

# PROGETTO NOACRONYM METAISOLATOR

Collaborazione tra l'Università degli Studi di Salerno -  
Provincia di Avellino - Museo Irpino

31 Gennaio 2025

## ***Il Progetto Metaisolator per la Protezione Sismica dei Beni Museali*** **Prof. Fernando Fraternali** ***Università degli Studi di Salerno***

Lavoro in collaborazione con Prof. Ada Amendola  
ed Ingg. Valentina Adinolfi, Giovanni Germano e Sara Antinozzi,  
***Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno***



PROGRAMMA DI VALORIZZAZIONE #NOACRONYM+



*Ministero dello Sviluppo Economico*



Finanziato  
dall'Unione europea  
NextGenerationEU



MUSEO IRPINO



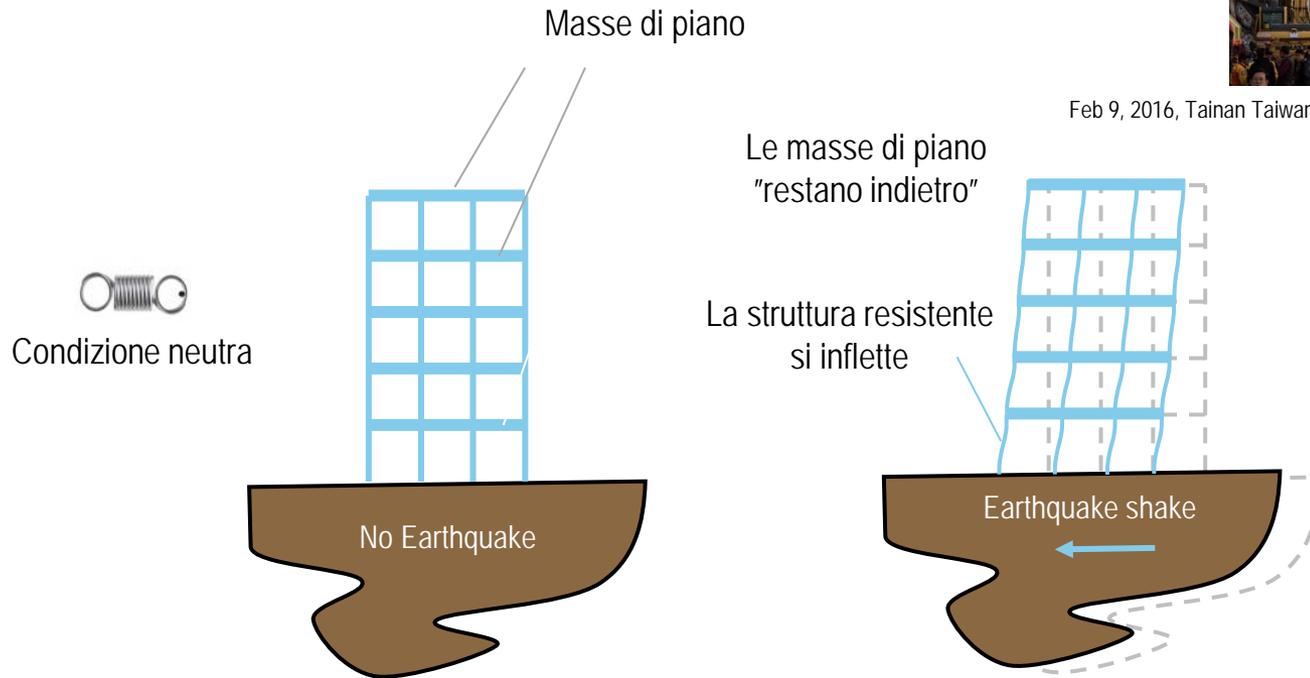


## Indice

- Introduzione
- Principi dell'isolamento sismico degli edifici
- Isolamento sismico di opere d'arte
- Isolatori sismici di tipo commerciale
- Esempi di isolamento sismico di opere d'arte
- Metamateriali pentamode
- Uso di reticoli pentamode confinati per l'isolamento sismico
- Proof-of-Concept METAISOLATOR
- Esperimenti di validazione campione
- Considerazioni conclusive

## INTRODUZIONE

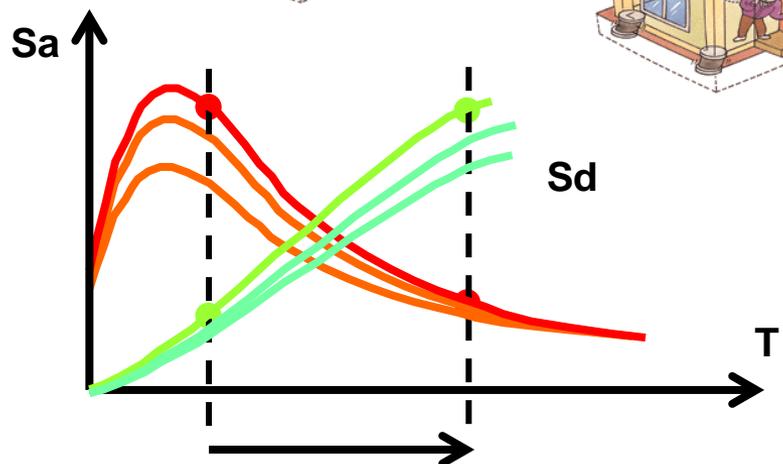
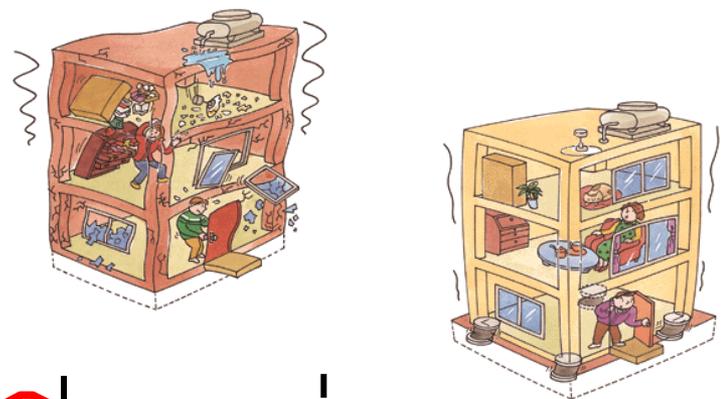
### Risposta di un edificio ad un terremoto



Feb 9, 2016, Tainan Taiwan, 6.4 M (Anthony Wallace/Afp/Getty Images)

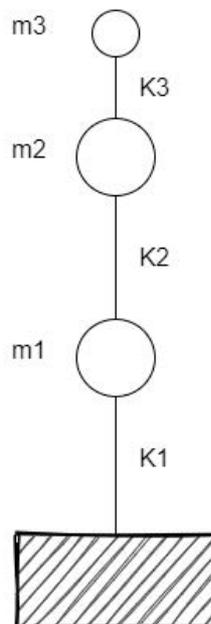
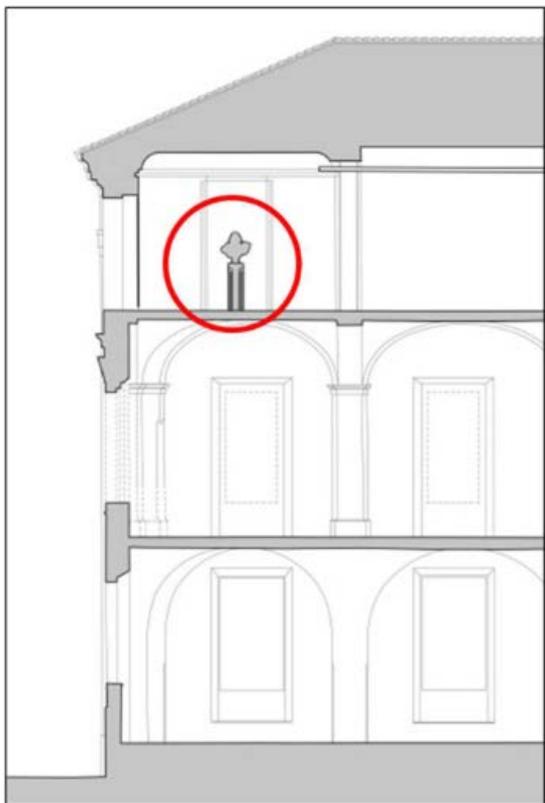


