino a rottura.

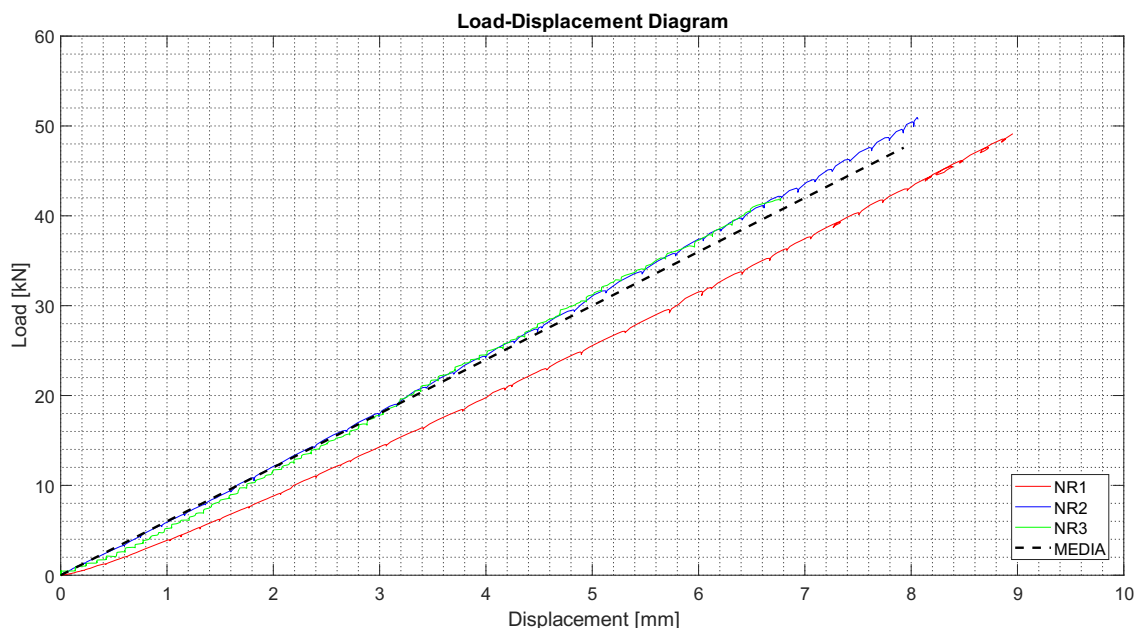


Figura 84 – Confronto provini non rinforzati

Nella *Figura 84*, osservando il comportamento del provino NR3, si nota un minore carico di rottura (42 kN) e un minore spostamento (6,77 mm) rispetto agli altri due provini, che hanno due andamenti simili. Ciò è dovuto al fatto che, durante l'applicazione del carico, il provino ha subito uno sforzo flessionale nella direzione debole rispetto al piano di sollecitazione, che ha portato alla rottura di una singola lastra. Dalla *Figura 85*, si può notare la modalità di rottura del provino NR3. Si vede chiaramente lo svergolamento dell'elemento che ha causato la rottura della lastra

posteriore, con una conseguente diminuzione della capacità di carico dell'intero provino, dovuta dalla collaborazione in modo non uniforme delle due lastre.



Figura 85 - Modalità di rottura PROVINO NR3

Serie	Campione	Carico massimo	Spostamento massimo	Resistenza a flessione	Modulo di rigidezza
ID	-	F_{max} [kN]	δ [mm]	σ [N/mm ²]	K [N/mm]
NR	NR1	49,14	8,96	167,69	548650
	NR2	50,95	8,07	173,87	631707
	NR3	42,00	6,77	143,35	620168
	Media	47,36	7,93	161,63	600175
	Dev. St.	4,73			
	Rel. Dev. St.	10,00 %			

Tabella 16 - Risultati sperimentali, provini NR

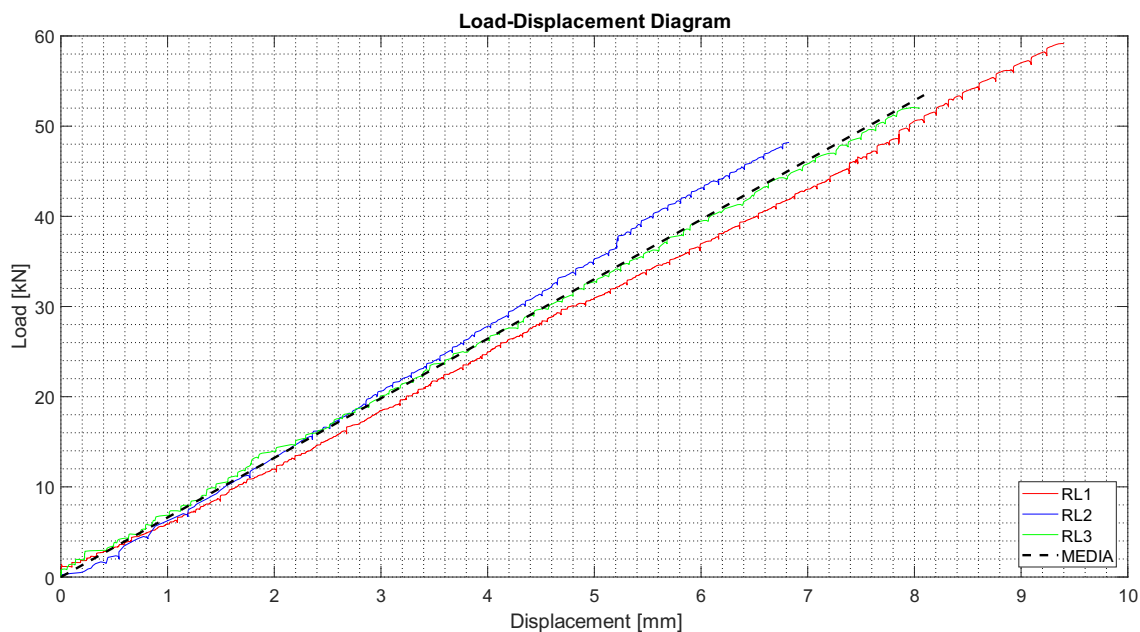


Figura 86 – Confronto provini rinforzati con lamina

Dalla *Figura 86*, osservando il comportamento dei provini, si può notare che i provini RL2 e RL3 mostrano una minore capacità di carico, rispettivamente 48,20 kN e 52,08 kN, ed un minore spostamento, rispettivamente 6,83 mm e 8,05 mm, in confronto al provino RL1, caratterizzato da un carico massimo di 59,16 kN e uno spostamento massimo di 9,40 mm. Il motivo di tali comportamenti può essere ricercato osservando i provini durante e dopo la prova. Infatti, come si vede nella *Figura 87*, riferita al provino RL2, sono presenti degli aloni al di sotto dei rulli del ripartitore di carico, formatisi all'incirca a metà della prova. Ciò dimostra un possibile problema di adesione tra la lamina in fibra di carbonio e il SentryGlas®. Inoltre, il provino durante la prova ha subito uno sforzo flessionale nella direzione debole rispetto al piano di sollecitazione principale, causando la rottura di una singola lastra. Dalla *Figura 88*, si nota chiaramente lo svergolamento subito dal provino, con la rottura della lastra anteriore. La combinazione di questi due fenomeni ha portato ad una diminuzione della capacità portante dell'elemento.

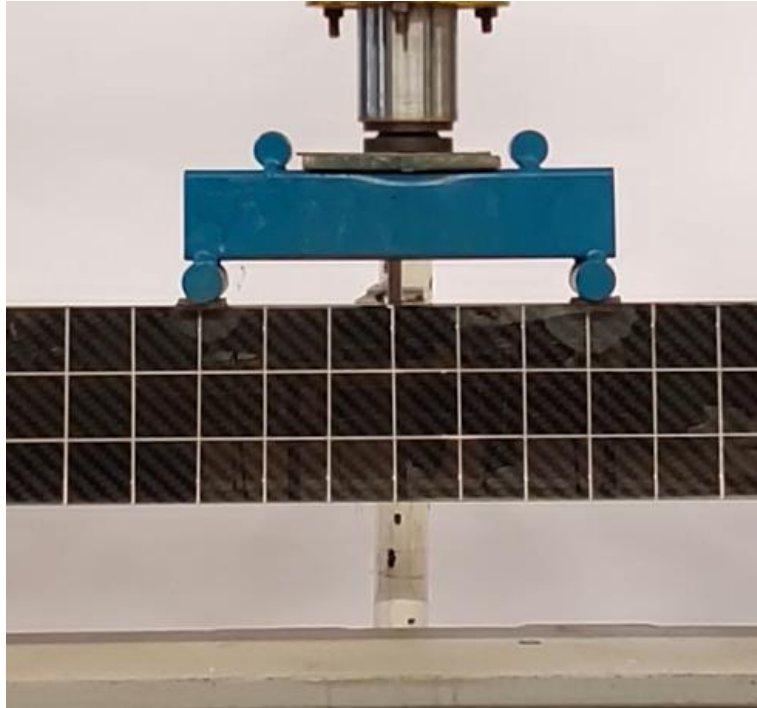


Figura 87 - Aloni in prossimità dei rulli del ripartitore di carico, PROVINO RL2



Figura 88 - Modalità di rottura PROVINO RL2

Il provino RL3 ha avuto un comportamento intermedio tra i provini RL1 e RL2. Infatti, come si nota dalla *Figura 86*, il provino ha raggiunto un carico e uno

spostamento massimo superiore rispetto al precedente, ma inferiore rispetto al provino RL1. Il motivo per cui esso si colloca nella posizione intermedia tra i due si può valutare osservando il suo comportamento durante la prova. Infatti, dalla *Figura 89*, si notano degli aloni al di sotto dei rulli del ripartitore di carico che testimoniano l'inizio del distacco tra la lamina in fibra di carbonio e il SentryGlas[®], ma a differenza del provino RL2, essi risultano essere molto più ampi. La differenza sostanziale tra il provino RL3 e RL2, è che esso non ha subito degli sforzi flessionali nel piano debole rispetto al piano di sollecitazione principale. Per tale motivo, la presenza degli aloni su entrambi i provini non inficia allo stesso modo quanto il fenomeno di instabilità laterale, che crea il successivo svergolamento dei provini e causa una diminuzione della capacità di carico e la conseguente diminuzione dello spostamento massimo.

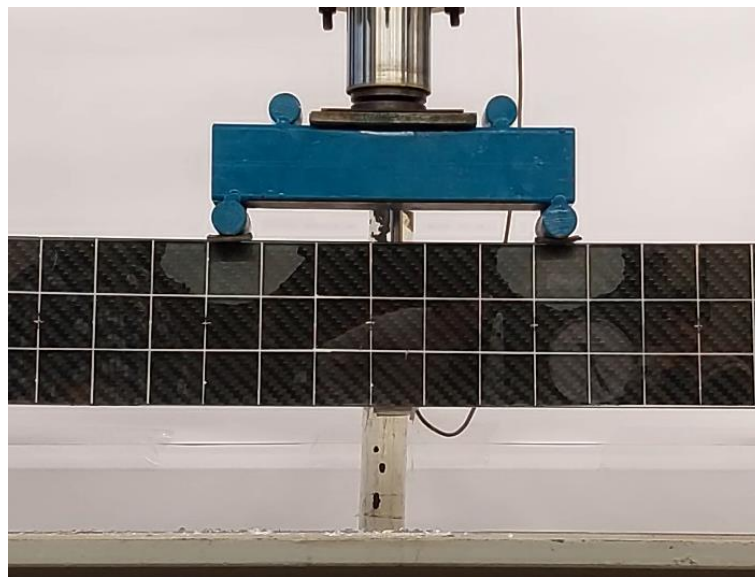


Figura 89 - Aloni in prossimità dei rulli del ripartitore di carico, PROVINO RL3



Figura 90 - Modalità di rottura PROVINO RL3

Serie	Campione	Carico massimo	Spostamento massimo	Resistenza a flessione	Modulo di rigidezza
ID	-	F_{max} [kN]	δ [mm]	σ [N/mm ²]	K [N/mm]
RL	RL1	59,16	9,40	178,70	629374
	RL2	48,20	6,83	145,64	706267
	RL3	52,08	8,05	157,33	646673
	Media	53,15	8,09	160,56	660771
	Dev. St.	5,56			
	Rel. Dev. St.	10,46 %			

Tabella 17 - Risultati sperimentali, provini RL

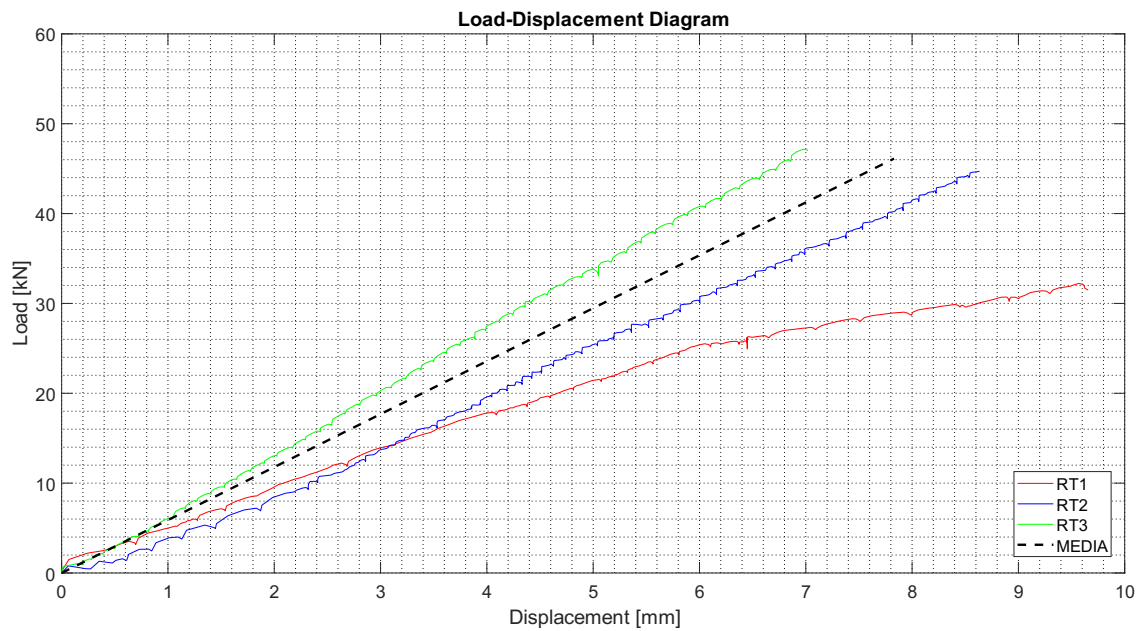


Figura 91 - Confronto tra i provini rinforzati con tessuto [6]

Nella Figura 91, si nota chiaramente la scarsa resistenza del provino RT1. Il motivo è causato dal fatto che il provino, durante la prova, ha subito uno sforzo importante nella direzione debole rispetto al piano di sollecitazione principale, subendo uno svergolamento. Pertanto, ai fini della determinazione dei valori medi, tale provino è stato escluso.

