



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A.A. 2022/2023

Sessione di Laurea dicembre 2024

# **Miglioramento sismico di Edifici in muratura tramite Metamateriali Meccanici**

**Relatore:**

Prof. Rosario Ceravolo

**Correlatrici:**

Dott.ssa Linda Scussolini

Dott.ssa Valeria Cavanni

**Candidato:**

Perra Marco s291122







## Abstract

Il miglioramento sismico delle strutture esistenti rappresenta una sfida cruciale nel campo dell'Ingegneria Civile, soprattutto in contesti ad elevato rischio sismico, dove le conseguenze di un evento sismico possono compromettere non solo l'integrità degli edifici ma anche la sicurezza degli occupanti e la continuità delle attività economiche e sociali. Molte delle strutture costruite in epoche precedenti alle attuali normative antisismiche risultano particolarmente vulnerabili, rendendo necessario un intervento mirato per adeguarle agli standard di sicurezza attuali.

In questo contesto alcuni materiali ingegnerizzati con proprietà non presenti in natura, chiamati metamateriali, possono essere sfruttati all'interno di soluzioni di miglioramento sismico. Nel caso dei metamateriali meccanici, alcune configurazioni geometriche possono generare gli effetti ricercati.

In questa tesi, è stata studiata una soluzione di miglioramento sismico, le cui capacità dissipative si basano principalmente sulle proprietà dei metamateriali, che permettono di ottimizzare la risposta delle strutture sottoposte a sollecitazioni sismiche. In particolare, è stato analizzato un metamateriale bistabile. La bistabilità, ovvero la capacità di un sistema dinamico di oscillare tra due stati di equilibrio, tradizionalmente è sempre stata considerata un fenomeno negativo per le strutture civili. Il passaggio tra i due stati di equilibrio permette infatti una maggiore dissipazione dell'energia sismica.

L'obiettivo finale della tesi è quello di valutare la soluzione di miglioramento sismico proposta, tramite l'applicazione su un caso studio reale, andando ad ottimizzare le relative proprietà geometriche e dei materiali.

# Sommario

Introduzione .....	1
Capitolo 1.....	3
Miglioramento e Adeguamento sismico di edifici in muratura .....	3
1.1 Miglioramento e Adeguamento sismico: differenze e tecniche esistenti .....	3
1.1.1 Miglioramento vs Adeguamento .....	3
1.1.2 Tecniche di miglioramento sismico su edifici in muratura.....	4
1.2 Miglioramento integrato sismico ed energetico.....	9
Capitolo 2.....	16
Metamateriali meccanici per assorbimento e dissipazione dell'energia.....	16
2.1 Controllo passivo delle vibrazioni .....	16
2.2 Proprietà dei metamateriali .....	20
2.2.1 Proprietà dei Metamateriali associati alla rigidezza .....	21
2.2.2 Metamateriali a Poisson's Ratio negativo.....	26
Capitolo 3.....	28
Caso Studio: edificio per civile abitazione in muratura portante.....	28
3.1 Casa Benedino .....	28
3.2 Modellazione agli elementi finiti .....	33
3.3 Modellazione Casa Benedino .....	34
3.4 Analisi preliminare della struttura .....	40
Capitolo 4.....	46
Modellazione del Meta-Pannello Bistabile.....	46
4.1 Snap-through e bistabilità della trave sinusoidale .....	46
4.2 Modellazione della trave sinusoidale.....	56
4.2.1 Introduzione alla modellazione.....	56
4.2.2 Geometria e materiali del pannello.....	57
4.2.3 Modellazione del dispositivo .....	61
4.2.4 Analisi Time History .....	64
4.2.5 Risultati delle analisi.....	68
Capitolo 5.....	72
Proposta di applicazione sul caso studio.....	72

5.1 Obiettivi dell'applicazione.....	72
5.2 Analisi svolte .....	73
5.3 Analisi dei risultati.....	76
Conclusioni .....	80
Bibliografia .....	81

## Lista delle figure

Figura 1 - Edifici in Muratura in Italia (ISTAT, 2011) .....	4
Figura 2 - Esempificazione di meccanismi di danno (Pasqualon et al., 2020).....	5
Figura 3 - Intervento migliorativo con tiranti metallici .....	5
Figura 4 - Interventi migliorativi con i cordoli .....	6
Figura 5 - Interventi migliorativi con FRP .....	6
Figura 6 - Comportamento scatolare (Donà et al, 2011) .....	7
Figura 7 - Geometria degli stong-backs (Dizhur et al., 2017) .....	8
Figura 8 - principali obiettivi della strategia di ristrutturazione olistica proposta, che promuove sostenibilità e resilienza (Mariniet al.,2017) .....	9
Figura 9 – Fine della vita utile dell’edificio (Pohoryleet al.s, 2022) .....	10
Figura 10 – Life Cycle Design (Marini et al., 2017) .....	11
Figura 11 – Configurazione dell’esoscheletro (Pohoryles et al., 2022).....	12
Figura 12 – Caso studio (Marini et al., 2017).....	13
Figura 13 - Possibili configurazioni di TRM e soluzioni di miglioramento energetico: a) Rinforzo dei tamponamenti e della struttura in cemento armato con TRM, b) Isolamento dell’involucro edilizio, c) TRM + tubi capillari per riscaldamento e d) TRM + materiale isolante termico (Pohoryles et al., 2022)....	13
Figura 14 – Retrofit sulle strutture orizzontali (Giuriani, 2016).....	14
Figura 15 – Comparazione economica dei diversi retrofit analizzati (Pohoryles, 2022) .....	14
Figura 16 – Comparazione delle emissioni (Pohoryles, 2022).....	15
Figura 17 - schema TMD .....	16
Figura 18 - Eccitazione del sistema senza TMD .....	17
Figura 19 - Eccitazione della struttura con TMD .....	18
Figura 20 - TMD nel Taipei 101 .....	18
Figura 21 - Curva di risposta del sistema con o senza TMD .....	19
Figura 22 - Classificazione dei metamateriali in funzione delle costanti elastiche (Xianglong Yu et al., 2017) .....	20
Figura 23 - Strutture reticolari a) Octet-truss e b) Tetrakaidecahedom (Xianglong Yu et al., 2017) .....	22
Figura 24 - Sistemi chirali e antichirali (Xianglong Yu et al., 2017) .....	23
Figura 25 - Geometria degli origami (Xianglong Yu et al., 2017) .....	24
Figura 26 - Sistemi cellulari (Xianglong Yu et al., 2017) .....	24
Figura 27 - Cambiamento delle proprietà di rigidità nei metamateriali (Xianglong Yu et al., 2017) .....	25
Figura 28 - Deformazione di 2x2 celle unitarie per a)v=0,8 e b)v=-0,8.....	27
Figura 29 – Lato Ovest Casa Benedino .....	28
Figura 30 - Prospetti Casa Benedino .....	29
Figura 31 - Pianta Casa Benedino.....	30

Figura 32 - Particolare murature esterne.....	31
Figura 33 - Particolare solaio.....	31
Figura 34 - Planimetria copertura.....	32
Figura 35 - Modello FEM.....	34
Figura 36.....	35
Figura 37.....	35
Figura 38 – Beam class I.....	35
Figura 39 - Tabella C8.5.I Circolare esplicativa del 2019 delle NTC18 (C.S.LL. PP, 2019).....	36
Figura 40 - Creazione del materiale.....	37
Figura 41 - Creazione del set Mesh.....	38
Figura 42 - Mesh della struttura.....	39
Figura 43 - Travi inclinate, curve e ad arco (Tan et al, 2022).....	47
Figura 44 - Curve Forza-Spostamento per travi a) inclinate, b) curve e c) ad arco (Tan et al, 2022).....	48
Figura 45 - Diagrammi Forza-Spostamento per travi a) inclinate, b) curve, c) ad arco al variare dei parametri geometrici (Tan et al, 2022).....	49
Figura 46 - Processo di deformazione (Tan et al, 2022).....	49
Figura 47 - Comparazione della bistabilità (Tan et al, 2022).....	50
Figura 48 - Geometria delle configurazioni GNS e NNS (Chen et al, 2021).....	51
Figura 49 - Risposta Forza-Spostamento di a) GNS e b) NNS (Chen et al, 2021).....	52
Figura 50 - Curva forza spostamento del Cyclic Test nei GNS (Chen et al, 2021).....	53
Figura 51 - Curve Forza-SPostamento del Cyclic Test nei NNS (Chen et al, 2021).....	54
Figura 52 - MCF e SEA per GNS e NNS (Chen et al, 2021).....	55
Figura 53 - Geometria del dispositivo.....	56
Figura 54 - Vista dall'alto della geometria del dispositivo.....	58
Figura 55 - Metapannello multicellulare.....	59
Figura 56 – Vista in pianta su Diana FEA.....	61
Figura 57 - Modello 3D Diana FEA.....	61
Figura 58 - Assegnazione vincoli modello.....	62
Figura 59 - Vincoli tipo face.....	63
Figura 60 - Combinazioni di carico.....	64
Figura 61 - Input dell'analisi (Terremoto di El Centro, 1940).....	65
Figura 62 - Analisi Time History.....	66
Figura 63 - Start time.....	67
Figura 64 - Time step.....	67
Figura 65 - Plot dello spostamento fuori dal piano del dispositivo del nodo di collegamento tra il pannello XLAM e il pannello sinusoidale.....	68
Figura 66 - Prima posizione di equilibrio.....	69
Figura 67 - Seconda posizione di equilibrio.....	70

Figura 68 - Confronto dello spostamento in direzione fuori dal piano al variare della geometria .....	70
Figura 69 - Diagramma Forza-Spostamento.....	71
Figura 70 - Modello Diana FEA retrofit vs no retrofit .....	74
Figura 71 - Input time history .....	75
Figura 72 - Grafico Spostamento-Tempo del Metapannello applicato al caso studio .....	76
Figura 73 - Grafico Spostamento tempo per caratterizzare le differenze di spostamento tra il pannello sinusoidale e il pannello murario.....	77
Figura 74 - Nodo considerato nei risultati .....	78
Figura 75 - Differenze di spostamento tra i due modelli .....	78

## **Lista delle tabelle**

Tabella 1 - Riassunto risultati Analisi Modale .....	45
<i>Tabella 2 - Valori della geometria del dispositivo .....</i>	<i>59</i>

## Introduzione

Il territorio italiano è costituito da un vasto patrimonio edilizio che necessita di essere preservato. Diventa dunque fondamentale adottare delle misure preventive mirate, che risultano preferibili alla messa in sicurezza di edifici già danneggiati da eventi estremi, come i terremoti. In questo contesto, risulta fondamentale individuare le problematiche strutturali del patrimonio edilizio, e salvaguardarlo.. Gli interventi di miglioramento sismico sul patrimonio esistente però non sempre risultano particolarmente efficienti da un punto di vista energetico, evidenziando la necessità di ricerca per tecnologie più avanzate. Quest'ultime devono avere dei requisiti trasversali in più di una delle sfide che siamo chiamati ad affrontare nei prossimi anni. Inoltre, negli ultimi anni, ha acquisito sempre più importanza, oltre all'aumento della sicurezza degli edifici, la diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e il consumo di materie prime.

Questo elaborato si focalizza sullo studio di una proposta innovativa di intervento di miglioramento sismico delle strutture in muratura, sfruttando le caratteristiche dei metamateriali, cioè materiali ingegnerizzati con proprietà non presenti in natura. In particolare, è stato analizzato un metamateriale bistabile. La bistabilità, ovvero la capacità di un sistema dinamico di oscillare tra due stati di equilibrio, tradizionalmente è sempre stata considerata un fenomeno negativo per le strutture civili. Il passaggio tra i due stati di equilibrio permette infatti una maggiore dissipazione dell'energia sismica.

Lo studio si basa su un'estesa ricerca bibliografica, che, soprattutto negli ultimi anni, ha sviluppato in maniera approfondita l'argomento dei metamateriali e di come possano essere sfruttati all'interno di una progettazione di intervento di miglioramento sismico (ed energetico).

La tesi si articola in sei capitoli:

- Nel primo capitolo è trattato il tema dei miglioramenti e adeguamenti sismici e del nuovo approccio proposto dalla letteratura: l'integrazione dei retrofit sismici ed energetici in un'unica soluzione.
- Nel secondo capitolo sono riportate le tecnologie su cui si basa la proposta di miglioramento studiata in questo elaborato: i Tuned Mass Dumper (TMD) e i metamateriali.
- Nel terzo capitolo sono presenti le caratteristiche del caso studio su cui è applicato il retrofitting: stato di fatto, modellazione agli elementi finiti e uno studio preliminare della struttura mediante un'analisi dinamica lineare.
- Nel quarto capitolo si è evidenziato come alcuni dei fenomeni instabilizzanti sono in realtà stati utilizzati in modo vantaggioso per le strutture. Tra questi in particolare la bistabilità. Inoltre, è riportata la

modellazione e sono presentati i risultati della proposta, qui chiamata metapannello, studiata in questa tesi. È stata effettuata un'analisi parametrica sulla geometria della soluzione in modo tale da ottimizzare il comportamento bistabile del dispositivo.

- Nell'ultimo capitolo ci si è concentrati sull'applicazione e la modellazione del retrofitting sul caso studio di cui discusso sopra e i relativi risultati ottenuti.

In questo lavoro è stato quindi possibile analizzare in dettaglio le modalità con cui questa tipologia di miglioramento sismico influisce positivamente sul comportamento delle strutture in muratura portante. L'analisi ha permesso di valutare l'efficacia dell'intervento nel migliorare il comportamento delle strutture in muratura, contribuendo così a ridurre i danni in caso di eventi sismici e a migliorare la sicurezza complessiva degli edifici.

I risultati ottenuti forniscono indicazioni utili per l'ottimizzazione della tecnica di retrofit analizzata, evidenziando come questi interventi possano prolungare la vita utile degli edifici in muratura e rispondere alle moderne esigenze di sicurezza sismica.

# Capitolo 1

## Miglioramento e Adeguamento sismico di edifici in muratura

### 1.1 Miglioramento e Adeguamento sismico: differenze e tecniche esistenti

#### 1.1.1 Miglioramento vs Adeguamento

I termini “adeguamento” e “miglioramento” sismico vengono spesso utilizzati impropriamente come se fossero sinonimi, ma in realtà si riferiscono a tipologie di interventi progettuali distinte. Secondo quanto stabilito dal Decreto Ministeriale 17 gennaio 2008, Norme Tecniche per le Costruzioni, è necessario eseguire una valutazione della sicurezza delle strutture esistenti ogni volta che si prevedono interventi strutturali. Tale valutazione consente di stabilire il tipo di intervento più appropriato in base alle esigenze di sicurezza alle condizioni dell’edificio.

Gli interventi strutturali possono essere classificati principalmente in due categorie:

- Interventi di Adeguamento sismico: sono finalizzati a portare l’edificio ai livelli di sicurezza prescritti dalle normative tecniche vigenti, Questo tipo di intervento mira a rendere la struttura conforme agli standard attuali di resistenza sismica.
- Interventi di Miglioramento Sismico: riguardano invece l’incremento della sicurezza strutturale rispetto allo stato esistente, senza però necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza minimi richiesti dalla normativa. Questi interventi sono spesso adottati per incrementare la resistenza della costruzione in modo graduale o quando le circostanze (ad esempio vincoli di natura economica o tecnica) non permettono di conseguire un completo adeguamento. La normativa specifica che per gli edifici ordinari l’intervento è considerabile un miglioramento se questo produce una miglioria del 10% minimo.

In sintesi, mentre l’adeguamento sismico è orientato a garantire che la struttura soddisfi pienamente i requisiti di sicurezza sismica imposti dalle norme, il miglioramento sismico si limita ad incrementare la resistenza dell’edificio, migliorandone la capacità di sopportare eventi sismici senza necessariamente soddisfare tutte le specifiche normative.

### 1.1.2 Tecniche di miglioramento sismico su edifici in muratura

Le strutture in muratura costituiscono una parte significativa del patrimonio edilizio, soprattutto nei centri storici e in edifici di valore culturale (fig. 1). Questo tipo di costruzioni, spesso presenta caratteristiche di resistenza che, seppur adeguate ai carichi statici verticali, risultano insufficienti a resistere alle sollecitazioni dinamiche indotte da eventi sismici. La muratura ha infatti una scarsa capacità di assorbire deformazioni e dissipare energia, per cui le forze laterali causate da un sisma possono generare rotture, spostamenti fuori piano e, nei casi peggiori, il collasso parziale o totale della struttura.

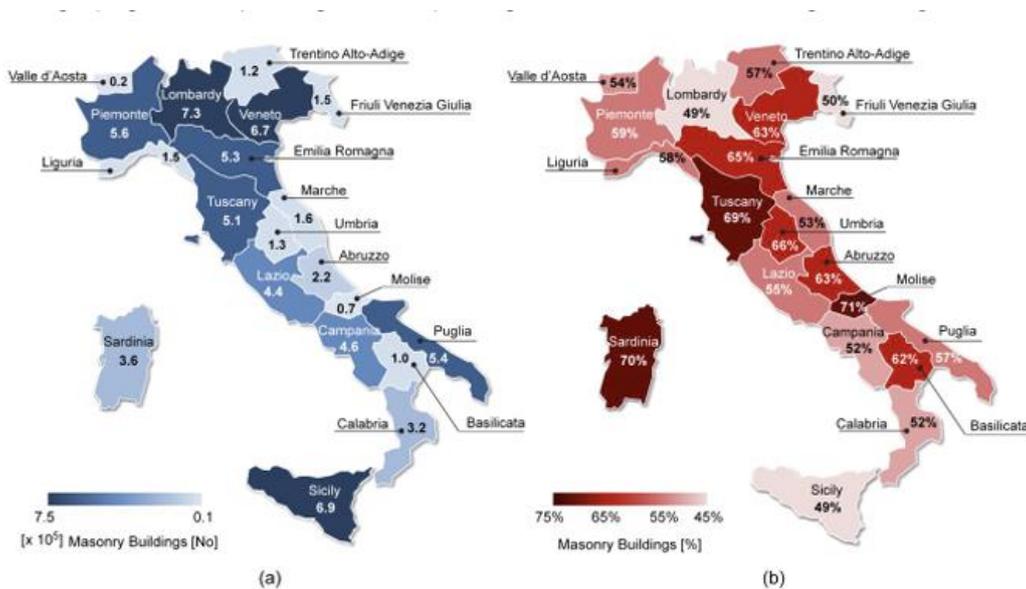


Figura 1 - Edifici in Muratura in Italia (ISTAT, 2011)

I danni tipici del costruito in muratura possono essere distinti secondo due fondamentali modalità di collasso, detti meccanismi di primo e secondo modo (Giuffrè et al. 1993).

I meccanismi di primo modo rappresentano quei cinematismi connessi al comportamento della parete fuori dal piano, Quelli di secondo modo riguardano invece la risposta della parete nel proprio piano, con tipici danneggiamenti per taglio e flessione (fig. 2).

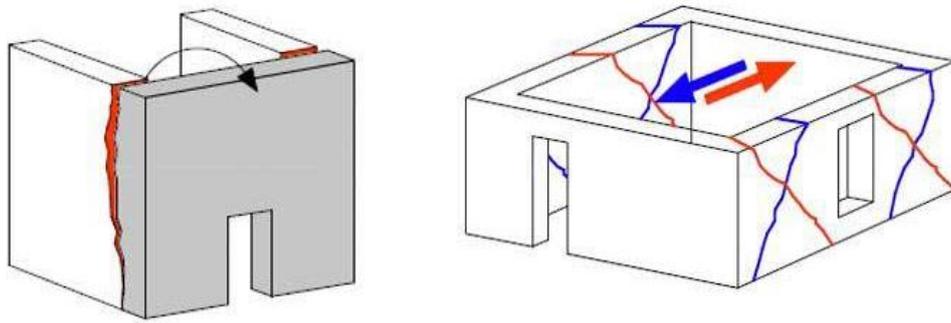


Figura 2 - Esempificazione di meccanismi di danno (Pasqualon et al., 2020)

Il ribaltamento di pareti esterne degli edifici dovute all'azione del sisma rappresenta la situazione più frequente e pericolosa. Per questo motivo gli interventi di miglioramento sismico più frequenti sono quelli che evitano il primo meccanismo di collasso.

Tra gli interventi che scongiurano la formazione di meccanismi di primo modo, si riportano i tiranti in acciaio. Questa tipologia di intervento conferisce stabilità e resistenza alle strutture murarie, costituendo un collegamento tra le pareti murarie e rivelandosi particolarmente utili nel caso di ribaltamenti perché garantiscono un comportamento scatolare alla struttura.

I tiranti sono degli elementi metallici monodimensionali che garantiscono un adeguato ammassamento tra le pareti tramite l'interazione di due componenti: la catena e il capochiave (fig. 3).

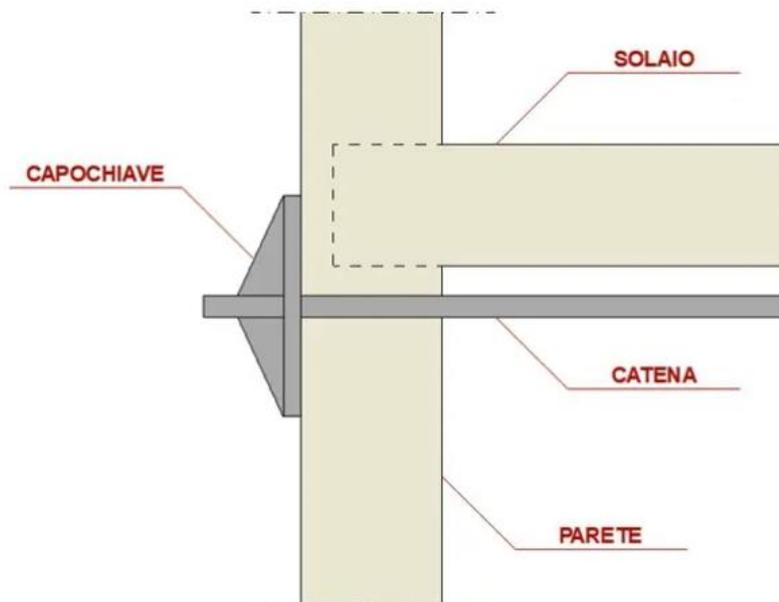


Figura 3 - Intervento migliorativo con tiranti metallici

La catena è l'elemento principale che attraversa la struttura in modo da collegare le pareti opposte mentre il capochiave è l'elemento terminale del tirante che funziona per contrasto.

Il secondo intervento di miglioramento sismico a cui si può far riferimento sono i cordoli di copertura o di interpiano. Questa tipologia di intervento è utile a collegare le pareti, migliorando l'interazione con le strutture di copertura, garantendo un comportamento scatolare all'edificio. In questo modo si evita il ribaltamento fuori piano della parete (fig. 4). Inoltre, il cordolo contribuisce ad assorbire la spinta della copertura nel caso sia presente un tetto spingente.

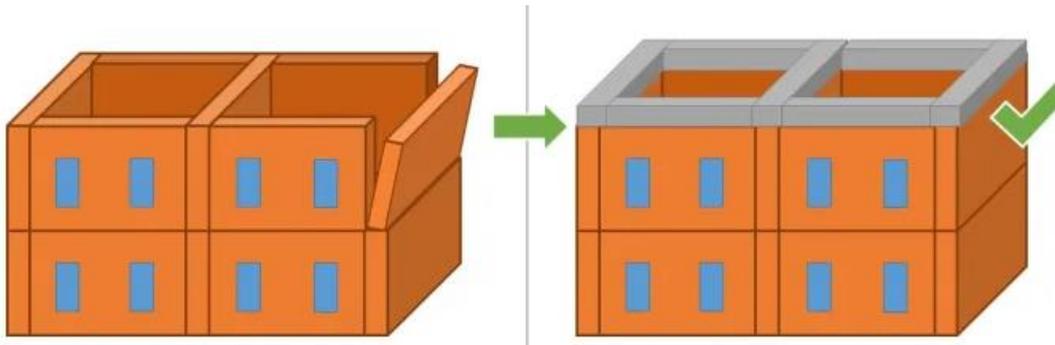


Figura 4 - Interventi migliorativi con i cordoli

Tra gli interventi che conferiscono migliori prestazioni alle strutture in muratura ci sono le fasce in FRP (Fiber Reinforced Polymer), cioè delle fasce in fibra di carbonio ad altissima resistenza meccanica che vengono applicate alla struttura in modo da trasferire gli sforzi alla fascia stessa (fig. 5).



Figura 5 - Interventi migliorativi con FRP

Questi materiali sono composti dalla fase “matrice”, che conferisce la forza e la geometria al materiale, e la fase “carica”, che è aggiunta come riempitivo in forma di particelle. La matrice è solitamente una resina, mentre i rinforzi sono costituiti da fibre in materiale organico. Il funzionamento di questi materiali applicati mediante specifici adesivi è quello di elementi collaboranti con la struttura.

Si è evidenziato come, nelle strutture in muratura, una delle proprietà positive che vengono maggiormente prese in considerazione sia la scolarità dell’edificio (fig. 6). Uno degli elementi che conferisce questa caratteristica agli edifici è il solaio. Nella storia edilizia degli edifici in muratura, la tipologia di solaio maggiormente utilizzata è quella in legno, il quale presenta quasi sempre una eccessiva deformabilità rispetto alle attuali esigenze di progettazione.

Alla luce di ciò, uno degli interventi più diffusi è quello di consolidamento dei solai. Il consolidamento può essere effettuato sovrapponendo al solaio una soletta in calcestruzzo armato di 5-6 centimetri, collegata alle travi sottostanti attraverso una serie di pioli connettori o tramite degli “interventi a secco”, introducendo dei piatti in acciaio a croce di Sant’Andrea collegati al perimetro con degli angolari solidarizzati alle pareti.

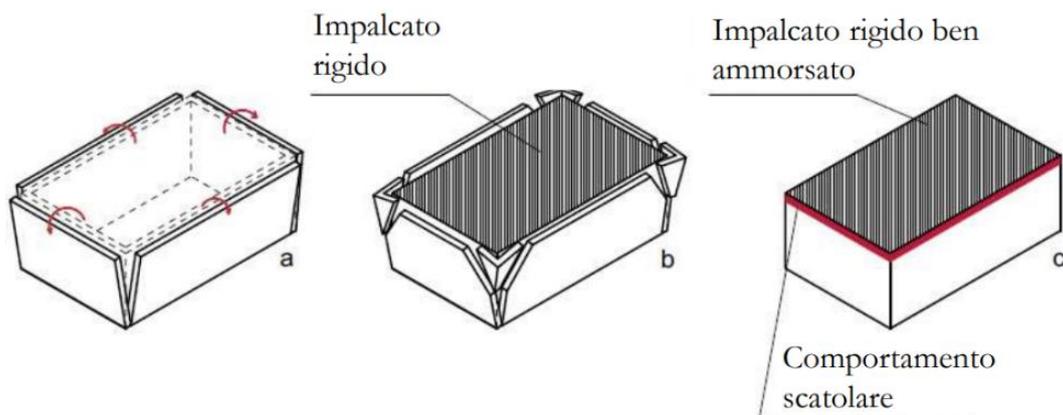


Figura 6 - Comportamento scatolare (Donà et al, 2011)

Tra gli interventi di miglioramento per edifici in muratura studiati dalla letteratura negli ultimi anni si propone quello di Dizhur et al. (2017). Questo studio prevede la realizzazione di un esoscheletro interno che determina una maglia di elementi verticali, detti *stong-backs*. I risultati dello studio hanno evidenziato come l’applicazione di queste costolature migliori notevolmente il comportamento dei singoli pannelli murari. E’ stato, inoltre, possibile constatare come la geometria ottimale di questa struttura preveda l’uso di elementi lignei 90x45 mm ad interasse di 600 mm (fig. 7).