## Ruolo dell'isolamento sismico

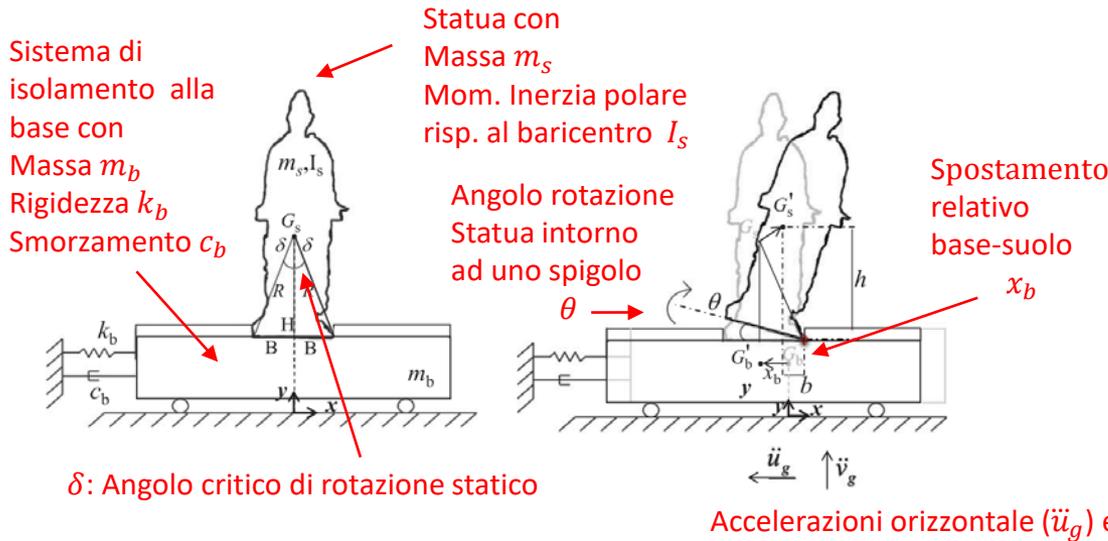


Incremento del periodo proprio di vibrazione

## Risposta di un'opera d'arte in un edificio investito da un terremoto



## Meccanica del movimento di rocking di una statua su isolatore



Condizione di ribaltamento o "rocking". L'opera d'arte inizia il suo movimento oscillatorio quando il momento ribaltante ( $M_{ov}$ ) supera il momento stabilizzante ( $M_{st}$ ):

$$M_{ov} = m_s H |\ddot{u}_g + \ddot{x}_b|$$

$$M_{st} = m_s (g + \ddot{v}_g) B$$

$$M_{ov} \geq M_{st} \Rightarrow |\ddot{u}_g + \ddot{x}_b| \geq \frac{B}{H} (g + \ddot{v}_g)$$

Quando il blocco è in 'rocking', si assume che la rotazione continui senza intoppi da uno spigolo O allo spigolo opposto O'. Si suppone che il 'rocking' avvenga mediante il contatto inelastico tra statua e base. Dalla conservazione del momento della quantità di moto in O' nell'istante anteriore all'impatto e in quello successivo, si deduce

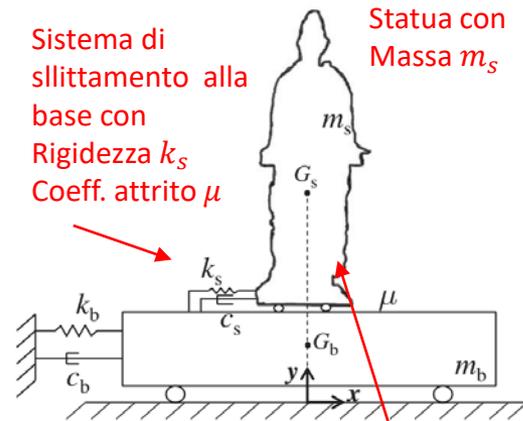
$$I_s \dot{\theta}_1 - m \dot{\theta}_1 2BR \sin \delta = I_s \dot{\theta}_2$$

dove  $\dot{\theta}_1$  e  $\dot{\theta}_2$  sono la velocità angolare prima l'impatto e subito dopo l'impatto. Il rapporto di energia cinetica dopo e prima dell'impatto definisce il coefficiente di restituzione  $r$

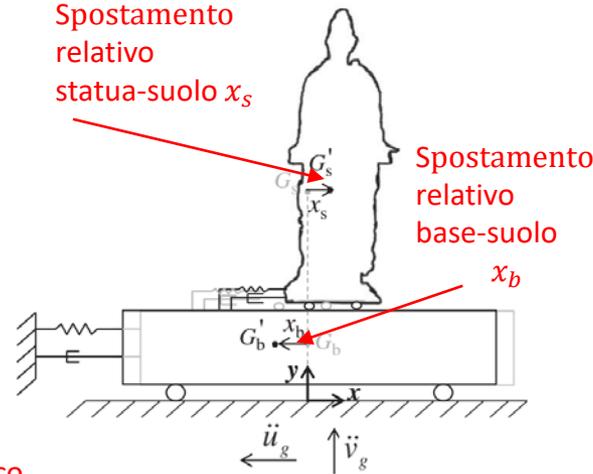
$$r = \frac{\dot{\theta}_2^2}{\dot{\theta}_1^2} = \left( \frac{(\gamma+4) \cot^2 \delta - 2(\gamma+1)}{(\gamma+4) \cot^2 \delta + 4(\gamma+1)} \right) \quad \left( \gamma = \frac{m_s}{m_b} \right)$$

Testi ed immagini riprodotte da: Venanzi, I., Ierimonti, L., & Materazzi, A. L. (2020). Active base isolation of museum artifacts under seismic excitation. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(3), 506-527.[link](#)

## Meccanica del movimento di sliding di una statua su isolatore



$\delta$ : Angolo critico di rotazione statico



Condizione di attivazione "sliding".

L'opera d'arte inizia il suo movimento di sliding rispetto alla base quando la componente orizzontale della forza inerziale  $F_{in}$  è maggiore della forza di attrito statico  $F_{st}$  esercitata sulla superficie di contatto tra il manufatto e la sua base:

$$F_{in} = m_s |\ddot{u}_g + \ddot{x}_b|$$

$$F_{st} = m_s \mu (g + \ddot{v}_g)$$

$$F_{in} \geq F_{st} \Rightarrow |\ddot{u}_g + \ddot{x}_b| \geq \mu (g + \ddot{v}_g)$$

Prima dell'attivazione dello slittamento, il movimento è descritto da un unico grado di libertà,  $x_b = x_s$ , poiché il sistema è costituito dalla base e dalla statua, che sono rigidamente collegati tra loro. L'equazione del moto è la seguente:

$$(m_s + m_b) \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b + k_b x_b = -(m_s + m_b) \ddot{u}_g$$

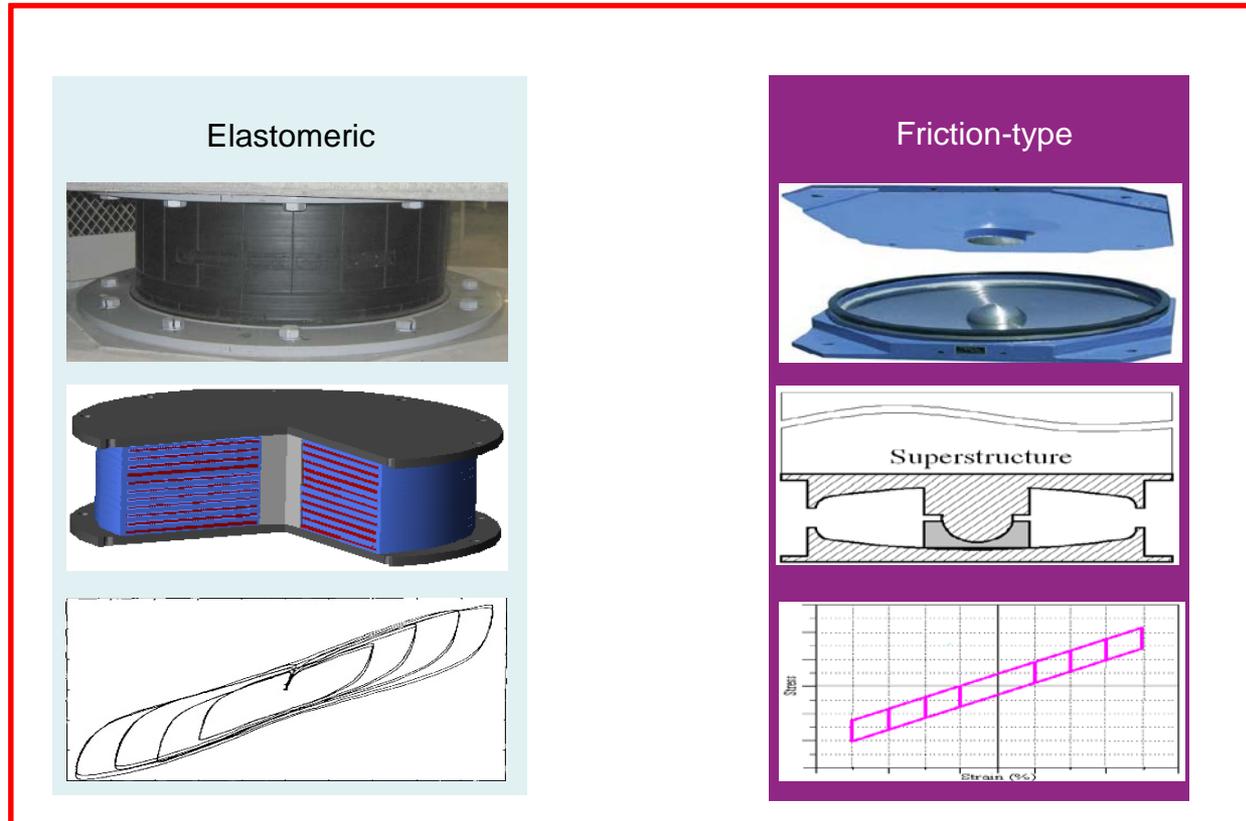
Quando si attiva lo sliding il sistema diventa a due gradi di libertà indipendenti ( $x_b, x_s$ ) ed è retto dalle due equazioni del moto:

$$m_b \ddot{x}_b + (c_b + c_s) \dot{x}_b + (k_b + k_s) x_b - c_s \dot{x}_s - k_s x_s = -m_b \ddot{u}_g$$

$$m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_b) + k_s (x_s - x_b) = -m_s \ddot{u}_g$$

Testi ed immagini riprodotte da: Venanzi, I., Ierimonti, L., & Materazzi, A. L. (2020). Active base isolation of museum artifacts under seismic excitation. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(3), 506-527.[link](#)