Serie	Campione	Carico massimo	Spostamento massimo	Resistenza a flessione	Modulo di rigidezza
ID	-	F_{max} [kN]	δ [mm]	σ [N/mm ²]	K [N/mm]
RT	RT1*	32,21	9,66	110,01	333606
	RT2	44,70	8,63	152,56	517673
	RT3	47,16	7,02	160,93	671856
	Media	45,93	7,83	156,74	594764
	Dev. St.	1,74			
	Rel. Dev. St.	3,78 %			

Tabella 18 - Risultati sperimentali, provini RT

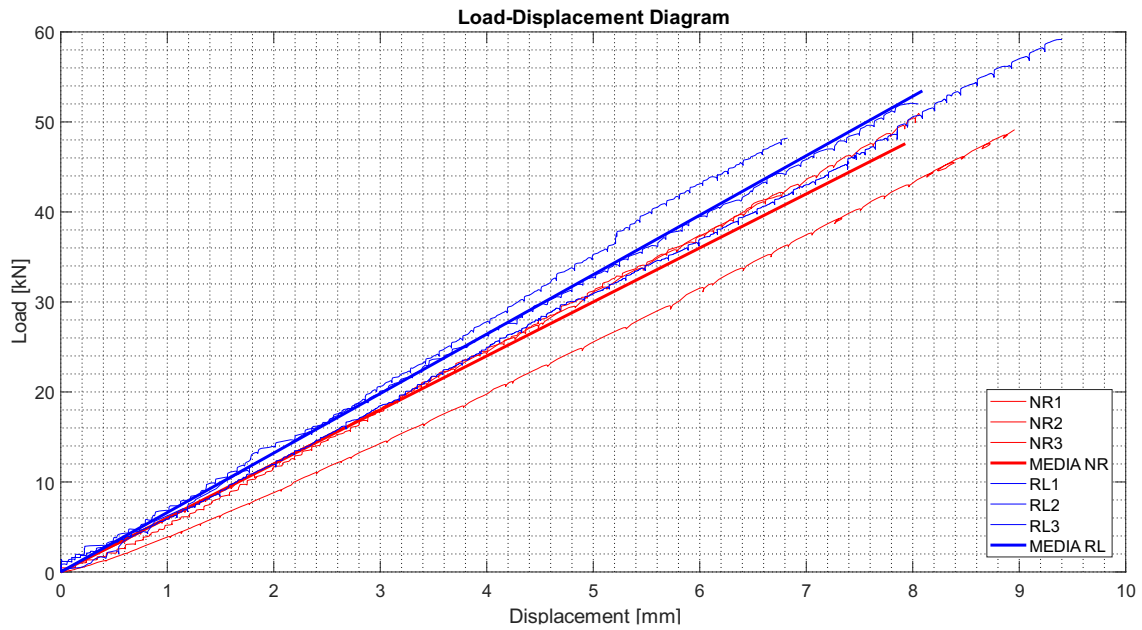


Figura 92 - Confronto tra i provini NR e RL

Come si nota dalla *Figura 92*, la tipologia RL risulta essere più resistente rispetto alla tipologia NR. Infatti, il valore di carico massimo raggiunto dalla RL è di circa 53 kN, mentre il carico raggiunto dalla NR è di circa 47 kN.

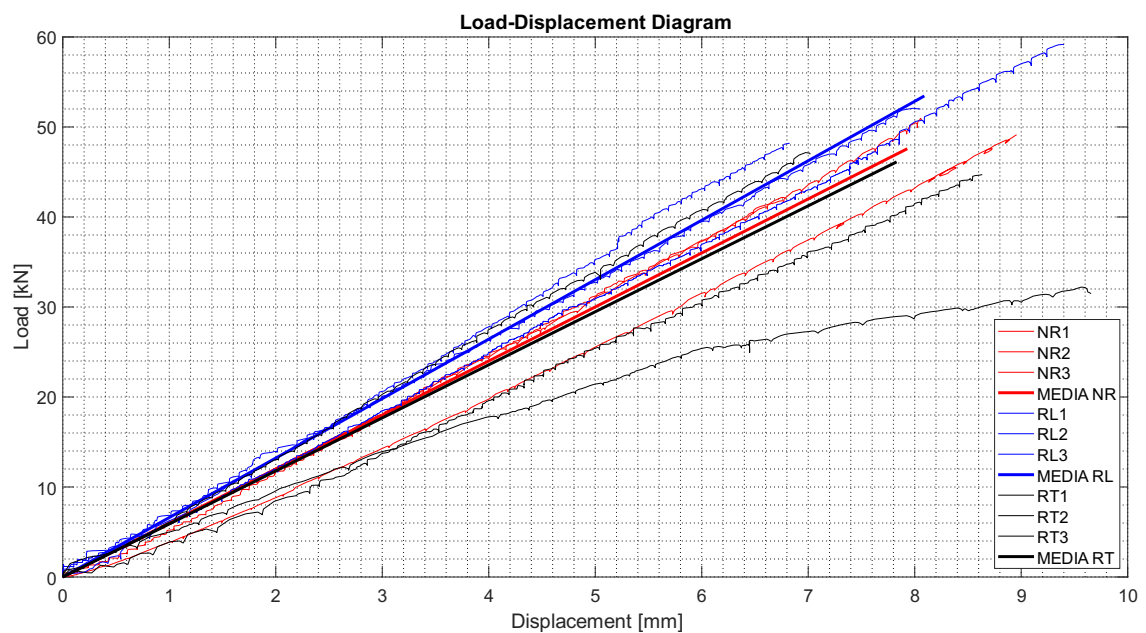


Figura 93 – Confronto tra i provini NR, RL e RT

Dalla *Figura 93* si nota il miglior comportamento della tipologia RL rispetto alle altre due. Dal grafico si evince che, scartando il provino RT1, per il motivo visto

precedentemente, il valore medio della tipologia RT si avvicina molto ai valori medi della tipologia NR. Ciò significa che il provino rinforzato con il tessuto in fibra di carbonio, incollato con la resina epossidica bicomponente nel lembo inferiore della trave, non ha portato benefici dal punto di vista statico. Di seguito si riporta una tabella riepilogativa contenente i risultati principali ottenuti dalla sperimentazione.

Serie	Campione	Carico Max	Spost. Max	Res. Flessione σ	E
ID	-	[kN]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm]
NR	NR1	49,14	8,96	167,69	548650
	NR2	50,95	8,07	173,87	631707
	NR3	42,00	6,77	143,35	620168
	Media	47,36	7,93	161,64	6001175
	Dev. St.	4,73			
	Rel. Dev. St	10,00 %			
RL	RL1	59,16	9,40	178,70	629374
	RL2	48,20	6,83	145,64	706267
	RL3	52,08	8,05	157,33	646673
	Media	53,15	8,09	160,56	660771
	Dev. St.	5,56			
	Rel. Dev. St	10,46 %			
RT	RT1*	32,21	9,66	110,01	333606
	RT2	44,70	8,63	152,56	517673
	RT3	47,16	7,02	160,93	671855
	Media	45,93	8,44	156,74	594764
	Dev. St.	1,74			
	Rel. Dev. St	3,78 %			

Tabella 19 – Confronto risultati sperimentali dei provini

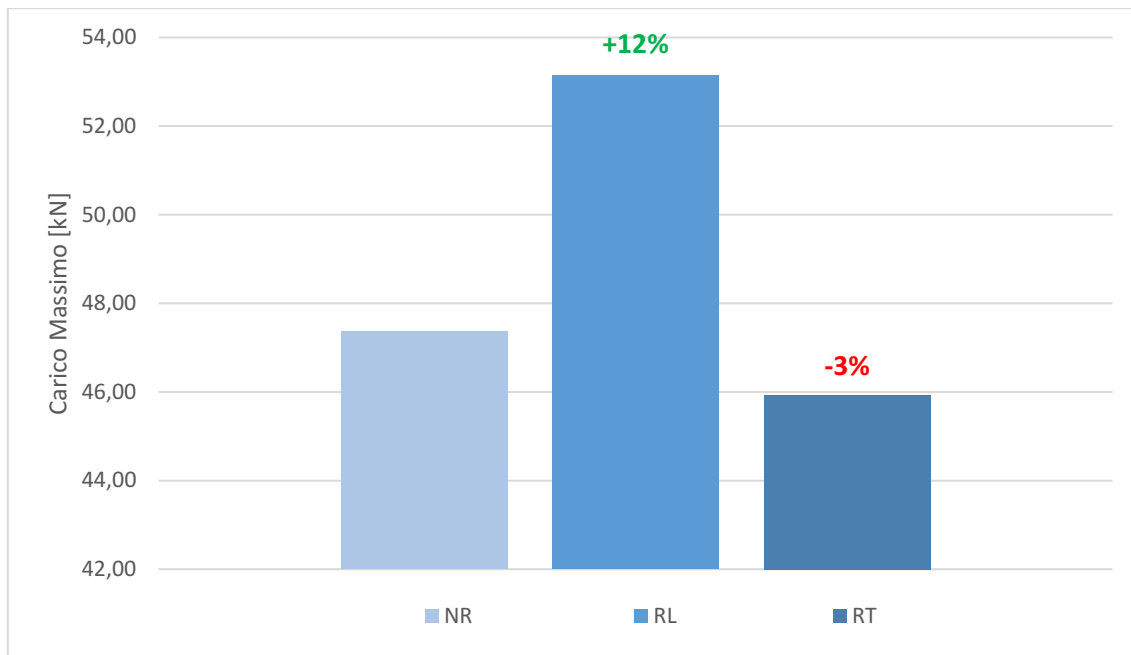


Figura 94 - Confronto tra i valori medi di carico per le tipologie di provini sperimentati

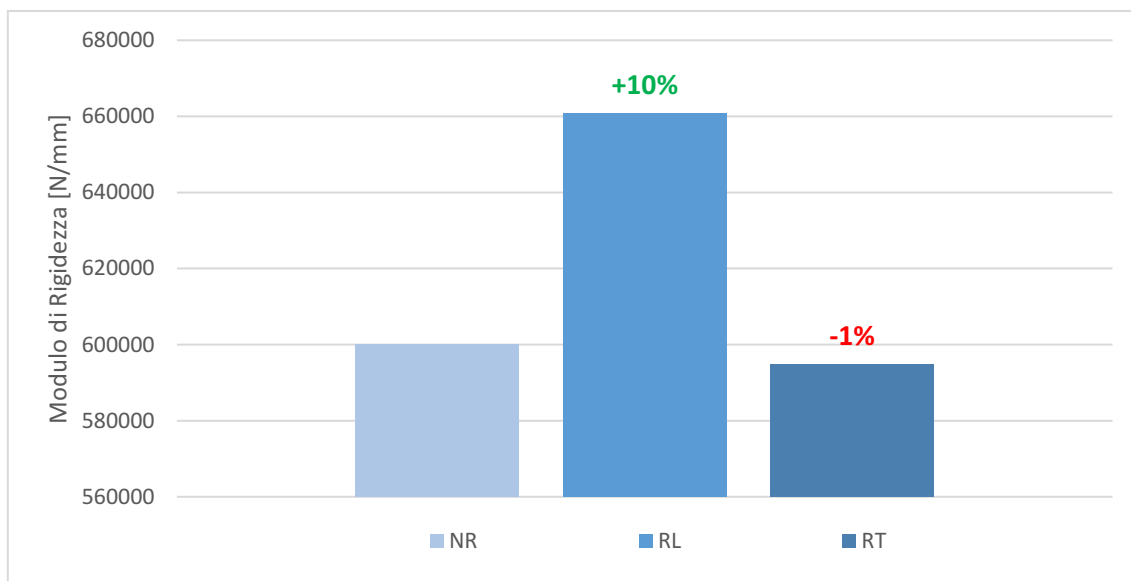


Figura 95 - Confronto del modulo di rigidezza dei provini

Dalla *Figura 94*, si nota la differenza percentuale tra la tipologia non rinforzata e quella rinforzata con la lamina in CFRP, con un aumento del carico massimo di circa il 12%. La tipologia RT riporta una diminuzione percentuale del carico massimo di circa il 3%. Tale valore, essendo negativo, non significa che il rinforzo con il tessuto incide negativamente sul comportamento dei provini, diminuendone la resistenza al carico massimo, ma, essendo molto piccolo, viene considerato non significativo, e

quindi considerato al pari della tipologia NR. Lo stesso ragionamento viene fatto per la *Figura 95*, la quale riporta il confronto tra i moduli di rigidezza dei provini, dimostrando un aumento percentuale della tipologia RL di circa il 10%, irrigidita dalla presenza della lamina. La tipologia RT, pur avendo una percentuale minore dell'NR dell'1%, per via del valore molto basso, non viene considerata peggiorativa ma al pari della tipologia non rinforzata. Dai grafici si può quindi affermare che l'unica tipologia di rinforzo efficiente è quella con la lamina in fibra di carbonio inserita tra le lastre in vetro, denominata RL.

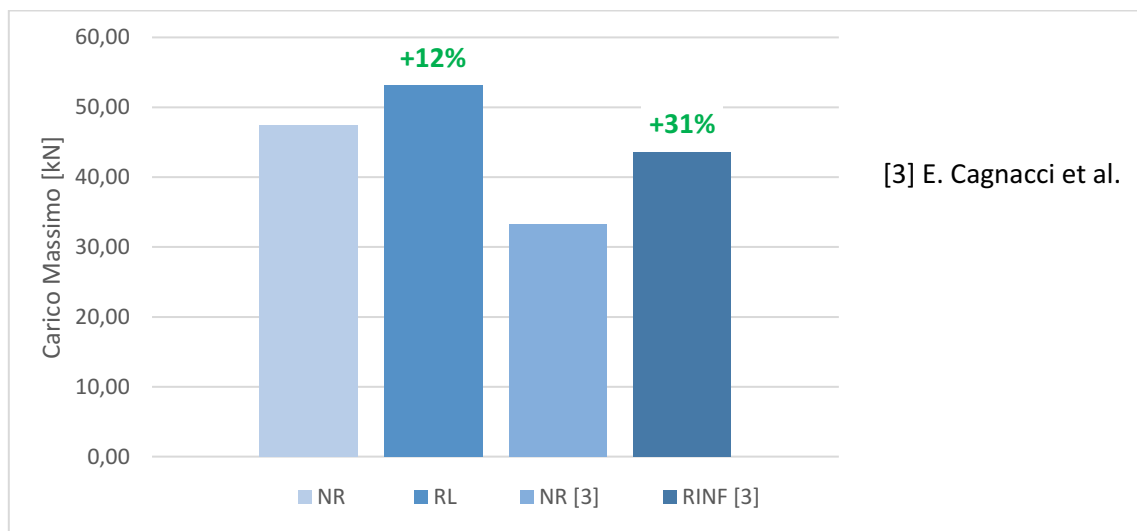


Figura 96 - Confronto con i valori presenti in letteratura

La *Figura 96* riporta il confronto tra la sperimentazione effettuata nel presente elaborato di tesi e quella effettuata da [3]. Si notano in entrambe un aumento della resistenza, rispettivamente 12% nel caso in esame e 31% nello studio esaminato, dovuto alla presenza del rinforzo.

6.2. DISCUSSIONE CARATTERIZZAZIONE DINAMICA

Di seguito si riporta la tabella di confronto tra le frequenze ottenute in via sperimentale, tramite il software BK Connect - Pulse, e quelle ottenute in via numerica, tramite il software ANSYS. Tale tabella risulta essere interessante poiché mette in luce la corretta esecuzione della sperimentazione, per via delle percentuali di scarto molto basse tra modellazione FEM e la sperimentazione effettuata.