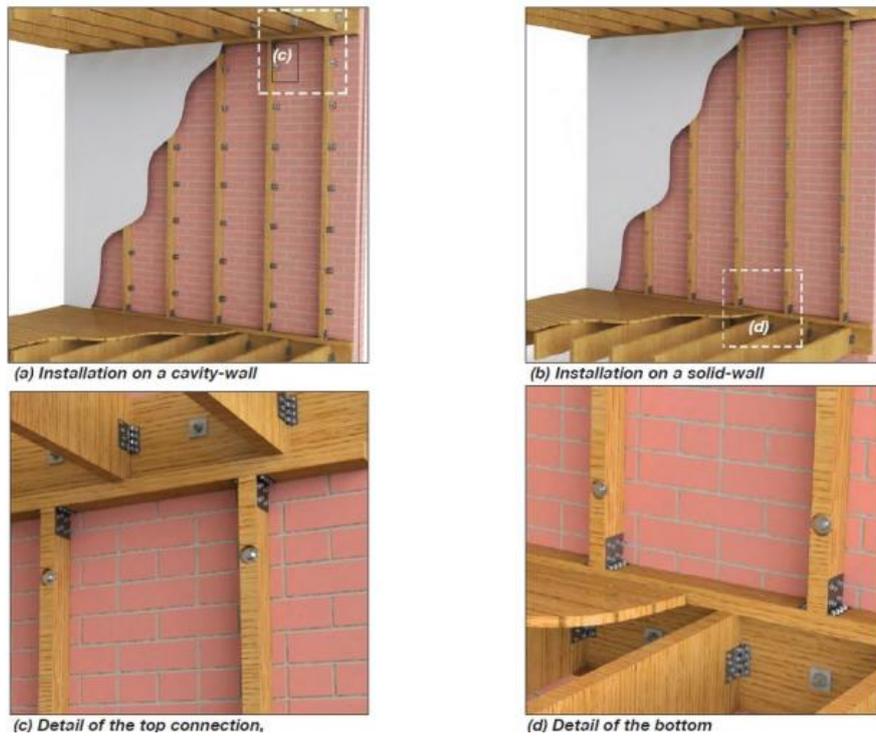


Figura 7 - Geometria degli stong-backs (Dizhur et al., 2017)

In sintesi, l'efficacia degli interventi di miglioramento sismico nelle strutture in muratura non si basa esclusivamente sulla scelta accurata della tecnica più idonea, ma richiede un approccio complessivo che prenda in considerazione una pluralità di fattori. Oltre alla selezione degli interventi, è essenziale comprendere a fondo il comportamento strutturale complessivo della costruzione, analizzando in dettaglio come l'edificio risponde alle diverse sollecitazioni sismiche.

## 1.2 Miglioramento integrato sismico ed energetico

L'approccio alla riqualificazione edilizia sta subendo un cambiamento significativo tramite l'integrazione degli aspetti energetici e sismici in un'unica soluzione per ottimizzare i costi e migliorare le prestazioni. Attualmente, infatti, l'approccio più adottato prevede due interventi separati.

In generale, la riqualificazione è un tema importante in quanto l'invecchiamento del patrimonio edilizio rappresenta una problematica rilevante che interessa numerose zone a livello globale.

Lo scopo è quello di ottimizzare gli edifici che risultano energeticamente inefficienti (con conseguente elevato consumo energetico per la climatizzazione invernale ed estiva) e allo stesso tempo introdurre dei miglioramenti sismici negli edifici che presentano delle vulnerabilità in quanto progettati secondo normative non più attuali che recentemente hanno portato a danni strutturali, ingenti perdite economiche e, purtroppo, anche gravi infortuni e perdite di vite umane.

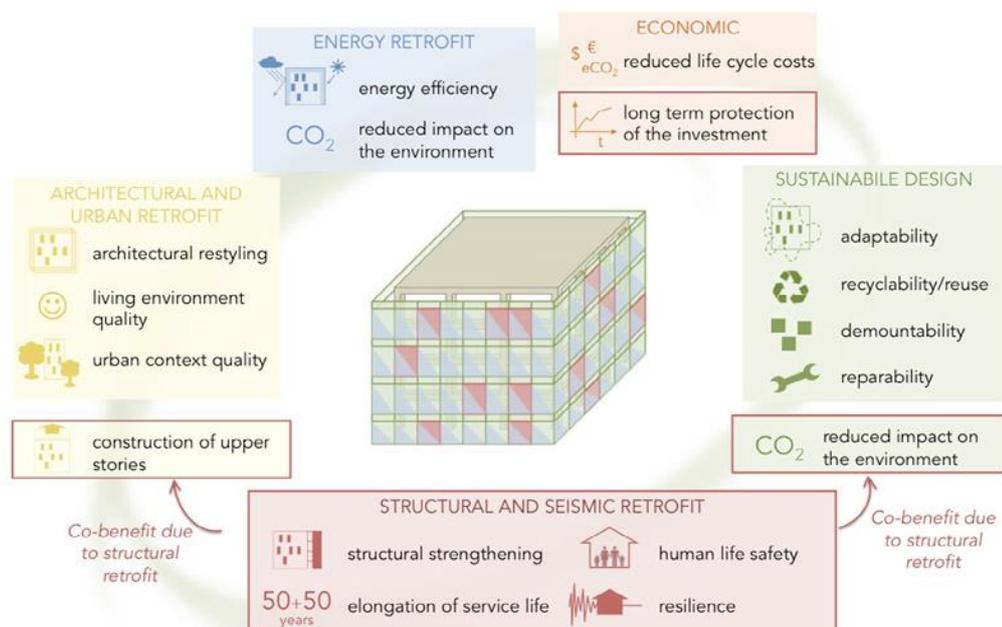


Figura 8 - principali obiettivi della strategia di ristrutturazione olistica proposta, che promuove sostenibilità e resilienza (Mariniet al.,2017)

Data la portata del problema, affrontare le inefficienze energetiche e le carenze strutturali degli edifici esistenti attraverso la loro sostituzione non è una soluzione praticabile, poiché avrebbe un impatto severo sul tessuto urbano esistente e sulla società, oltre a non essere finanziariamente sostenibile né ecologicamente vantaggioso. Invece, dovrebbe essere preferito il prolungamento della vita utile

degli edifici esistenti attraverso interventi di manutenzione, riparazione e riqualificazione.

Soprattutto nelle regioni ad elevato rischio sismico le due esigenze di riqualificazione (strutturale ed energetica) sono intrinsecamente collegate, poiché i danni sismici influirebbero anche sulla sicurezza dell'investimento nella riqualificazione energetica. La Figura 9 confronta la demolizione e la sostituzione di un edificio esistente con due diversi approcci di riqualificazione per un edificio esistente. Nel primo caso, viene applicata solo la riqualificazione energetica, lasciando tuttavia l'edificio vulnerabile a un potenziale evento sismico. Ovviamente, in caso di evento sismico, insieme all'edificio stesso, anche la riqualificazione energetica ne risentirebbe e potrebbe essere persa.

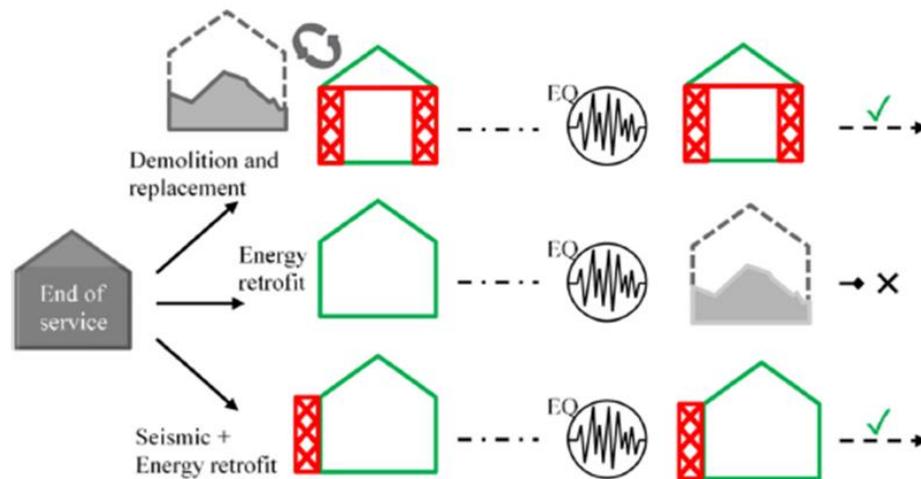


Figura 9 – Fine della vita utile dell'edificio (Pohoryleet al.s, 2022)

In pratica, nelle aree a rischio sismico, è fondamentale che qualsiasi intervento di riqualificazione energetica venga eseguito solo se l'edificio può essere considerato strutturalmente sicuro secondo gli standard moderni. Altrimenti, il rischio di perdere l'investimento energetico non è giustificabile, come dimostrato dalle esperienze recenti.

Lo studio di Marini et al. (2017) evidenzia un altro aspetto importante nell'approccio alla progettazione integrata: il Life Cycle Thinking Design. Nell'approccio LCT, infatti, la selezione accurata dei materiali e delle tecnologie da impiegare assume un'importanza cruciale affinché si possa ridurre l'impatto ambientale e ottimizzare i costi lungo l'intero ciclo di vita in maniera efficace. Risultano pertanto preferibili materiali e soluzioni che facilitino una manutenzione agevole, la riparazione in seguito a eventi sismici e la sostituzione. La completa smontabilità, lo smontaggio selettivo e il riciclo o riuso integrale dei componenti a fine vita si configurano come elementi imprescindibili per accrescere la sostenibilità dell'intervento, con l'obiettivo ideale di realizzare costruzioni

caratterizzate da costi minimi, consumi energetici pressoché nulli e produzione di rifiuti prossima allo zero.

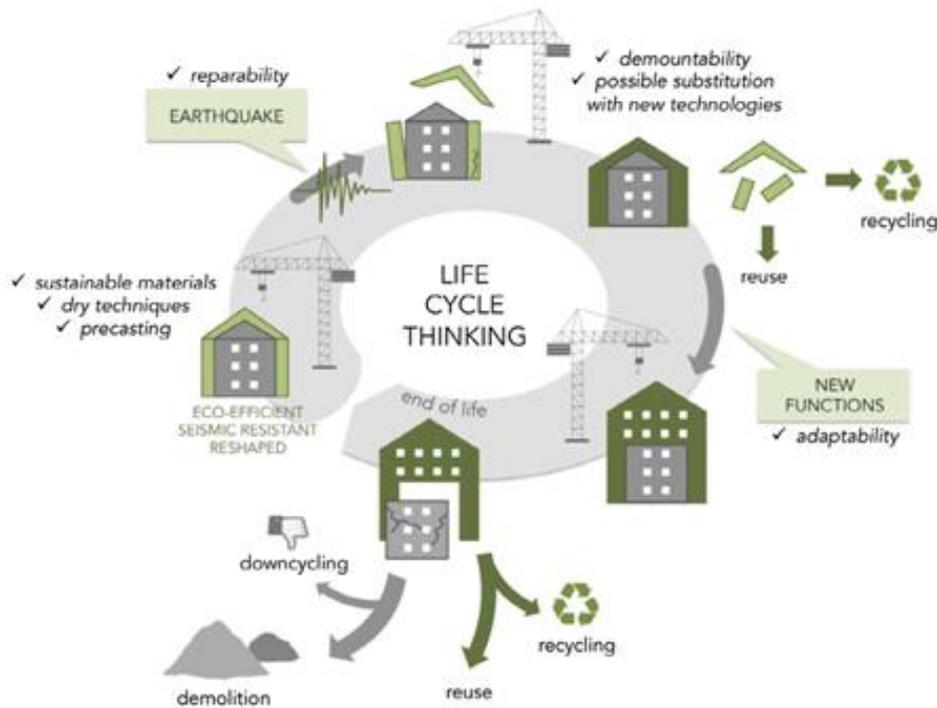
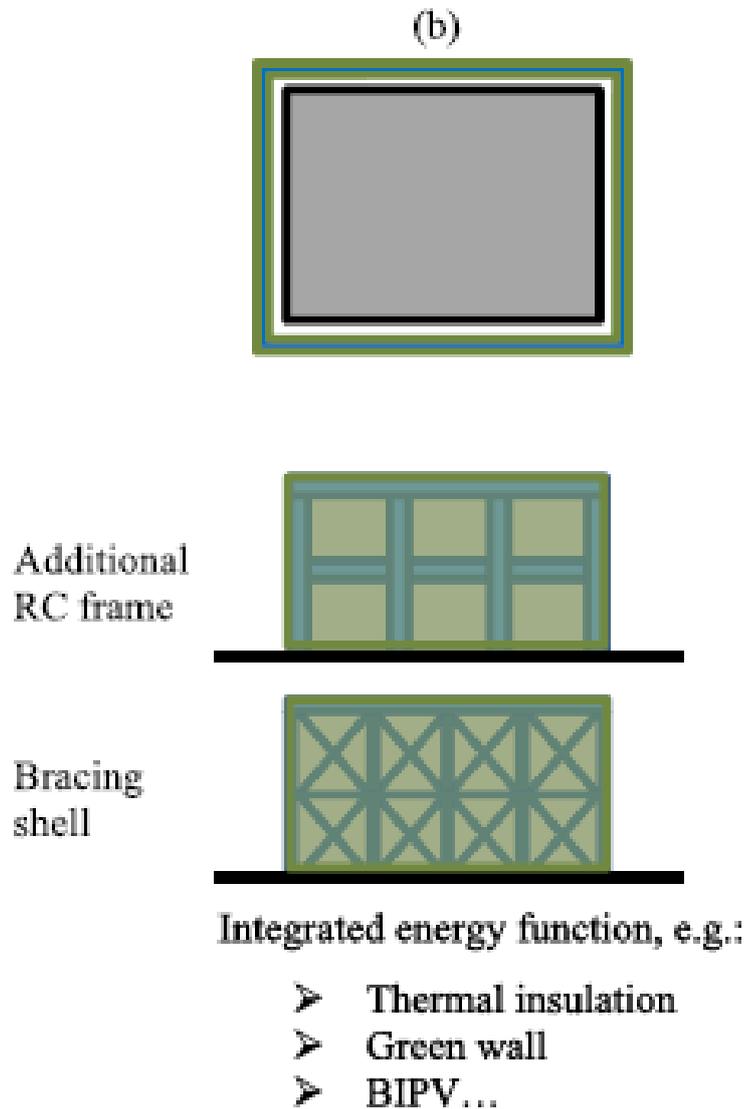


Figura 10 – Life Cycle Design (Marini et al., 2017)

Quando si pensa di combinare tecniche per la riqualificazione sismica ed energetica, è importante considerare la loro compatibilità già nella fase di progettazione, in particolare in termini di sovrapposizione spaziale, scala di applicazione, livello di interruzione e livello di prestazione desiderato.

Le soluzioni proposte includono l'integrazione di esoscheletri, il rafforzamento e l'isolamento dell'involucro edilizio esistente o la sostituzione con materiali più performanti e gli interventi su elementi orizzontali come solai e coperture.

Nel primo caso, si possono analizzare diversi casi studio. Il primo è la ristrutturazione dell'edificio Midorigaoka-1 del Tokyo Institute of Technology. È stato utilizzato un esoscheletro a guscio (Fig. 11) che combina buckling restraining braces (BRB) per una maggiore capacità di dissipazione dell'energia sismica e persiane per migliorare l'ombreggiamento, riducendo così i guadagni di calore solare.



*Figura 11 – Configurazione dell'esoscheletro (Pohoryles et al., 2022)*

Il secondo caso studio analizzato tra gli esoscheletri è quello proposto da Marini et al. (2017). L'uso di sistemi di esoscheletro a parete di taglio in acciaio ha fornito un rinforzo sismico supportando al contempo sistemi separati di efficienza energetica (fig. 12). Questi ultimi includono serre solari lungo la facciata sud, oltre a isolamento termico (EPS), nuove finestre e sistemi di ombreggiamento (persiane regolabili) per il controllo della radiazione solare.



Figura 12 – Caso studio (Marini et al., 2017)

Una seconda tipologia di retrofitting integrato da considerare sono l'insieme di interventi sugli involucri esistenti. Infatti, invece di costruire nuovi elementi edilizi, è possibile applicare un intervento di rinforzo strutturale ed energetico sull'esistente.

Sono state testate diverse soluzioni di rinforzo che utilizzano materiali compositi: TRM (textile-reinforced mortars), FRP (fibre reinforced polymer), ECC (engineered cementitious composites) e SFRM (steel fibre reinforced mortars).

Come mostrato nella fig. 13 a questa tipologia può essere facilmente applicata insieme a diverse soluzioni di isolamento termico.

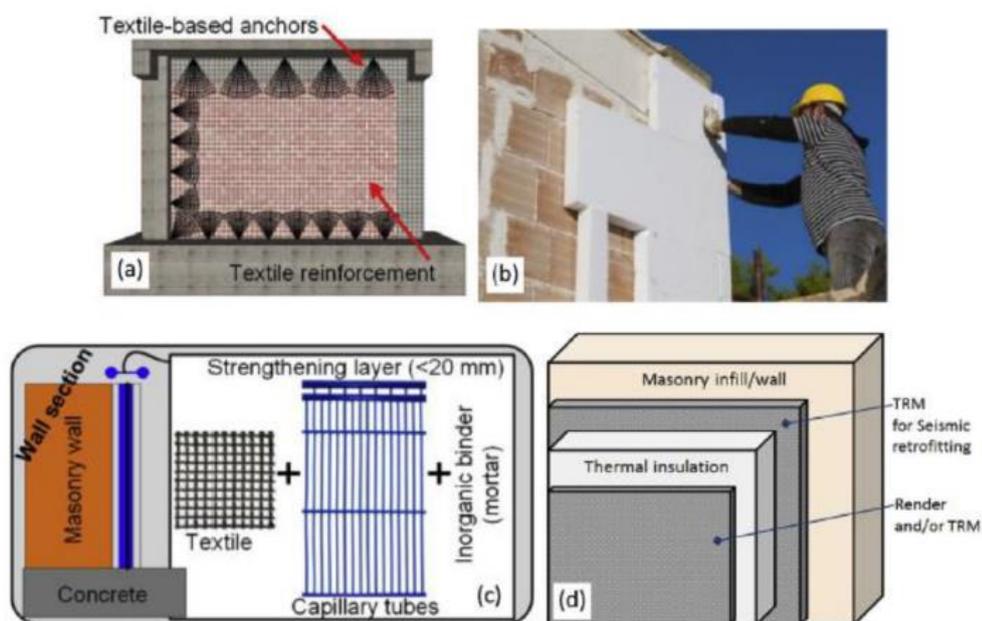


Figura 13 - Possibili configurazioni di TRM e soluzioni di miglioramento energetico: a) Rinforzo dei tamponamenti e della struttura in cemento armato con TRM, b) Isolamento dell'involucro edilizio, c) TRM + tubi capillari per riscaldamento e d) TRM + materiale isolante termico (Pohoryles et al., 2022)

L'ultima soluzione riportata riguarda gli interventi su solai e coperture. Soprattutto negli edifici in muratura sono spesso presenti elementi orizzontali in legno che necessitano di interventi irrigidenti. È possibile prendere in esame il retrofitting Nested Building (Valluzzi et al. 2021) in cui è stato proposto di sostituire le attuali solette con pavimenti in CLT, riducendo così la massa sismica della struttura, oltre a fornire isolamento termico. Un altro studio che analizza l'intervento di retrofit integrato sulle strutture orizzontali è Giuriani et al. (2016) che propone una tecnica per il recupero dei tetti in legno storici. La soluzione si basa sulla costruzione di un sottile guscio piegato che si sovrappone ai travetti e alle tavole esistenti. Ogni falda viene trasformata in un diaframma composto da travetti di falda, da cordoli perimetrali e da un pannello a trama che si sovrappone alle tavole esistenti. Per garantire un miglioramento energetico, viene aggiunta una struttura secondaria ventilata. Una vista schematica di questo tipo di intervento è presentata in fig. 14.

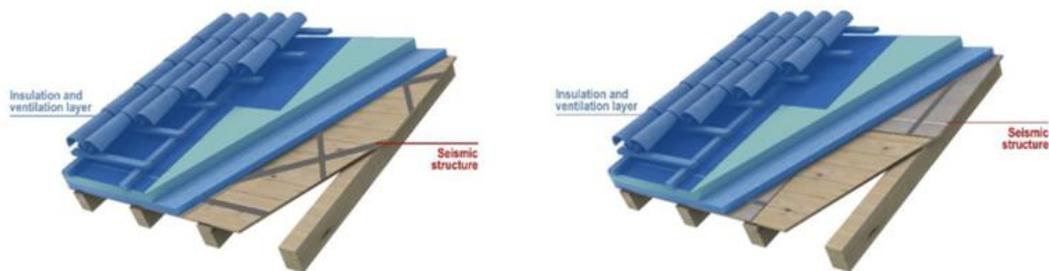


Figura 14 – Retrofit sulle strutture orizzontali (Giuriani, 2016)

Per comprendere meglio il potenziale dei retrofit presentati viene presentato nella tabella in fig. 15 un breve confronto dell'efficacia, dei costi, del livello di invasività e dei tempi di inattività e dell'impatto ambientale, con diversi criteri per il confronto delle tecnologie.

Table 1  
Summary comparison of different seismic-plus-energy retrofitting strategies.

	Lateral load Capacity improvement	Cost of implementation	Level of invasiveness	Disruptiveness	Integration of seismic-energy retrofit <sup>(1)</sup>
<i>Exoskeleton systems</i>	50–100%	Medium-High	High	Low	Coupled/Integrated
<i>Interventions on existing envelope (TRM + thermal insulation)</i>	50–60% in-plane 300–400% out-of-plane	Low	Medium	Low if carried out from the external face Medium	Coupled
<i>Strengthening of openings with steel frame + new window</i>	25–50% <sup>(1)</sup>	Medium	Medium	Medium	Coupled
<i>Timber-based panels with thermal insulation</i>	25–50%	Medium	Medium	Low if carried out from the external face Medium-High	Integrated/coupled
<i>Replacing of existing envelope</i>	50–100% in-plane 300–400% out-of-plane	Low	High	Medium-High	Integrated
<i>Interventions on floors or roof</i>	10–50 times higher in-plane stiffness	Medium	High	High (Low-medium for roof)	Coupled

<sup>(1)</sup>In this table entry is indicated if the seismic plus energy retrofitting is done by a single element (integrated) or two elements working in parallel (coupled).

Figura 15 – Comparazione economica dei diversi retrofit analizzati (Pohoryles, 2022)

Per valutare l'impatto ambientale delle soluzioni di retrofitting combinate proposte, è necessario considerare le emissioni equivalenti di CO<sub>2</sub> incorporate prodotte, ad esempio, durante la fabbricazione, il trasporto e/o l'installazione, fino all'intero ciclo di vita dei materiali o componenti da costruzione.

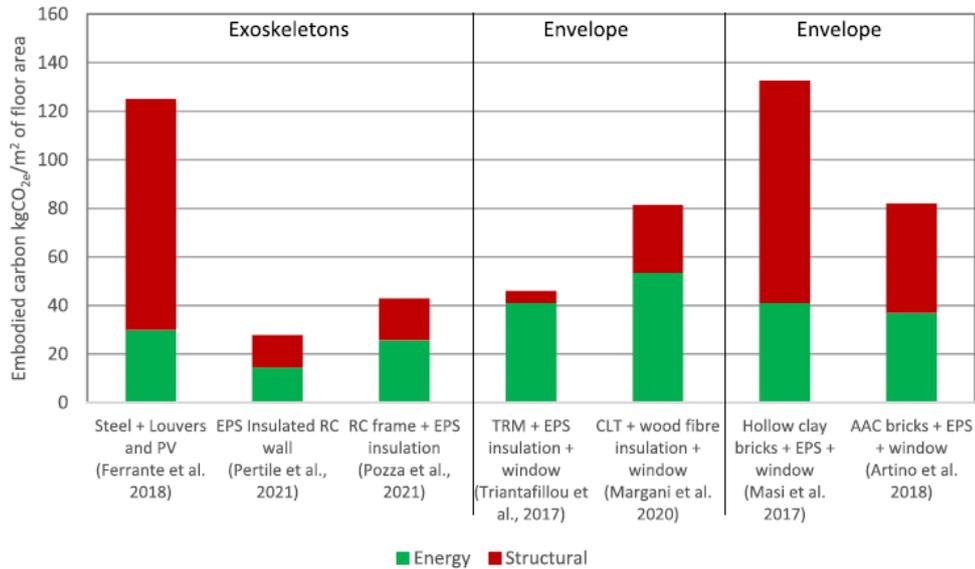


Figura 16 – Comparazione delle emissioni (Pohoryles, 2022)

Sebbene sia nota l'efficacia a livello finanziario dei retrofit integrati, ci sono ancora diverse barriere da superare. I costi iniziali elevati degli investimenti per il retrofitting degli edifici rappresentano uno scoglio insormontabile per molti proprietari, anche per interventi che sono economicamente vantaggiosi nel lungo termine. Il ritorno sugli investimenti riguardo alle misure di efficienza energetica è più diretto rispetto al caso del retrofitting sismico, dove i risparmi sono associati alla natura probabilistica del rischio sismico, e quindi non offrono un incentivo finanziario tangibile alla ristrutturazione.

Inoltre, nella maggior parte dei casi, coloro che vivono in abitazioni con scarse prestazioni sismiche ed energetiche sono famiglie a basso reddito, ossia le meno in grado di investire in misure di ristrutturazione.

Oltre al problema finanziario, un altro aspetto da tenere in conto è la scarsa consapevolezza e conoscenza della vulnerabilità sismica delle strutture da parte dei cittadini. Infatti, mentre una prestazione energetica inadeguata è spesso nota, la consapevolezza del rischio sismico è decisamente minore.

Per attirare un importante numero di persone a realizzare interventi di retrofit integrati sono quindi necessarie campagne di sensibilizzazione sociale a livello nazionale ed europeo.

## Capitolo 2

# Metamateriali meccanici per assorbimento e dissipazione dell'energia

Il miglioramento sismico progettato nella tesi in oggetto rappresenta una soluzione innovativa, combinando due tecnologie avanzate: il Tuned Mass Damper (TMD) e i metamateriali. Questa combinazione permette di ottenere un dispositivo di smorzamento sismico che non solo riduce le vibrazioni attraverso il trasferimento di energia, come avviene nei TMD tradizionali, ma sfrutta anche le proprietà dei metamateriali per migliorare l'efficacia del sistema.

### 2.1 Controllo passivo delle vibrazioni

Un Tuned Mass Damper (TMD) è un dispositivo di assorbimento passivo delle vibrazioni, progettato per migliorare la stabilità e la sicurezza delle strutture civili esposte a forze laterali come eventi sismici o vento. L'obiettivo è quello di ridurre l'ampiezza delle vibrazioni ad un livello accettabile.

La sua configurazione è quella di un sistema a un grado di libertà composto da una massa inerziale montata nella struttura e collegata tramite una molla e un dispositivo di smorzamento viscoso (fig. 17).

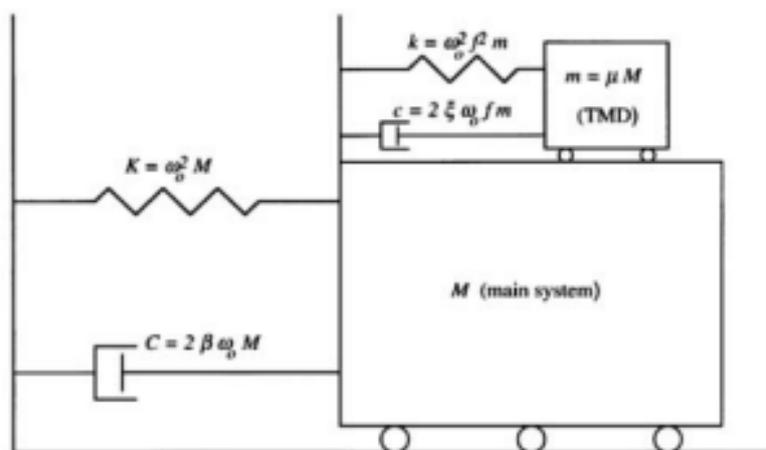


Figura 17 - schema TMD

In fig. 17  $K$ ,  $M$  e  $C$  rappresentano, rispettivamente la rigidezza, la massa e lo smorzamento del sistema principale, mentre  $k$ ,  $m$  e  $c$  rappresentano la rigidezza, la massa e lo smorzamento del TMD.

I sistemi TMD sono tipicamente efficaci su una banda di frequenze limitata e devono essere sintonizzati su una particolare frequenza naturale.