## Isolatori sismici più comunemente impiegati in campo ingegneristico



## Dettagli tecnici

Isolatori a doppio pendolo

Isolatori elastomerici

a basso smorzamento

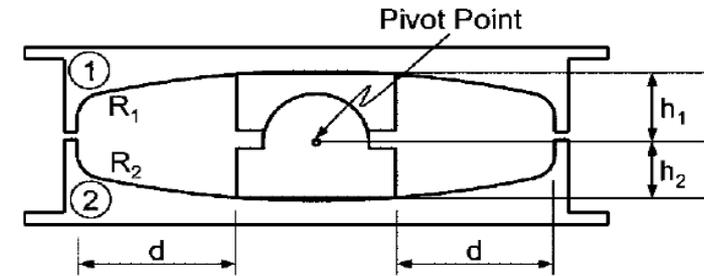
ad alto smorzamento

con nucleo in piombo

a basso costo

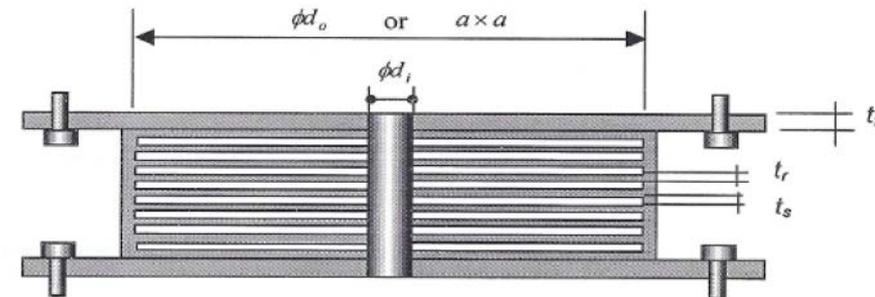
gomma riciclata

rinforzati con fibre



$$T = 2\pi \sqrt{R/g}$$

$$T = 2\pi \sqrt{m/K}$$



## Proprieta' meccaniche isolatori in gomma e piastre in acciaio: comportamento a taglio

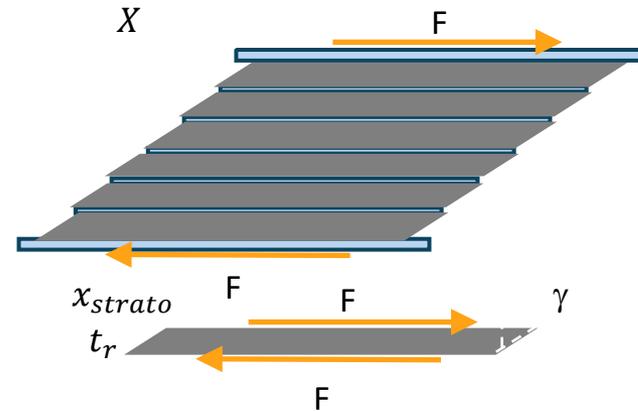


Le piastre in acciaio non si deformano lateralmente quindi ognuno dei  $n$  strati di gomma e' soggetto alla stessa forza  $F$  e si deforma di  $x_{strato} = X/n$

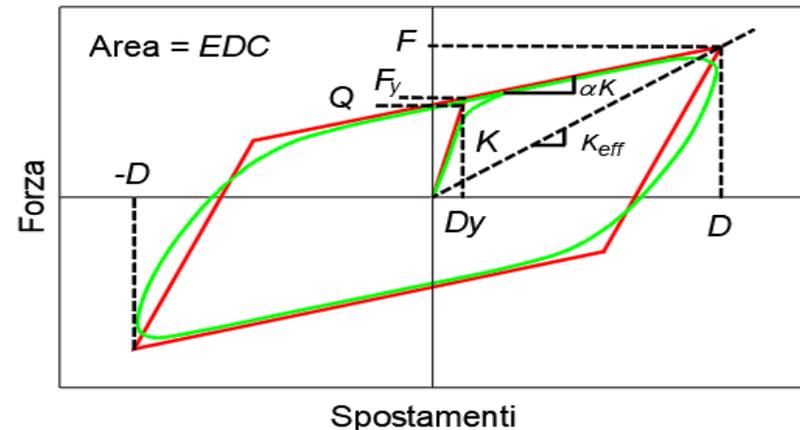
La deformazione a taglio  $\gamma$  si ottiene come:

$$\gamma = \frac{X}{nt_r} = \frac{x_{strato}}{t_r}$$

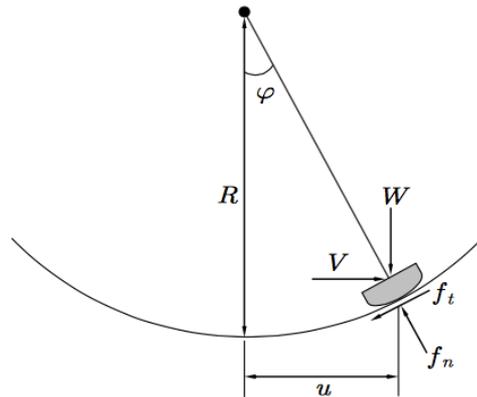
( $\gamma = 100\%$  significa che uno strato di gomma ha uno spostamento laterale uguale all'altezza dello strato)



### Modello bilineare idealizzato



## Proprietà' meccaniche isolatori a pendolo: comportamento con attrito e ricentraggio - 1/2



$$V - f_t \cos \varphi - f_n \sin \varphi = 0$$

$$W + f_t \sin \varphi - f_n \cos \varphi = 0$$

$$\begin{pmatrix} V \\ W \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_t \\ f_n \end{pmatrix}$$

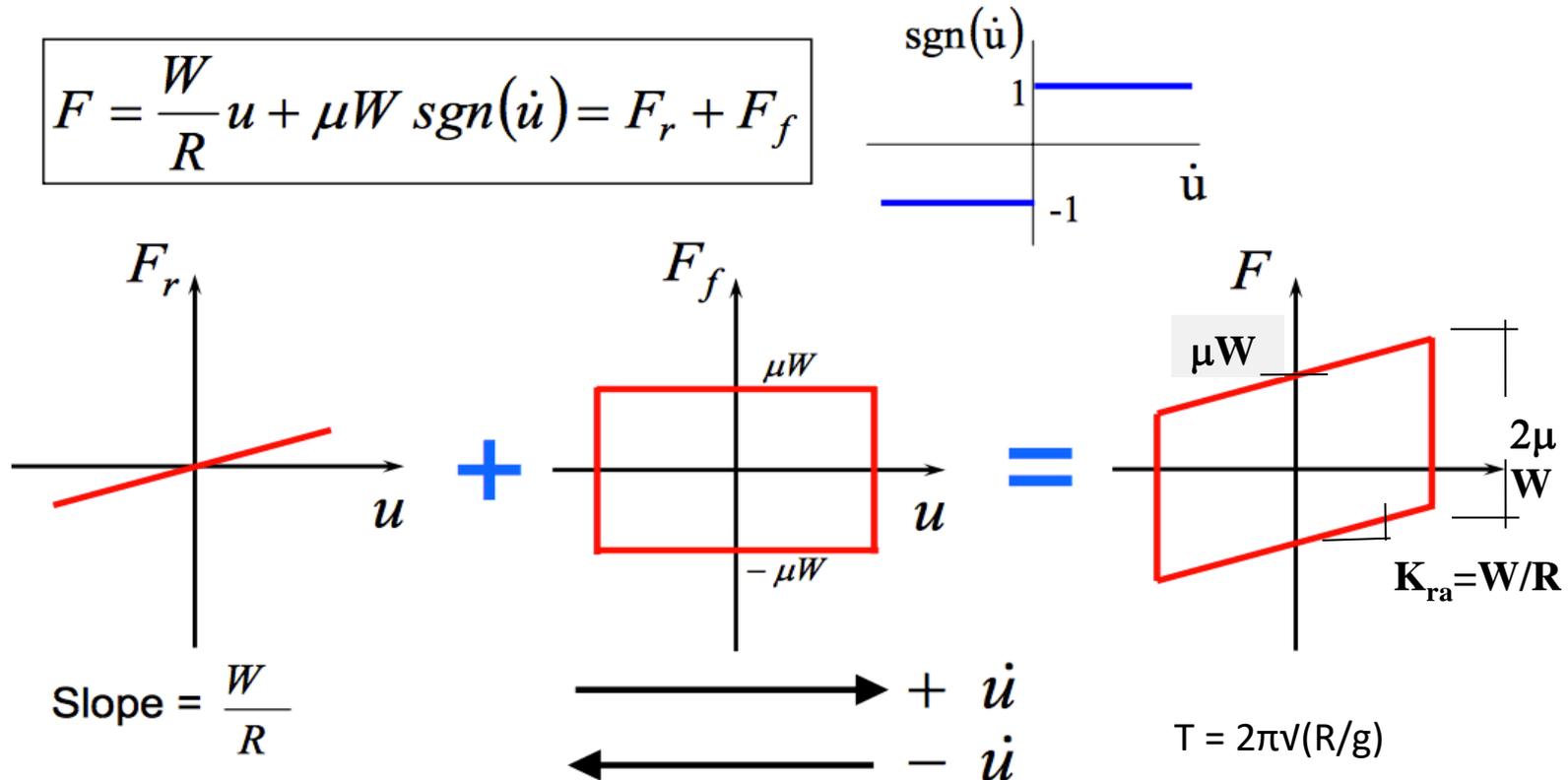
Dalla geometria:  $\sin \varphi = u / R$      $\cos \varphi = \sqrt{R^2 - u^2} / R$