Serie	Modi di vibrare	Sperimentale	FEM	Scarto percentuale
ID	-	[Hz]	[Hz]	%
NR_AF	I°	352,00	345,80	1,76
	II°	928,00	902,04	2,78
	III°	1696,00	1650,90	2,66
	IV°	2592,00	2528,00	2,47
NR_AD	I°	56,00	52,86	5,61
	II°	144,00	143,40	0,42
	III°	280,00	274,62	1,92
	IV°	456,00	440,75	3,34
RL_AF	I°	352,00	345,23	1,92
	II°	920,00	900,70	2,10
	III°	1672,00	1648,90	1,38
	IV°	2552,00	2525,40	1,04
RL_AD	I°	68,00	60,94	10,38
	II°	168,00	162,60	3,21
	III°	320,00	304,60	4,81
	IV°	508,00	477,00	6,10

Tabella 20 - Confronto tra frequenze sperimentali e modello FEM

Successivamente si riportano le tabelle relative ai confronti tra le frequenze dei provini non rinforzati e rinforzati con la lamina in fibra di carbonio. Da come si nota nella *Tabella 21* e dalla *Tabella 22* il rinforzo ha generato un aumento della frequenza nel piano di sollecitazione debole (XX). Conoscendo quindi la frequenza, possiamo calcolare la pulsazione secondo la seguente relazione:

$$\omega = 2\pi f. \quad (2)$$

Una volta determinata la pulsazione, è possibile calcolare la rigidezza del provino, applicando la seguente relazione:

$$k = \omega^2 m. \quad (3)$$

A parità di massa del provino, se aumenta la frequenza aumenta la rigidezza. Ciò dimostra il fatto che la lamina in fibra di carbonio ha reso il provino più rigido rispetto a quello non rinforzato.

Serie	Modi di vibrare	Sperimentale	FEM	Scarto percentuale (Sperimentale)	Scarto percentuale (FEM)
ID	-	[Hz]	[Hz]	%	%
NR_AF	I°	352	345,8		
	II°	928	902,04		
	III°	1696	1650,9		
	IV°	2592	2528		
RL_AF	I°	352	345,23	0,000	-0,16
	II°	920	900,7	-0,87	-0,15
	III°	1672	1648,9	-1,43	-0,12
	IV°	2552	2525,4	-1,57	-0,10

Tabella 21 - Confronto tra frequenze dei provini non rinforzati e rinforzati, asse forte

Serie	Modi di vibrare	Sperimentale	FEM	Scarto percentuale (Sperimentale)	Scarto percentuale (FEM)
ID	-	[Hz]	[Hz]	%	%
NR_AD	I°	56	52,86		
	II°	144	143,4		
	III°	280	274,62		
	IV°	456	440,75		
RL_AD	I°	68	60,94	17,64	13,26
	II°	168	162,6	14,27	11,81
	III°	320	304,6	12,5	9,84
	IV°	508	477	10,24	7,60

Tabella 22 - Confronto tra frequenze dei provini non rinforzati e rinforzati, asse debole

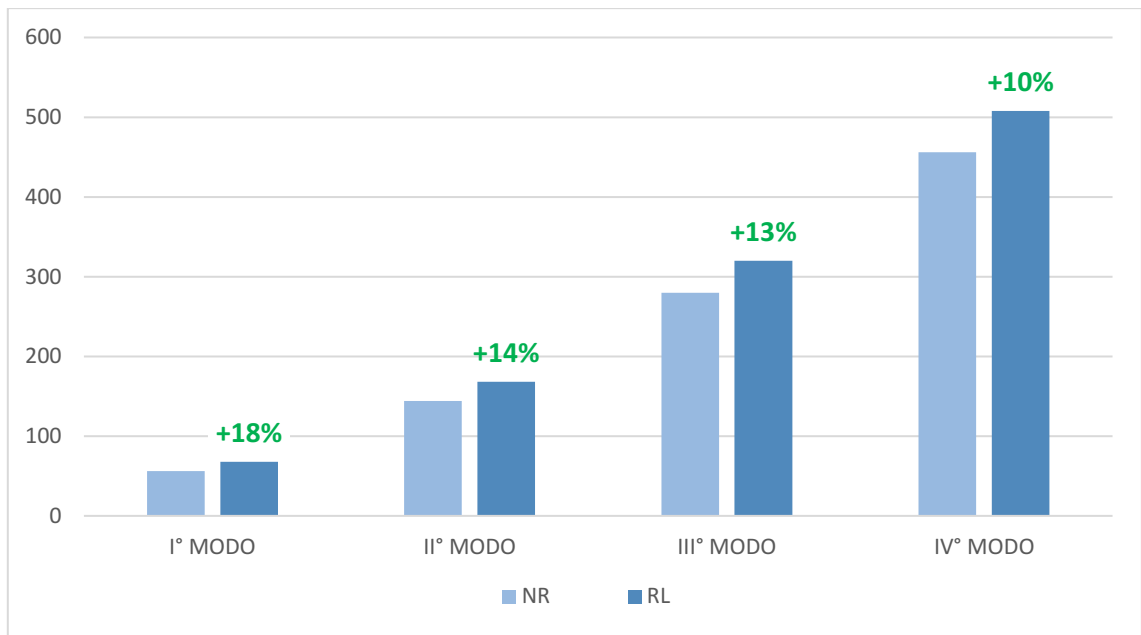


Figura 97 - Confronto tra le frequenze relative ai primi modi dei provini NR e RL

La *Figura 97*, riporta confronto tra le frequenze relative ai primi quattro modi di vibrare delle due tipologie di provini. Per ogni modo, la tipologia RL risulta avere una frequenza maggiore rispetto alla tipologia NR e ciò si traduce in un aumento di rigidità.

In conclusione, come si osserva dalla *Figura 95* e dalla *Figura 97*, si può affermare che la lamina, posizionata all'interno delle lastre in vetro, genera un aumento di rigidità statica e di rigidità dinamica dello stesso ordine di grandezza (10% e 15%).

7. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Sulla base delle prove sperimentali statiche e dinamiche condotte e sull'analisi dei risultati ottenuti, è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- L'applicazione della lamina in fibra di carbonio (CFRP) aumenta la resistenza flessionale dell'elemento analizzato, incrementando il carico massimo di fessurazione, lo spostamento massimo e la rigidità statica;
- Dall'analisi delle variazioni dei valori di frequenza, si può constatare che la presenza della lamina determina un aumento delle frequenze relative ai primi quattro modi di vibrare, aumentandone la rigidità dinamica flessionale dell'elemento.

Il provino rinforzato con la lamina in fibra di carbonio (CFRP) ha le potenzialità per costituire una solida base per eventuali sviluppi futuri. Come discusso nel capitolo precedente, la presenza degli aloni al di sotto dei rulli del ripartitore di carico testimoniano un iniziale distacco della lamina dal SentryGlas[®]; pertanto può essere condotto un preliminare test di adesione tra il materiale composito e l'intercalare, così da evitare il distacco prematuro. Inoltre, la lamina, costituita dalla sovrapposizione di tre strati di fibra di carbonio, può presentare al suo interno dei micro-vuoti, dovuti dalla natura del materiale fibroso, che causano una minore aderenza finale. Pertanto, può essere condotta un'ulteriore indagine preliminare volta alla determinazione e all'eliminazione di tali micro-difetti al fine di avere una perfetta adesione tra gli elementi. Le prove sperimentali possono essere effettuate nel piano di sollecitazione debole (XX) per valutare il contributo della lamina in tale direzione. Inoltre, la prova statica può essere estesa alla determinazione del comportamento plastico dei provini,

analizzando gli effetti dati dai materiali di rinforzo dopo la prima rottura del vetro. Infine, visti i casi in cui si è verificato il fenomeno dello svergolamento delle barre, si può implementare lo studio creando dei provini costituiti da più lastre in vetro, ottenendo così uno spessore maggiore che si oppone al fenomeno di instabilità.

BIBLIOGRAFIA

- [1] COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI, «Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro,» *CNR-DT 210/2013*.
- [2] C. Louter, C. Leung, H. Kolstein e J. Vambersky, «Structural Glass Beams with Embedded Glass Fibre Reinforcement,» Maggio 2010.
- [3] E. Cagnacci, M. Orlando e P. Spinelli, «Experimental campaign and numerical simulation of the behaviour of reinforced glass beam».
- [4] C. Bedon e C. Louter, «Structural glass beams with embedded GFRP, CFRP, or steel reinforcement rods: Comparative experimental, analytical and numerical investigations,» *Journal of Building Engineering*, n. 22, 2019.
- [5] X. Centelles, J. Castro, F. Pelayo, M. Aenlle-López e L. F. Cabeza, «Experimental study and comparison of different fully transparent laminated glass beam design,» *Glass Structures & Engineering*, 2021.

- [6] A. Donati, «Comportamento meccanico di travi in vetro strutturale rinforzate con tessuti in fibra di carbonio,» 2021-2022.
- [7] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN 1288-1».
- [8] UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, «UNI EN 1288-3».
- [9] C. Bedon e C. Louter, «Numerical investigation on structural glass beams with GFRP-embedded rods, including effects of pre-stress,» *Composite Structures*, n. 184, 2018.
- [10] E. Cagnacci , M. Orlando e P. Spinelli , «Il vetro strutturale - parte I,» *Bollettino Ingegneri*, n. 11, 2016.
- [11] D. Zhang, S. Chen, Y. Lu e X. Chen, «Quasi-static experimental study on flexural performance of aluminium-reinforced glass beams,» *Engineering Structures*, n. 256, 2022.