Quando una forza laterale colpisce la struttura, l'edificio viene eccitato e subisce uno spostamento ( $x_1$ ), generando una forza cinetica ( $F_{k1}$ ) a causa della sua massa e della conseguente accelerazione (fig 18). L'edificio oscillerà poi in direzione opposta raggiungendo un altro spostamento ( $x_2$ ). In teoria,  $x_1$  sarà maggiore di  $x_2$  e  $x_2$  sarà maggiore dello spostamento successivo dell'oscillazione successiva (cioè  $x_3$ ); infatti, arriverà un momento in cui lo spostamento si annullerà grazie allo smorzamento della struttura.

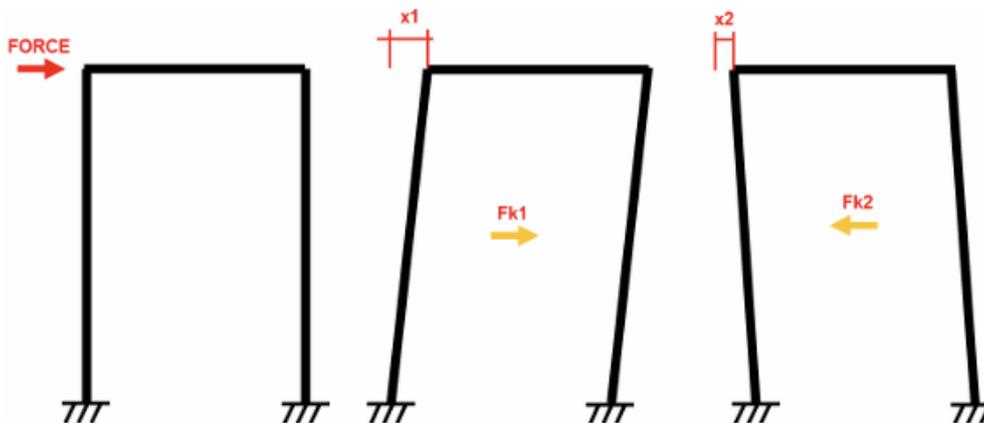


Figura 18 - Eccitazione del sistema senza TMD

Nel caso del TMD (fig. 18), quando la struttura inizia a oscillare, generando quindi l'energia cinetica  $F_{k1}$ , il TMD viene messo in movimento tramite una molla/pendolo e spinge l'edificio nella direzione opposta mediante una forza di reazione ( $D_1$ ). Lo stesso scenario si verifica quando l'edificio oscilla nell'altra direzione ( $F_{k2}$  contro  $D_2$ ). Di conseguenza, confrontando i due schemi sopra, si può osservare che gli spostamenti  $x_1$  e  $x_2$  nello schema in fig. 19 sono minori rispetto a quelli dello schema in fig. 18. Questo risultato è dovuto alla forza di reazione offerta dal TMD ogni volta che l'edificio tenta di oscillare in una delle due direzioni. Ciò significa anche che l'edificio smetterà di oscillare in un intervallo di tempo più breve e si stabilizzerà più velocemente.

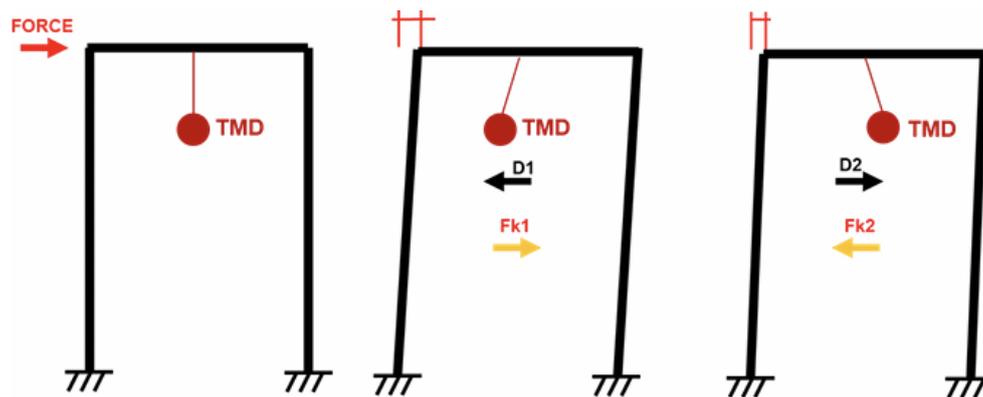


Figura 19 - Eccitazione della struttura con TMD

Tra le applicazioni più notevoli del TMD si riporta quella sul grattacielo Taipei 101 a Taiwan (fig. 20). L'edificio è dotato di 101 piani e raggiunge un'altezza di 508 metri. La notorietà dell'edificio è dovuta (oltre alla sua altezza) all'enorme sfera di acciaio che forma un TMD tra l'ottantasettesimo e il novantaduesimo piano. La sfera ha un diametro di 5,5 metri ed è costituita da 41 dischi sovrapposti di diametro variabile dal peso di 660 tonnellate. La sfera rimane sospesa e collegata alla struttura mediante un sistema di 16 in acciaio, ciascuno lungo 42 metri, con un diametro di 9 centimetri, raggruppati in 4 funi.

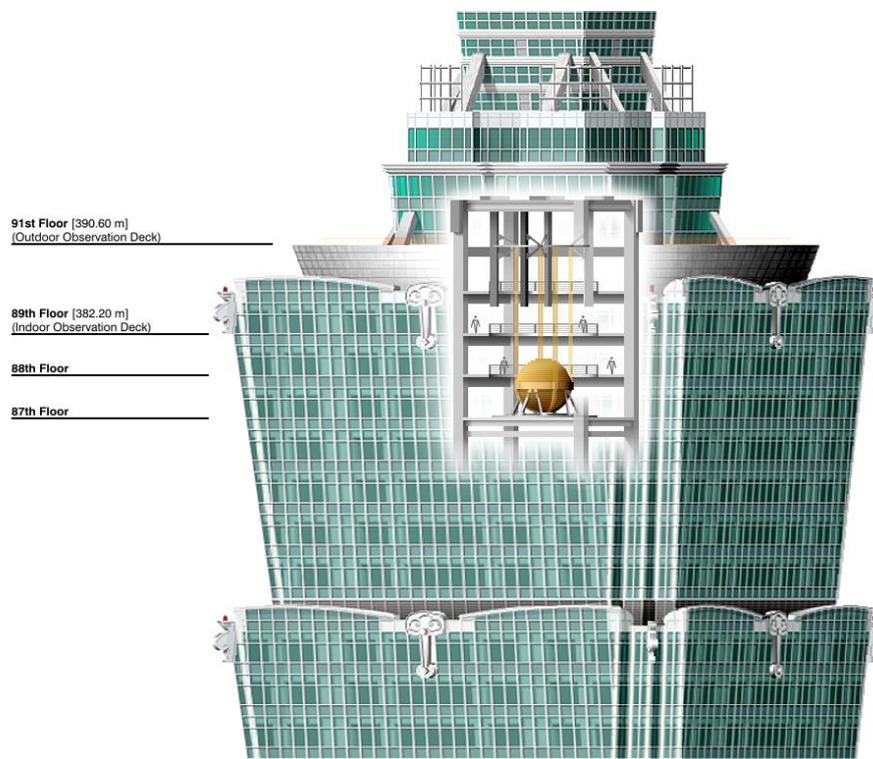


Figura 20 - TMD nel Taipei 101

In conclusione, l'uso di un TMD può significativamente migliorare la capacità di una struttura di resistere a forze dinamiche, come quelle indotte da terremoti o vento, purché sia correttamente sintonizzato sulla frequenza naturale della struttura. In fig. 21 si riporta come le ampiezze delle vibrazioni della struttura principale siano ridotte in modo significativo nella zona di risonanza quando il TMD è sintonizzato correttamente.

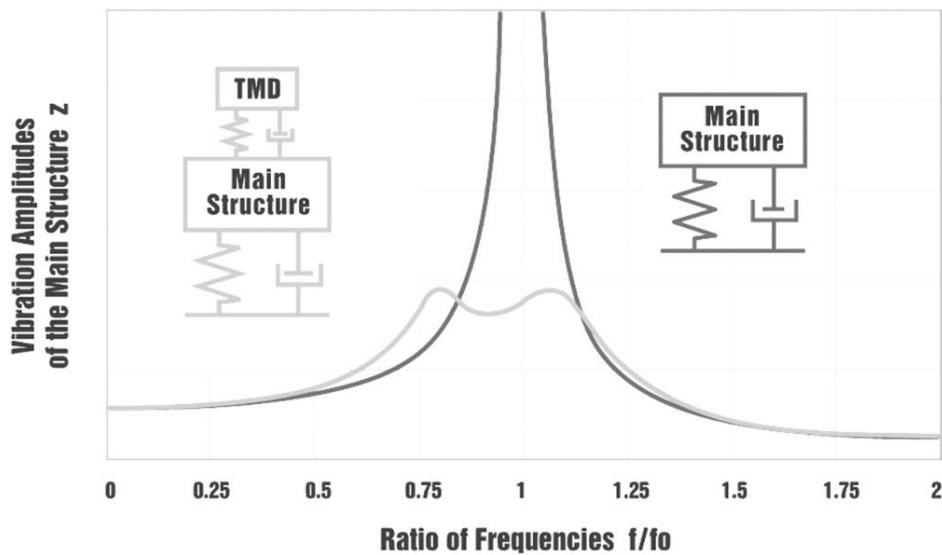


Figura 21 - Curva di risposta del sistema con o senza TMD

## 2.2 Proprietà dei metamateriali

Xianglong Yu et al. (2017) definisce i metamateriali meccanici come delle strutture artificiali progettate per avere proprietà meccaniche controintuitive, che dipendono dalla geometria della cella unitaria piuttosto che dalle caratteristiche intrinseche dei singoli componenti. Questi metamateriali sono spesso associati a quattro costanti fondamentali: il modulo di Young  $E$ , il modulo di taglio  $G$ , il modulo di compressibilità  $K$  e il Poisson's Ratio  $\nu$ .

A differenza dei materiali tradizionali, i metamateriali non si trovano in natura e sono il risultato della progettazione e della creatività umana. La loro particolarità risiede nella possibilità di realizzare unità simili ad atomi, creando così materiali con proprietà inedite. Queste proprietà uniche derivano dalla geometria della microstruttura, piuttosto che dalla composizione dei materiali stessi.

I metamateriali, quindi, presentano una gamma di proprietà meccaniche notevolmente migliorate: Poisson's ratios nulli o negativi, rigidità negativa o comprimibilità negativa. La fig. 22 fornisce una classificazione dei metamateriali, basandosi sulle costanti elastiche.

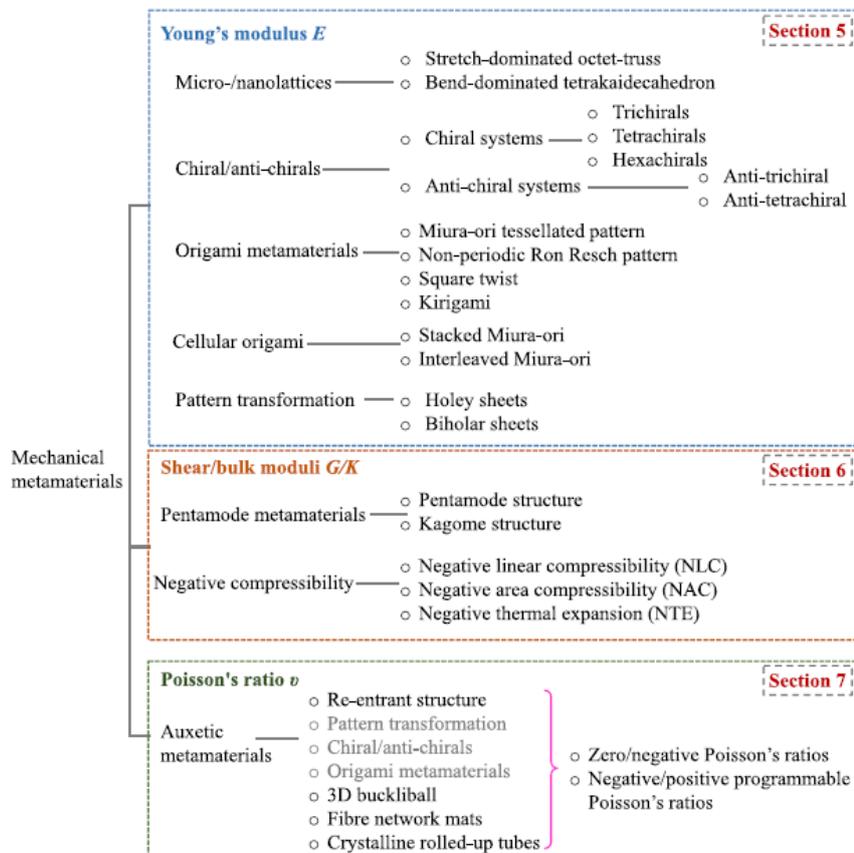


Figura 22 - Classificazione dei metamateriali in funzione delle costanti elastiche (Xianglong Yu et al., 2017)

### 2.2.1 Proprietà dei Metamateriali associati alla rigidezza

In quasi tutti i sistemi elastici conosciuti, la rigidezza descrive il rapporto tra la forza applicata e lo spostamento risultante, similmente alla costante elastica di una molla. Quando un oggetto elastico viene compresso, esso oppone resistenza alla deformazione attraverso una forza di richiamo che tende a riportarlo alla posizione iniziale. Si parla di rigidezza positiva quando la deformazione e la forza applicata agiscono nella stessa direzione, generando una forza che restituisce il corpo alla sua configurazione originale. Nei metamateriali meccanici, tuttavia, è possibile ottenere una rigidezza negativa, la quale facilita la deformazione applicata invece di opporvisi.

Lo studio Xianglong Yu et al. (2017) evidenzia come diversi metamateriali meccanici siano divisibili in quattro categorie principali legate alla rigidezza regolabile: micro o nanoreticoli, metamateriali chiral/anti-chiral, metamateriali ispirati all'origami e metamateriali cellulari.

Un materiale a reticolo è costituito da una struttura cellulare o a traliccio, composta da un elevato numero di elementi uniformi, come sottili travi o aste. Tali materiali sono ottenuti tramite la tassellazione di una cella unitaria nello spazio, che funge da elemento costitutivo. La progettazione di materiali a reticolo richiede attenzione sia alla geometria della cella unitaria sia alla disposizione dell'intero reticolo, poiché queste due caratteristiche influenzano in modo significativo le proprietà finali del materiale. In applicazioni tradizionali, come nelle schiume e negli aerogel, l'architettura del reticolo è spesso determinata con metodi stocastici e presenta una porosità superiore al 50%. Tuttavia, i metamateriali artificiali micro e nanoreticolari, ispirati a solidi cellulari naturali come strutture a nido d'ape, presentano architetture più ordinate che permettono un controllo preciso della struttura cellulare.

Nella progettazione di metamateriali a reticolo su scala micro/nanometrica, due aspetti principali richiedono particolare attenzione: la cella unitaria e la sua tassellazione. La maggior parte di questi metamateriali ultraleggeri, con una densità inferiore a  $10 \text{ mg/cm}^3$ , è realizzata utilizzando una varietà di materiali solidi e una struttura gerarchica.

Per caratterizzare le proprietà meccaniche dei metamateriali leggeri e resistenti, è importante esaminare il rapporto tra resistenza e densità nei micro e nanoreticoli. Ridurre la densità dei materiali spesso causa un deterioramento delle loro proprietà meccaniche, poiché gli elementi strutturali tendono a deformarsi per flessione a livello microscopico quando vengono sottoposti a carichi macroscopici.

Due fattori fondamentali nella progettazione dei metamateriali micro e nanoreticolari sono la geometria della cella unitaria e la disposizione della struttura reticolare. La configurazione della cella unitaria influenza sia la rigidezza sia la resistenza allo snervamento, mentre la disposizione spaziale determina la

distribuzione dei vuoti nella struttura, che è essenziale per mantenere le caratteristiche di leggerezza e resistenza. Inoltre, nei materiali cellulari convenzionali, come le schiume o gli aerogel, le proprietà del modulo elastico rispetto alla densità sono spesso indipendenti dalla scala dimensionale o dalla simmetria specifica della struttura. Tuttavia, recenti studi hanno dimostrato che, nelle strutture a simmetria cubica (semplice, a corpo centrato e a facce centrate), il modulo elastico dipendente dalla densità può mostrare anisotropia strutturale, influenzando la risposta del materiale in diverse direzioni.

I metamateriali meccanici, la cui rigidità dipende più dalla loro configurazione geometrica che dalla composizione chimica, permettono di mantenere una relazione di scala lineare tra rigidità e densità su un ampio intervallo di densità e utilizzando una varietà di materiali costitutivi. Questo approccio, che riduce il decadimento del modulo elastico con la diminuzione della densità relativa, ha portato allo sviluppo di metamateriali ultraleggeri ma resistenti, ideali per applicazioni avanzate.

Due esempi di queste strutture reticolari (fig. 23), comunemente descritti nella letteratura tecnica, sono l'octet-truss dominato dalla trazione e la struttura a tetrakaidecahedron dominata dalla flessione. Gli octet-trusses, costituiti da metalli o ceramiche, presentano una geometria triangolata che consente alla struttura di deformarsi prevalentemente tramite l'allungamento assiale degli elementi del traliccio. Questo tipo di struttura mantiene un rapporto lineare tra il modulo elastico e la densità relativa, permettendo così la creazione di metamateriali ultraleggeri e rigidi. La cella unitaria dell'octet-truss è basata su un ottaedro regolare circondato da otto tetraedri, con una struttura cristallina simile a quella della cella unitaria cubica a facce centrate.

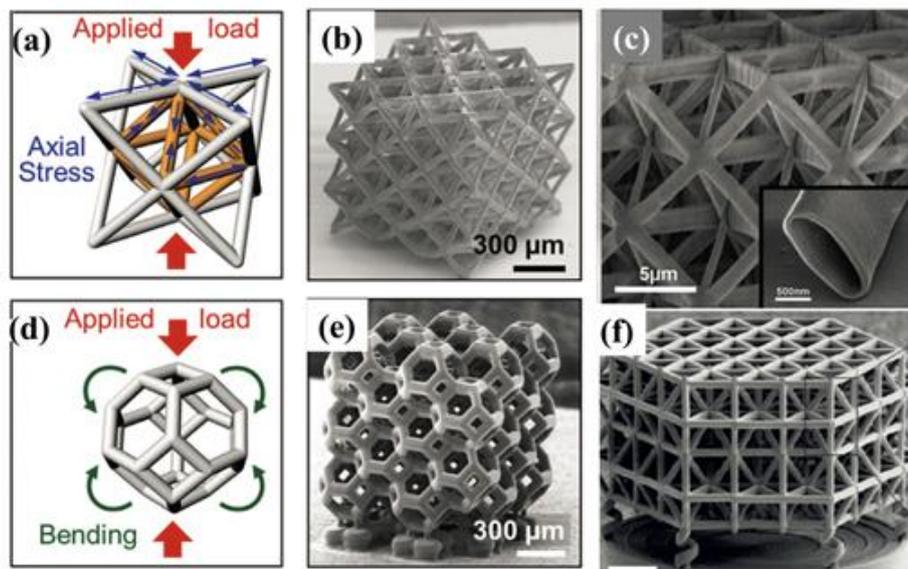


Figura 23 - Strutture reticolari a) Octet-truss e b) Tetrakaidecahedron (Xianglong Yu et al., 2017)

Le strutture chirali sono delle configurazioni che si presentano come immagini speculari non sovrapponibili e possono essere concepite sia in configurazione destrorsa che sinistrorsa. Ogni cella unitaria in questa rete è formata da un cilindro centrale, detto nodo, a cui si collegano sei unità disposte tangenzialmente, creando una simmetria rotazionale di ordine sei, nota come hexachiral.

Le unità chirali possono essere ulteriormente suddivise in sistemi chirali e anti-chirali (fig. 24): nel primo, i nodi si trovano ai lati opposti dei legamenti, mentre nel secondo i nodi sono collocati sullo stesso lato, con unità destrorse e sinistrorse in uguale proporzione.

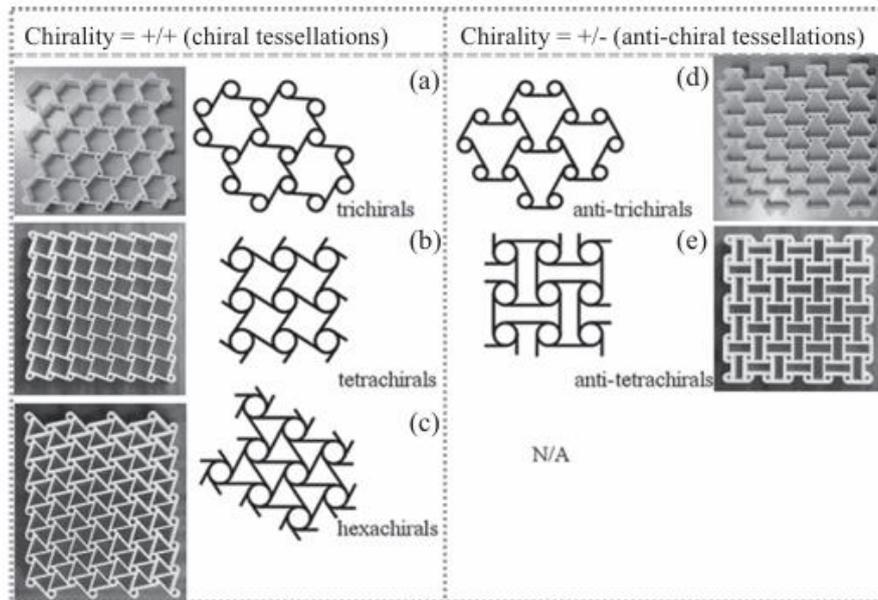


Figura 24 - Sistemi chirali e antichirali (Xianglong Yu et al., 2017)

La terza tipologia trattata da Xianglong Yu et al. (2017) è l'origami, tradizionalmente un'arte giapponese di piegare carta per ottenere forme decorative senza l'uso di tagli, è oggi una tecnica adottata in ambiti ingegneristici per progettare metamateriali meccanici ultraleggeri e personalizzabili.

Nella geometria computazionale dell'origami, vengono definiti elementi essenziali come pieghe e vertici (fig. 25.): le pieghe rappresentano le linee lungo cui la superficie viene piegata, i vertici sono punti di convergenza delle pieghe, e le aree delimitate da pieghe prendono il nome di facce. Le pieghe possono essere classificate in pieghe a montagna e pieghe a valle a seconda della direzione di piegatura. Nei modelli strutturali, le pieghe agiscono come giunture o cerniere, consentendo alla struttura finale di muoversi e di assumere forme specifiche.

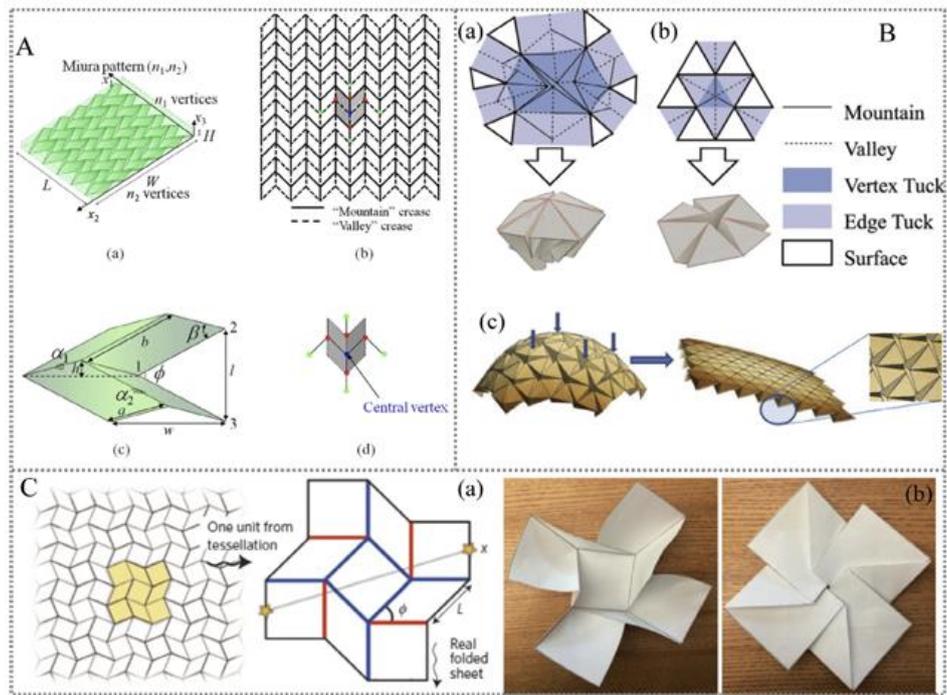


Figura 25 - Geometria degli origami (Xianglong Yu et al., 2017)

L'ultima tipologia analizzata è relativo ai sistemi cellulari. Oggi, i principi di design dell'origami vengono estesi ai materiali cellulari tridimensionali, dando vita a nuovi metamateriali cellulari pieghevoli (fig. 26). Questi metamateriali uniscono la progettazione strutturale dei micro e nanoreticoli con pattern innovativi derivati dall'origami, condividendo con l'origami tradizionale i meccanismi di instabilità e le trasformazioni di pattern che ne derivano.

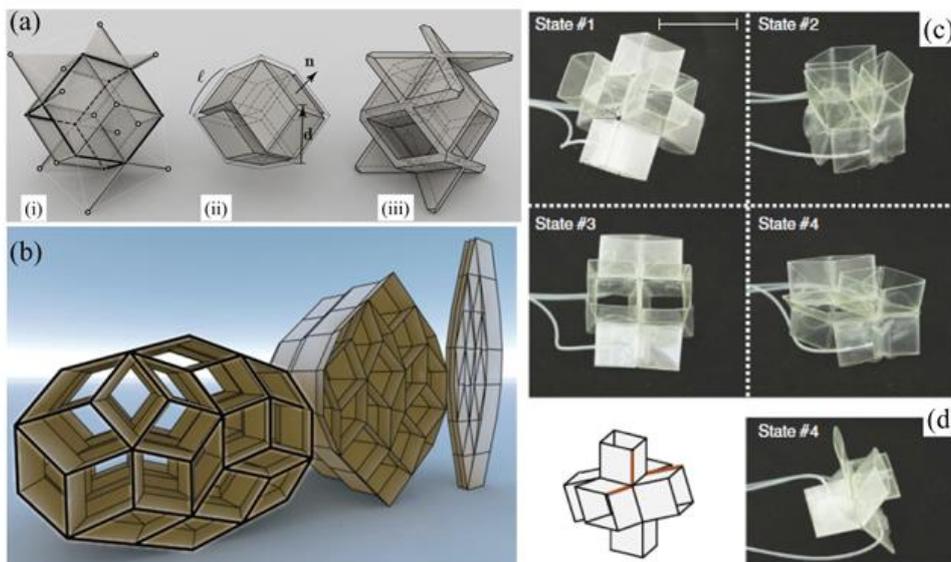


Figura 26 - Sistemi cellulari (Xianglong Yu et al., 2017)

Nel testo si discute inoltre della trasformazione di pattern in configurazioni specifiche, particolarmente in strutture con pattern forati. La trasformazione del pattern è caratterizzata da un cambiamento macroscopico nelle proprietà di tensione e deformazione quando il metamateriale è compresso oltre una soglia critica; questa trasformazione avviene tramite un meccanismo di flessione cooperativa che permette l'emergere delle proprietà meta-meccaniche (fig. 27).

Un aspetto distintivo della trasformazione di pattern è la possibilità di regolare la rigidità in direzioni assiali e normali sotto compressione.

Il processo di trasformazione può essere influenzato dalla forma dei pori e dalla loro disposizione topologica. La forma dei pori, come cerchi, ellissi o forme irregolari, ha un ruolo fondamentale nell'innescare dell'instabilità e nel comportamento post-buckling. Cambiando la forma dei pori, è possibile ottimizzare la risposta elastica iniziale, l'instabilità e il comportamento post-buckling, ottenendo proprietà meccaniche desiderate, come una rigidità sintonizzabile.