Supponedo  $R \gg u \rightarrow \sqrt{R^2 - u^2} \approx R$ .     $f_t = \mu f_n$

$$V = \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) + \frac{W}{R} u$$

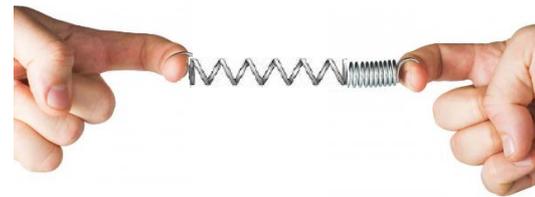
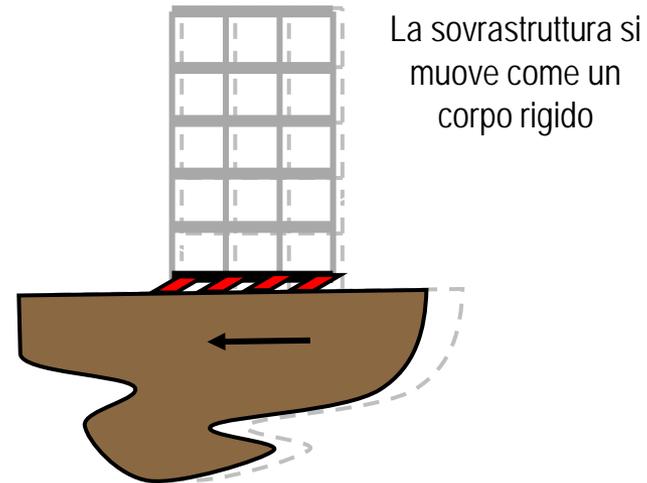
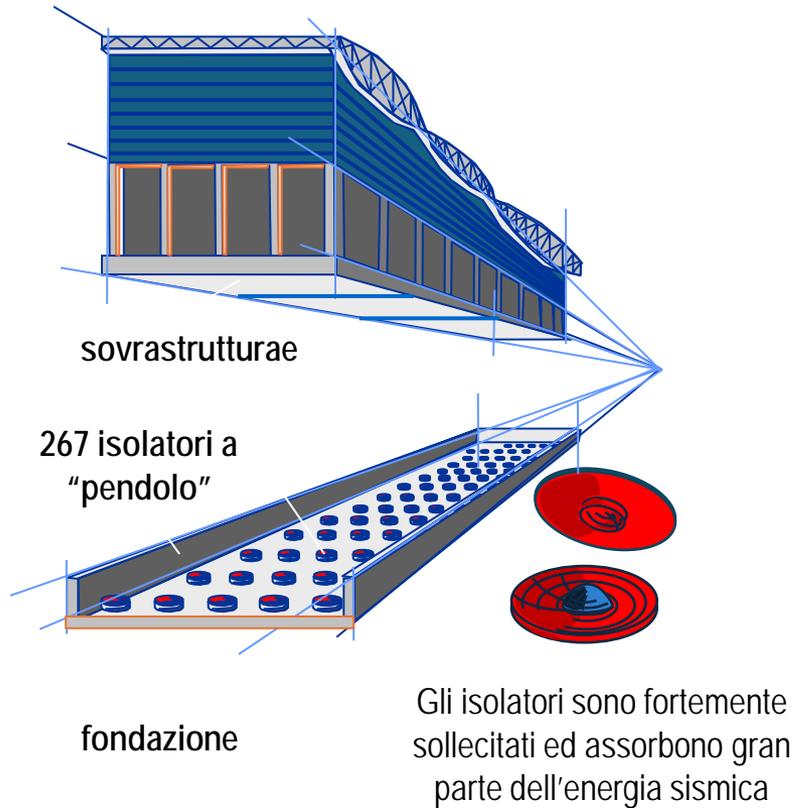
Cinematica e relazioni base

## Proprietà' meccaniche isolatori a pendolo: comportamento con attrito e ricentraggio - 2/2



Legge di risposta forza - spostamento

## Esempio di una moderna struttura isolata alla base: San Francisco Flight Terminal



## Limitazioni degli isolatori attualmente disponibili in commercio per l'isolamento delle opere d'arte

- Frequenze operative non facilmente «adattabili»
- Difficoltà di collegamento della statua ad un isolatore commerciale standard
- Pesi dei manufatti da isolare molto minori rispetto a quelli degli isolatori per edifici
- Necessità di applicazioni «ad hoc» per ogni opera da proteggere
- Utilizzo di sistemi di produzione costosi e tecnologicamente complessi

## *Esempi recenti di isolamento sismico di opere d'arte*

Bronzi di Riace  
Reggio Calabria



Galleria dei Prigioni  
Firenze



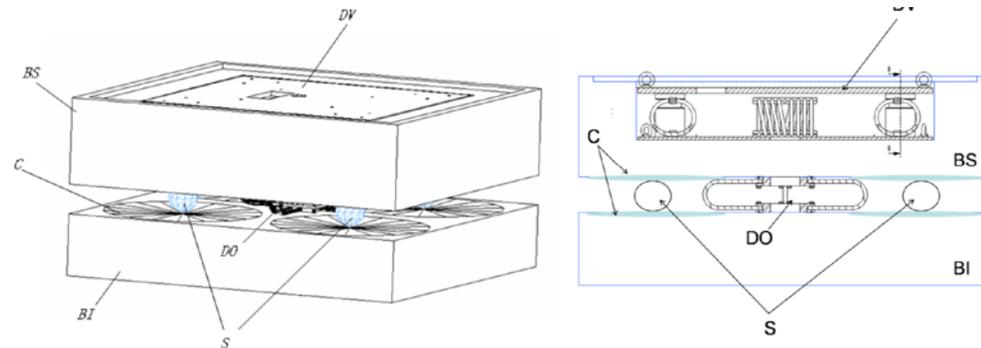
Pinnacoli sulla Porta della città  
Ferrara



Busto di Francesco I d'Este  
Galleria Estense di Modena



## Isolamento dei Bronzi di Riace - Museo Archeologico di Reggio Calabria – 1/2



**Figure 1.** Marble anti seismic basement provided by spheres + horizontal limitation device + vertical isolation device inserted in the upper block.

Le due statue di bronzo note come "Bronzo A il giovane" e "Bronzo B il vecchio" erano precedentemente situate al piano terra del museo ed erano dotate di dispositivi antisismici in gomma laminata. Lo spostamento delle statue dal piano terra alla nuova sala espositiva al primo piano del museo ha richiesto un adeguamento dei basamenti antisismici (anno 2011). I nuovi basamenti sono composti ciascuno da due blocchi di marmo sovrapposti sulle cui superfici interne sono state ricavate, specularmente ai due blocchi, quattro calotte. Nelle calotte sono state collocate quattro sfere, anch'esse in marmo, che con il loro rotolamento conferiscono i requisiti di grandi spostamenti, bassa rigidità e basso attrito richiesti per massimizzare l'isolamento sismico delle statue.

Testi ed immagini riprodotte da: *De Canio, G. (2012, September). Marble devices for the Base isolation of the two Bronzes of Riace: a proposal for the David of Michelangelo. In Proceedings of the XV World Conference on Earthquake Engineering-WCEE (pp. 24-28). [link](#)*

## Isolamento dei Bronzi di Riace - Museo Archeologico di Reggio Calabria – 2/2

Nella nuova configurazione di isolamento sismico con basamento in marmo il coefficiente di riduzione dell'azione sismica è dell'ordine di 15-20. E' stato pertanto possibile ridurre l'entità delle forze di stabilizzazione necessarie per contrastare lo scorrimento orizzontale ed il ribaltamento della statua.

Sono state affidate alle forze di richiamo solo la funzione di ancoraggio dell'imbracatura alla piastra di base e la compensazione dei pesi mancanti dello scudo sul braccio sinistro e della lancia sul braccio destro.

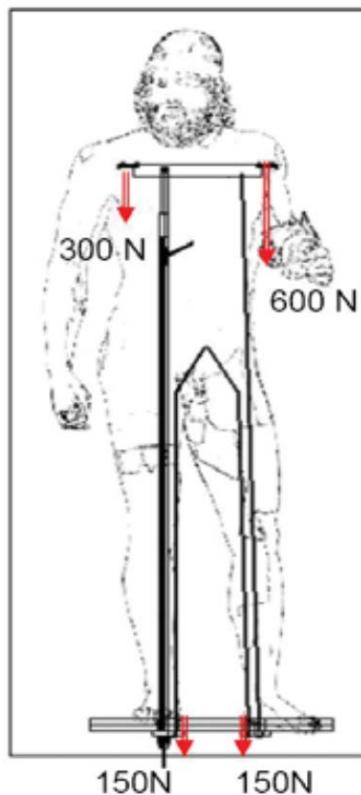


Figura 3a - Basamento posizionato sulla tavola vibrante per le prove sismiche.



Figura 3b - Acquisizione dei dati di spostamento tramite sistema 3D\_Vision.

Testi ed immagini riprodotte da: *De Canio, G. (2012, September). Marble devices for the Base isolation of the two Bronzes of Riace: a proposal for the David of Michelangelo. In Proceedings of the XV World Conference on Earthquake Engineering-WCEE (pp. 24-28).* [link](#)

## Studio sull'isolamento di statue di Michelangelo Buonarroti - Galleria dei Prigioni (FI)



Figura 5.1 – Galleria dei Prigioni, Firenze

La “Galleria dei Prigioni”, situata al pianterreno della Galleria dell’Accademia a Firenze, ospita sei importanti sculture di Michelangelo (scolpite tra il 1525 ed il 1530) creando così un percorso suggestivo che guida il visitatore al centro della tribuna dove si erge il David. Una ricerca di tesi dell’Università di Padova ha studiato l’isolamento con isolatori a pendolo della statua Prigione Barbuto e della statua di San Matteo. Si è osservata una riduzione dell’accelerazione esibita dalle statue nei test di simulazione. Tale accelerazione nelle statue isolate è stabile sulla soglia di 0,05 g (riduzione pari a circa l’80% rispetto al caso della statua non isolata), valore che non compromette la sicurezza delle sculture. E’ emerso che deve essere accuratamente determinato lo spostamento massimo da scorrimento della statua su isolatore, per evitare che la slitta del dispositivo vada a battere sul fine corsa durante un evento sismico.