ALLEGATI

PROVINO NON RINFORZATO – ASSE FORTE

PROVINO NON RINFORZATO – M1

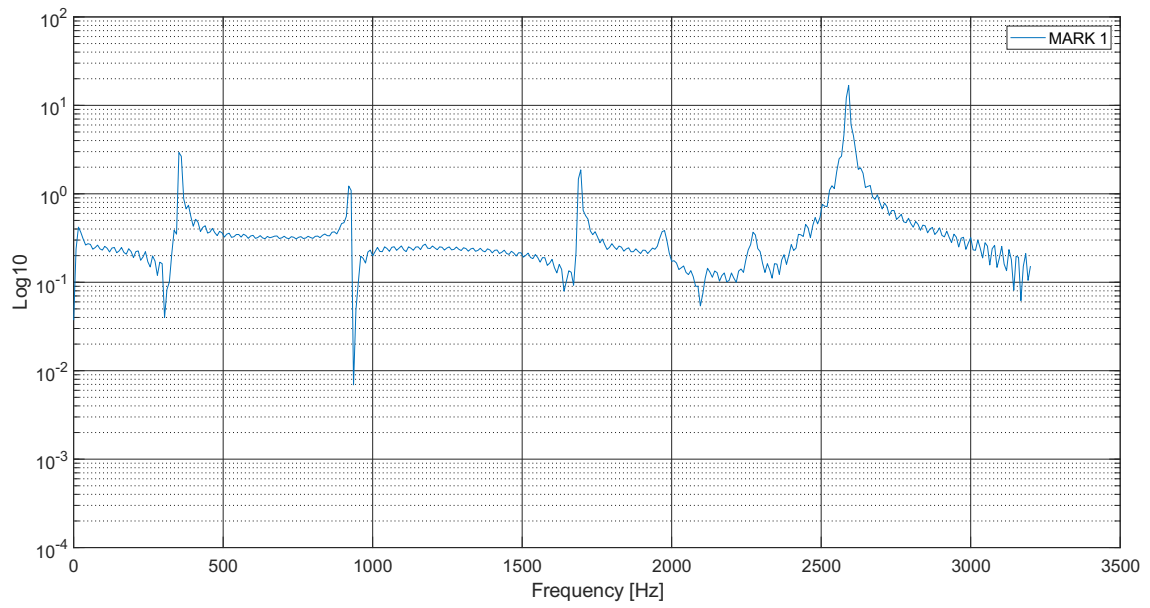


Figura 98 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M1

PROVINO NON RINFORZATO – M2

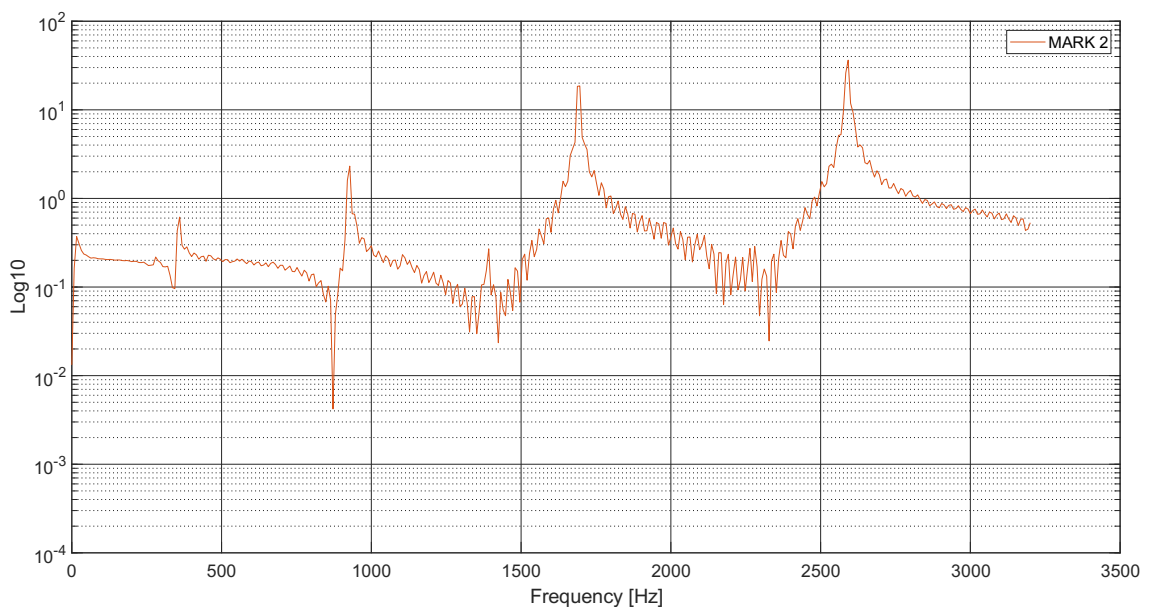


Figura 99 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M2

PROVINO NON RINFORZATO – M3

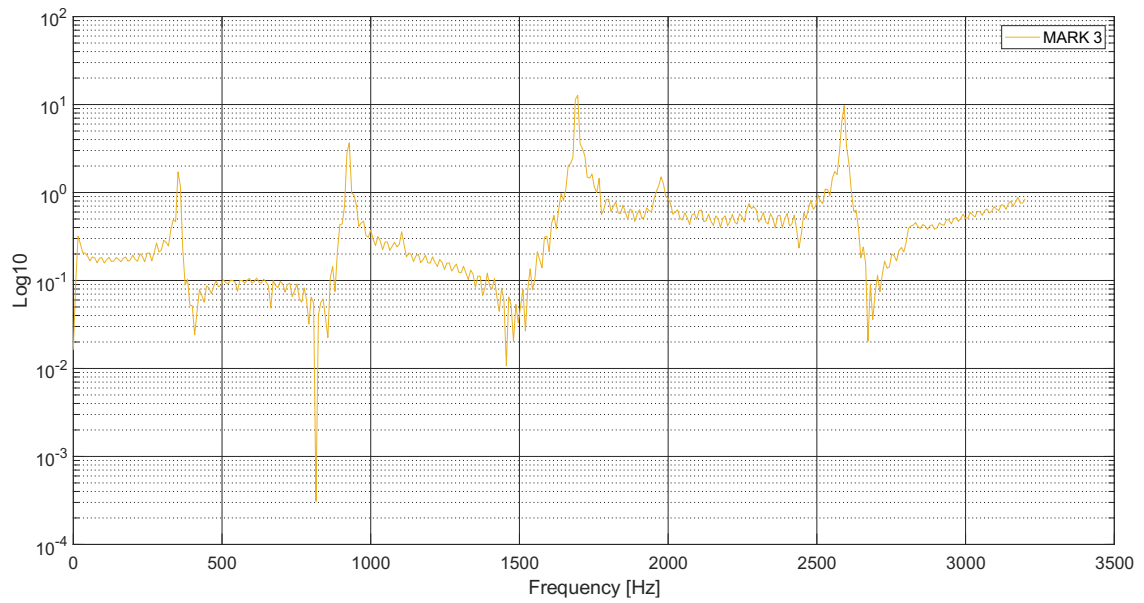


Figura 100 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M3

PROVINO NON RINFORZATO – M4

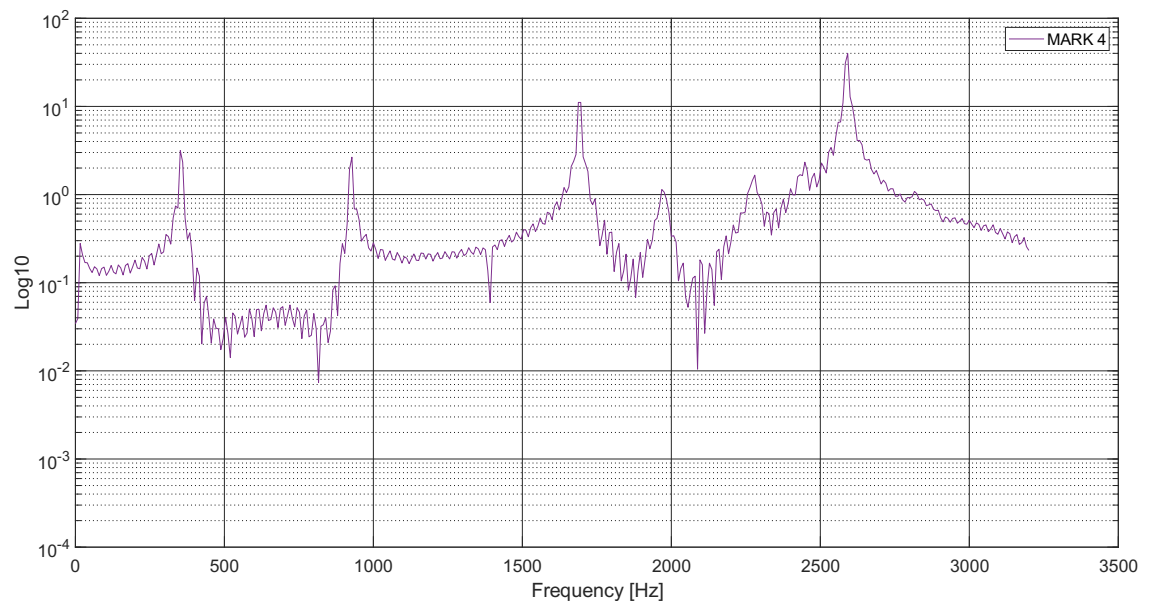


Figura 101 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M4

PROVINO NON RINFORZATO – M5

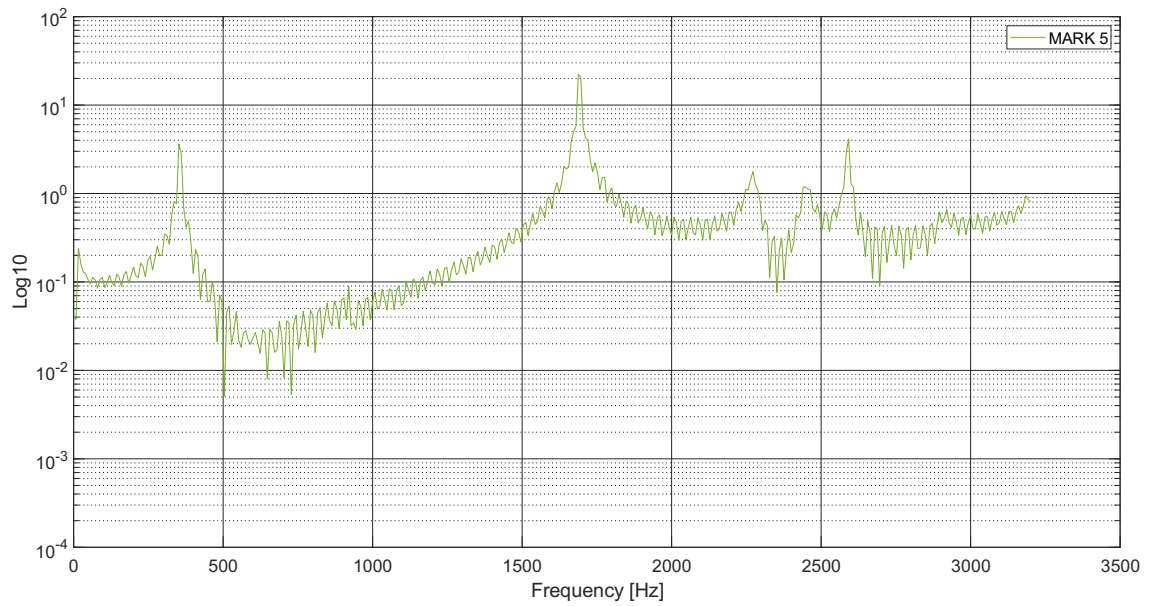


Figura 102 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M5

PROVINO NON RINFORZATO – M6

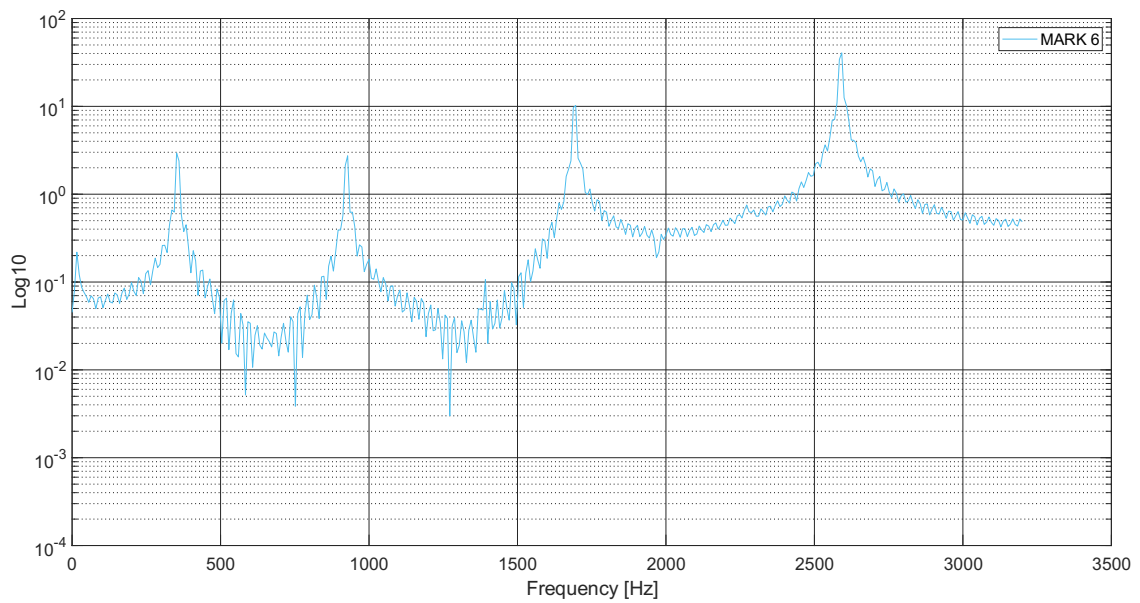


Figura 103 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M6

PROVINO NON RINFORZATO – M7

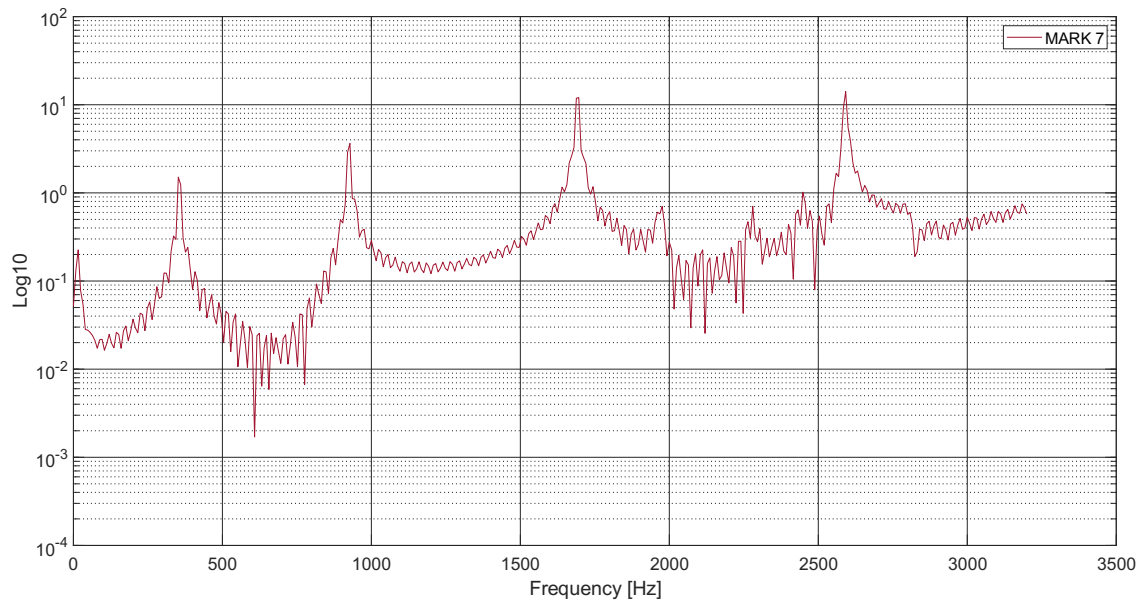


Figura 104 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M7