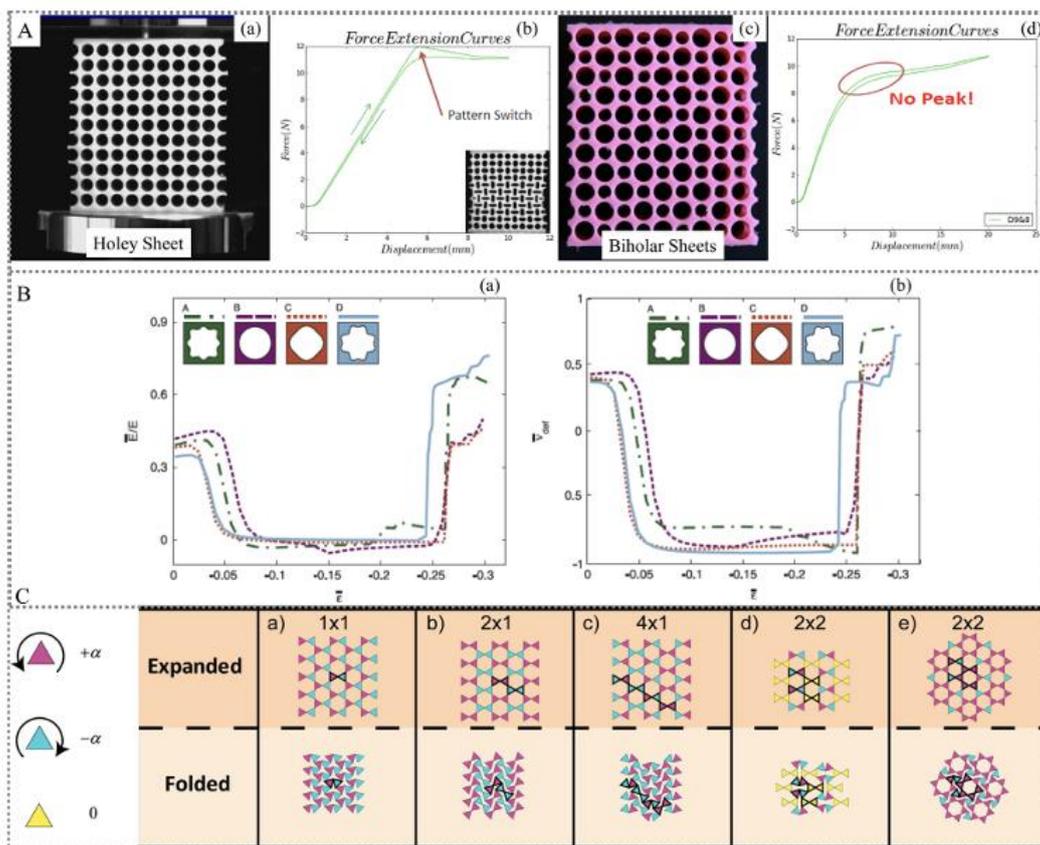


Figura 27 - Cambiamento delle proprietà di rigidità nei metamateriali (Xianglong Yu et al., 2017)

Inoltre, sono discussi due pattern specifici di disposizione dei pori: i holey sheets (lastre con fori di dimensioni omogenee) e i biholar sheets (lastre con due dimensioni di fori). I holey sheets agiscono come strutture cellulari rigide collegate

da travi, consentendo un assorbimento energetico elevato quando deformati oltre il regime elastico lineare. Al contrario, i biholar sheets possono presentare un comportamento programmabile, come la risposta isteretica, derivata dall'instabilità elastica che causa effetti di snervamento.

In sintesi, le instabilità elastiche nelle strutture porose periodiche aprono nuove possibilità per applicazioni nei metamateriali, poiché consentono la variazione delle proprietà strutturali in risposta a stimoli esterni.

### 2.2.2 Metamateriali a Poisson's Ratio negativo

Considerando un parallelepipedo elementare soggetto alla sola componente di tensione normale  $\sigma_x$ , le deformazioni dell'elemento considerato sono date dalle:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu}{E}\sigma_x = -\nu\varepsilon_x \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu}{E}\sigma_x = -\nu\varepsilon_x\end{aligned}$$

Il coefficiente  $\nu$  rappresenta il rapporto tra le dilatazioni indotte nelle direzioni ortogonali a quella della sollecitazione e la dilatazione nella direzione di sollecitazione:

$$\nu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}$$

Il rapporto  $\nu$  è detto modulo elastico normale o rapporto di Poisson.

Xianglong Yu et al. (2017) evidenzia come solitamente nei solidi, quando un oggetto viene allungato assialmente, si contrae lateralmente. Tuttavia, alcuni materiali presentano un rapporto di Poisson negativo, con valori prossimi a -1, il che significa che si espandono lateralmente quando allungati e si contraggono quando compressi (fig. 28). I metamateriali con questa proprietà sono noti come auxetici.

È, inoltre, possibile dividere i metamateriali auxetici in due categorie: auxetici completi e auxetici parziali. Nei primi, il modulo di Poisson è sempre negativo o nullo, mentre i secondi mostrano valori sia positivi che negativi in funzione dell'orientamento dei meta-atomi sottoposti ad una deformazione.

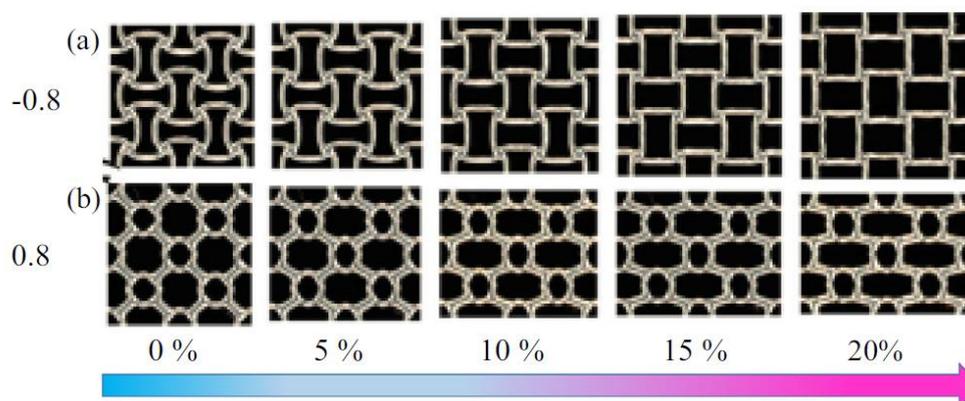


Figura 28 - Deformazione di 2x2 celle unitarie per a)  $\nu=0,8$  e b)  $\nu=-0,8$

## Capitolo 3

# Caso Studio: edificio per civile abitazione in muratura portante

### 3.1 Casa Benedino

Il caso studio in oggetto è Casa Benedino, un edificio risalente al 1934, sito in Via Canonico Stevenin ad Aosta. L'edificio, inizialmente adibito ad abitazione privata, negli anni è diventato di proprietà dell'amministrazione comunale che l'ha reso un centro notturno di assistenza nel 1996 con un intervento di restauro conservativo.



*Figura 29 – Lato Ovest Casa Benedino*

L'edificio è costituito da un piano seminterrato e due fuori terra (fig. 29) con un interasse tra i solai di 2,82 m.



*Figura 30 - Prospetti Casa Benedino*

Le strutture portanti verticali esterne sono in muratura di mattoni dello spessore di 40 cm mentre quelle interne sono costituite da un nucleo in calcestruzzo armato ordinario in prossimità dell'ascensore e un muro di spina in muratura lungo le scale (fig. 31).

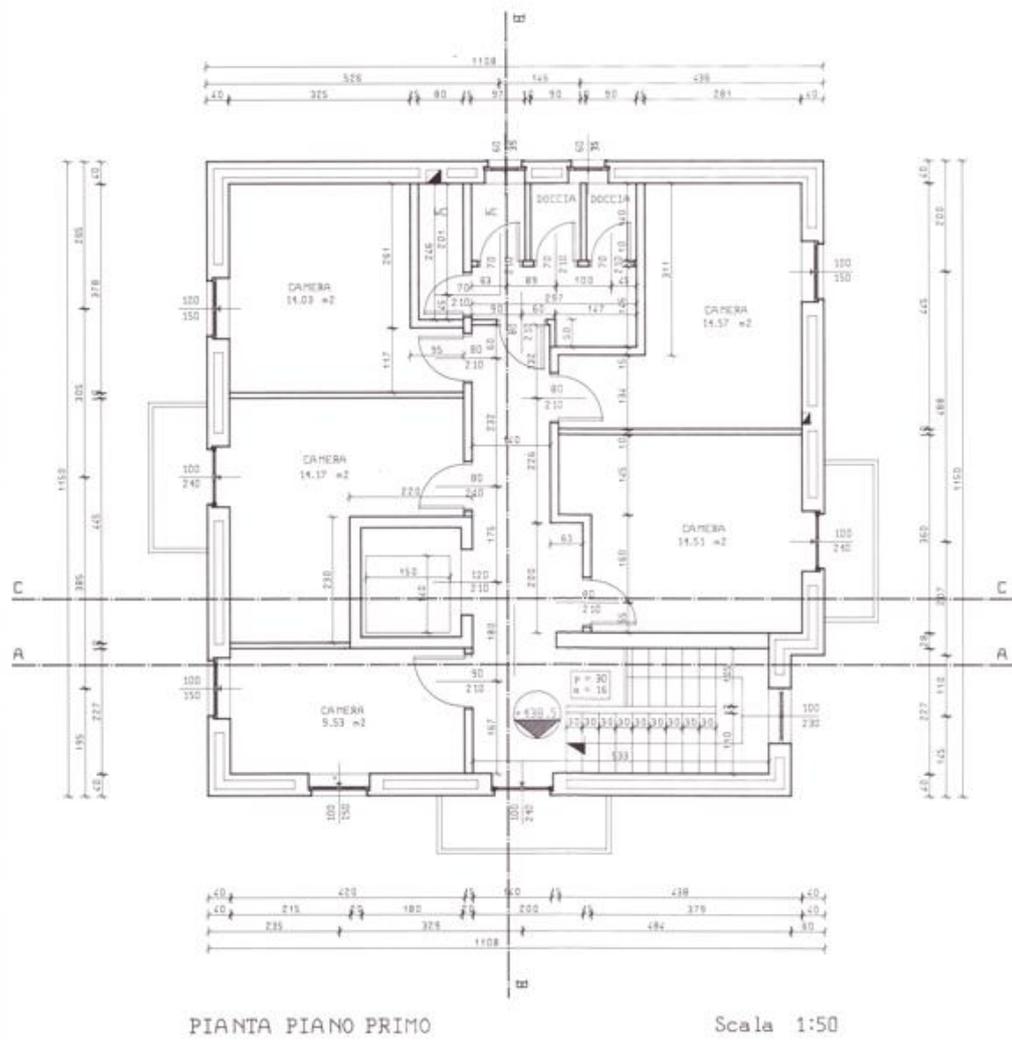


Figura 31 - Pianta Casa Benedino

Un particolare delle murature esterne si può osservare in fig. 32 in cui si evidenziano le ultime modifiche eseguite sull'esistente.

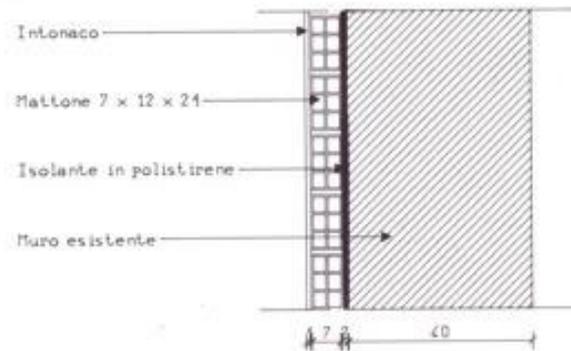


Figura 32 - Particolare murature esterne

Le strutture orizzontali sono formate da solai a travi in acciaio composti da una tavella e da un riempimento a base di malta bastarda e scorie d'alto forno con materiali di alleggerimento e una soletta in calcestruzzo armato con rete metallica (fig. 33).

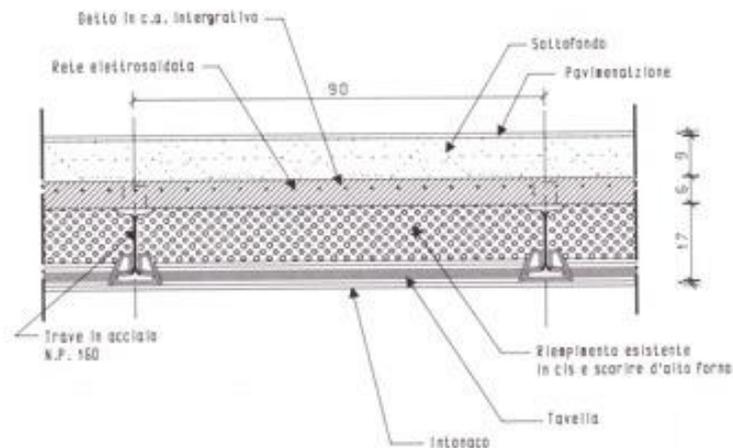


Figura 33 - Particolare solaio

La copertura è costituita da una struttura portante in legno lamellare e le restanti parti in legno di abete. E' costituita da delle travi principali 22x40 e da degli arcarecci 14x20 (fig. 34).

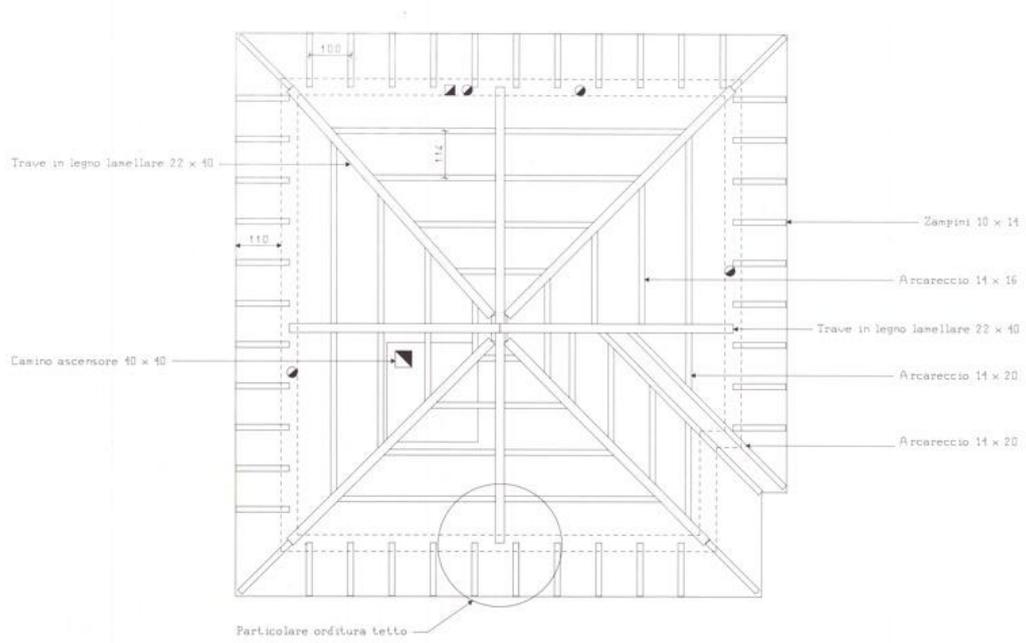


Figura 34 - Planimetria copertura

## 3.2 Modellazione agli elementi finiti

Il FEM (Finite Element Modelling, Metodo degli elementi finiti in italiano) è una tecnica di modellazione numerica utilizzata nella progettazione strutturale per rappresentare e analizzare, coerentemente con la realtà, il comportamento di un sistema.

Il metodo consiste nel suddividere la struttura in elementi finiti, ognuno dei quali viene descritto da un insieme di equazioni matematiche. Le equazioni descrivono il comportamento del materiale, le proprietà geometriche e le condizioni sui singoli elementi.

Una volta che tutti gli elementi sono stati descritti matematicamente, vengono assemblati in un modello computazionale completo della struttura. Questo modello viene poi risolto numericamente per determinare lo stato di deformazione e sforzo in ogni punto della struttura. In questo modo, il FEM consente di ottenere una previsione del comportamento della struttura in risposta ai carichi esterni, nonché di identificare le aree di stress e deformazioni critiche.

Il FEM viene utilizzato in molte applicazioni ingegneristiche, tra cui l'analisi di solidità di una struttura, la simulazione del comportamento di un sistema meccanico, la progettazione di prodotti e l'ottimizzazione delle prestazioni di un sistema.

Il modello è stato realizzato mediante DIANA FEA (DISplacement ANAlyzer), software agli elementi finiti dedicato in particolar modo a specialisti nel settore dell'Ingegneria Civile

DIANA FEA è un codice di uso generale, basato sul Metodo degli Spostamenti.

### 3.3 Modellazione Casa Benedino

Nel caso oggetto di studio, la geometria è stata preliminarmente modellata su AutoCAD e solo successivamente importata su Diana.

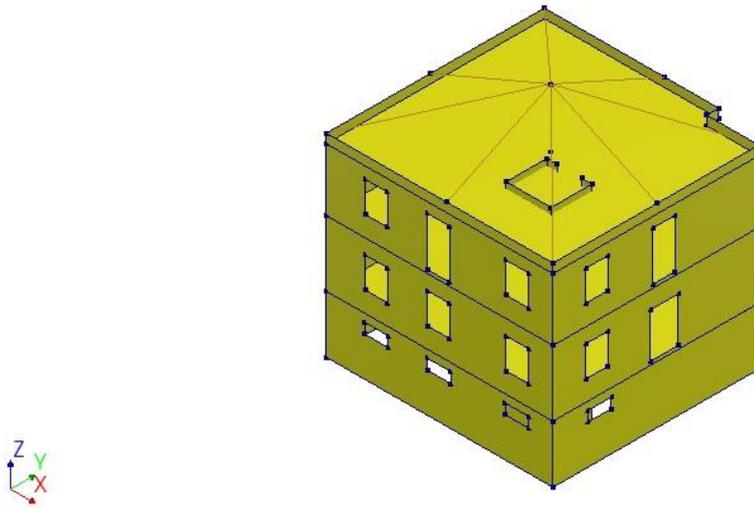


Figura 35 - Modello FEM

Dopo aver importato la geometria, è stata assegnata la *element class* a tutti gli elementi importati. Ai pannelli murari, il nucleo dell'ascensore e i solai, è stata assegnata la classe *regular curved shell* (figg. 36-37) caratterizzata da 8 nodi ciascuno dei quali presenta 5 gradi di libertà (3 traslazionali e 2 rotazionali).

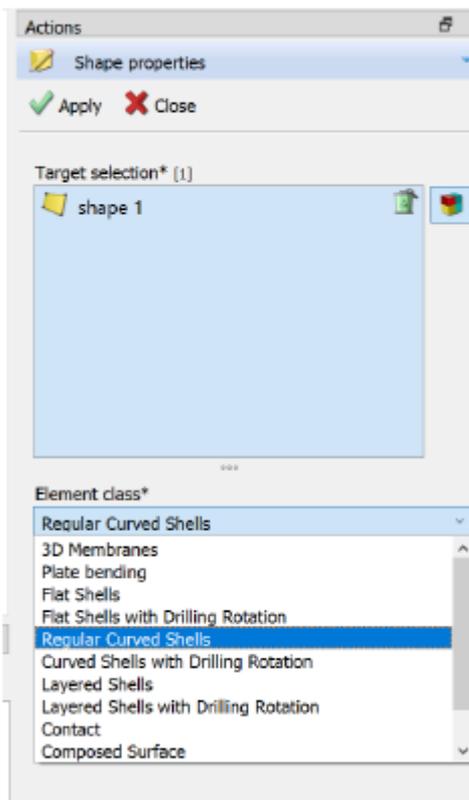


Figura 36

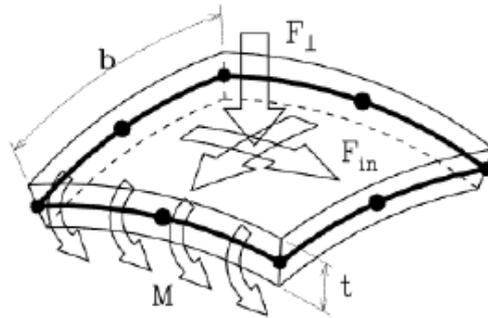


Figura 37

Alle travi di copertura è stata assegnata la classe *beam class I*, caratterizzata da due nodi (fig. 38)

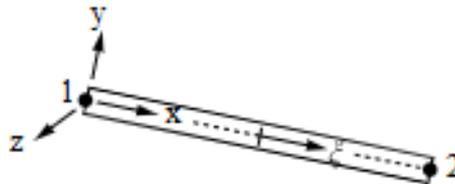


Figura 38 – Beam class I

Successivamente si è definito per ogni elemento, il materiale di cui è composto. Essendo, le mura perimetrali, realizzate in muratura, si è scelto come classe *concrete and masonry* e come modello di materiale *linear elastic isotropic*.

La scelta dei valori meccanici è dipesa dalle considerazioni effettuate sui livelli di conoscenza, in base alle seguenti regole stabilite dal D.M. 17 Gennaio 2018 (Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni):

- LC1: richiede l'esecuzione di indagini limitate e prove limitate. Il fattore di confidenza è pari a  $FC=1,35$ . Per le resistenze si utilizzano i valori minimi

degli intervalli della tabella C8.5.I, per i moduli elastici i valori medi degli intervalli della tabella C8.5.I.

- LC2: richiede l'esecuzione di indagini estese e prove estese. Il fattore di confidenza è pari a  $FC=1,2$ . Per le resistenze si utilizzano i valori medi degli intervalli della tabella C8.5.I, per i moduli elastici i valori medi degli intervalli della tabella C8.5.I.
- LC3: richiede l'esecuzione di indagini esaustive e prove esaustive. Il fattore di confidenza è pari a  $FC=1$ . Per le resistenze e i moduli elastici si utilizza una distribuzione statistica a priori basata sugli intervalli di valori della tabella C8.5.I; tali valori vengono aggiornati in funzione della tipologia di prove eseguite e del numero di prove.

[<https://www.marcodepisapia.com/edifici-esistenti-in-muratura-livelli-di-conoscenza-fattori-di-confidenza/>]

Con la mancanza di indagini e prove, è stato considerato un livello di conoscenza pari a LC1.

Per la muratura, sono stati assegnati i parametri riportati nel paragrafo C8.5.4.1 della circolare 21 Gennaio 2019, n.7/C.S.LL.PP.

Nello specifico è stata utilizzata la tabella C8.5.I. della sopracitata circolare che riporta i valori dei parametri meccanici di alcune delle tipologie di murature più impiegate. Per le proprietà riportate in tabella sono presenti un range di valori per ogni tipologia di muratura.

Per il caso in oggetto, date le tavole storiche, è stata considerata una tipologia di muratura corrispondente a *muratura in mattoni pieni e malta di calce*.

Tipologia di muratura	$f$	$\tau_v$	$f_{vs}$	$E$	$G$	$w$
	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )				
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- .	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbalzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- .	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- .	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	- .	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura 540%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(\*) Nella muratura a conci sbalzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(\*\*) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione  $f_{ps}$  può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(\*\*\*) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Figura 39 - Tabella C8.5.I Circolare esplicativa del 2019 delle NTC18 (C.S.LL. PP, 2019)

Nella tabella sono riportati i seguenti parametri meccanici:

- $f$  è la resistenza media a compressione;
- $\tau_0$  è la resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali;
- $f_{v0}$  è la resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali;
- $E$  è il valore medio del modulo di elasticità normale;
- $G$  è il valore medio del modulo di elasticità tangenziale;
- $w$  è il peso specifico medio.
- 

Sono stati quindi presi in considerazione i seguenti parametri meccanici (fig. 40):

- $E = 1,5 \text{ N/mm}^2$ ;
- $\nu = 0,3$ ;
- $\gamma = 1800 \text{ kg/m}^3$ .

Dove:

- $E$  è il modulo di Young;
- $\nu$  è il Poisson's ratio;
- $\gamma$  è la densità di massa.

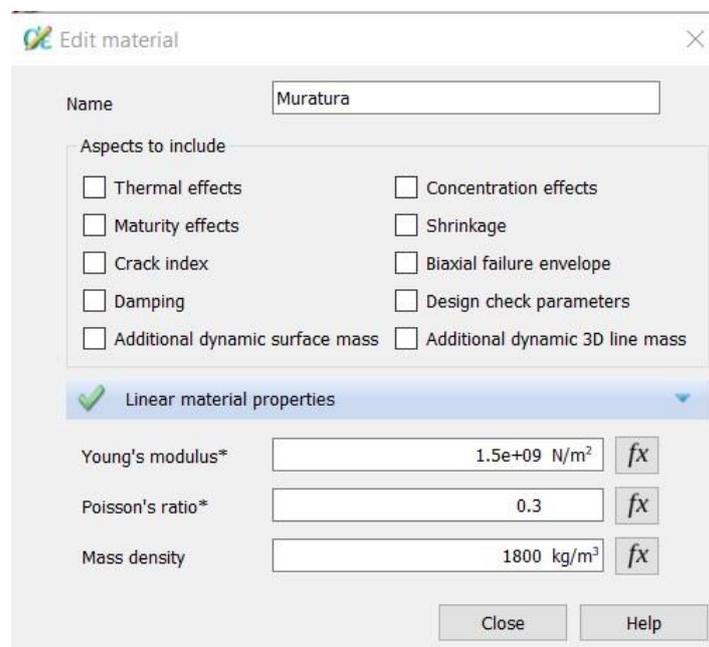


Figura 40 - Creazione del materiale

Infine è stata generata la mesh. Il software permette di definire le proprietà della mesh nelle *shape*. L'impostazione delle proprietà della mesh prevede le opzioni

relative a: *operation* (le proprietà possono essere assegnate a forme, facce e spigoli), *shape selection* (la forma della mesh può essere selezionata) e *seeding method* (si può scegliere tra *Division*, *Element Size* e *Gradation*).

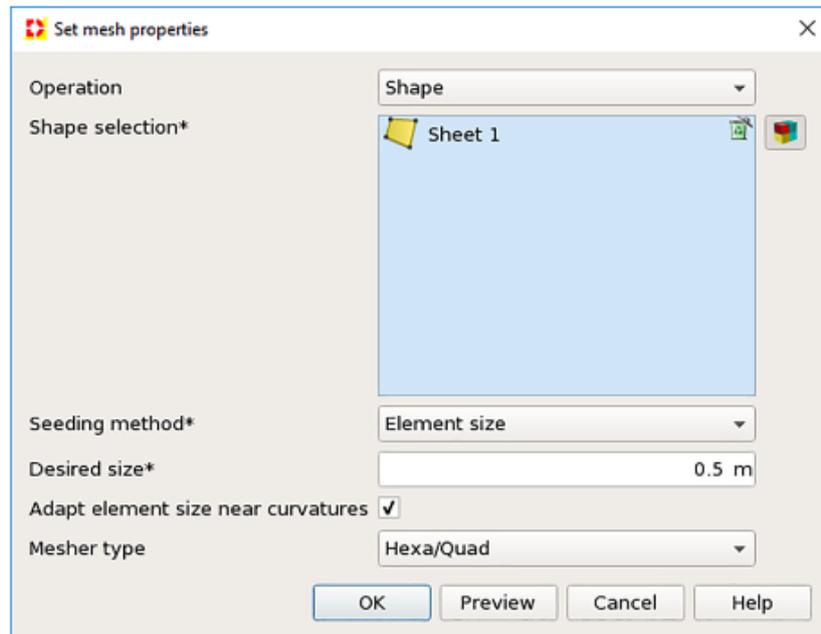
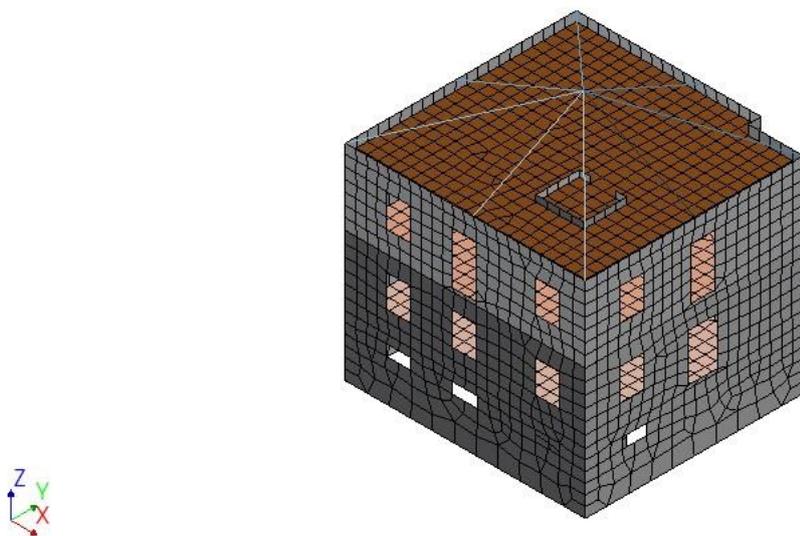


Figura 41 - Creazione del set Mesh

Nel modello oggetto dell'analisi è stata adottata una discretizzazione con le seguenti proprietà:

- Target type: shape;
- Shape selection: Hexa/Quad;
- Seeding method: Element size (con dimensione pari a 0.5 m).