Prigione Atla

San Matteo

Prigione Barbuto

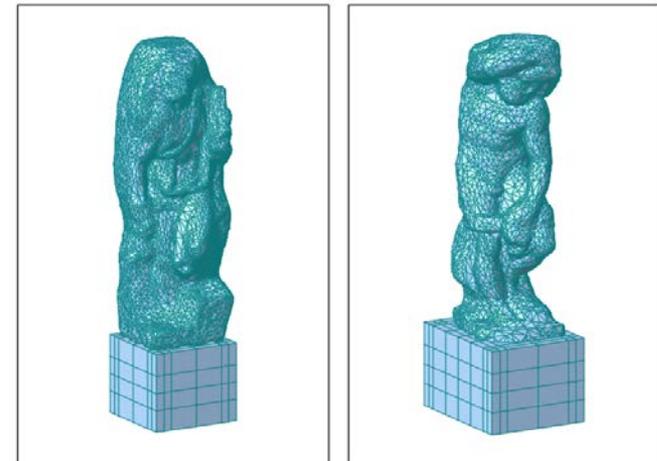


Figura 5.11 – San Matteo e Prigione Barbuto, modelli completi

Testi ed immagini riprodotte da: *Baggio, S. Studio di un sistema di isolamento sismico di statue e beni mobili-Aspetti sperimentali e numerici-Il caso studio dei Prigioni di Michelangelo., Tesi di Laurea, Università di Padova, 2012. [link](#)*

## Isolamento del Busto di Francesco I d'Este - Galleria Estense di Modena



Figure 15. One of the ISOLART® PENDULUM devices.

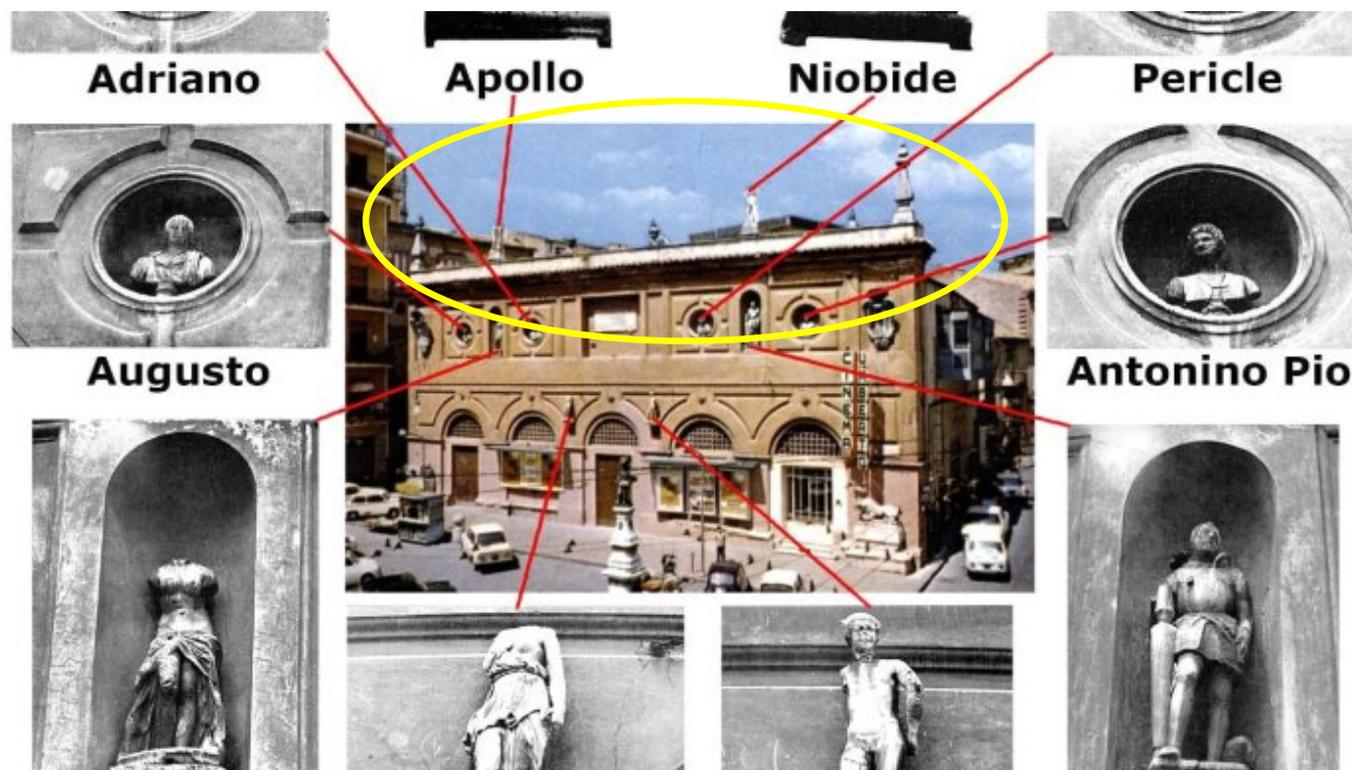


Figure 16. Render of the final installation (courtesy of arch. Marco Barbato)

Un'altra notevole applicazione del brevetto industriale ISOLART® PENDULUM è stata sviluppata per proteggere sismicamente il busto di Francesco I d'Este, conservato presso la Galleria Estense nel "Palazzo dei Musei" a Modena. Studi preliminari, condotti in assenza di isolamento, hanno indicato che il busto di Francesco I d'Este potrebbe essere soggetto a pericolose oscillazioni anche in caso di terremoti di bassa intensità, a causa delle sue caratteristiche geometriche e inerziali e della presenza del piedistallo. Simulazioni condotte sul busto isolato mostrano un'efficienza generale del sistema di isolamento adottato, che si traduce nella riduzione dell'accelerazione che agisce alla base del piedistallo ad un valore compatibile con la sicurezza dell'opera d'arte.

Testi ed immagini riprodotte da: *Baggio, S., Berto, L., Gabriella Castellano, M., Faccio, P., Marcolin, L., Infanti, S., & Saetta, A. (2015). Seismic vulnerability and risk reduction interventions for art goods: the bust of Francesco I d'Este in Modena. In Atti del 16. Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"(ANIDIS).*[link](#)

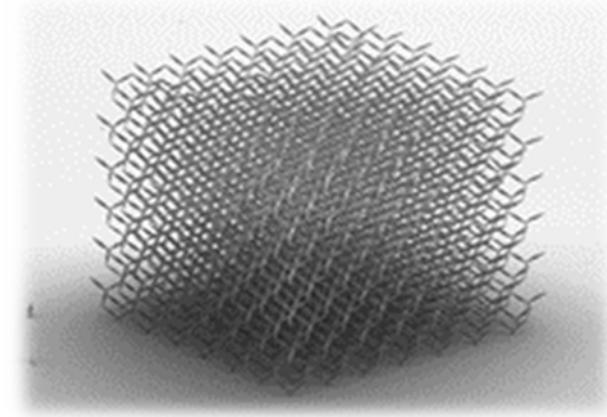
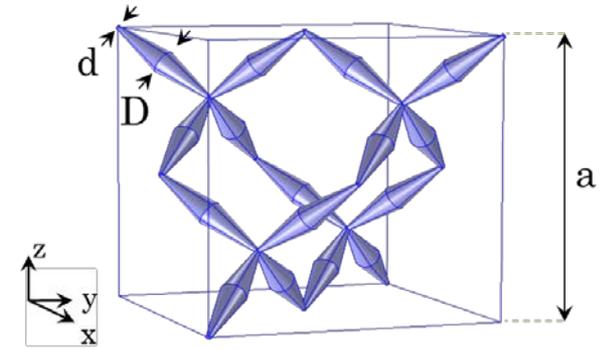
## *Possibile applicazione di isolatori sismici per la protezione sismica delle statue in sommità alla facciata del Palazzo della Dogana di Avellino*



## Metamateriali “pentamode”

I metamateriali reticolari sono costituiti da reticoli ingegnerizzati che presentano comportamenti non convenzionali derivati principalmente dalla geometria della loro microstruttura, piuttosto che dalla loro composizione chimica.

I reticoli “**pentamode**” sono caratterizzati da una cella unitaria primitiva formata da quattro aste che si incontrano in un punto. La sua ripetizione nello spazio tridimensionale dà origine a una struttura simile ad un diamante che supporta bene carichi di compressione/estensione di tipo uniforme (stati di tensione sferici). Il reticolo non confinato presenta **cinque modi di deformazione «soffici»** e un **unico modo rigido** [Milton and Cherkaev, *J Eng Mater Technol* 1995]

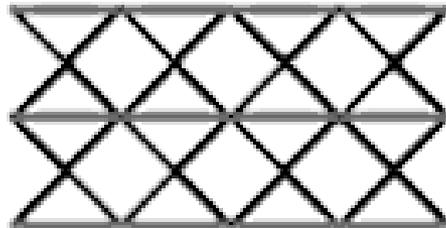


## Uso di reticoli pentamode per l'isolamento sismico

In letteratura sono stati studiati nuovi reticoli **pentamode, confinati** tra piastre rigide. Queste strutture hanno la **capacità di supportare carichi di compressione unidirezionali** (in direzione ortogonale alle piastre di irrigidimento) con rigidità sufficientemente elevata, pur conservando una rigidità marcatamente bassa contro carichi di taglio.