PROVINO NON RINFORZATO – M8

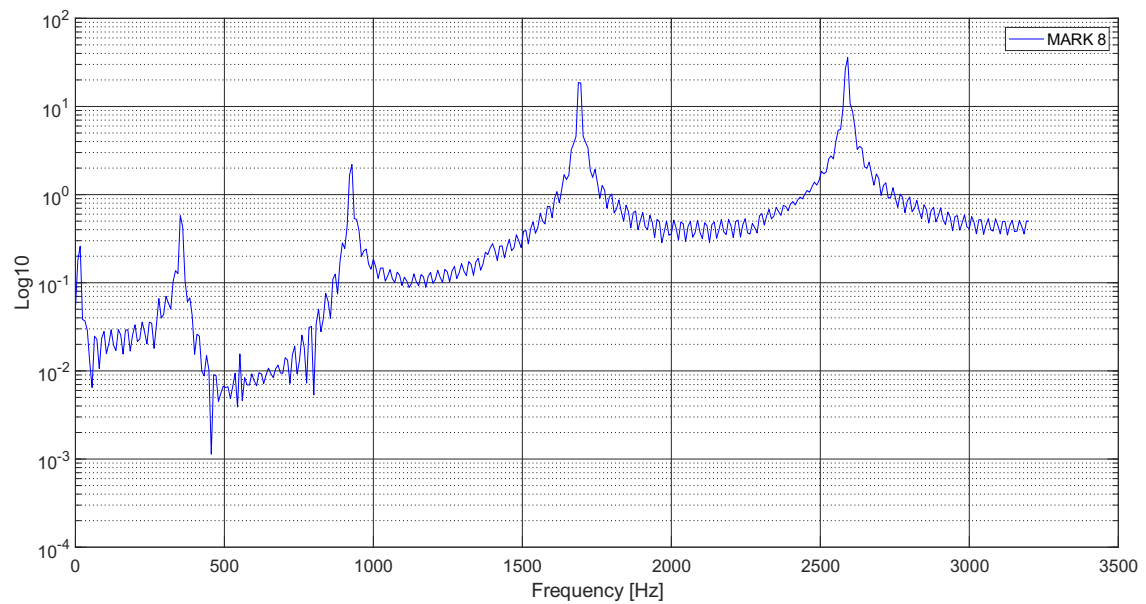


Figura 105 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M8

PROVINO NON RINFORZATO – M9

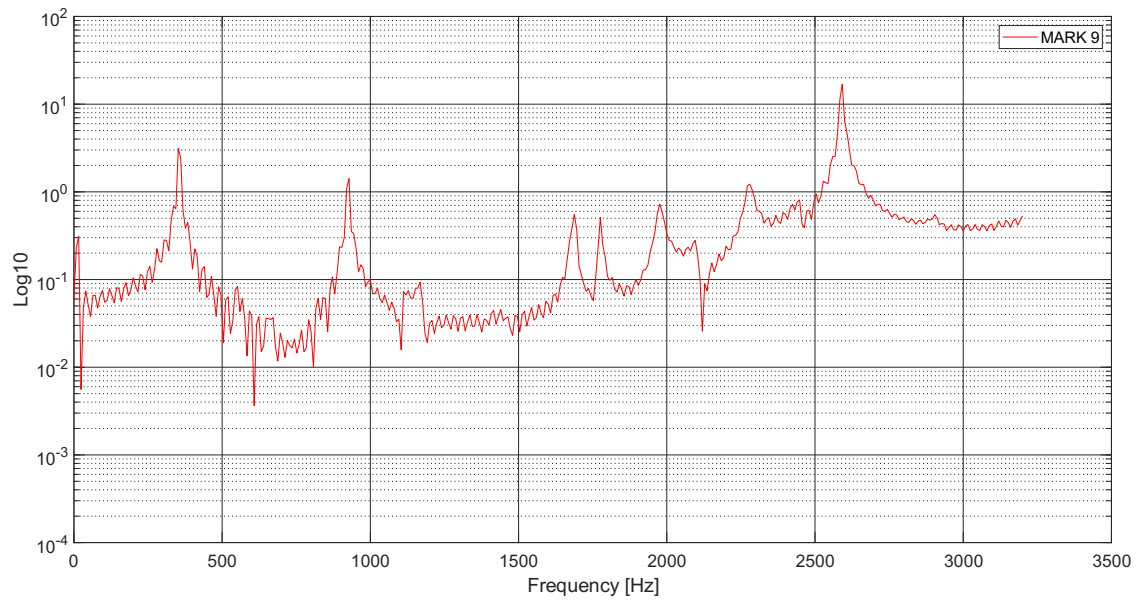


Figura 106 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M9

PROVINO NON RINFORZATO - ASSE DEBOLE

PROVINO NON RINFORZATO – M1

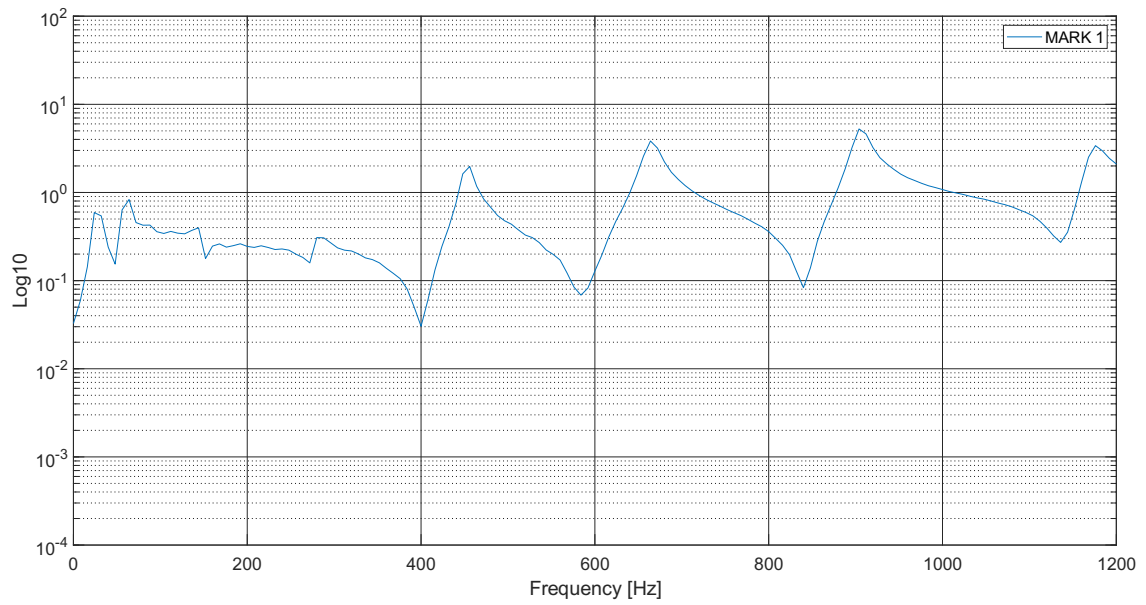


Figura 107 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M1

PROVINO NON RINFORZATO – M2

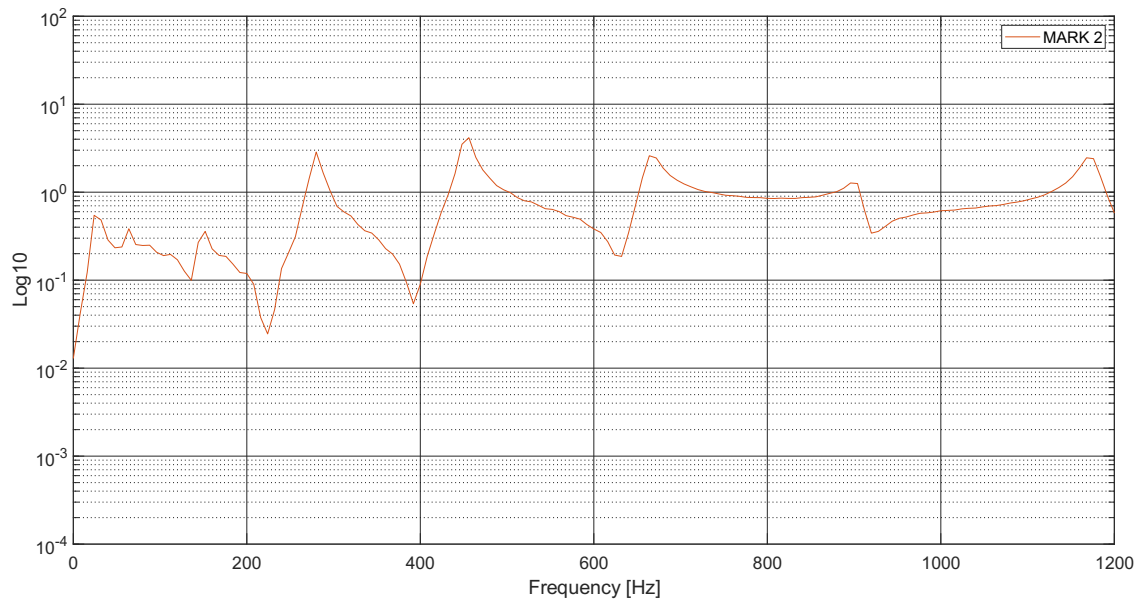


Figura 108 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M2

PROVINO NON RINFORZATO – M3

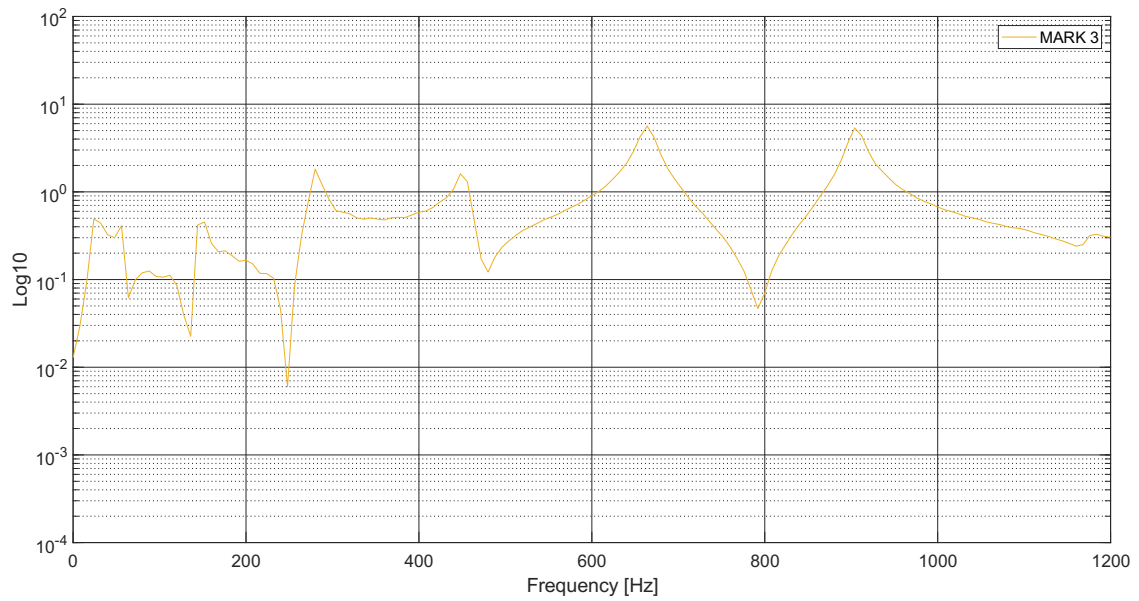


Figura 109 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M3

PROVINO NON RINFORZATO – M4

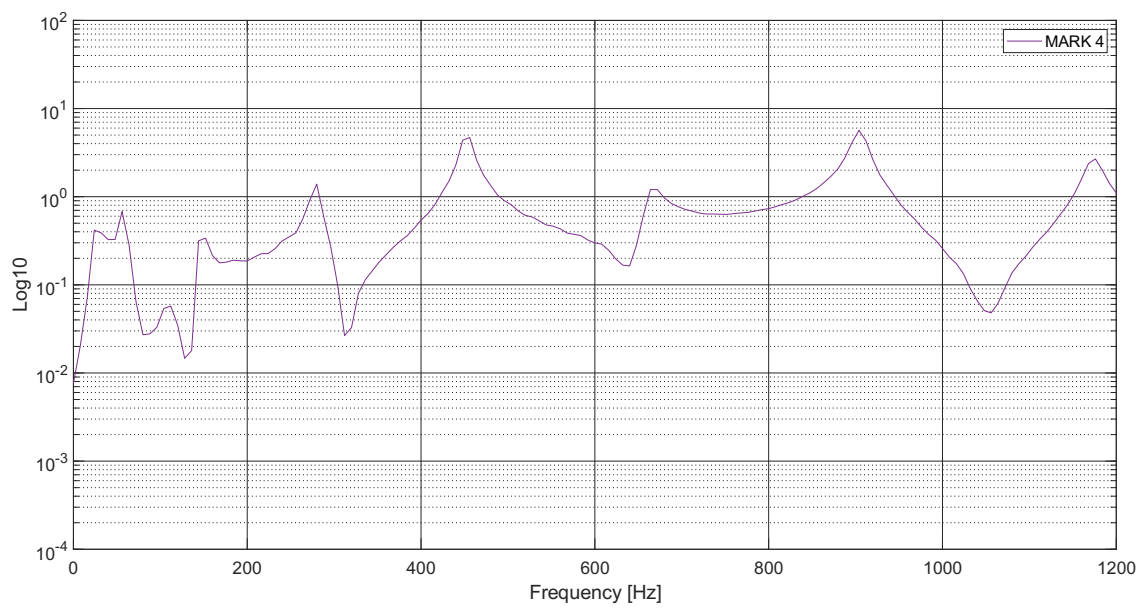


Figura 110 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M4

PROVINO NON RINFORZATO – M5

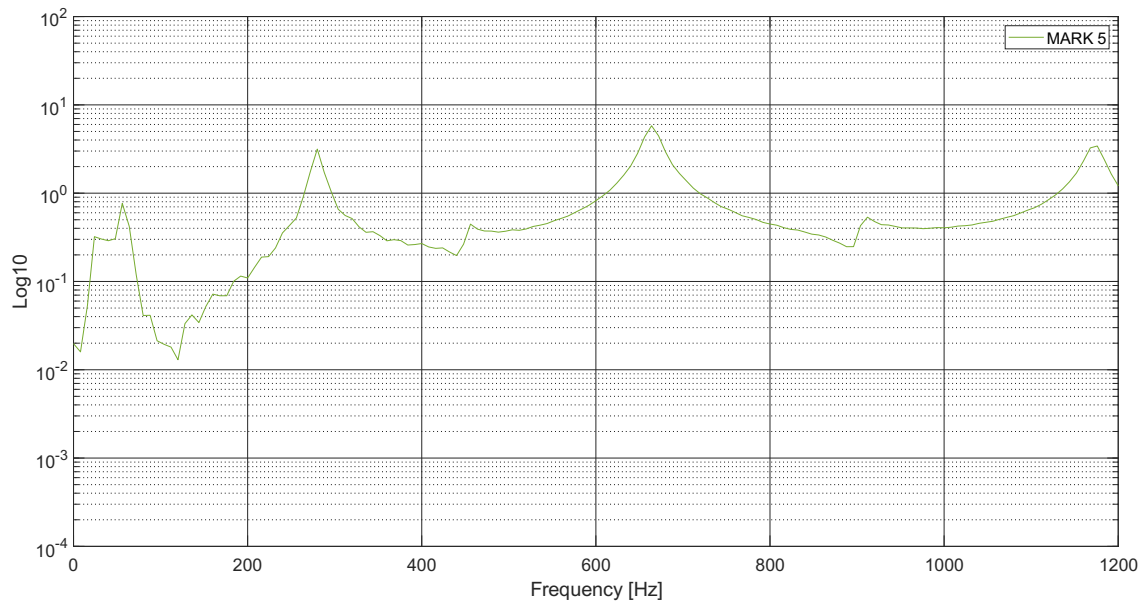


Figura 111 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M5