*Figura 42 - Mesh della struttura*

### 3.4 Analisi preliminare della struttura

L'analisi preliminare è stata effettuata mediante un'analisi dinamica lineare della struttura oggetto della tesi.

L'analisi dinamica modale opera una scomposizione della risposta dinamica nei contributi dei singoli modi di vibrare, mediante la trasformazione di un sistema ad N gradi di libertà in N sistemi ad 1 grado di libertà. La risposta strutturale è ottenuta attraverso la sovrapposizione dei singoli modi di vibrare (sovrapposizione modale). L'analisi modale ricerca i modi di vibrare di una struttura e per ciascun modo di vibrare calcola il suo periodo naturale di vibrazione, ossia l'intervallo di tempo che la struttura impiega per eseguire un'oscillazione completa secondo una configurazione deformata affine ad un suo modo di vibrare. Per un sistema vibrante vale una regola generale: il numero dei modi di vibrare sarà pari al numero di gradi di libertà del sistema.

Per la definizione di tale problema si parte dall'equazione del moto generica per sistemi a N gradi di libertà.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0$$

Dove:

$[M]$  è la matrice delle masse;

$\{\ddot{x}\}$  è il vettore delle accelerazioni;

$[K]$  è la matrice delle rigidezze;

$\{x\}$  è il vettore degli spostamenti.

La soluzione è determinata da una forma spaziale ed unaforma temporale del tipo:

$$\{x\} = \{\psi\}\varphi(t)$$

$$\{\ddot{x}\} = \{\psi\}\ddot{\varphi}(t)$$

Sostituendo all'interno dell'equazione del moto, si ottiene:

$$[K]\{\psi\} - \omega^2[M]\{\psi\} = 0$$

In questo modo si definisce il problema agli autovalori e autovettori.

Trascurando la soluzione banale ( $\{\psi\} = 0$ ), si trova la soluzione seguente:

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0$$

In questo modo è possibile ricavare le pulsazioni modali  $\omega$  del sistema.

Si risolve, in questo modo, il problema agli autovalori.

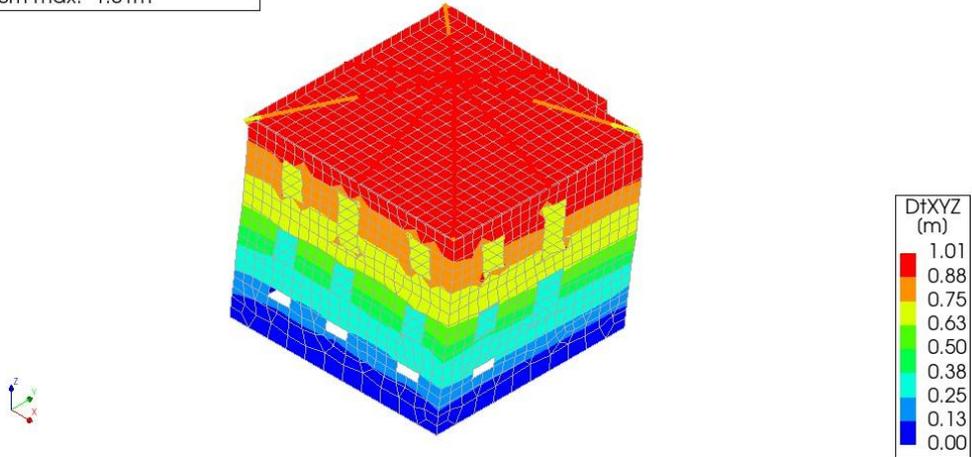
Per eseguire l'analisi modale con il software Diana FEA, il primo passo consiste nell'impostare l'analisi da effettuare. In Diana, questa operazione si realizza utilizzando il comando "add an analysis" nella command window. Una volta aggiunta la nuova analisi, è possibile selezionare la tipologia desiderata tra quelle disponibili nel software, scegliendo "Structural eigenvalue".

Dopo aver creato l'analisi è possibile impostare i parametri relativi alla precisione e gli output dei risultati.

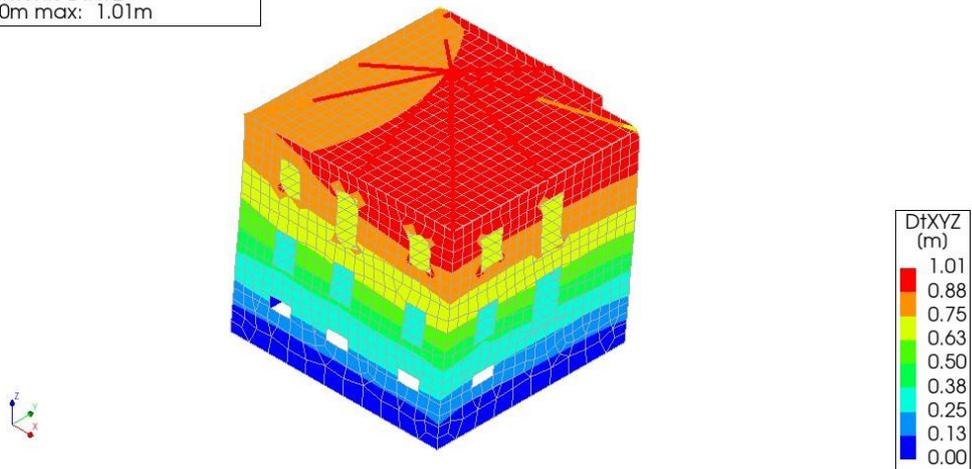
Si può inoltre impostare il numero di autovalori (modi di vibrare) dell'analisi.

L'Analisi Modale eseguita sul caso studio di Casa Benedino ha restituito i seguenti modi di vibrare.

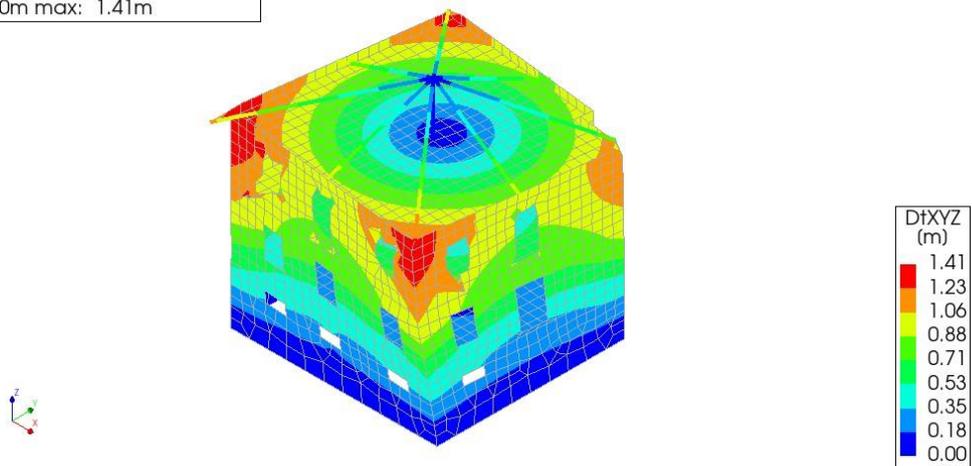
Analysis2  
Mode 1, Eigen frequency 7.8601 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.01m



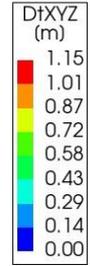
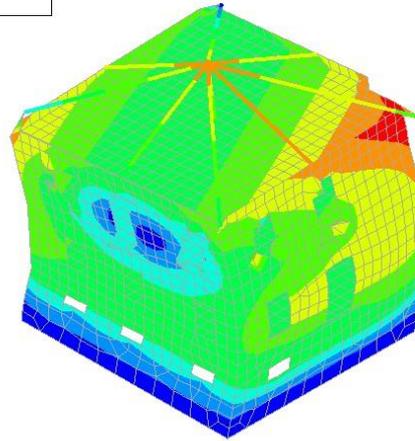
Analysis2  
Mode 2, Eigen frequency 8.3050 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.01m



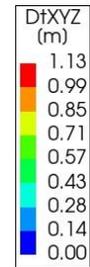
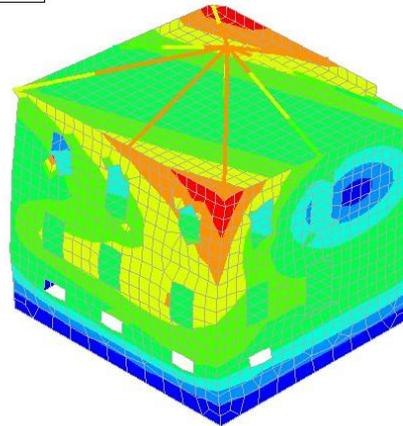
Analysis2  
Mode 3, Eigen frequency 11.228 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.41m



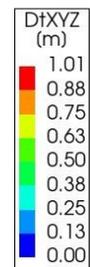
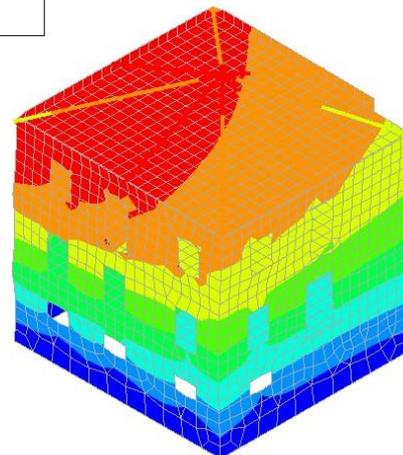
Analysis2  
Mode 4, Eigen frequency 20.750 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.15m



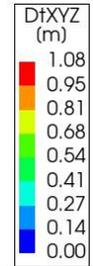
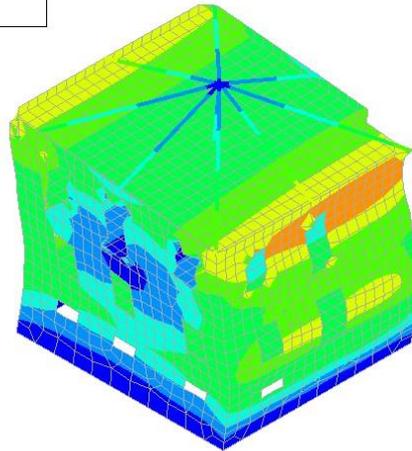
Analysis2  
Mode 5, Eigen frequency 21.205 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.13m



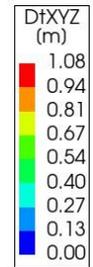
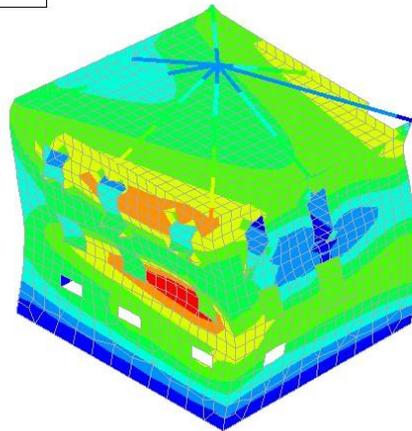
Analysis2  
Mode 6, Eigen frequency 21.530 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.01m



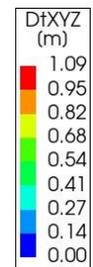
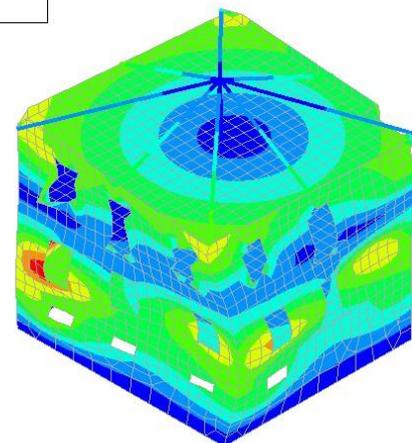
Analysis2  
Mode 7, Eigen frequency 26.831 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.08m



Analysis2  
Mode 8, Eigen frequency 28.703 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.08m



Analysis2  
Mode 9, Eigen frequency 31.912 Hz  
Displacements DtXYZ  
min: 0.00m max: 1.09m



Dai risultati riportati si evidenzia come le prime due deformate modali siano prevalentemente traslazionali in direzione, rispettivamente, X e Y. La terza deformata modale mostra una evidente torsione, mentre dal quarto modo di vibrare in poi si trovano dei modi di vibrare misti e locali.

Di seguito, si riportano i risultati ottenuti.

Modo	Frequenza [Hz]	Descrizione
1	7.8601	Traslazionale in direzione y
2	8.3050	Traslazionale in direzione x
3	11.228	Torsionale
4	20.750	Mista, locale
5	21.205	Mista, locale
6	21.530	Mista, locale
7	26.831	Mista, locale
8	28.703	Mista, locale
9	31.912	Mista, locale

*Tabella 1 - Riassunto risultati Analisi Modale*

## Capitolo 4

# Modellazione del Meta-Pannello Bistabile

### 4.1 Snap-through e bistabilità della trave sinusoidale

Nel campo dell'ingegneria civile, i fenomeni di instabilità sono stati tradizionalmente percepiti come potenzialmente dannosi, poiché possono generare cambiamenti repentini nella configurazione del sistema in oggetto, compromettendone la funzionalità. Tuttavia, negli ultimi anni, si è cominciato a riconoscere che questi fenomeni possono essere sfruttati in modo anche vantaggioso.

Tra i fenomeni su cui la letteratura scientifica e, in particolare, gli studi di Tan et al. (2022), Chen et al. (2021) e Chenxi Lu et al. (2022), si sono soffermati maggiormente per evidenziarne gli eventuali aspetti positivi per le strutture, si può citare senza dubbio la bistabilità (e lo snap through).

La bistabilità è un fenomeno che evidenzia come un sistema possa esistere in due stati di equilibrio distinti con la possibilità di passare da uno stato all'altro tramite un'energia di attivazione.

In questo contesto, i recenti sviluppi nei metamateriali, come evidenziato nello studio di Tan et al. (2022), stanno aprendo nuove prospettive per un uso della bistabilità nelle strutture. Questo studio analizza le configurazioni strutturali delle travi – in particolare inclinata, curva e ad arco.

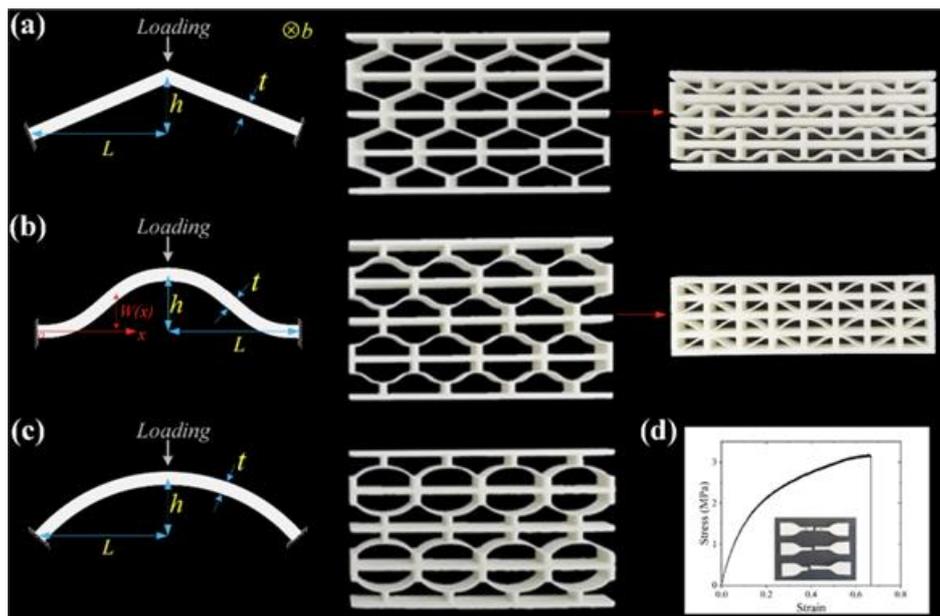


Figura 43 - Travi inclinate, curve e ad arco (Tan et al, 2022)

Gli autori illustrano un approccio sperimentale e numerico dettagliato per valutare le proprietà meccaniche delle travi con rigidità negativa e comportamento bistabile. I campioni di trave, progettati per diverse configurazioni (inclinata, curva e ad arco), sono stati fabbricati tramite tecnologia SLS (Selective Laser Sintering) utilizzando TPU (poliuretano termoplastico). Le prove meccaniche sono state condotte per verificare la curva di risposta sforzo-deformazione del materiale facendo variare i parametri geometrici, quali: spessore della trave, altezza e lunghezza.

Lo studio compara i risultati ottenuti dalle prove meccaniche e quelli ottenuti da un'analisi FEM.

Le curve di risposta forza-spostamento delle strutture studiate composte da elementi a trave inclinata, curva e ad arco sono mostrate separatamente in fig. 43 e i relativi processi di deformazione sono illustrati in fig. 44. Queste strutture sono tutte assemblate con  $4 \times 4$  elementi a trave. La forza di picco, ovvero la forza di instabilità per le strutture a trave inclinata e curva, è quasi la stessa, ma risulta significativamente maggiore rispetto a quella della struttura a trave ad arco nelle dimensioni geometriche specificate ( $t = 0,6$  mm,  $h = 4$  mm,  $L = 20$  mm e  $b = 1,5$  mm). I processi di deformazione globale per tutte le forme sono simili e non emergono modalità di deformazione uniche con l'introduzione della curvatura. Le strutture collassano strato per strato e presentano curve di risposta meccanica seghettate e periodiche.

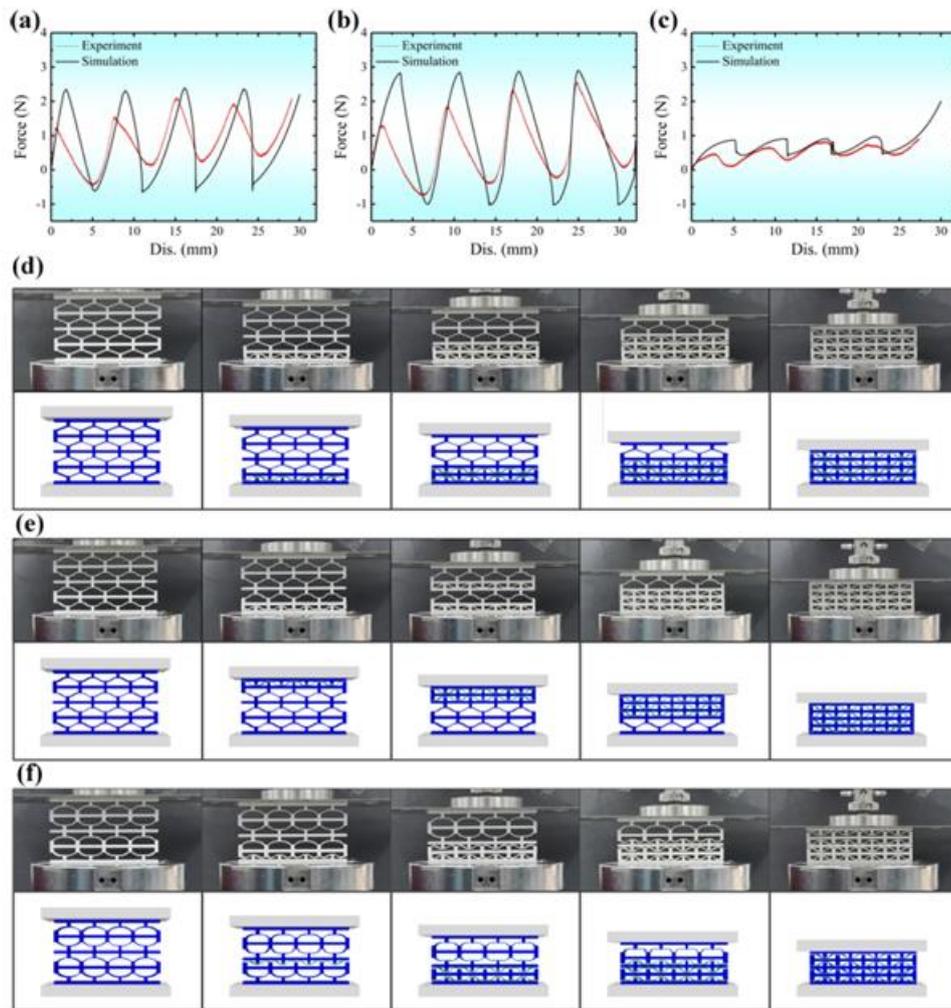


Figura 44 - Curve Forza-Spostamento per travi a) inclinate, b) curve e c) ad arco (Tan et al, 2022)

Nello stesso studio citato in precedenza si evidenziano le differenti risposte delle strutture bistabili al variare dei parametri geometrici.

Si nota dalle curve di risposta forza-spostamento come la forza di picco e la rigidezza iniziale aumentano con l'incremento dei rapporti  $h/L$  e  $t/L$ .

Tuttavia, la relazione tra la forza minima (*valley force*) e questi rapporti di parametro è relativamente complessa. La *valley force* della trave inclinata aumenta all'aumentare di  $t/L$  e diminuisce con l'aumento di  $h/L$ , come mostrato in fig. 45. La relazione tra la *valley force* e i rapporti di parametro della trave curva è la stessa di quella per la trave inclinata. Per l'elemento a trave arcuata, la relazione tra la *valley force* e i rapporti di parametro è evidente: la *valley force* aumenta con l'incremento di  $h/L$  e  $t/L$ , come si può osservare dalla fig. 45.

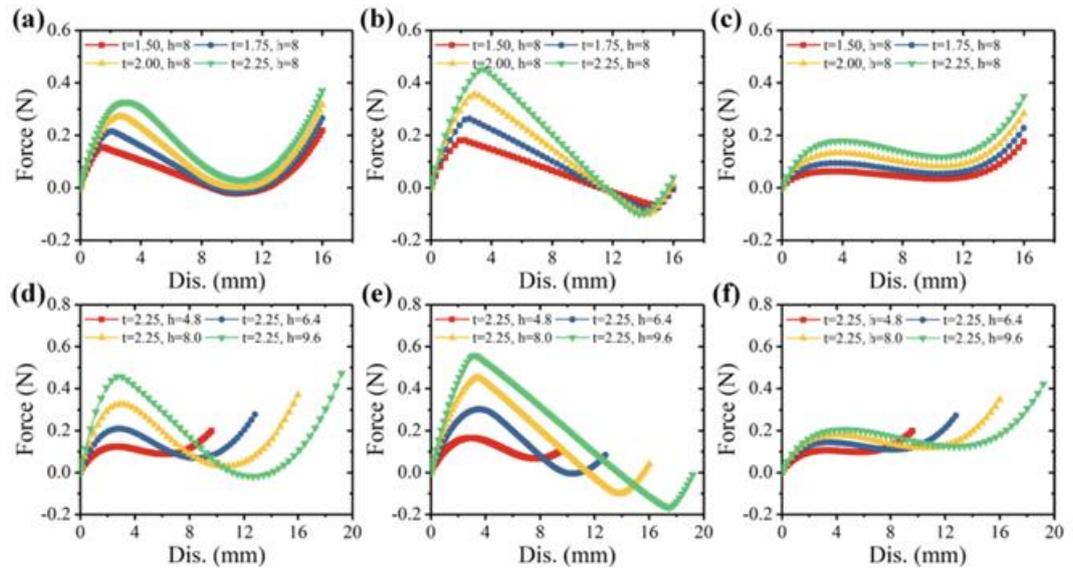


Figura 45 - Diagrammi Forza-Spostamento per travi a) inclinate, b) curve, c) ad arco al variare dei parametri geometrici (Tan et al, 2022)

Nello studio sono inoltre riportati i processi di deformazione per questi tre elementi a trave sono mostrati in fig. 46. Le loro modalità di deformazione sono tutte identiche. Lo sforzo si concentra principalmente alle estremità delle travi, mentre appare poco sforzo nella parte centrale delle travi quando sono completamente compresse.

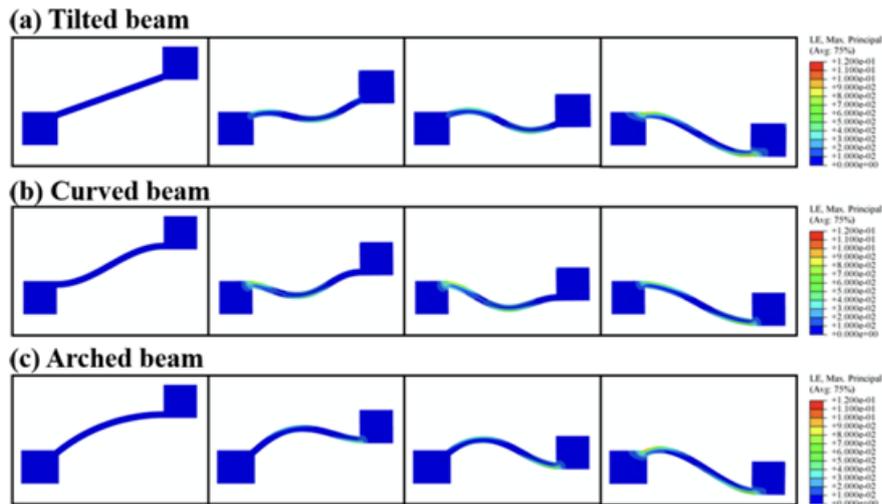


Figura 46 - Processo di deformazione (Tan et al, 2022)

Come si può osservare, lo studio evidenzia come, nel caso dei rapporti  $h/L=0.64$  e  $t/L=0.08$ , gli elementi a trave inclinata e curva sono entrambi bi-stabili, mentre l'elemento a trave arcuata è mono-stabile. Nel caso dei rapporti  $h/L=0.64$  e  $t/L=0.125$  anche la trave inclinata ha un comportamento mono-stabile.

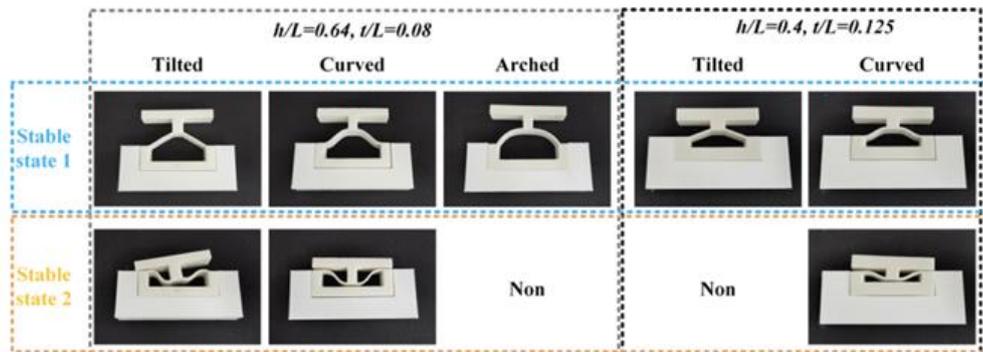


Figura 47 - Comparazione della bistabilità (Tan et al, 2022)

Un altro articolo che tratta il tema della bistabilità nelle strutture è Chen et al. (2021), che propone una struttura a nido d'ape per l'assorbimento dell'energia. Anche questo studio si concentra sulla progettazione di una configurazione innovativa in cui le celle della struttura presentano variazioni regolari di rigidità, contrariamente alle strutture tradizionali a rigidità negativa uniforme. L'obiettivo è quello di migliorare l'assorbimento energetico e il controllo delle vibrazioni attraverso una distribuzione ottimizzata della deformazione. Attraverso una combinazione di simulazioni numeriche e prove sperimentali, l'articolo dimostra come la struttura possa offrire prestazioni superiori rispetto alle configurazioni convenzionali, sia in termini di capacità di assorbimento di energia sia di isolamento dalle vibrazioni, aprendo nuove possibilità per applicazioni in ambito ingegneristico.