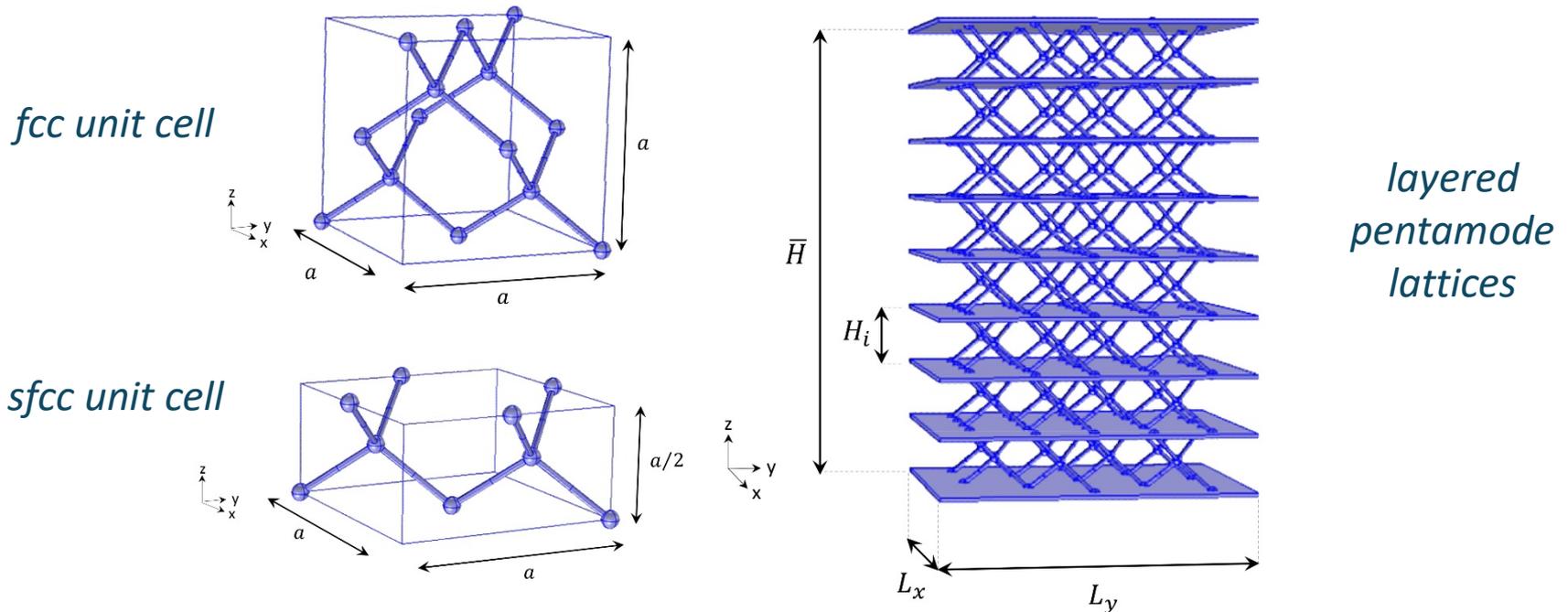
E' stato dimostrato che strutture monostrato e multistrato formate dai reticoli pentamode alternati e dalle piastre di irrigidimento sono in grado di opporre un notevole grado di rigidità ai carichi di compressione unidirezionali, a causa **dell'effetto di confinamento** fornito dalle piastre di irrigidimento.

Tale caratteristica è essenziale quando si sviluppano metamateriali meccanici che devono sopportare carichi significativamente grandi perpendicolari alla loro superficie esterna, pur esibendo una **bassa rigidità (teoricamente nulla) contro le forze di taglio trasversali**.



## Studi teorici su reticoli pentamode laminati

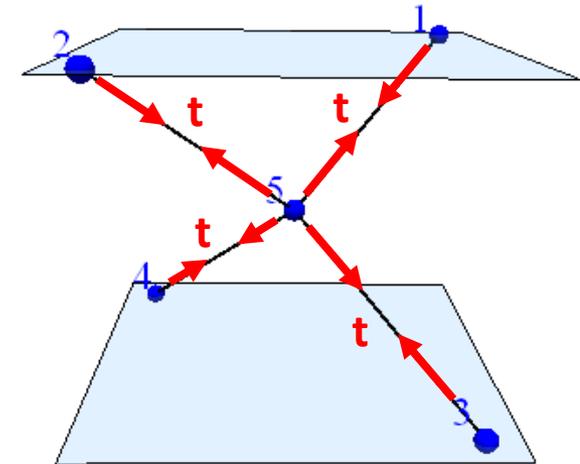
Sono state studiate presso l'Università degli Studi di Salerno strutture laminate composte da strati di reticoli pentamode confinati tra piastre irrigidenti. Sono stati esaminati sia sistemi dotati di connessioni articolate (sollecitati in «regime estensionale» delle membrature/aste) sia sistemi dotati di connessioni rigide (sollecitati in un regime meccanico dominato dalla «flessione» delle membrature).



## Risposta in puro regime estensionale delle membrature

Reticoli con aste collegate da nodi con comportamento a cerniera perfetta (presenza di soli sforzi assiali nelle aste, assenza di sforzi da flessione)

*Nei sistemi sfcc, tutte le aste che formano un modulo a quattro elementi (internamente non sollecitato) supportano forze assiali uguali.*



*incremental forces in the rods 5-1, 5-2 and 5-3*

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \vdots & \mathbf{A}_{12} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{A}_{21} & \vdots & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{t}_1 \\ \dots \\ \mathbf{t}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 \\ \dots \\ \mathbf{f}_2 \end{bmatrix}$$

→ *incremental force on node 5*  
→ *incremental forces on nodes 1 – 4*

*incremental force in the rod 5-4*

Assumendo  $\mathbf{f}_1 = 0$  è facile verificare che risulta:  $\mathbf{t}_1 = -\mathbf{A}_{11}^{-1} \mathbf{A}_{12} \mathbf{t}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_2 \\ \mathbf{t}_2 \\ \mathbf{t}_2 \end{bmatrix}$

## Cinematica incrementale

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \vdots & \mathbf{B}_{12} \\ \dots & & \dots \\ \mathbf{B}_{21} & \vdots & \mathbf{B}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{d}}_1 \\ \dot{\mathbf{d}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{e}}_1 \\ \dot{\mathbf{e}}_2 \end{bmatrix}$$

*dofs node 5* (green circle around  $\dot{\mathbf{d}}_1$ ) → rods 5-1, 5-2, 5-3 (blue circle around  $\dot{\mathbf{e}}_1$ )

*dofs nodes 1-4* (red circle around  $\dot{\mathbf{d}}_2$ ) → rod 5-4 (yellow circle around  $\dot{\mathbf{e}}_2$ )

$$\dot{\mathbf{e}}_2 = \mathbf{B}_{21}\dot{\mathbf{d}}_1 + \mathbf{B}_{22}\dot{\mathbf{d}}_2(\dot{\mathbf{v}}, \dot{\boldsymbol{\varphi}})$$

$$\dot{\mathbf{d}}_1 = \bar{\mathbf{B}}_{11}^{-1} [(\mathbf{B}_{22}\dot{\mathbf{d}}_2(\dot{\mathbf{v}}, \dot{\boldsymbol{\varphi}}))\mathbf{1} - \mathbf{B}_{12}\dot{\mathbf{d}}_2(\dot{\mathbf{v}}, \dot{\boldsymbol{\varphi}})]$$

$$\dot{\mathbf{e}}_1 = \mathbf{e}_2\mathbf{1} = (\mathbf{B}_{21}\dot{\mathbf{d}}_1 + \mathbf{B}_{22}\dot{\mathbf{d}}_2(\dot{\mathbf{v}}, \dot{\boldsymbol{\varphi}}))\mathbf{1}$$

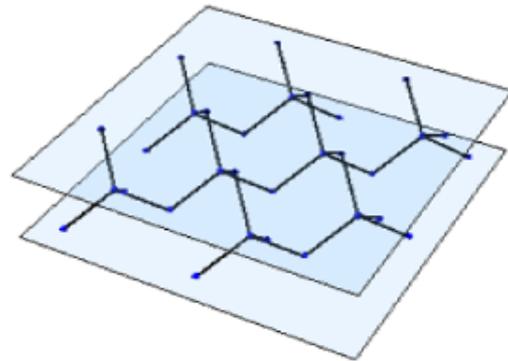
$$\bar{\mathbf{B}}_{11} = \mathbf{B}_{11} - \hat{\mathbf{B}}_{21}$$

*Deformazione verticale*

$$\dot{\mathbf{u}}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{w} \\ \frac{\dot{\varphi}_y}{2} \end{bmatrix}$$

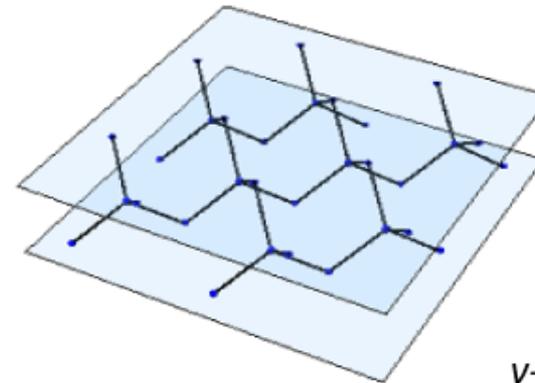
*Deformazione da flessione intorno a y*

$$\dot{\mathbf{u}}_5 = \begin{bmatrix} -\frac{a}{8}\dot{\varphi}_y \\ \frac{a}{8}\dot{\varphi}_y \\ \frac{\dot{\varphi}_y}{2}(x_5 - x_G) \end{bmatrix}$$