PROVINO NON RINFORZATO – M6

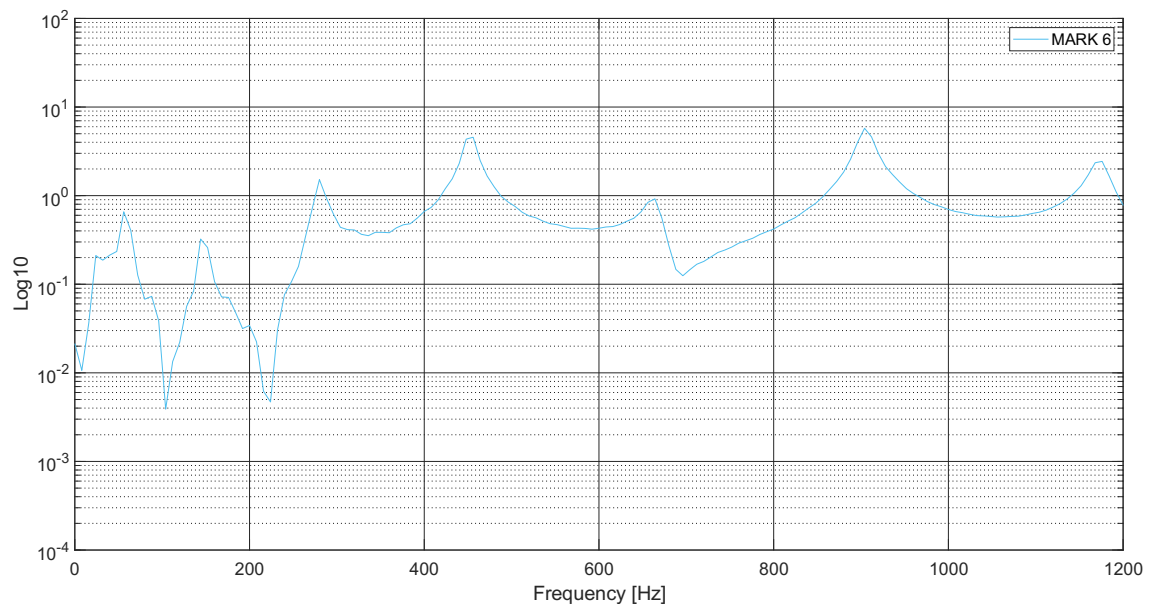


Figura 112 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M6

PROVINO NON RINFORZATO – M7

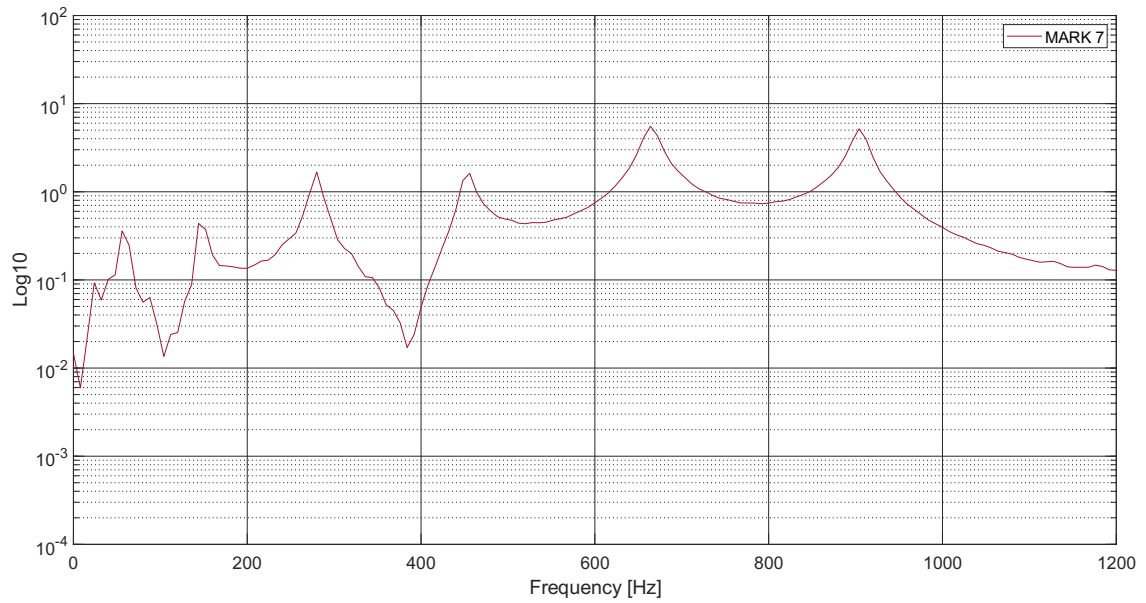


Figura 113 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M7

PROVINO NON RINFORZATO – M8

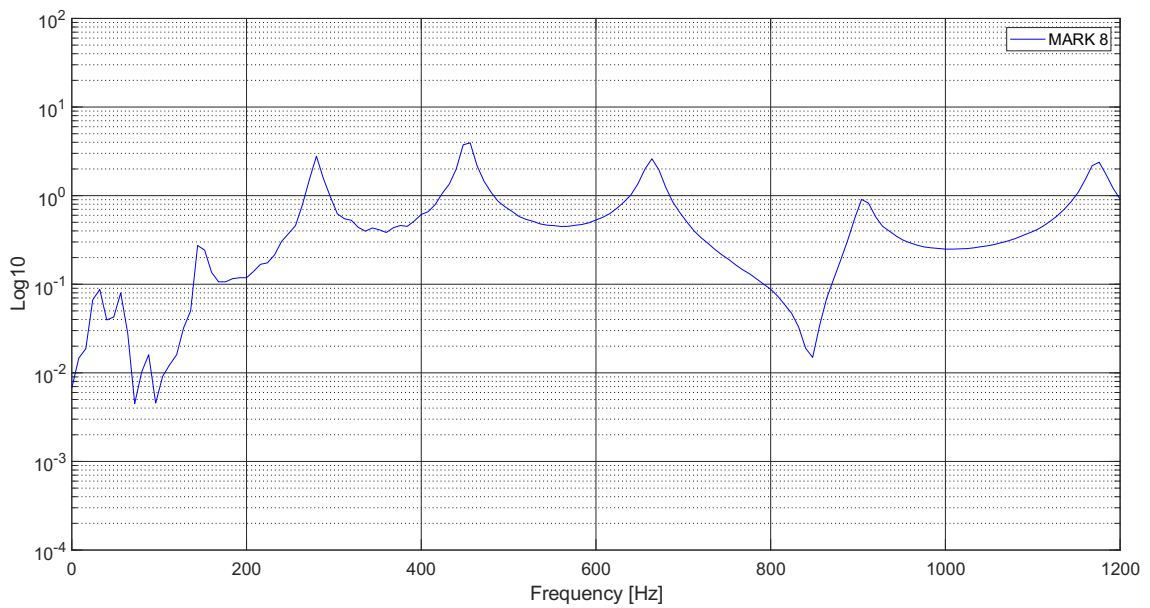


Figura 114 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M8

PROVINO NON RINFORZATO – M9

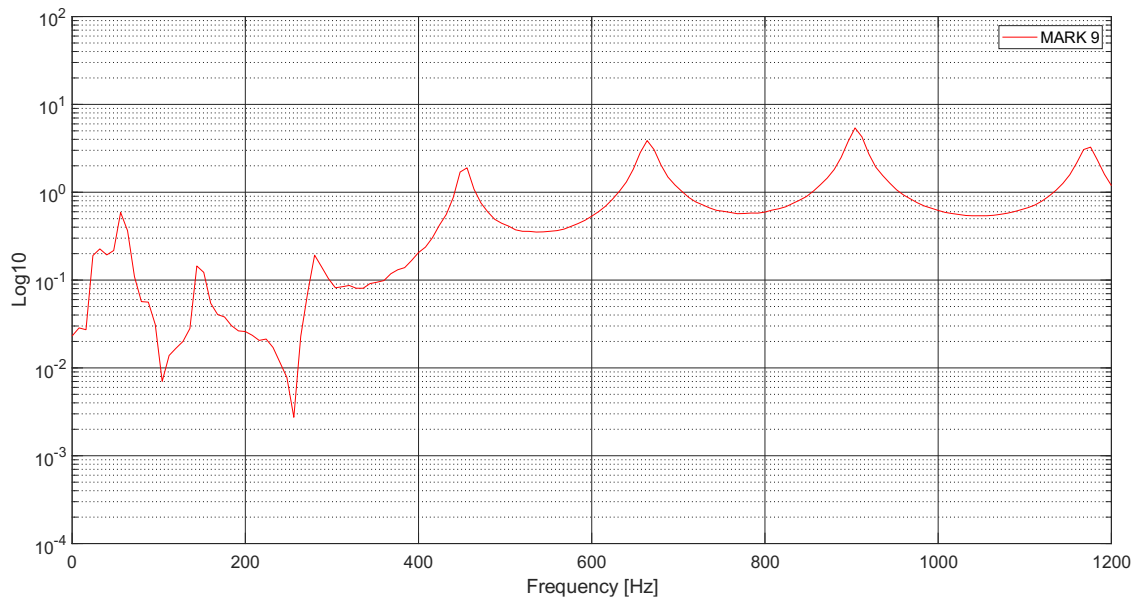


Figura 115 - Modulo del Complesso, PROVINO NON RINFORZATO, M9

PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE FORTE

PROVINO RINFORZATO – M1

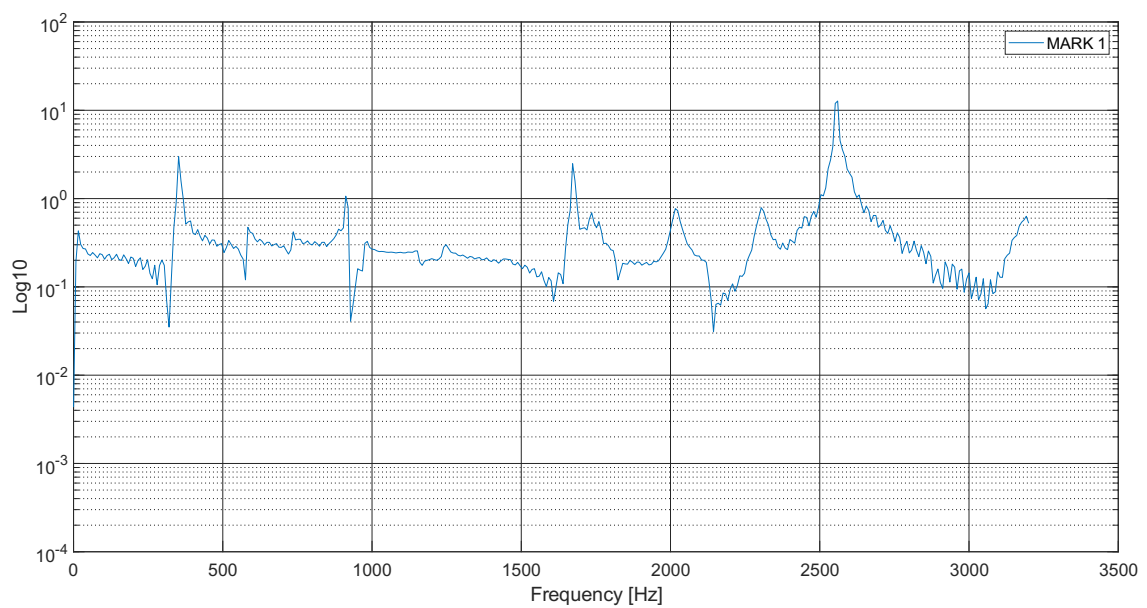


Figura 116 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M1

PROVINO RINFORZATO – M2

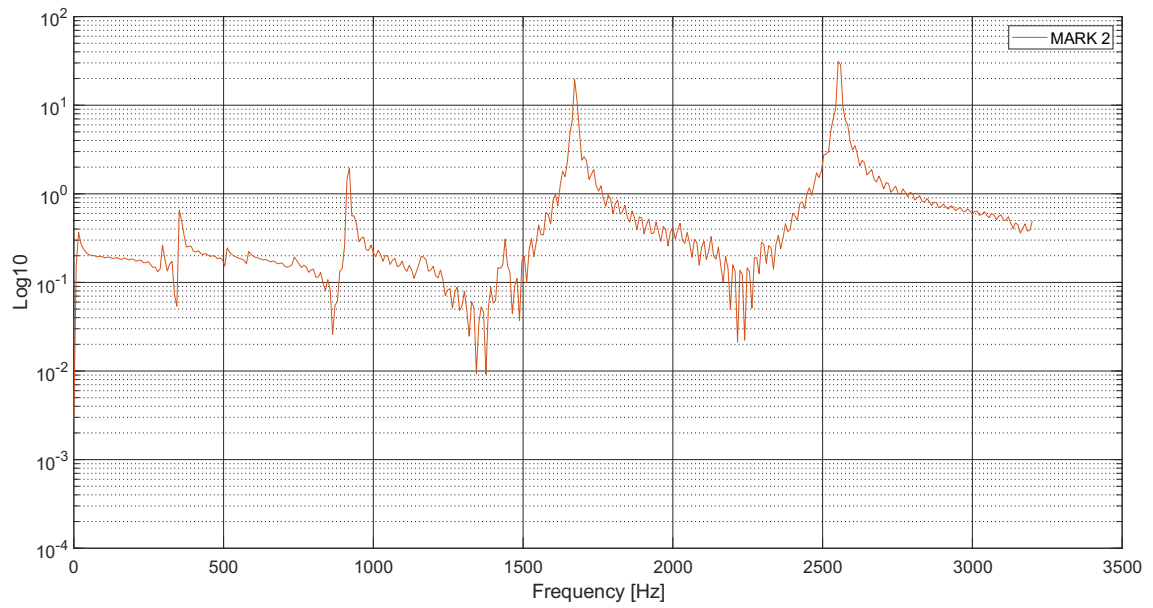


Figura 117 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M2

PROVINO RINFORZATO – M3

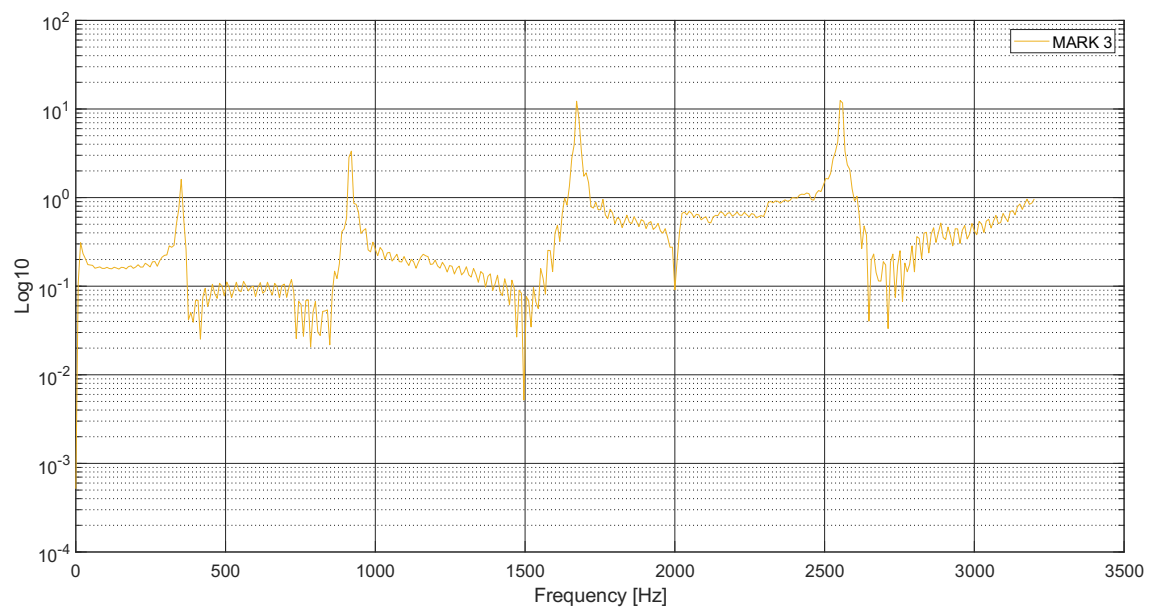


Figura 118 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M3

PROVINO RINFORZATO – M4