La struttura innovativa illustrata nell'articolo citato è illustrata nelle fig. 48 come un modello tridimensionale, in cui ogni cella unitaria è costituita da pareti di irrigidimento e una trave sinusoidale. Quando una forza verticale viene applicata al centro della trave sinusoidale, la trave subisce un'instabilità di tipo buckling (instabilità elastica).

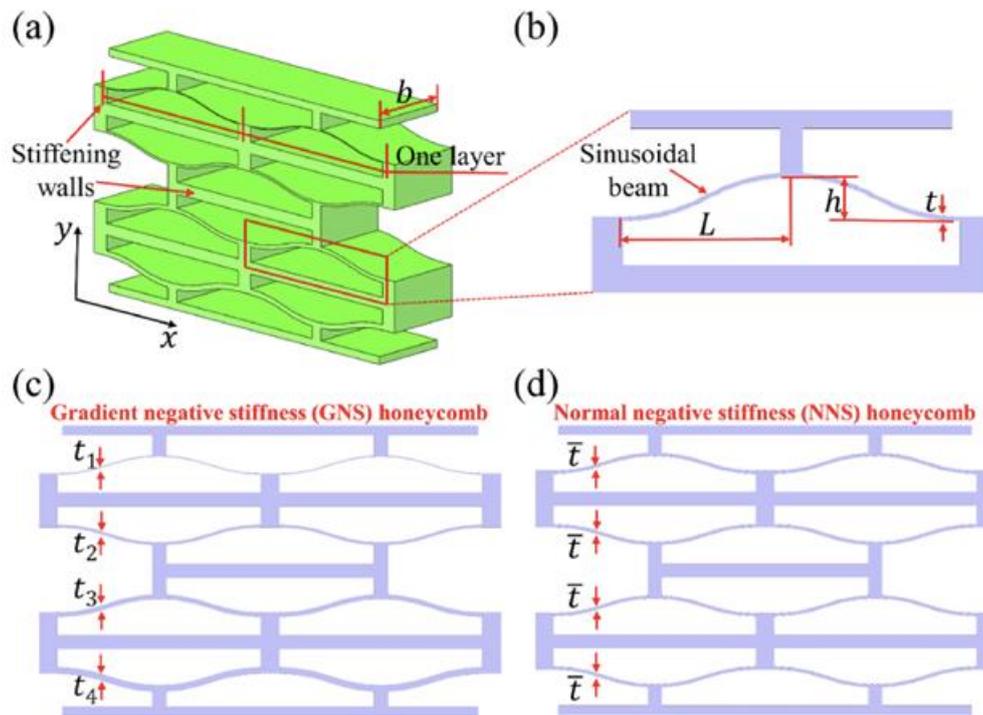


Figura 48 - Geometria delle configurazioni GNS e NNS (Chen et al, 2021)

La geometria della trave sinusoidale è espressa con una specifica equazione matematica, che rappresenta la curva in funzione della lunghezza e dell'altezza della trave. I parametri geometrici della trave curva includono lo spessore in piano ( $t$ ), la lunghezza ( $L$ ), l'altezza ( $h$ ), la profondità ( $b$ ) e il numero di celle in uno strato ( $n$ ). Tutte le travi sinusoidali sono connesse mediante pareti di irrigidimento. La presenza di queste pareti è fondamentale per evitare un'espansione orizzontale delle travi curve, che altrimenti impedirebbe l'instaurarsi del comportamento di snap-through, riducendo l'effetto di rigidità negativa.

Questa progettazione consente quindi di costruire l'intera struttura a nido d'ape sfruttando unità con travi curve di diverso spessore, garantendo così una variazione graduale delle proprietà meccaniche lungo tutta la struttura.

Il processo di fabbricazione della struttura discussa nello studio non è quello tradizionale a causa della complessità geometrica. La produzione additiva (Additive Manufacturing, AM), in particolare la sinterizzazione laser selettiva (Selective Laser Sintering, SLS), si è rivelata quella maggiormente adatta. La tecnologia SLS offre molti vantaggi, inclusa la capacità di realizzare strutture complesse e cave in diversi materiali e dimensioni, con un'elevata precisione di stampa (fino a 0,05 mm), costi di produzione ridotti e un elevato utilizzo dei materiali, poiché la struttura non necessita di supporti durante il processo di fabbricazione.

Nel processo di fabbricazione, è stato scelto la poliammide (PA) come materiale, grazie ai suoi vantaggi in termini di costo, resistenza, capacità di sopportare alte temperature e buona duttilità.

Anche nel caso di questo studio proposto, tutti i test sperimentali sono stati accompagnati da delle analisi FEM in modo da poter comparare i risultati. I risultati dello studio evidenziano un diverso comportamento tra due tipi di strutture: Gradient Negative Stiffness (GNS) e Normal Negative Stiffness (NNS). La prima è una struttura progettata con un gradiente di rigidezza, cioè con variazioni progressive nello spessore all'interno della struttura, che permette di migliorare la distribuzione della deformazione. La seconda ha delle unità strutturali con spessore uniforme e, di conseguenza, tutte le celle reagiscono in modo simile durante la compressione, senza una progressiva variazione di rigidezza tra gli strati.

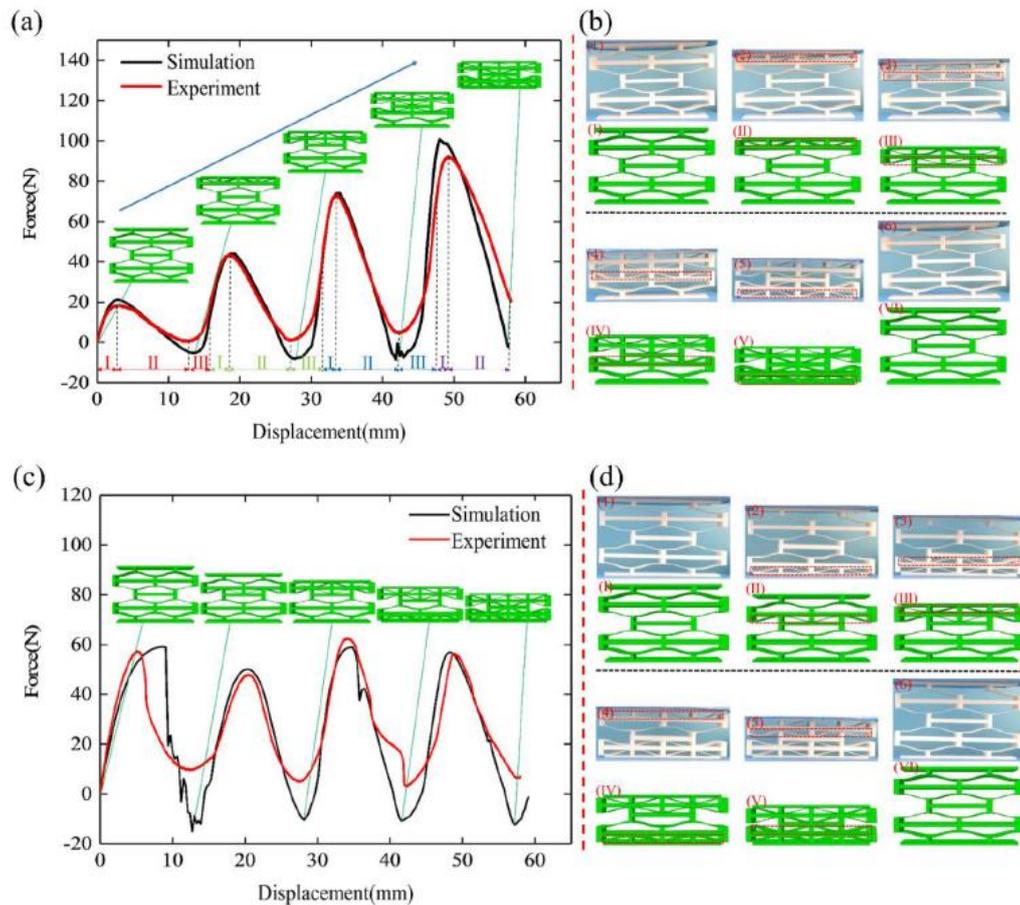


Figura 49 - Risposta Forza-Spostamento di a) GNS e b) NNS (Chen et al, 2021)

La configurazione a gradiente dei GNS aiuta a prevenire l'instabilità asimmetrica locale. La deformazione avviene in modo più controllato e sequenziale, iniziando dagli strati con minore spessore e aumentando con l'incremento della rigidezza. La NNS tende invece a sviluppare instabilità asimmetriche locali anche durante la compressione. Questa instabilità può portare a collassi improvvisi in alcuni strati, riducendo l'efficienza complessiva nell'assorbimento energetico.

Dal punto di vista delle prestazioni di assorbimento energetico, le strutture GNS assorbono più energia per unità di massa rispetto alle NNS, migliorando

L'assorbimento energetico specifico (SEA). Il design a gradiente permette di mantenere un alto livello di assorbimento anche dopo numerosi cicli di compressione.

Questi risultati sono stati confermati dai test ciclici. Sono infatti stati eseguiti 30 cicli di compressione e decompressione con un tasso di spostamento costante di 5 mm/min nelle due configurazioni GNS e NNS.

Nei GNS le proprietà meccaniche cambiano a malapena con l'aumentare del numero di cicli. Questo indica un comportamento elastico della struttura, che impedisce la formazione di deformazioni locali plastiche imprevedibili.

Questi risultati confermano che la struttura può supportare una deformazione significativa senza compromettere le sue capacità di assorbimento energetico.

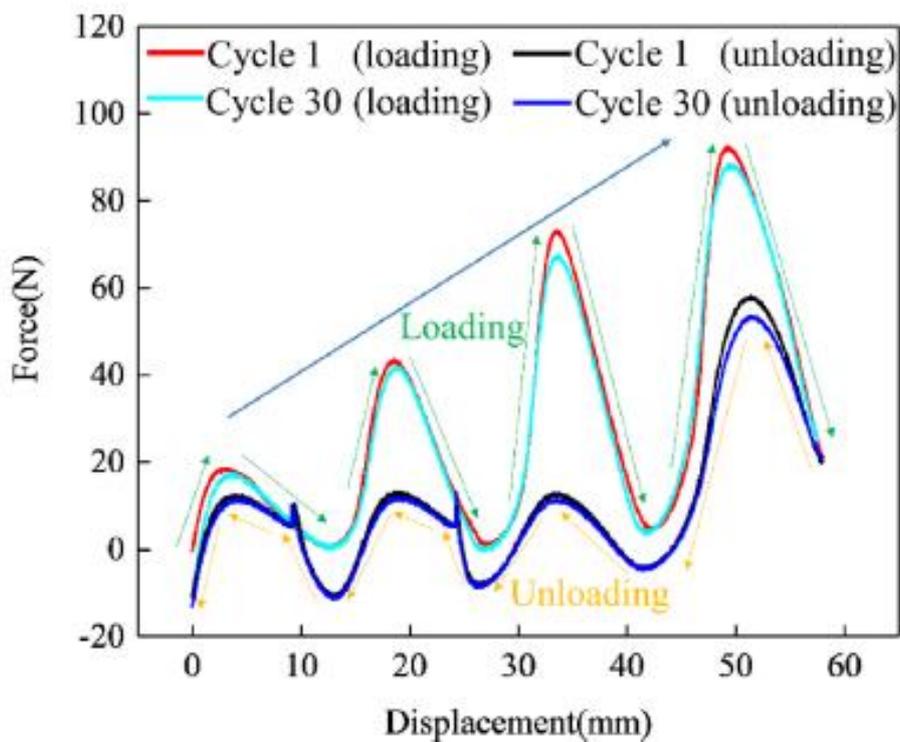


Figura 50 - Curva forza spostamento del Cyclic Test nei GNS (Chen et al, 2021)

Le strutture NNS, pur mostrando una certa resistenza, sono penalizzate dall'assenza di un gradiente di rigidezza, che porta ad un'instabilità asimmetrica locale e a prestazioni di assorbimento energetico inferiori.

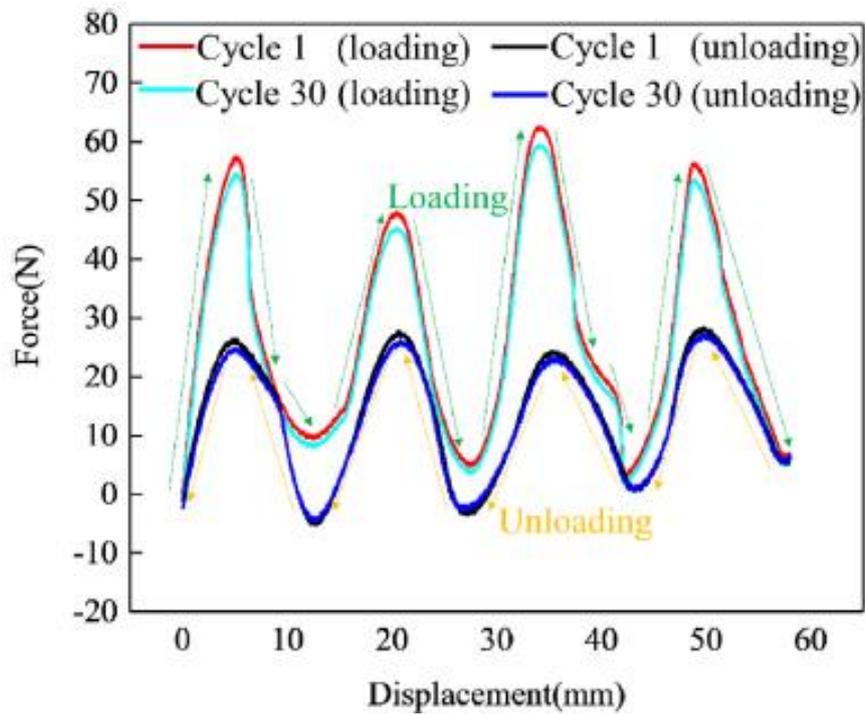


Figura 51 - Curve Forza-Spostamento del Cyclic Test nei NNS (Chen et al, 2021)

Un parametro che dà un'indicazione dell'energia assorbita è l'MCF, o Mean Compression Force, cioè la forza media necessaria a comprimere la struttura a nido d'ape. Questo parametro viene calcolato come di seguito:

$$MCF = \frac{EA}{\delta}$$

Dove:

- EA è l'energia totale assorbita durante la compressione;
- $\delta$  è lo spostamento complessivo durante la compressione.

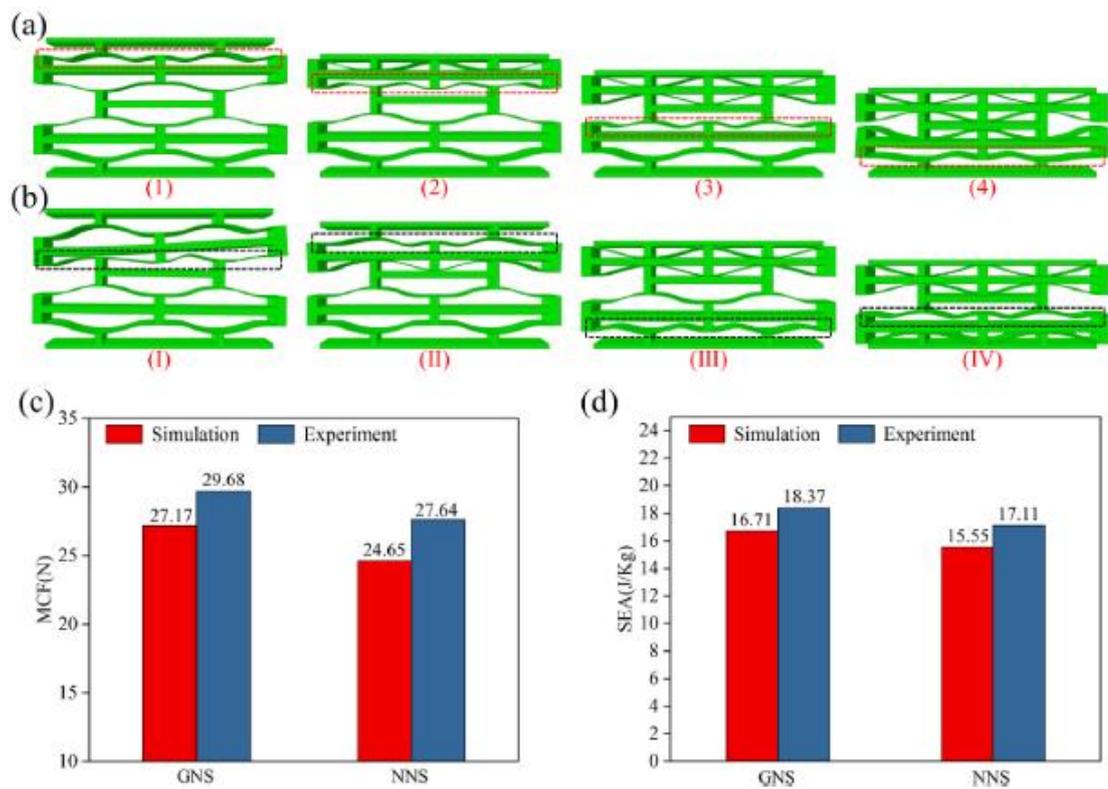


Figura 52 - MCF e SEA per GNS e NNS (Chen et al, 2021)

Quest'ultimo set di dati evidenzia una volta ancora come in entrambi i parametri considerati, le strutture GNS hanno maggiore capacità di assorbimento di energia, sia dal punto di vista sperimentale che simulativo.

## 4.2 Modellazione della trave sinusoidale

### 4.2.1 Introduzione alla modellazione

In questo capitolo si descrive il processo di modellazione del dispositivo, progettato per rispondere in modo ottimale a sollecitazioni dinamiche, come quelle indotte da eventi sismici. Il sistema è costituito da un pannello di forma sinusoidale in acciaio accoppiato a un pannello in legno XLAM (fig 53).

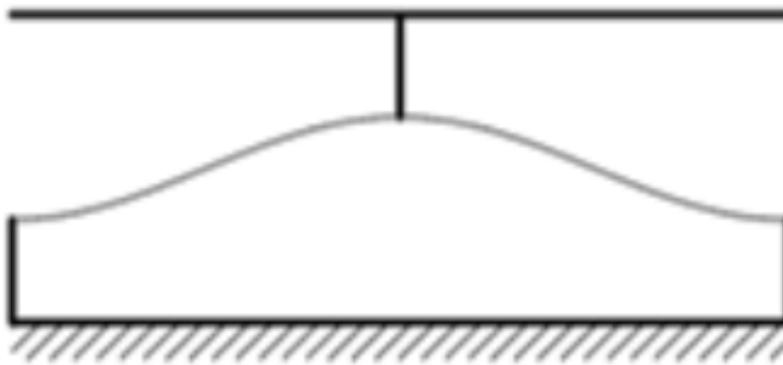


Figura 53 - Geometria del dispositivo

Il dispositivo sfrutta le proprietà dei Tuned Mass Dampers mediante la massa vibrante in legno e quelle dei metamateriali tramite il pannello sinusoidale.

La configurazione geometrica del pannello in acciaio, che ha le proprietà dei metamateriali, viene utilizzata per raggiungere un comportamento bistabile. Questo comportamento permette al sistema di assorbire e dissipare l'energia indotta da sollecitazioni esterne, contribuendo alla mitigazione delle vibrazioni.

Il pannello sinusoidale e la massa vibrante sono collegati mediante dei pannelli in acciaio rigidi che, come visto nel paragrafo precedente, aiutano ad ottenere un comportamento bistabile.

L'obiettivo principale della modellazione è stato quello di ottimizzare la geometria del dispositivo, in modo tale che il pannello entri in stato di bistabilità quando sottoposto a un carico sismico. Per ottenere questo risultato, è stata eseguita un'analisi parametrica, che ha consentito di individuare le configurazioni geometriche più efficaci.

La verifica di queste configurazioni è stata effettuata mediante analisi dinamica non lineare (time history), che simula il comportamento del sistema sotto un'azione sismica.

In questo capitolo, vengono dettagliati i principi dell'analisi effettuata, le assunzioni adottate, le caratteristiche geometriche principali e i parametri considerati

nell'ottimizzazione. Successivamente, saranno presentati i risultati dell'analisi time history, che confermano il raggiungimento della bistabilità desiderata e illustrano il comportamento del sistema sotto carichi sismici.

#### 4.2.2 Geometria e materiali del pannello

La scelta della geometria ottimale del dispositivo, rappresentata in figura 54, è stata effettuata mediante un'approfondita analisi parametrica del pannello. Questa procedura ha permesso di definire in modo accurato le proprietà geometriche del pannello, orientando la progettazione verso la ricerca e l'ottenimento del fenomeno di bistabilità nel pannello sinusoidale, una caratteristica cruciale per il comportamento meccanico e la risposta dinamica desiderata.

L'analisi parametrica è iniziata con la selezione dei parametri fondamentali dell'equazione che descrive la sinusoide. Il primo passo è stato quindi la scelta e la definizione dei parametri dell'equazione della sinusoide, quali l'ampiezza, la frequenza e la fase della curva sinusoidale:

$$y(x) = A \sin(\omega t + \Phi)$$

Dove:

$A$  è l'ampiezza della sinusoide, pari a 10;

$\omega$  è la pulsazione;

$\Phi$  è la costante di fase, pari a  $\frac{3}{2}\pi$ .

Stabiliti i valori per alcuni parametri fondamentali come l'altezza  $H$ , lo spessore dei collegamenti  $t$ , la larghezza  $h$  e lo spessore della massa vibrante, l'analisi è proseguita variando altri due parametri cruciali: lo spessore del pannello sinusoidale  $s$  e la larghezza  $L$  (fig. 54).

Questa fase di variazione dei parametri  $s$  e  $L$  ha permesso di esplorare come tali dimensioni influenzino direttamente la risposta dinamica e strutturale del pannello. In particolare, i valori sono stati tarati in modo da studiarne l'impatto sulla rigidezza e sulla capacità del pannello di raggiungere e mantenere lo stato di bistabilità.

Attraverso l'analisi combinata di questi parametri, è stato possibile raggiungere un equilibrio tra flessibilità e stabilità, progettando un pannello con proprietà ottimali per resistere e dissipare le sollecitazioni sismiche applicate.

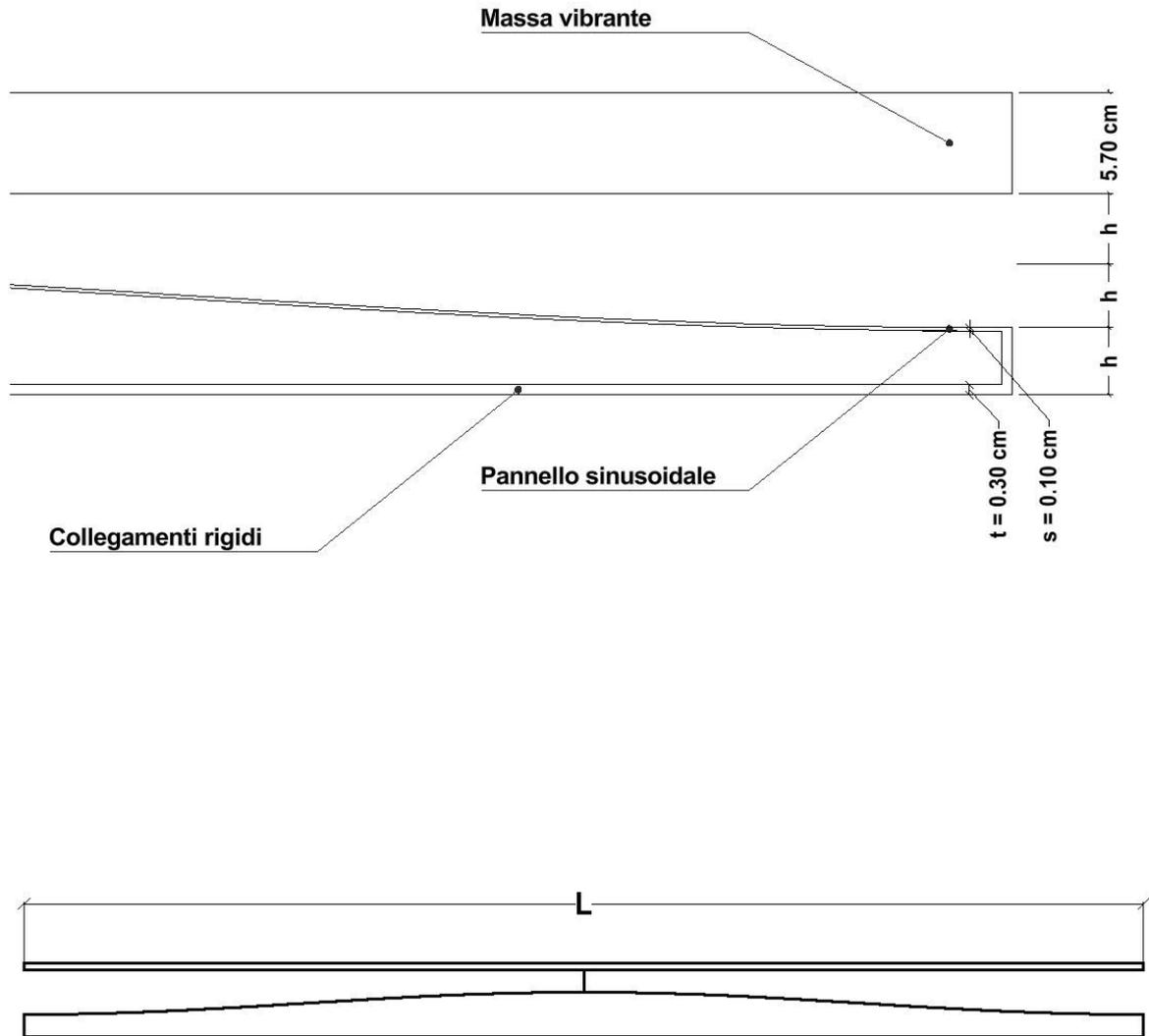


Figura 54 - Vista dall'alto della geometria del dispositivo

La geometria unicellulare concepita in questa fase di analisi rappresenta una base iniziale che potrà essere ulteriormente sviluppata in studi futuri, evolvendo verso configurazioni più complesse e performanti. Come evidenziato nella letteratura citata nei capitoli precedenti, i metapannelli possono essere progettati come strutture multicellulari, in cui ogni cella opera secondo una logica gerarchica.

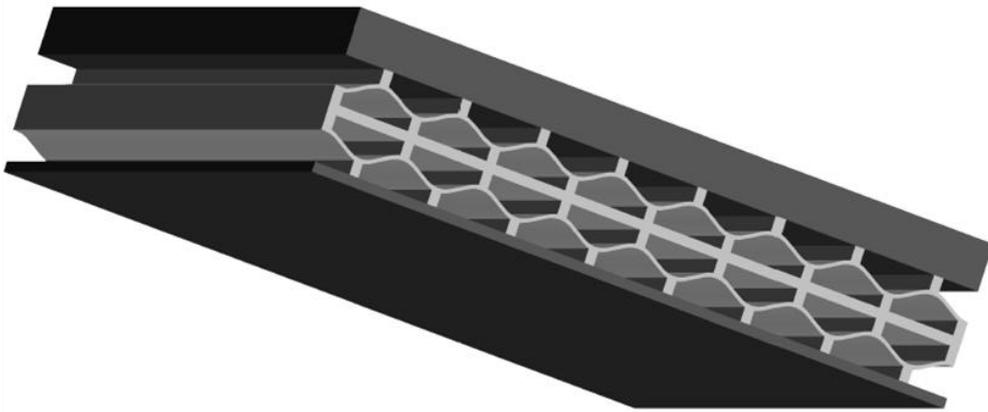
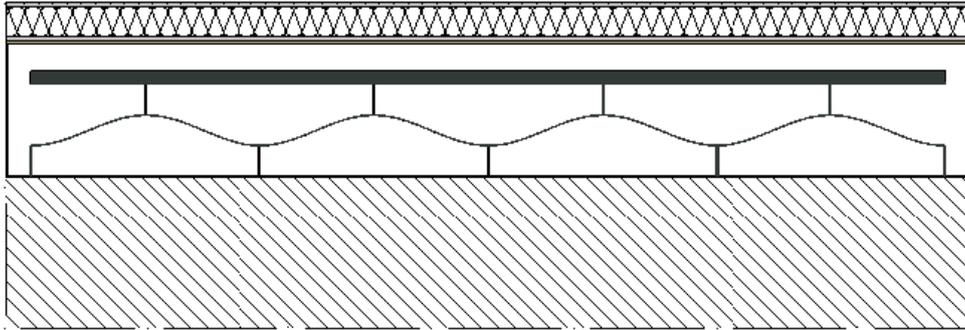


Figura 55 - Metapannello multicellulare

Di seguito i valori dei parametri geometrici considerati nei risultati riportati:

Parametro	Valore	Unità
Altezza H	3,00	m
Spessore t	3,00	mm
Larghezza h	2,00	cm
Spessore XLAM	5,70	cm
Spessore s	1,00	mm
Larghezza L	20, 50 e 100	cm

Tabella 2 - Valori della geometria del dispositivo

La scelta dei materiali per il dispositivo è stata effettuata considerando le esigenze di stabilità, resistenza meccanica e capacità di dissipazione energetica necessarie per il corretto funzionamento del dispositivo nei contesti sismici.