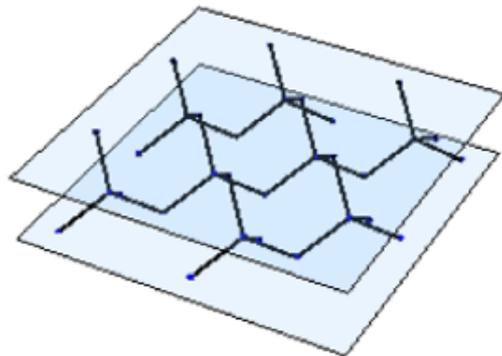


*x-translation*

## Meccanismi infinitesimi di reticoli sfcc («*modi soffici*»)



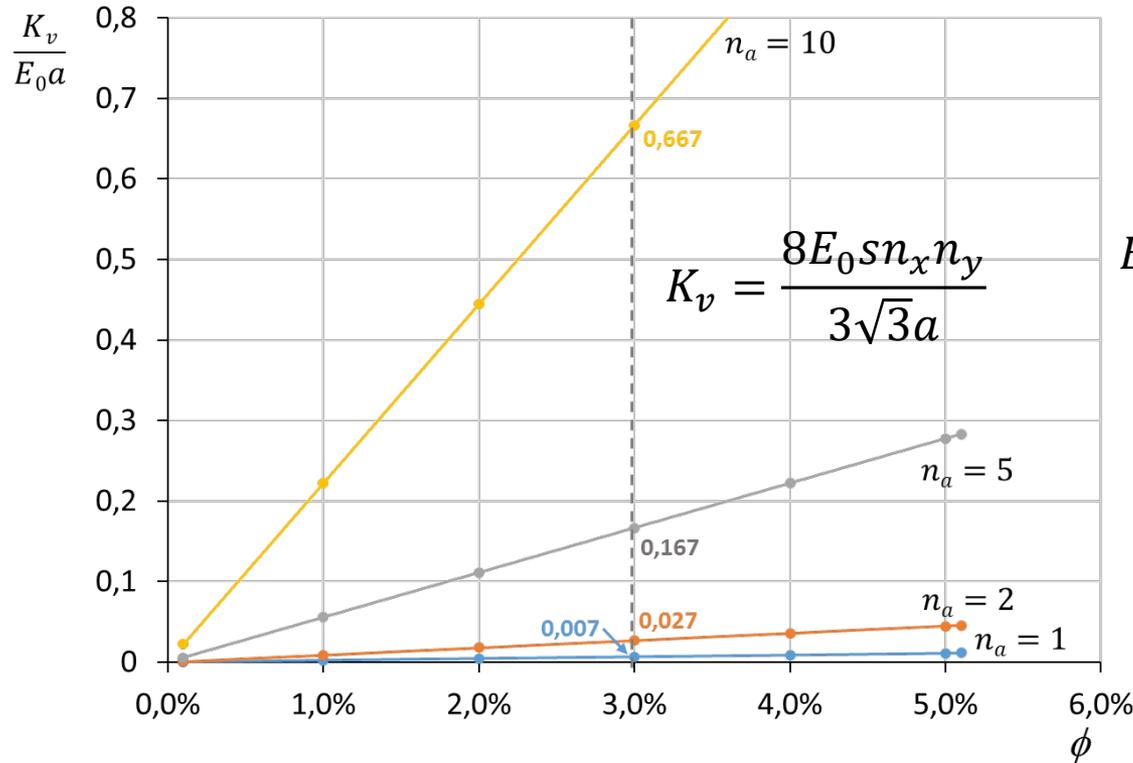
*y-translation*



*z-rotation*

Nota: i sistemi sfcc confinati non presentano meccanismi verticali, di flessione o locali.

## RIGIDEZZA VERTICALE $K_v$ DI SISTEMI SFCC AD UNO STRATO



## MODULO ELASTICO EFFETTIVO A COMPRESIONE

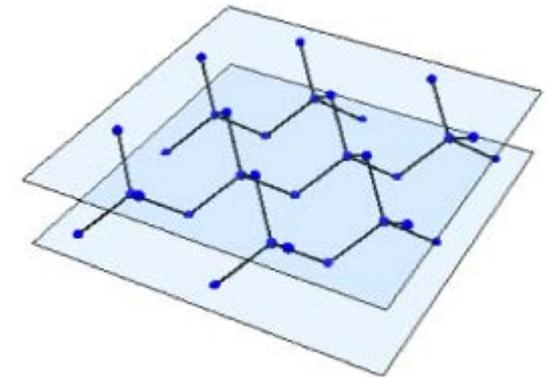
frazione di volume solido nella cella unitaria

area sez. struts

$$E_{eff} = \frac{K_v H}{A} = \frac{4E_0 s}{3\sqrt{3}a^2} = \frac{\phi}{9} E_0$$

area caricata

modulo elastico del materiale base

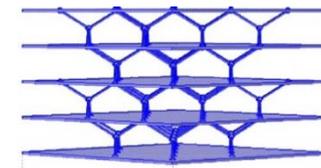


$n_a = n_x = n_y$  (reticolo a base quadrata)

## RIGIDEZZA VERTICALE DI SISTEMI MULTI-STRATO

Si osserva che  $K_v$  scala linearmente con  $\phi$

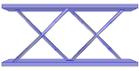
$$K_v = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_z} \frac{1}{K_{v_i}}}$$

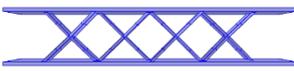


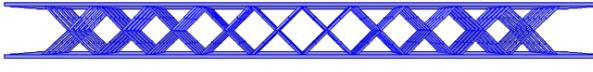
VARIAZIONE DELLA RIGIDEZZA VERTICALE DI SISTEMI SFCC MONOSTRATO AL VARIARE DEL NUMERO DI CELLE UNITARIE, PER UNA FISSATA FRAZIONE DI VOLUME SOLIDO ( $\phi = 3.0\%$ )

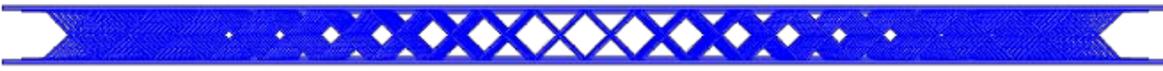
$$E_{eff} = \frac{\phi}{9} E_0$$

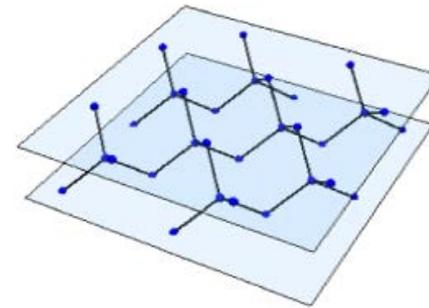
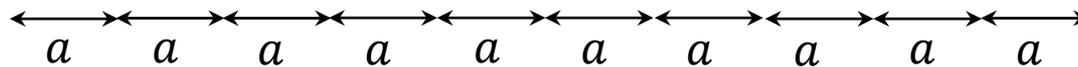
$$n_a = n_x = n_y \text{ (sistema a base quadrato)}$$

$n_a = 1$    $\frac{K_v}{E_0 a} = 0.007$

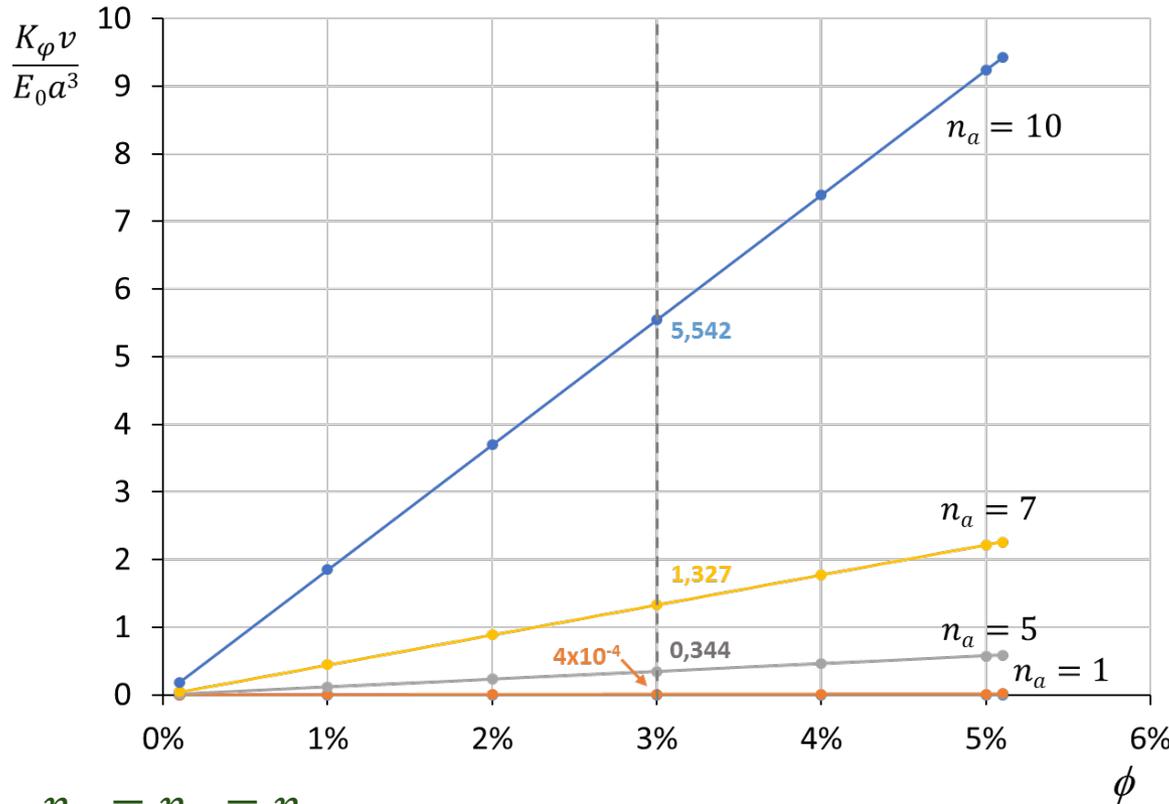
$n_a = 2$    $\frac{K_v}{E_0 a} = 0.027$