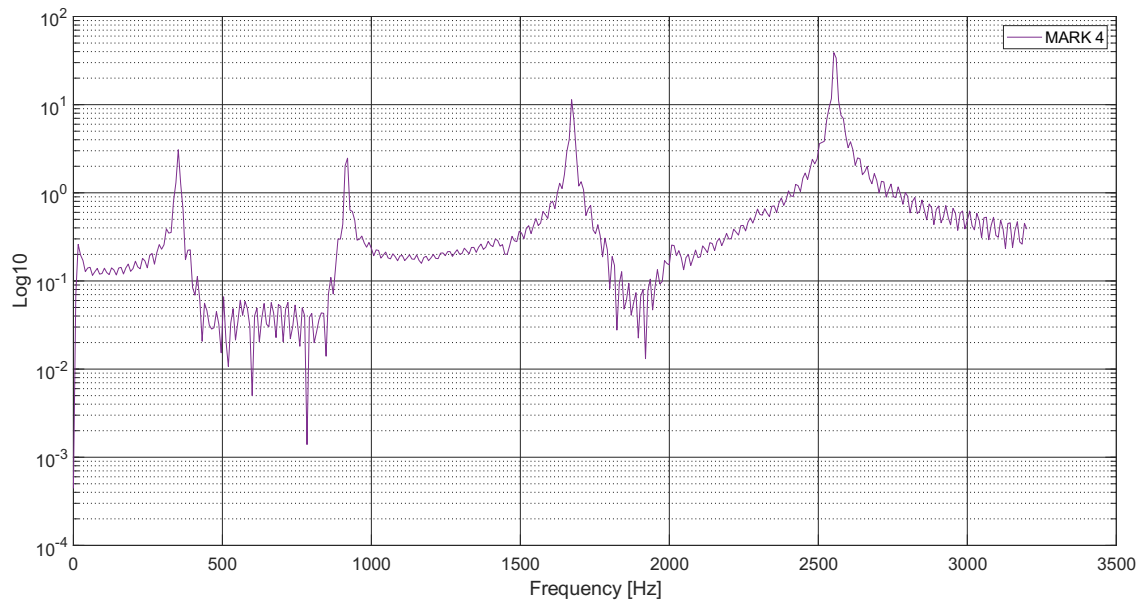


Figura 119 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M4

PROVINO RINFORZATO – M5

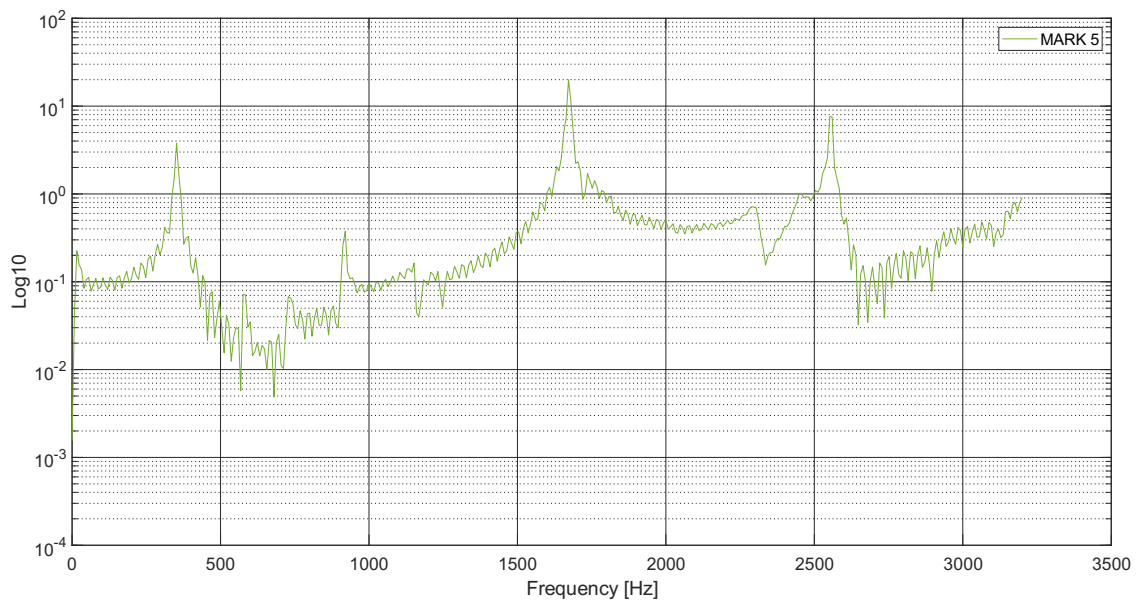


Figura 120 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M5

PROVINO RINFORZATO – M6

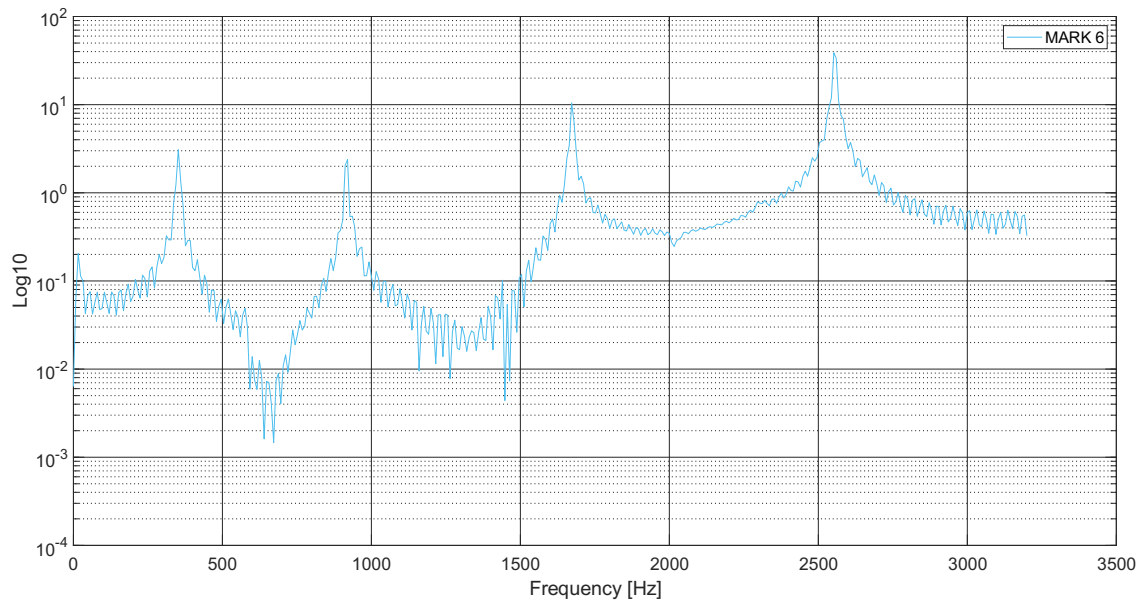


Figura 121 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M6

PROVINO RINFORZATO – M7

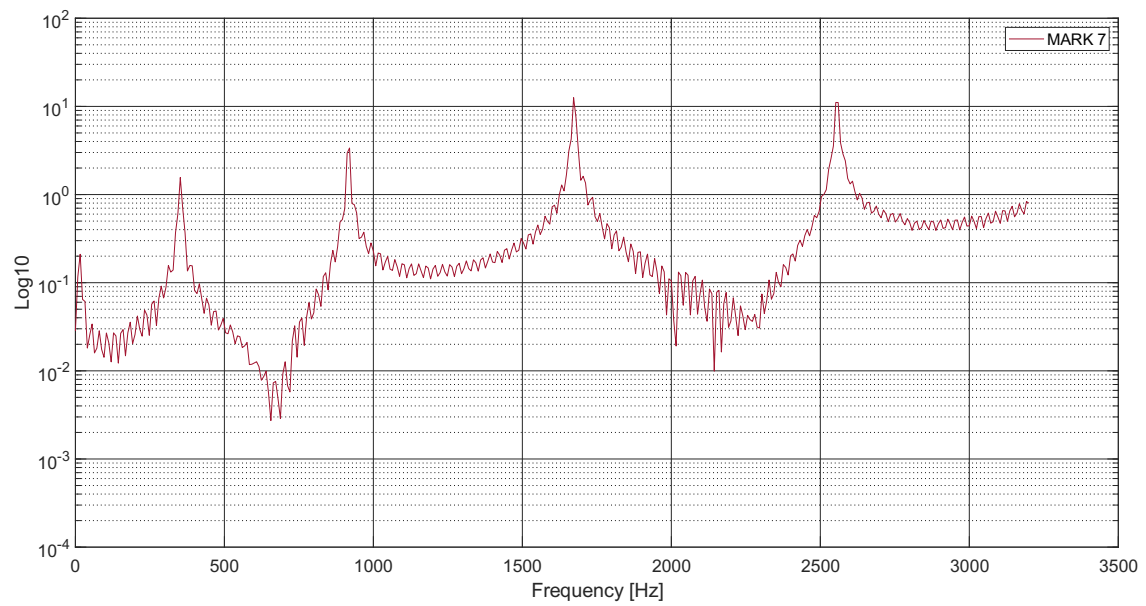


Figura 122 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M7

PROVINO RINFORZATO – M8

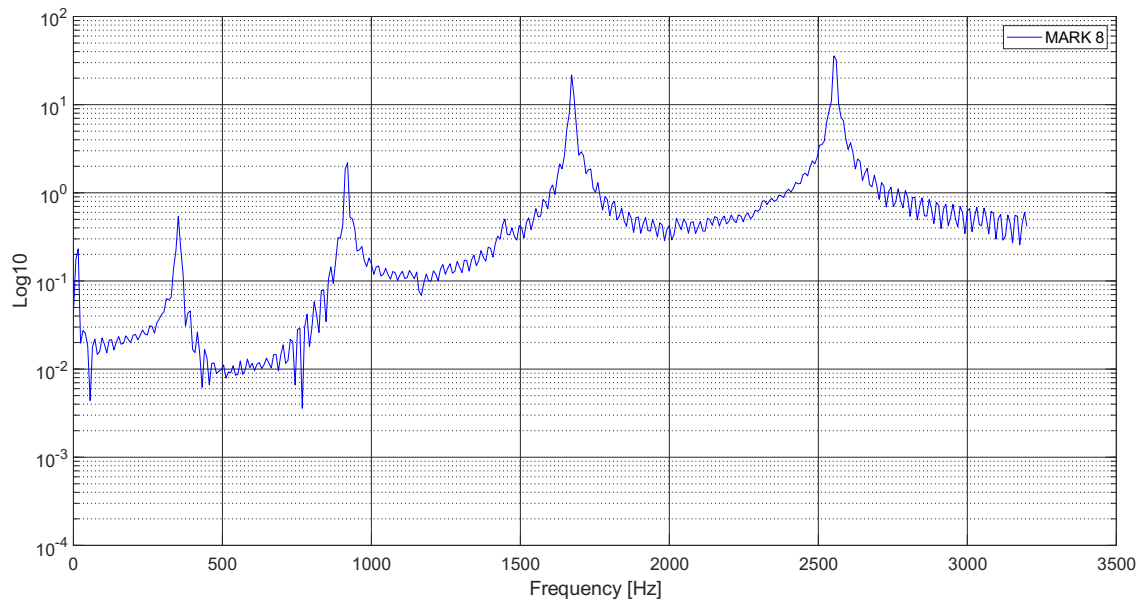


Figura 123 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M8

PROVINO RINFORZATO – M9

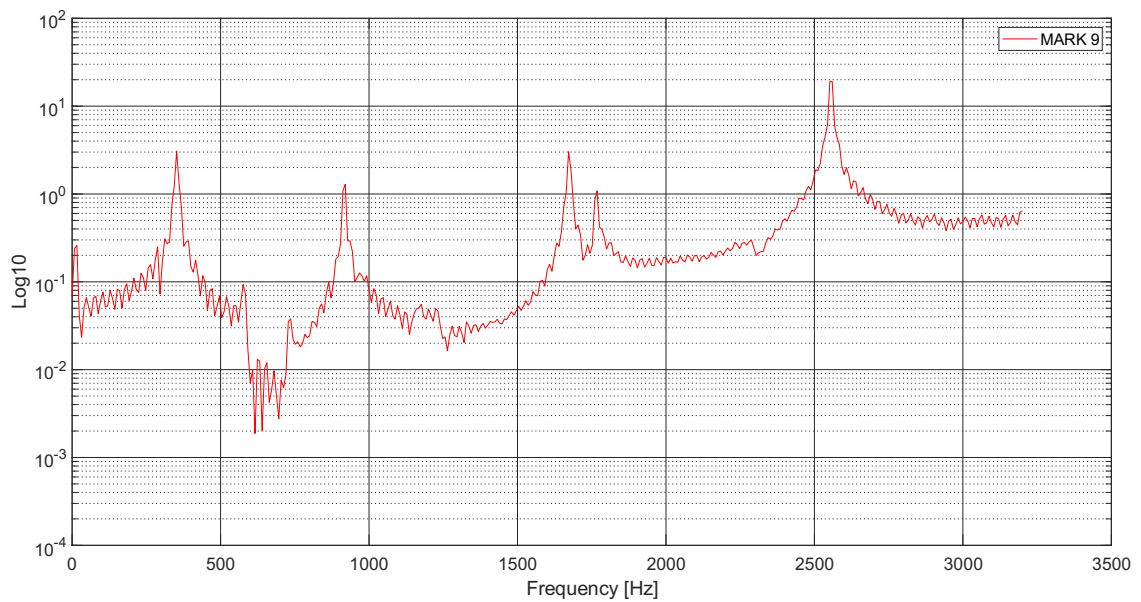


Figura 124 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M9

PROVINO RINFORZATO CON LAMINA – ASSE DEBOLE

PROVINO RINFORZATO – M1

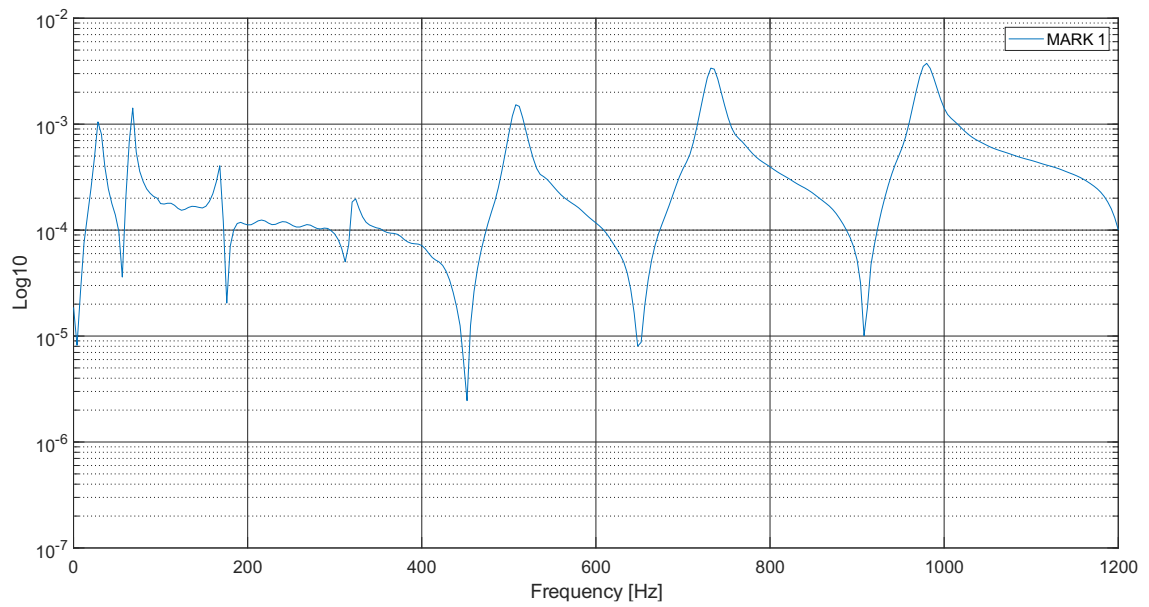


Figura 125 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M1

PROVINO RINFORZATO – M2

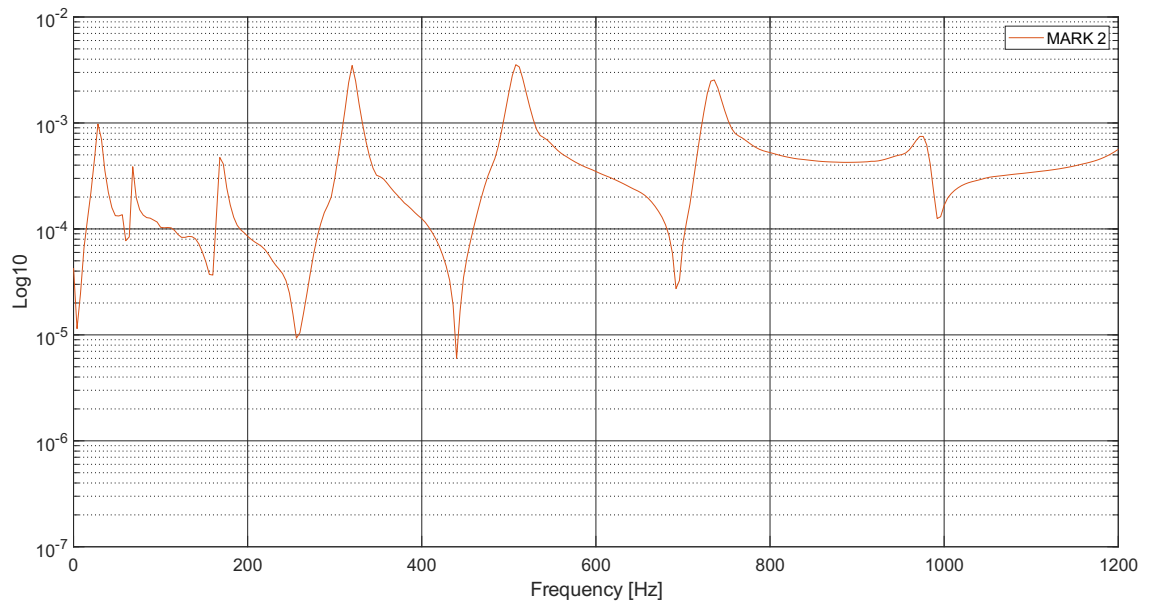