Di seguito si riportano i materiali e i relativi valori delle caratteristiche meccaniche, considerati nella modellazione:

- Per la massa vibrante è stato considerato un pannello XLAM in legno con le seguenti proprietà:

$$E = 11000 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu = 0,3$$

$$\gamma = 600 \text{ Kg/m}^3$$

- Per il pannello sinusoidale e i muri di collegamento è stato considerato un acciaio con le seguenti proprietà:

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$\nu = 0,3$$

$$\gamma = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

### 4.2.3 Modellazione del dispositivo

Anche la modellazione del pannello bistabile è stata effettuata mediante il software Diana FEA, precedentemente introdotto (fig. 56).

E' stato necessario utilizzare una discretizzazione notevolmente fitta della sinusoide in modo da consentire al software di cogliere i fenomeni di instabilità mediante l'analisi non lineare.

L' *element class* assegnata a tutti gli elementi è la classe *regular curved shell* caratterizzata da 8 nodi ciascuno.

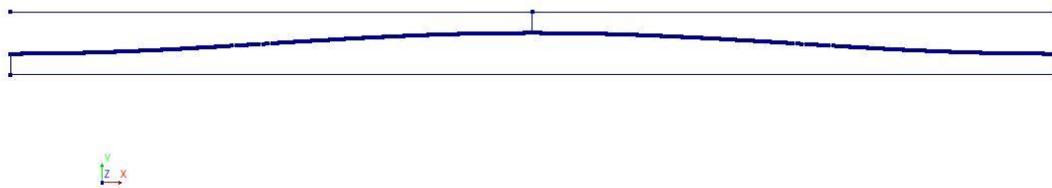


Figura 56 – Vista in pianta su Diana FEA

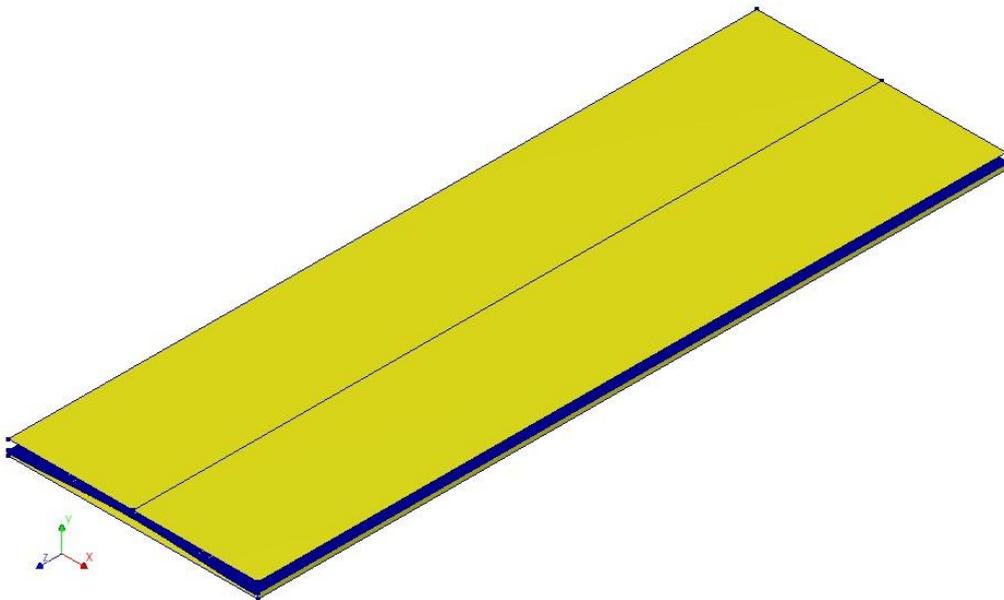


Figura 57 - Modello 3D Diana FEA

Un aspetto fondamentale della modellazione è stato assegnare i vincoli alla struttura (fig. 58).

La struttura è infatti stata pensata per essere vincolata lungo le pareti rigide (fig. 58) in modo tale da agevolare il movimento al pannello sinusoidale e permettere il comportamento bistabile al dispositivo.

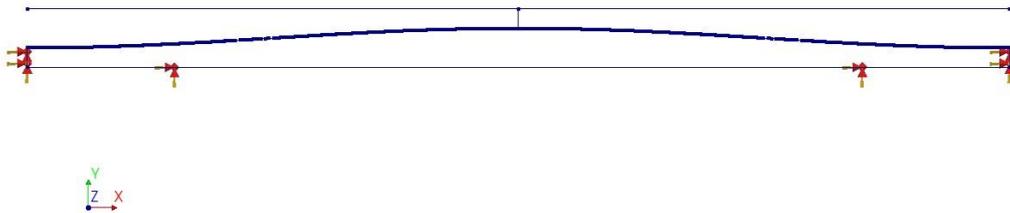


Figura 58 - Assegnazione vincoli modello

Sono stati utilizzati dei vincoli di tipo *face*, bloccando le traslazioni e le rotazioni in tutte le direzioni (fig. 59).

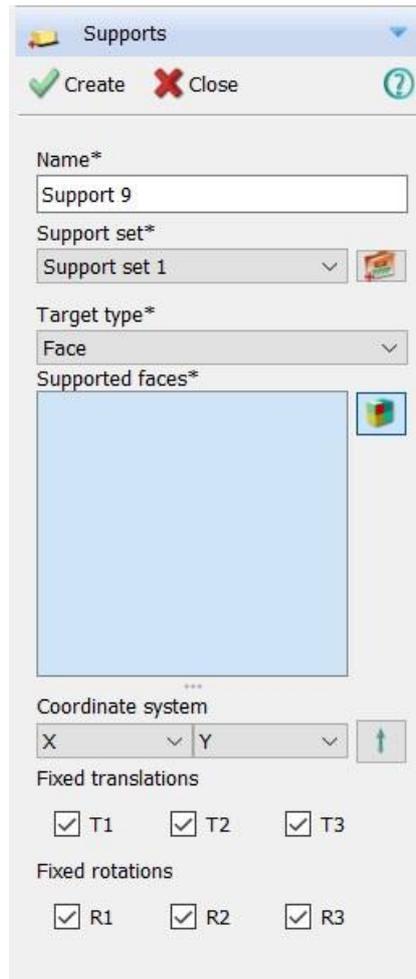


Figura 59 - Vincoli tipo face

#### 4.2.4 Analisi Time History

L'analisi time history è servita a valutare la risposta della struttura in funzione del tempo, sotto l'azione di forzanti note.

Una volta creata la geometria e assegnati i materiali, sono state create due combinazioni di carico: una relativa ai pesi propri e una al carico sismico.

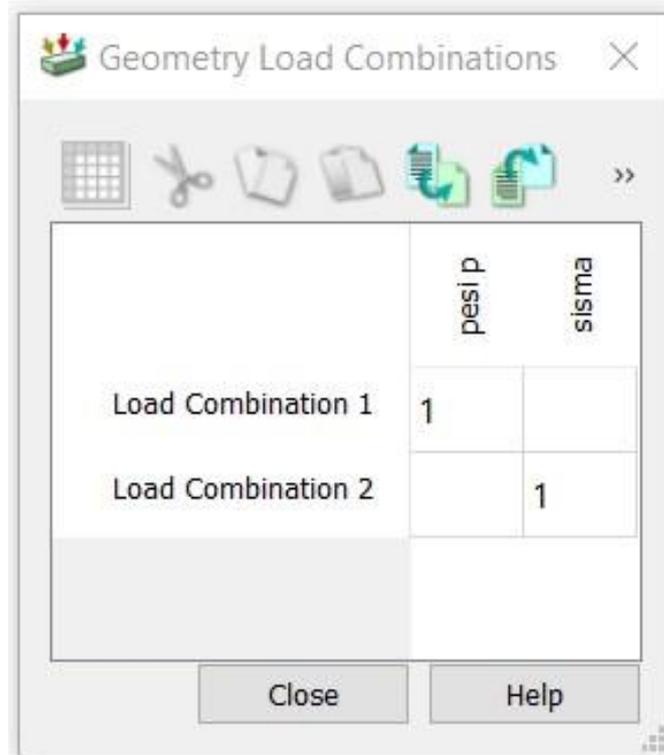


Figura 60 - Combinazioni di carico

Dopodiché è stata definita una funzione dipendente dal tempo, ossia l'accelerogramma, per la combinazione di carico rappresentativa del terremoto (fig. 61).

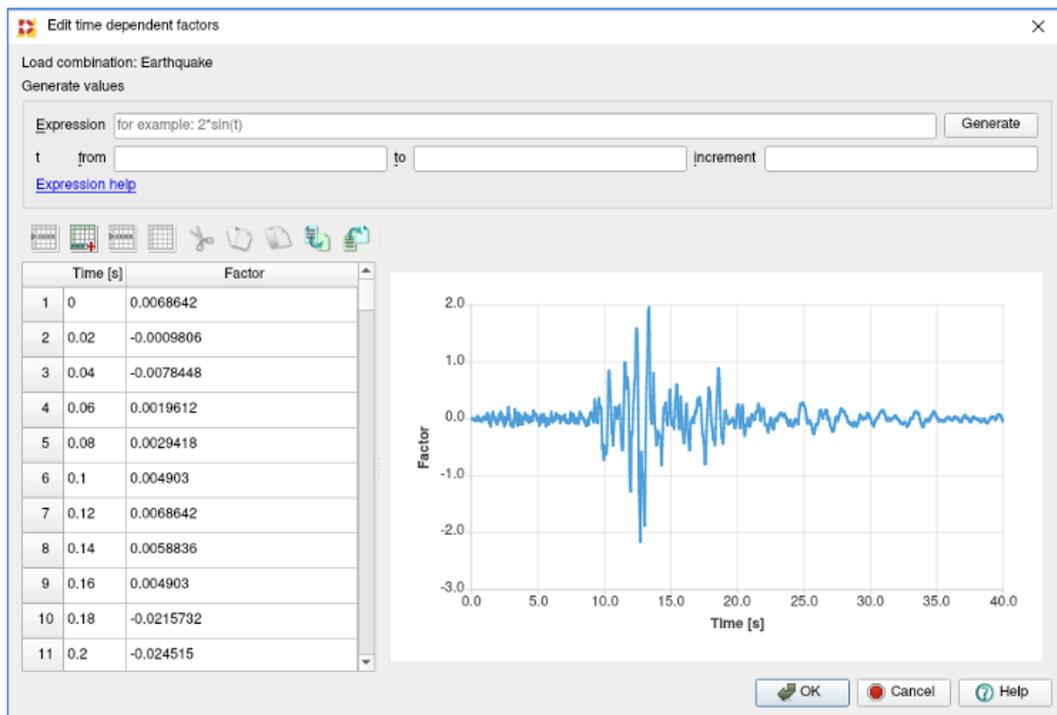


Figura 61 - Input dell'analisi (Terremoto di El Centro, 1940)

Infine, è stata creata l'analisi time history alla quale è stato aggiunto il comando *structural non linear* (fig. 62). In seguito sono stati aggiunti gli *execute block* relativi agli *start step* e ai *time step* (in figura iniziale e vibrazione).

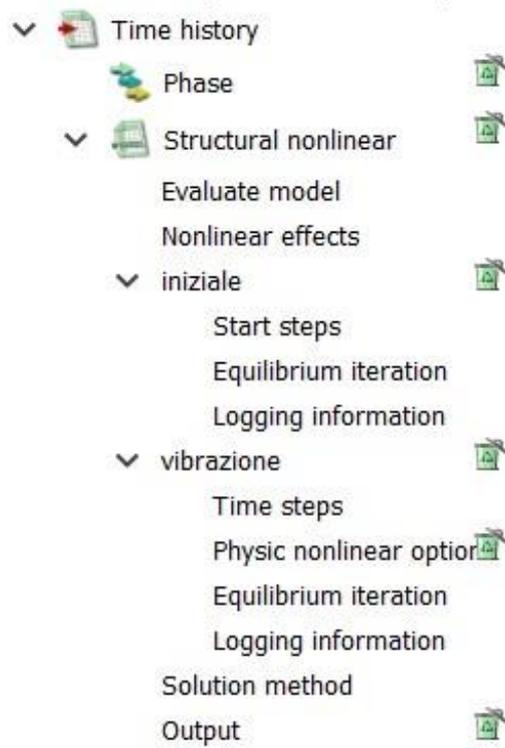


Figura 62 - Analisi Time History

Per quanto riguarda il primo, è stato possibile impostare lo start time, l'*initial stress* e l'*additional load* (fig. 63).

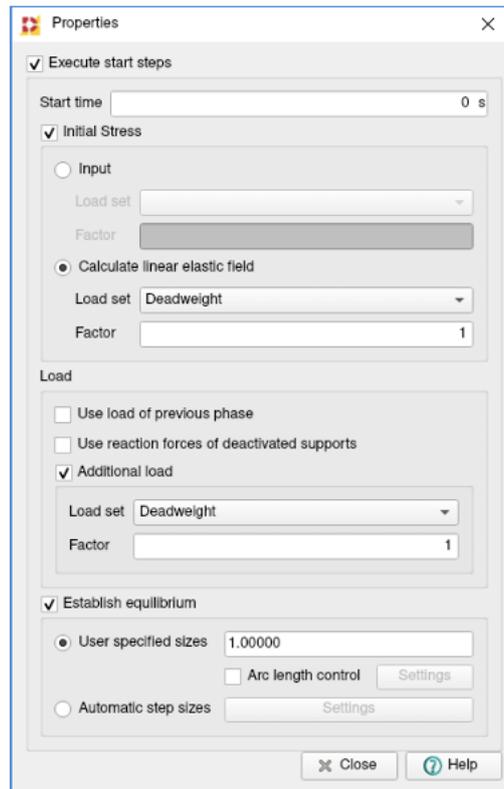


Figura 63 - Start time

Nel caso dei time step sono stati settati la dimensione e la quantità di time step desiderati (fig. 64).

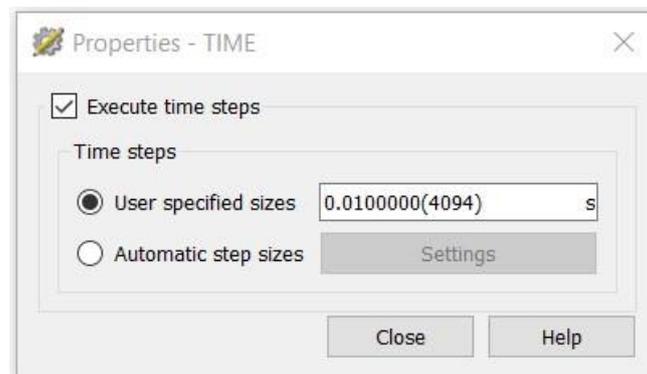


Figura 64 - Time step

## 4.2.5 Risultati delle analisi

Le analisi dinamiche non lineari sono state effettuate considerando come input, la forzante riportata in fig. 61, ovvero, la registrazione del terremoto di El Centro del 1940.

L'analisi parametrica del dispositivo ha dato esito positivo, evidenziando un'evidente bistabilità per una geometria caratterizzata dai valori espressi nella tabella 2 con una larghezza  $L$  del pannello pari a 100 cm.

Di seguito il plot tempo-spostamento relativo al nodo che collega il pannello XLAM con il pannello sinusoidale

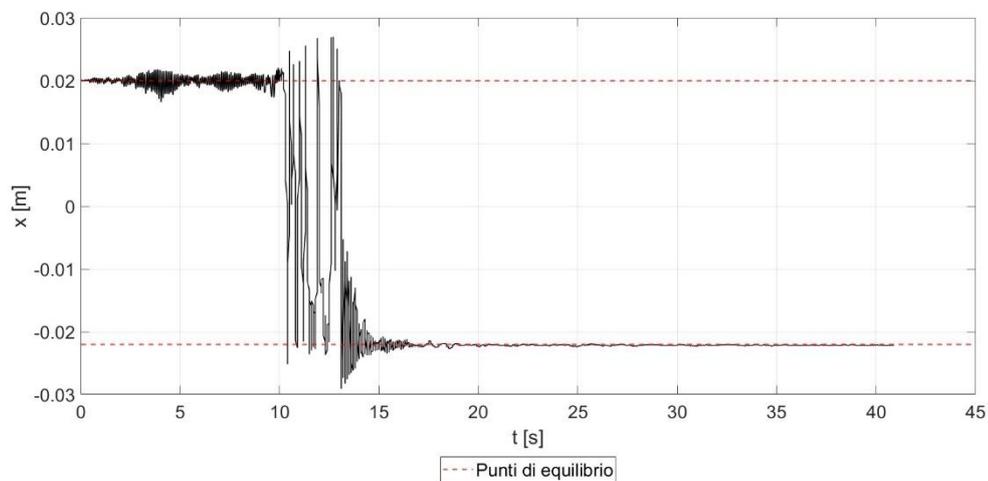


Figura 65 - Plot dello spostamento fuori dal piano del dispositivo del nodo di collegamento tra il pannello XLAM e il pannello sinusoidale

Il grafico mostra il comportamento dinamico del dispositivo in termini di spostamento  $x$  nel tempo  $t$ , evidenziando la presenza di due stati di equilibrio distinti, uno a  $x=0,02$  m e l'altro a  $x=-0,02$  m, tipici di un sistema bistabile. In particolare, nei primi dieci secondi, il dispositivo oscilla attorno alla posizione iniziale di equilibrio  $0,02$  m, mostrando delle oscillazioni di piccola ampiezza, chiamate "intra-wells". Queste oscillazioni di ampiezza ridotta riflettono la capacità del dispositivo di mantenere la configurazione stabile.

Dopo i primi dieci secondi, il grafico evidenzia un rapido scatto verso l'altro stato di equilibrio, situato a  $-0,02$  m. Questo salto, caratteristico dei sistemi bistabili, implica che l'energia accumulata o la forza applicata al sistema ha raggiunto una soglia critica, sufficiente a far superare la barriera che separa i due stati di equilibrio. Successivamente, il sistema mostra oscillazioni tra i due stati di equilibrio.

Infine, osserviamo un'attenuazione progressiva delle oscillazioni, segno che il sistema si sta stabilizzando attorno al secondo stato di equilibrio a  $-0,02$  m. La

capacità del dispositivo di assestarsi in questa nuova posizione di equilibrio, senza ritornare al punto iniziale, indica che il sistema può mantenere questa configurazione stabile indefinitamente, fino a quando non si applica nuovamente una forza in grado di invertire il processo.

Questo comportamento di bistabilità offre notevoli vantaggi nelle applicazioni pratiche. La possibilità di alternare tra due stati di equilibrio stabili rende il dispositivo ideale per sistemi in cui è necessario un isolamento sismico o uno smorzamento, in quanto può adattarsi rapidamente a cambiamenti nelle condizioni esterne e assorbire l'energia delle sollecitazioni sismiche. Inoltre, la distanza tra i due stati di equilibrio fornisce una misura dell'energia richiesta per attivare la transizione, un parametro fondamentale per definire le prestazioni del dispositivo in contesti applicativi.

In sintesi, il grafico non solo conferma la presenza di bistabilità, ma sottolinea anche l'efficacia del dispositivo nel mantenere stabilità in due posizioni distinte, offrendo potenzialità elevate per il controllo e la dissipazione di energia in applicazioni strutturali.

Le due posizioni di equilibrio sono riportate nelle figure 66-67.

Time history  
Phase - iniziale, Start-step 1, Load-factor 1.0000  
Frame 1/120  
Displacements TrDfY  
min: -7.25e-12m max: 1.39e-11m

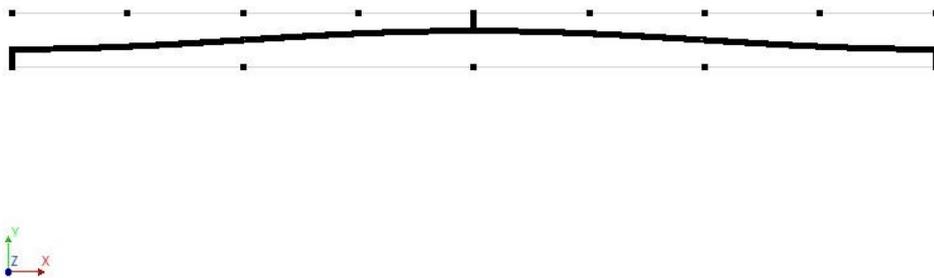


Figura 66 - Prima posizione di equilibrio

Time history  
Phase - vibrazione, Time-step 1167, Time 11.660  
Frame 107/120  
Displacements TrDY  
min: -4.21e-02m max: 1.32e-06m

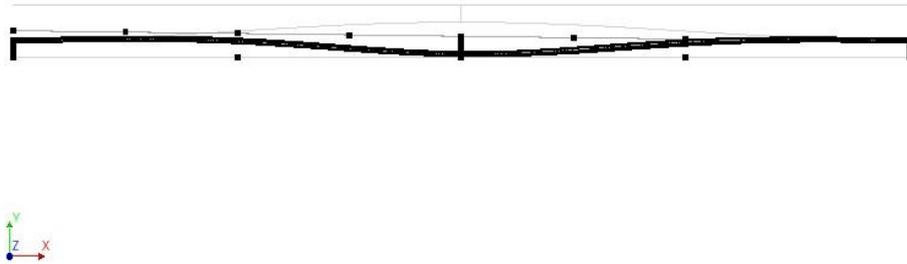


Figura 67 - Seconda posizione di equilibrio

Come precedentemente illustrato, per ottimizzare il comportamento bistabile del dispositivo è stato necessario effettuare un'analisi parametrica sulla geometria. Si riporta in fig. 68 un plot di tre delle diverse configurazioni che sono state analizzate. È evidente come la bistabilità avvenga soltanto per valori di  $L$  pari a 100 cm. Per valori inferiori alla dimensione ottimale, si ottengono degli spostamenti che oscillano attorno alla prima posizione di equilibrio  $x = 0$  m.

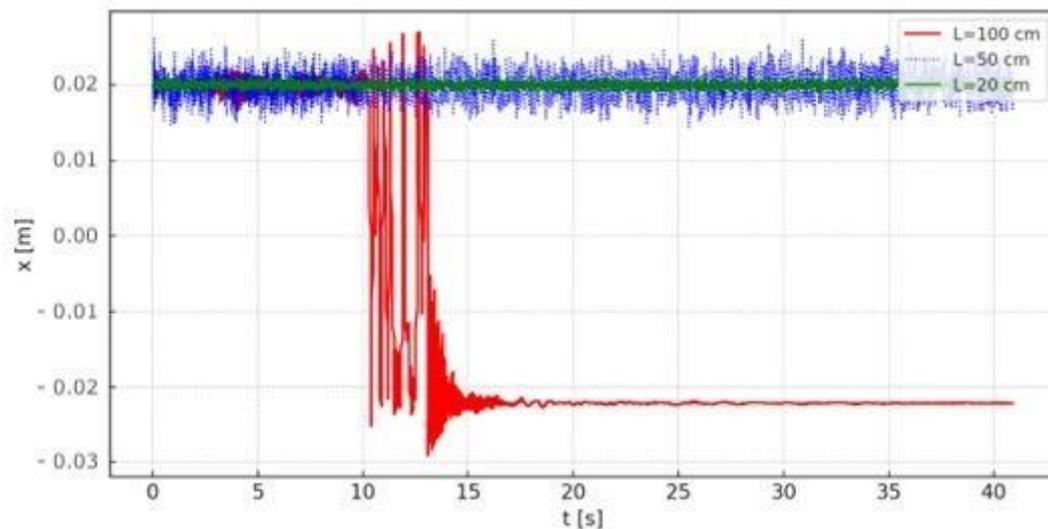


Figura 68 - Confronto dello spostamento in direzione fuori dal piano al variare della geometria

Gli stessi risultati sono evidenziati dal diagramma Forza-Spostamento riportato in fig. 69. Il diagramma presenta una curva non lineare, indicativa di un

comportamento non lineare e bistabile. Questo tipo di risposta suggerisce che il sistema presenta caratteristiche non lineari significative.

La forma del grafico, con dei loop, suggerisce la presenza di cicli di isteresi. Questo comportamento è comune nei sistemi bistabili che possono oscillare tra due stati di equilibrio. In altre parole, il sistema può avere due stati stabili e richiede una quantità di energia sufficiente per passare da uno stato all'altro.

I cicli di isteresi implicano anche che il sistema dissipa energia ad ogni ciclo di carico-scarico. La presenza di loop indica che, durante il caricamento e lo scaricamento, il sistema non segue lo stesso percorso di forza-spostamento, il che porta alla dissipazione di energia sotto forma di calore o deformazione.

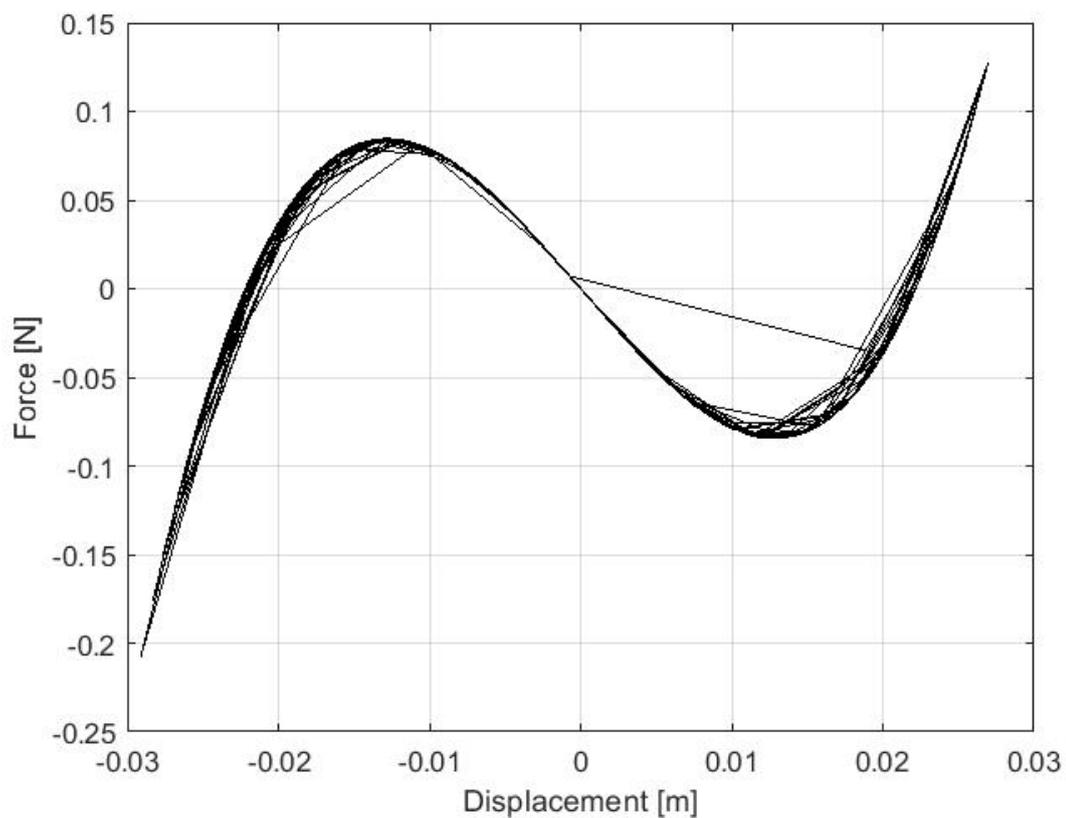


Figura 69 - Diagramma Forza-Spostamento

## Capitolo 5

# Proposta di applicazione sul caso studio

### 5.1 Obiettivi dell'applicazione

Nel contesto specifico del caso studio su Casa Benedino, dettagliato nel Capitolo 4, sono stati impiegati i metapannelli ottimizzati, precedentemente descritti. In particolare, per questo edificio si è optato per una collocazione mirata di due metapannelli, posizionati strategicamente sulla facciata Nord (fig. 70).