Figura 126 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M2

PROVINO RINFORZATO – M3

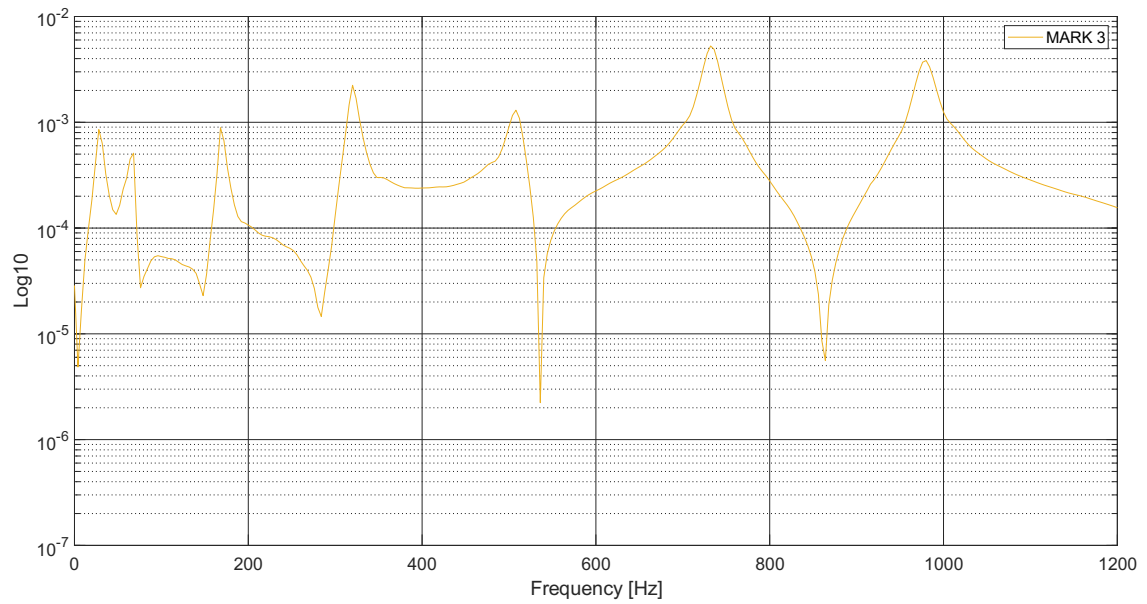


Figura 127 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M3

PROVINO RINFORZATO – M4

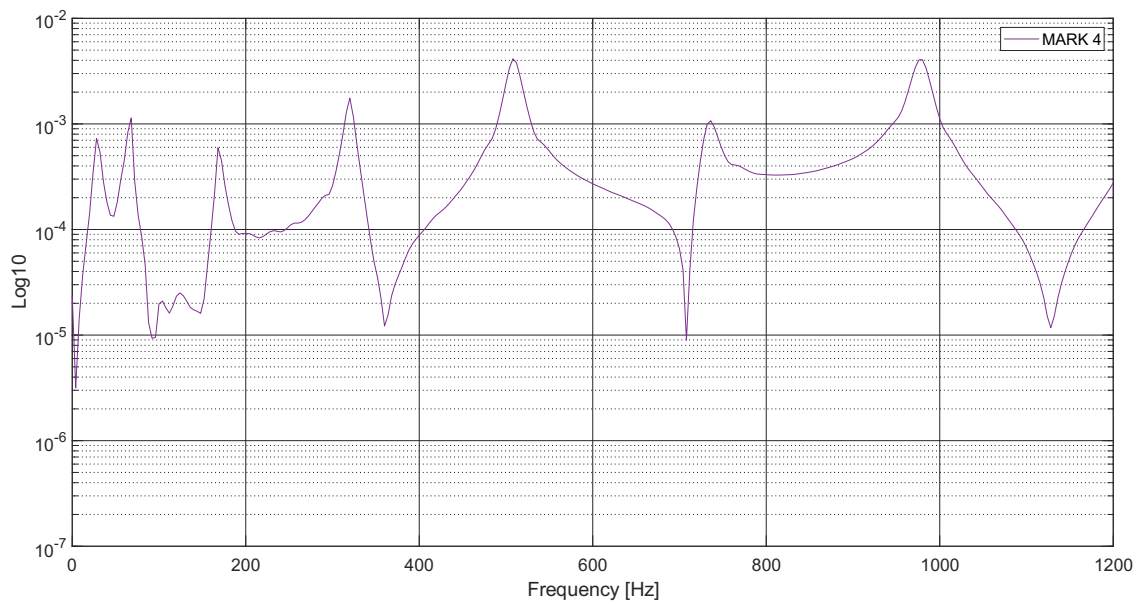


Figura 128 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M4

PROVINO RINFORZATO – M5

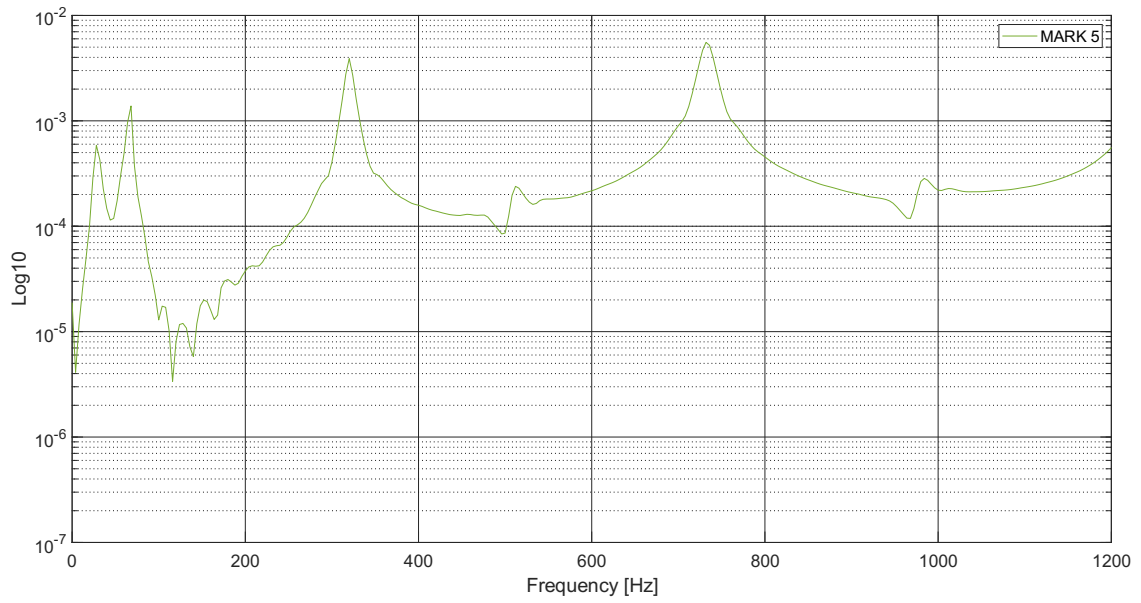


Figura 129 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M5

PROVINO RINFORZATO – M6

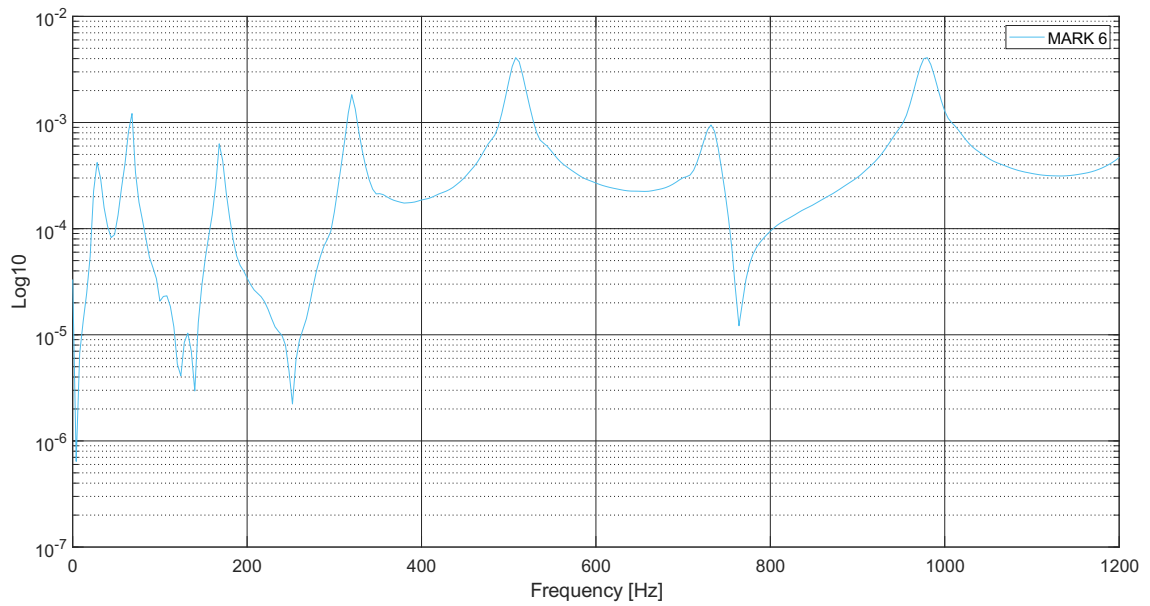


Figura 130 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M6

PROVINO RINFORZATO – M7

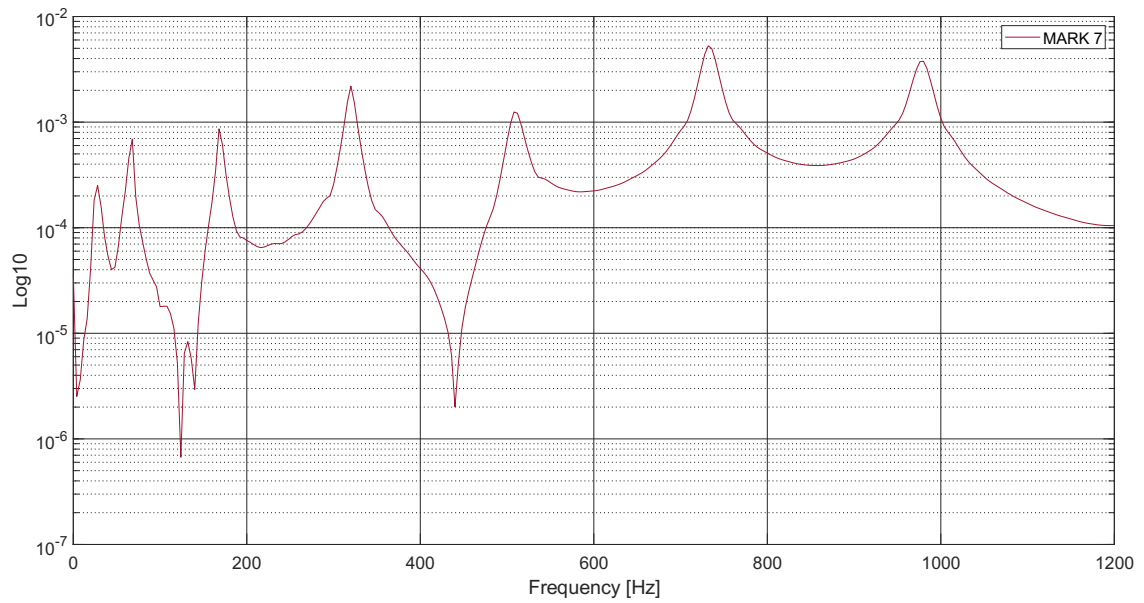


Figura 131 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M7

PROVINO RINFORZATO – M8

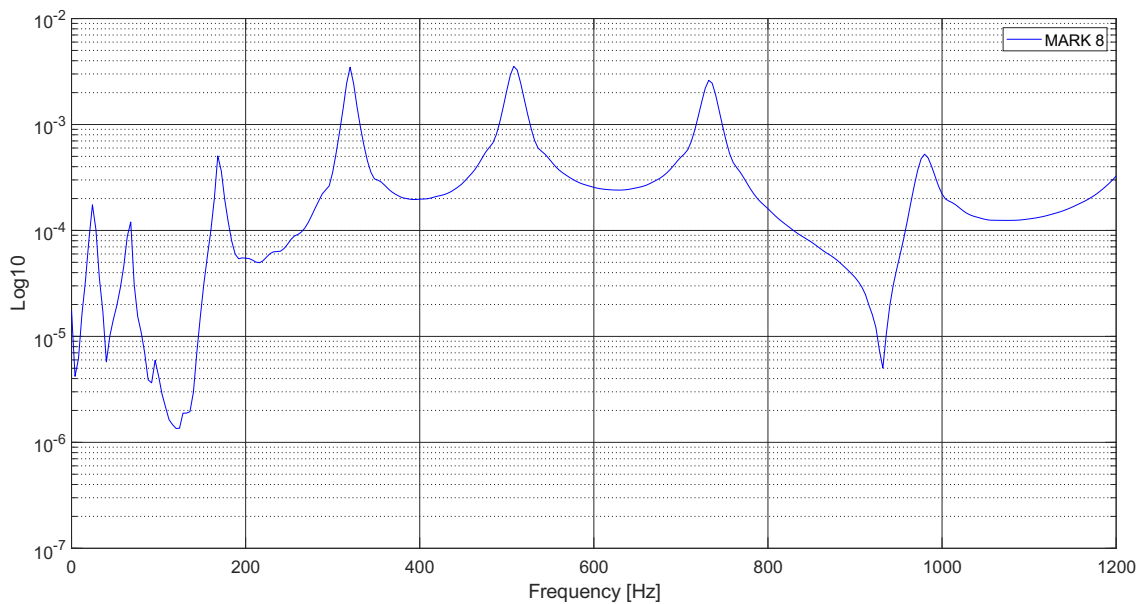


Figura 132 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M8

PROVINO RINFORZATO – M9

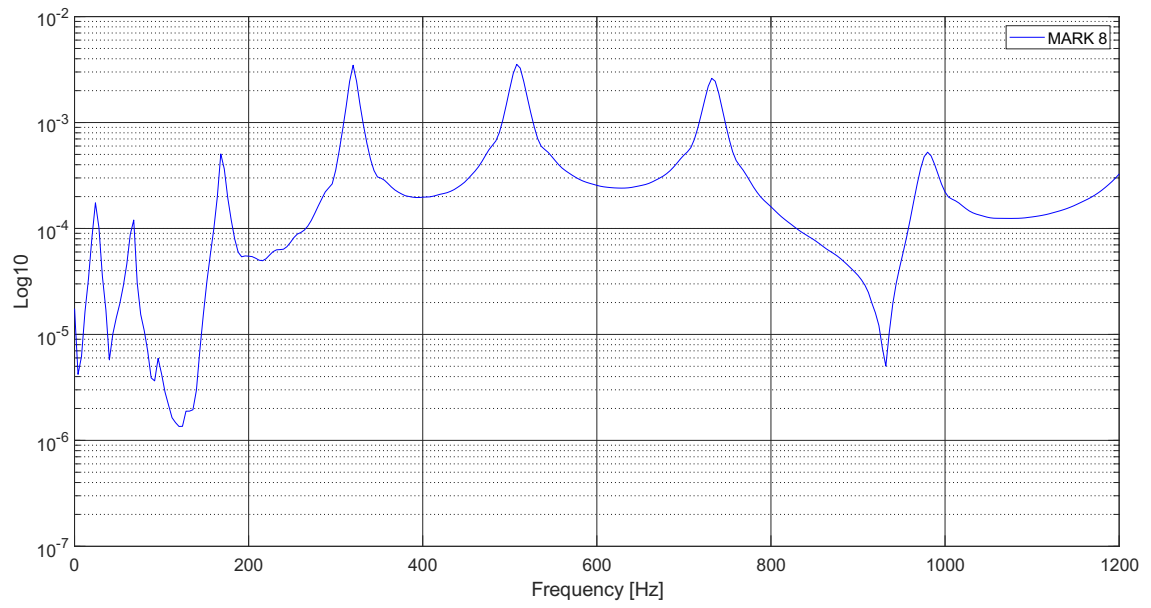


Figura 133 - Modulo del Complesso, PROVINO RINFORZATO, M9