I metapannelli, pertanto, sono stati installati con l'obiettivo di migliorare significativamente la risposta dell'edificio alle sollecitazioni sismiche permettendo, in modo efficace, di incrementare la capacità della struttura di assorbire e dissipare le forze orizzontali, che vengono generate dagli eventi sismici. Tale capacità di assorbimento e dissipazione risulta fondamentale per ridurre le oscillazioni che si producono durante un evento sismico e, in tal modo, contribuire a limitare eventuali danni che potrebbero potenzialmente verificarsi all'interno della struttura, proteggendo gli elementi architettonici e le murature portanti.

La funzione principale di questi metapannelli è stata ideata e concepita per stabilizzare la struttura dell'edificio in presenza di sollecitazioni sismiche, garantendo così non solo un livello maggiore di sicurezza per gli occupanti, ma anche la preservazione e conservazione del valore storico e culturale intrinseco dell'edificio.

Un aspetto essenziale e distintivo dell'applicazione dei metapannelli su Casa Benedino è costituito dalla loro natura completamente reversibile e non invasiva. Questo elemento assume particolare rilevanza quando ci si trova ad operare in contesti che coinvolgono edifici storici, dove è di primaria importanza preservare, in modo assoluto, sia l'integrità strutturale dell'edificio sia il suo aspetto visivo originale. La possibilità di rimuovere o modificare i metapannelli senza compromettere né alterare permanentemente le strutture preesistenti rende tale soluzione estremamente flessibile e sostenibile anche nel lungo termine.

Inoltre, qualora si presentasse la necessità di un futuro adeguamento o di una rimozione, i metapannelli possono essere rimossi in modo sicuro, senza lasciare segni o tracce permanenti, consentendo così un ripristino completo dell'edificio nella sua configurazione e stato originale, senza alcuna alterazione visibile. Questa caratteristica risulta particolarmente vantaggiosa, facilitando non solo le operazioni di manutenzione ordinaria, ma anche quelle di aggiornamento strutturale, permettendo di adattare l'intervento nel tempo alle normative sismiche

eventualmente aggiornate o ad altre condizioni di rischio che potrebbero emergere, tutto questo senza la necessità di intraprendere lavori invasivi o modifiche irreversibili all'edificio.

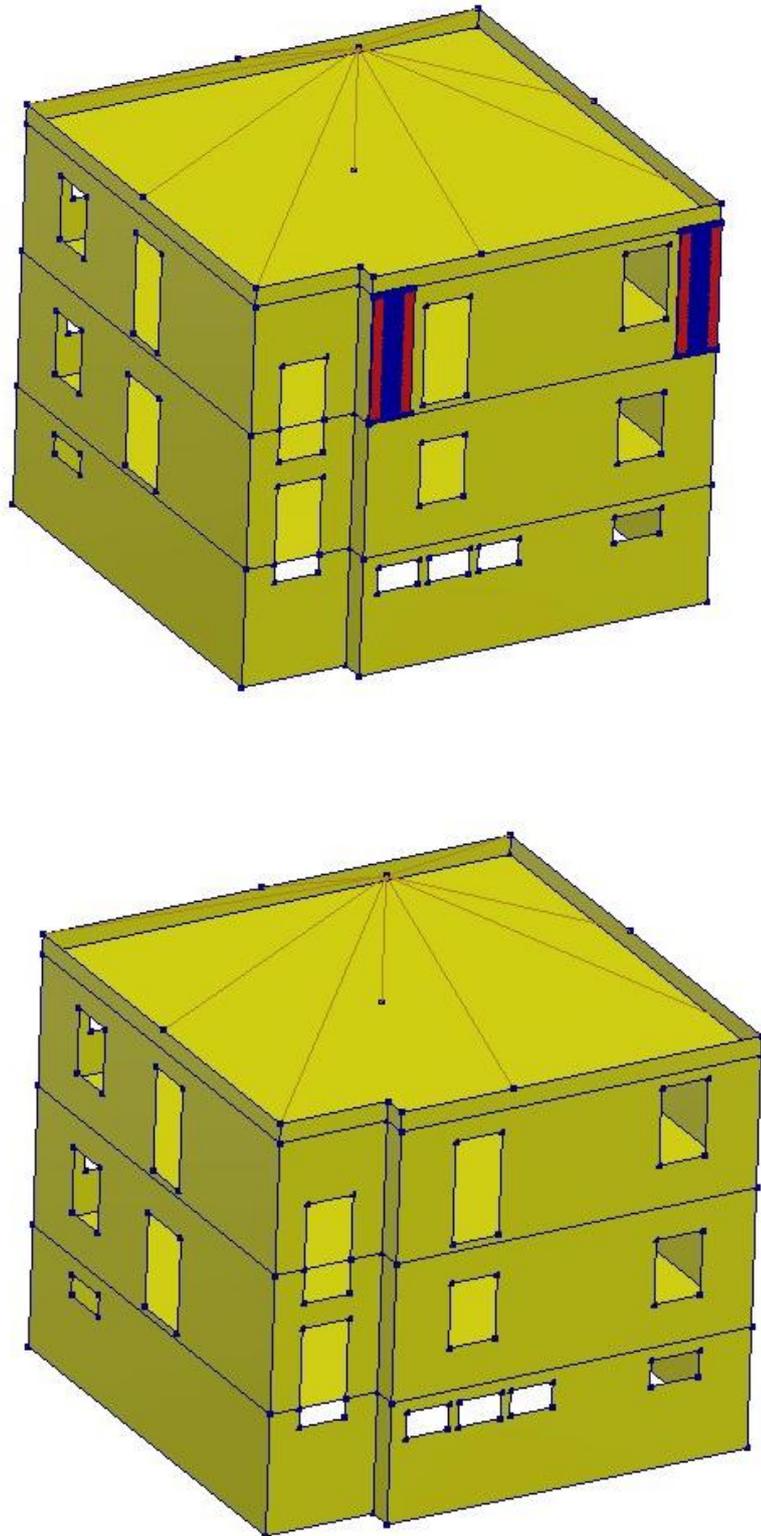
## 5.2 Analisi svolte

L'obiettivo principale delle analisi è stato quello di confrontare le differenze di comportamento della struttura allo stato di fatto e quello della struttura col retrofit implementato.

È stata condotta un'analisi time history (con le stesse modalità del 4.2.3) per il caso studio di Casa Benedino, con l'obiettivo di valutare in che modo i due modelli – con e senza metapannelli – rispondano alle sollecitazioni sismiche, esaminando le differenze nei loro comportamenti dinamici. Questo tipo di analisi, che simula gli effetti di un evento sismico reale applicando in sequenza temporale le forze, consente di studiare e confrontare la risposta strutturale dei due modelli in modo dettagliato, monitorando spostamenti, deformazioni e capacità di dissipazione dell'energia per tutta la durata dell'evento sismico.

Attraverso l'analisi time history, si possono osservare non solo i livelli di spostamento e deformazione raggiunti dai due modelli, ma anche il modo in cui ciascuna configurazione dissipa l'energia sismica assorbita. L'approccio consente di analizzare le diverse fasi della risposta dinamica della struttura, dalle oscillazioni iniziali fino alla stabilizzazione finale.

L'analisi time history rappresenta uno strumento efficace per valutare l'efficacia dei metapannelli come dispositivi di mitigazione sismica. Tale analisi fornisce dati dettagliati sulle modalità di trasferimento dell'energia sismica tra i diversi elementi strutturali, evidenziando come i metapannelli riescano a distribuire le sollecitazioni in modo più equilibrato rispetto alla configurazione priva di metapannelli. I risultati attesi da questa analisi mirano a dimostrare che l'integrazione dei metapannelli migliora la risposta complessiva dell'edificio in condizioni sismiche, dimostrandosi un elemento cruciale non solo per la resistenza strutturale, ma anche per la conservazione di edifici storici soggetti a sollecitazioni sismiche ripetute.



*Figura 70 - Modello Diana FEA retrofit vs no retrofit*

Nell'analisi condotta, come input sismico è stato utilizzato il terremoto di El Centro del 1940 (fig. 71), un evento significativo e frequentemente usato per valutazioni sismiche a causa della sua intensità e delle sue caratteristiche dettagliatamente registrate. Il sisma è stato applicato in una direzione specifica, scelta con attenzione in relazione alla configurazione e alla disposizione dei metapannelli installati sulla struttura di Casa Benedino.

La scelta della direzione si basa sulla modalità di inserimento dei pannelli, i quali presentano la direzione  $y$  fuori dal loro piano. Questo orientamento è stato considerato ottimale per massimizzare l'efficacia dei metapannelli nel dissipare l'energia sismica e nel ridurre le deformazioni e le sollecitazioni orizzontali indotte dal sisma. Orientando il sisma lungo una direzione perpendicolare al piano dei pannelli, si consente ai metapannelli di operare in modo più efficace come dispositivi di dissipazione, favorendo una risposta dinamica che riduce le oscillazioni e preserva la stabilità strutturale dell'edificio

$$E = 0.3E_x + E_y$$

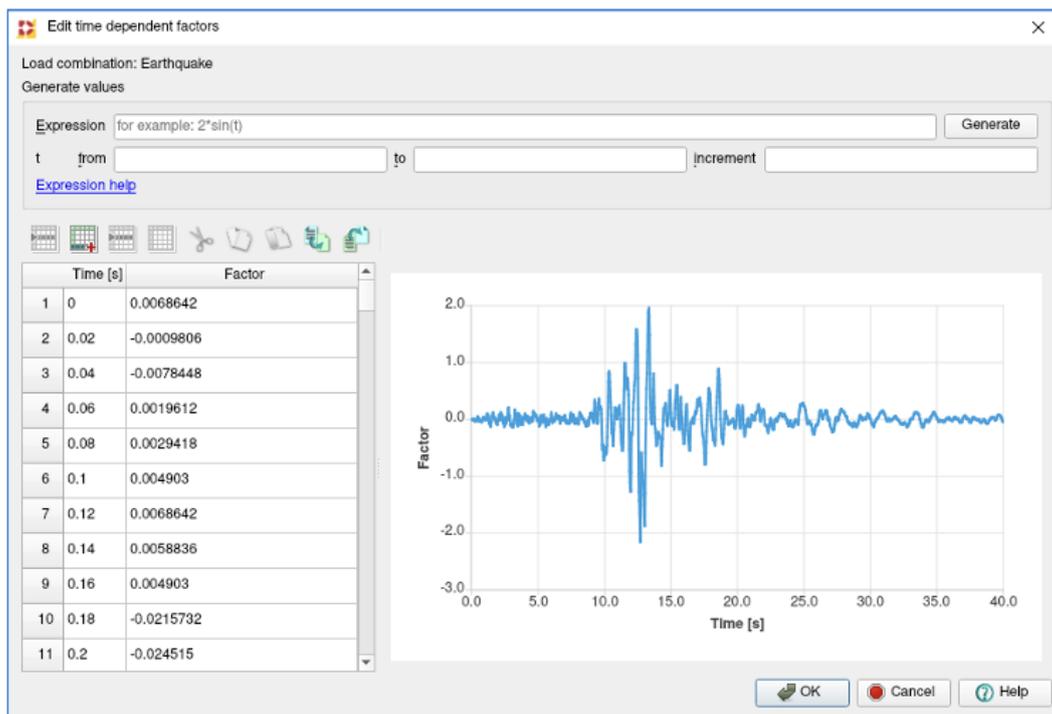


Figura 71 - Input time history

### 5.3 Analisi dei risultati

Il primo risultato analizzato riguarda lo spostamento nella direzione  $y$ , in funzione del tempo, del metapannello applicato al caso studio durante l'evento sismico simulato (fig. 72). Per questa valutazione è stato scelto un nodo chiave, posizionato in corrispondenza del punto di collegamento tra il pannello sinusoidale e la massa vibrante associata al sistema. Questo nodo riveste un ruolo cruciale nel trasferimento delle sollecitazioni tra il metapannello e la struttura principale, poiché si trova nella posizione strategica di interfaccia tra il dispositivo dissipativo e l'elemento vibrante.

La scelta di analizzare gli spostamenti di questo nodo è stata motivata dalla necessità di comprendere come le forze sismiche si distribuiscano attraverso il metapannello e quale sia il contributo specifico del pannello sinusoidale nel mitigare le oscillazioni. La rappresentazione degli spostamenti nel tempo ha permesso di osservare la risposta dinamica del sistema in termini di oscillazioni e attenuazioni successive, offrendo un quadro chiaro della capacità del metapannello di assorbire e dissipare l'energia sismica lungo la direzione  $y$ .

Analizzando l'andamento temporale dello spostamento del nodo, è possibile comprendere come il metapannello reagisca alle variazioni di carico e quale sia il grado di smorzamento delle oscillazioni, elemento essenziale per valutare l'efficacia del pannello nel ridurre le deformazioni trasmesse alla struttura. Il comportamento di questo nodo fornisce quindi una rappresentazione diretta dell'effetto stabilizzante e dissipativo del metapannello, evidenziando le caratteristiche specifiche del collegamento tra il pannello sinusoidale e la massa vibrante e contribuendo a una migliore interpretazione dei benefici del retrofit strutturale su Casa Benedino.

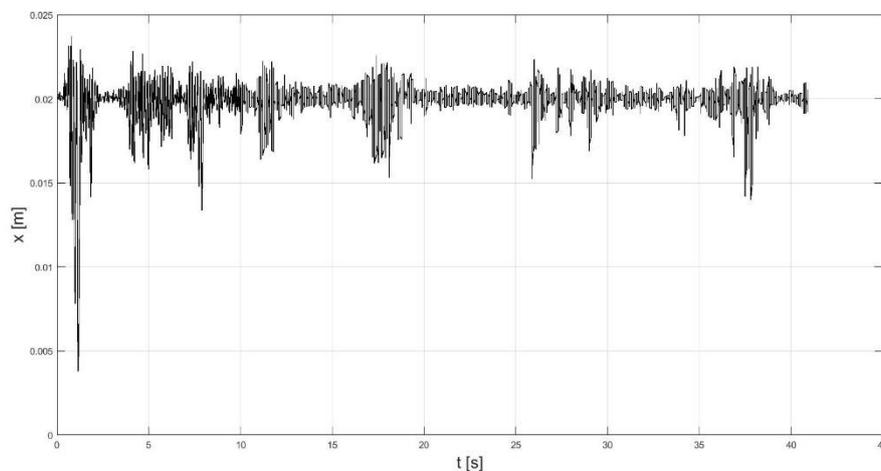


Figura 72 - Grafico Spostamento-Tempo del Metapannello applicato al caso studio

Il grafico evidenzia significativi spostamenti in direzione  $y$  del pannello sinusoidale, che tuttavia non riesce a raggiungere lo stato di bistabilità. Nonostante le condizioni di sollecitazione siano le medesime di quelle analizzate nel capitolo precedente (dove la bistabilità del pannello era stata ottenuta), in questo caso la struttura principale smorza parzialmente la forza trasmessa al metapannello. Tale smorzamento riduce l'intensità dell'input dinamico applicato al pannello sinusoidale, impedendogli di attivare il comportamento bistabile.

Lo stesso spostamento è stato tracciato in fig. 73, al fine di confrontare le differenze di spostamento tra il nodo del pannello, come illustrato in fig. 72, e il corrispondente nodo situato sulla muratura. Questo confronto permette di comprendere come le oscillazioni si distribuiscano tra il metapannello e la muratura stessa, fornendo indicazioni sulle differenze di risposta dinamica e sull'efficacia del pannello nel ridurre le deformazioni trasmesse alla struttura. Analizzando queste variazioni, è possibile valutare l'influenza del metapannello sulla stabilità e sull'assorbimento delle forze sismiche rispetto alla muratura.

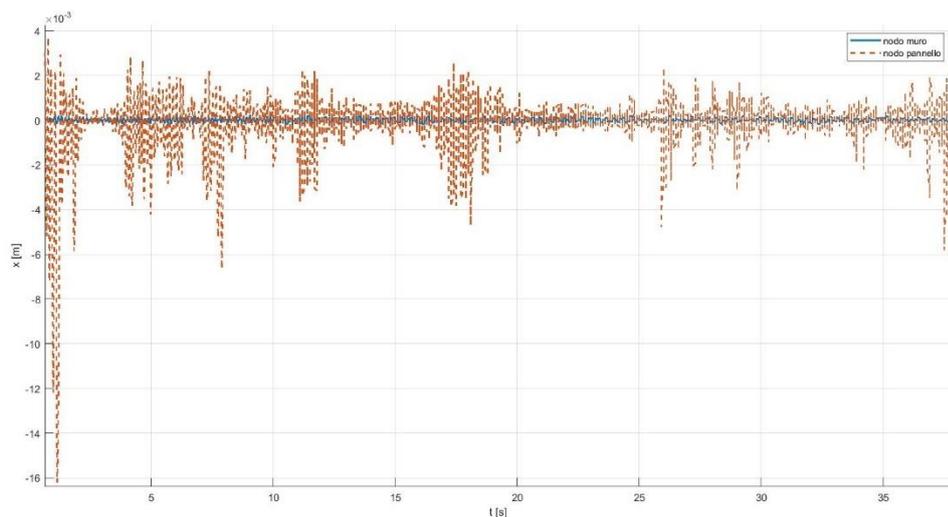


Figura 73 - Grafico Spostamento tempo per caratterizzare le differenze di spostamento tra il pannello sinusoidale e il pannello murario

L'analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione time history, applicata sia alla struttura con retrofit tramite metapannelli sia alla configurazione originale priva di interventi, ha permesso di osservare e confrontare le risposte dinamiche dell'edificio in modo dettagliato. In particolare, sono stati tracciati i grafici degli spostamenti nella direzione  $y$  per un nodo specifico della struttura, evidenziato nella figura (fig. 74), scelto come punto di riferimento per la valutazione degli effetti del sisma.

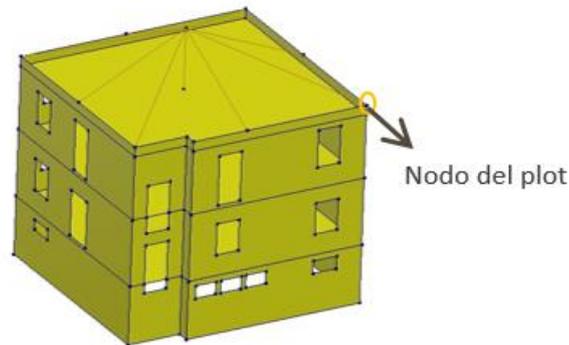


Figura 74 - Nodo considerato nei risultati

Segue quindi il diagramma spostamento-tempo relativo al nodo indicato, confrontando il comportamento del modello con pannelli metastabili rispetto a quello senza pannelli. Questo grafico consente di visualizzare le differenze nella risposta dinamica del nodo nelle due configurazioni, evidenziando l'influenza dei pannelli metastabili sugli spostamenti indotti nel tempo. Il confronto tra i due casi permette di valutare l'efficacia dei pannelli nel ridurre le oscillazioni e nel migliorare la stabilità strutturale sotto sollecitazioni sismiche.

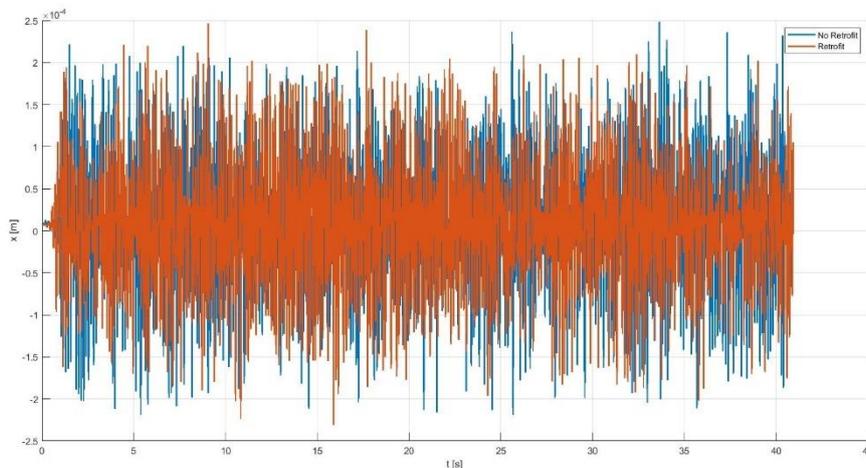


Figura 75 - Differenze di spostamento tra i due modelli

Le simulazioni e i test preliminari eseguiti hanno evidenziato in modo chiaro una riduzione significativa delle deformazioni e delle oscillazioni della struttura durante eventi sismici, grazie all'integrazione dei metapanelli progettati appositamente per questa tipologia di intervento. In particolare, i dati mostrano una riduzione massima degli spostamenti pari al 15,77%, un risultato che sottolinea l'efficacia dei metapanelli nel mitigare le forze orizzontali generate dalle vibrazioni sismiche. Questo risultato supera il valore minimo del 10%, considerato per considerare

l'intervento un miglioramento sismico. Questa diminuzione degli spostamenti consente di ridurre l'accumulo di stress nelle murature e nelle altre componenti portanti, contribuendo ad allungare la vita della struttura. I pannelli infatti assorbono e dissipano l'energia sismica in modo ottimale, prevenendo deformazioni estreme che potrebbero compromettere l'integrità architettonica dell'edificio storico.

Inoltre, l'intervento effettuato su Casa Benedino rappresenta un modello replicabile e scalabile per altre strutture storiche, offrendo un approccio adattabile e versatile. Grazie alla sua capacità di adattarsi a contesti differenti, questa tecnologia potrebbe essere applicata a una vasta gamma di progetti di riabilitazione strutturale.

In conclusione, l'applicazione dei metapannelli su Casa Benedino costituisce un esempio emblematico di come la tecnologia possa integrarsi armoniosamente con il patrimonio storico, facilitando la coesistenza tra ingegneria e conservazione del valore culturale. La soluzione adottata non solo preserva l'estetica dell'edificio, ma assicura anche una protezione efficace contro le forze sismiche, contribuendo a ridurre il rischio di danni strutturali.

L'esperienza di Casa Benedino dimostra quindi che interventi sismici avanzati e rispettosi dell'estetica originale sono possibili, e che la tecnologia può supportare efficacemente la conservazione del patrimonio, garantendo stabilità e sicurezza senza sacrificare l'autenticità e l'integrità storica delle strutture. Questo approccio potrebbe ispirare progetti futuri, favorendo un'attenzione sempre maggiore all'equilibrio tra innovazione e tutela del patrimonio architettonico.

## Conclusioni

La presente tesi ha indagato un approccio innovativo per il miglioramento della risposta sismica degli edifici storici in muratura, sfruttando le proprietà avanzate dei metamateriali meccanici attraverso l'uso di metapannelli bistabili. Questo studio, applicato al caso specifico di Casa Benedino, ha consentito di esplorare a fondo l'impatto dei metapannelli sia in termini di riduzione delle sollecitazioni sismiche che di minimizzazione delle deformazioni strutturali. Partendo dall'analisi dello stato attuale della struttura e delle sue vulnerabilità, l'integrazione dei metapannelli è stata attentamente progettata per rispondere alle specifiche esigenze sismiche, salvaguardando al contempo l'integrità estetica dell'edificio.

I risultati delle simulazioni e dei test preliminari hanno evidenziato come l'utilizzo dei metapannelli possa portare a una significativa riduzione degli spostamenti e delle oscillazioni durante eventi sismici, migliorando in modo tangibile la risposta dinamica della struttura. Questo comportamento è attribuibile alla capacità dei metapannelli di dissipare le sollecitazioni.

Un aspetto chiave è rappresentato dalla possibilità di utilizzare i metapannelli come soluzioni reversibili e non invasive, particolarmente adatte per edifici storici che richiedono interventi rispettosi delle caratteristiche originarie. La reversibilità dei metapannelli rappresenta un valore aggiunto in contesti dove preservare l'integrità della struttura è di primaria importanza, permettendo la rimozione senza lasciare tracce permanenti e consentendo un eventuale ripristino dell'edificio al suo stato originale. Questo approccio consente inoltre un elevato grado di adattabilità, permettendo di installare o rimuovere i metapannelli in funzione delle condizioni di rischio e delle normative sismiche, che potrebbero variare nel tempo. Tali caratteristiche rendono i metapannelli una soluzione flessibile e sostenibile, che si presta a lungo termine alla conservazione degli edifici storici in contesti sismici.

In conclusione, l'adozione dei metapannelli bistabili si rivela una strategia promettente e sostenibile per la protezione sismica degli edifici storici, coniugando efficacia strutturale e rispetto dell'integrità architettonica.

## Bibliografia

Dizhur, Dmytro & Giaretton, Marta & Giongo, Ivan & Ingham, Jason. (2017). Seismic retrofit of masonry walls using timber strong-backs.

Alessandra Marini, Chiara Passoni, Andrea Belleri, Francesca Feroldi, Marco Preti, Giovanni Metelli, Paolo Riva, Ezio Giuriani & Giovanni Plizzari (2022) Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*

D.A. Pohoryles, T. Triantafillou, D.A. Bournas, F. Da Porto, A. Caprino b, G. Santarsiero (2022). Integrated seismic and energy retrofitting of existing buildings: A state-of-the-art review

Valluzzi, M. R., Saler, E., Vignato, A., Salvalaggio, M., Croatto, G., Dorigatti, G., & Turrini, U. (2021). Nested buildings: an innovative strategy for the integrated seismic and energy retrofit of existing masonry buildings with CLT panels

Giuriani, E. P., Marini, A., & Preti, M. (2016). Thin-folded shell for the renewal of existing wooden roofs

Yu, X., Zhou, J., Liang, H., Jiang, Z., & Wu, L. (2018). Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review

Lu, C., Hsieh, M., Huang, Z., Zhang, C., Lin, Y., Shen, Q., ... & Zhang, L. (2022). Architectural design and additive manufacturing of mechanical metamaterials: a review

Chen, S., Tan, X., Hu, J., Zhu, S., Wang, B., Wang, L., ... & Wu, L. (2021). A novel gradient negative stiffness honeycomb for recoverable energy absorption

Tan, X., Wang, B., Wang, L., Zhu, S., Chen, S., Yao, K., & Xu, P. (2022). Effect of beam configuration on its multistable and negative stiffness properties

Santarsiero, G., Masi, A., & Butenweg, C. (2023). *Identification of European buildings most needing seismic and energy retrofit with a focus on the Italian context*

M. D. I. e dei Trasporti, (2018). DM 17 gennaio 2018. *Norme Tecniche per le Costruzioni, Supplemento ordinario alla "Gazzetta Ufficiale"*

<https://www.ingenio-web.it/articoli/miglioramento-sismico-degli-edifici-esistenti-in-muratura-una-panoramica-degli-interventi-piu-comuni-ed-esperienze-innovative/>

<https://www.ingenio-web.it/articoli/come-si-comportano-le-strutture-in-muratura-sotto-l-azione-del-sisma-i-vari-meccanismi-di-collasso/>

<https://biblus.acca.it/tiranti-e-catene-nelle-murature-progettazione-e-funzioni/>

[https://www.edilportale.com/news/2019/04/focus/materiali-compositi-e-fibrorinforzati-frp-guida-alla-scelta\\_69977\\_67.html](https://www.edilportale.com/news/2019/04/focus/materiali-compositi-e-fibrorinforzati-frp-guida-alla-scelta_69977_67.html)

<https://www.infobuild.it/approfondimenti/fasciature-per-strutture-malate/>