$n_a = 5$    $\frac{K_v}{E_0 a} = 0.167$

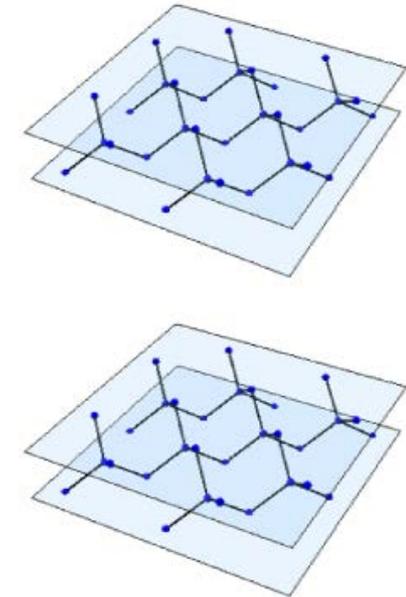
$n_a = 10$    $\frac{K_v}{E_0 a} = 0.667$



## RIGIDEZZA FLESSIONALE $K_\phi$ DI SISTEMI SFCC AD UNO STRATO



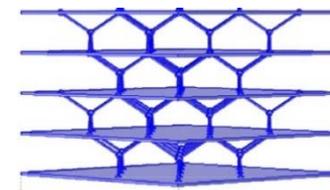
$$K_{\phi y} = \frac{E_0 s a n_x (4n_x^2 - 1)n_y}{18\sqrt{3}}$$



$$n_a = n_x = n_y$$

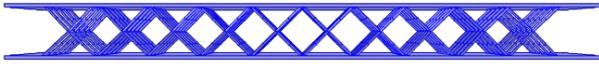
$K_\phi$  DI SISTEMI SFCC MULTI-STRATO  
Si osserva che  $K_\phi$  scala linearmente con  $\phi$

$$K_\phi = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_z} \frac{1}{K_{\phi i}}}$$



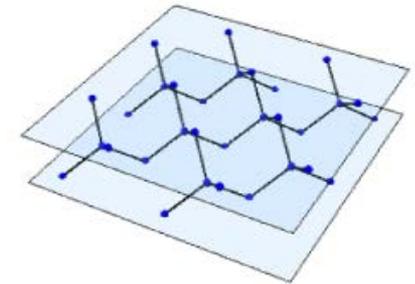
VARIAZIONE DELLA RIGIDEZZA A FLESSIONE DI SISTEMI SFCC MONOSTRATO AL VARIARE DEL NUMERO DI CELLE UNITARIE, PER UNA FISSATA FRAZIONE DI VOLUME SOLIDO ( $\phi = 3.0\%$ )

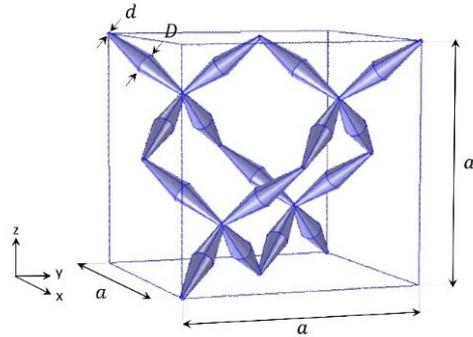
$n_a = 1$    $\frac{K_{\phi_y} s \dot{\ell}}{E_0 a^3} = 4 \times 10^{-4}$

$n_a = 5$    $\frac{K_{\phi_y} s \dot{\ell}}{E_0 a^3} = 0.344$

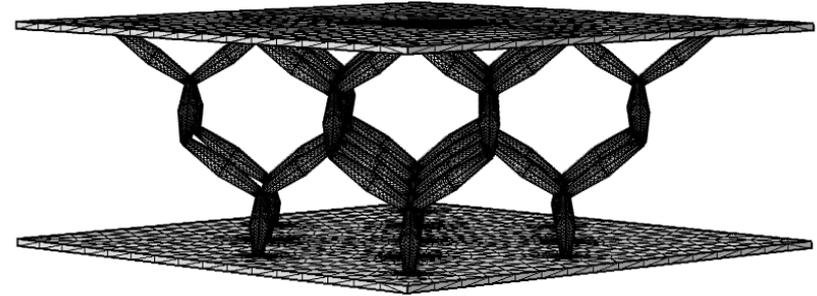
$n_a = 7$    $\frac{K_{\phi_y} s \dot{\ell}}{E_0 a^3} = 1.327$

$n_a = 10$    $\frac{K_{\phi_y} s \dot{\ell}}{E_0 a^3} = 5.542$

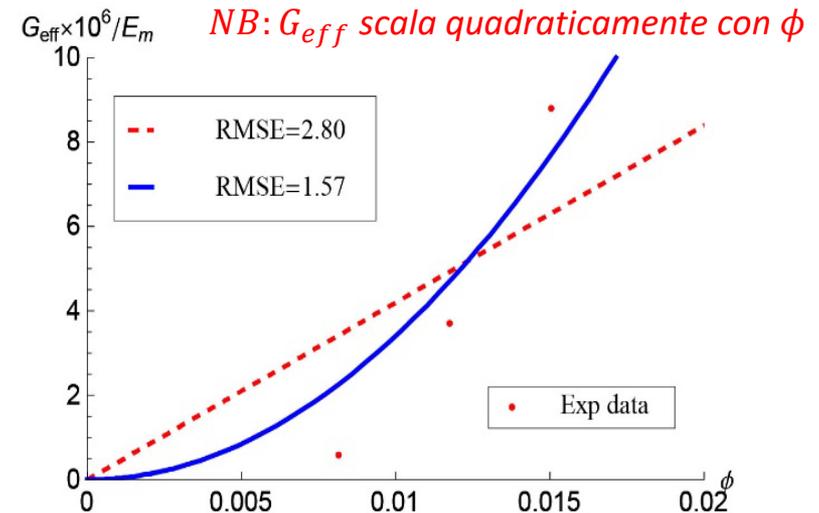
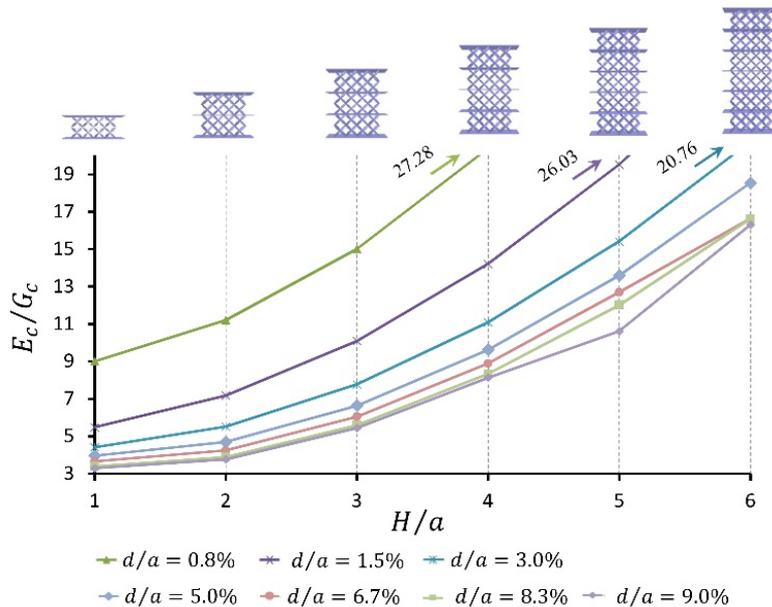




## Risposta in regime flessionale delle membrature

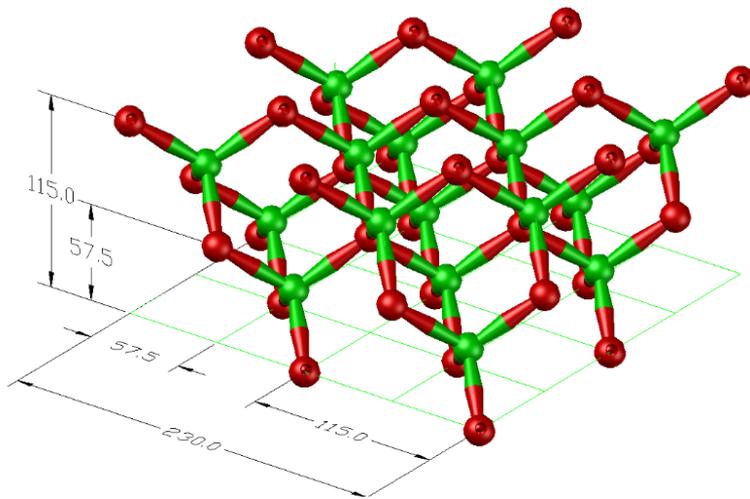


Cella unitaria pentamode con connessioni rigide



Variatione del rapporto tra il modulo di compressione effettivo e il modulo di taglio effettivo di strutture multistrato al variare di rapporti di aspetto su micro- e macro-scala

## Proof-of-concept METAISOLATOR: sistema costruttivo per isolatori pentamode realizzato mediante prototipazione rapida

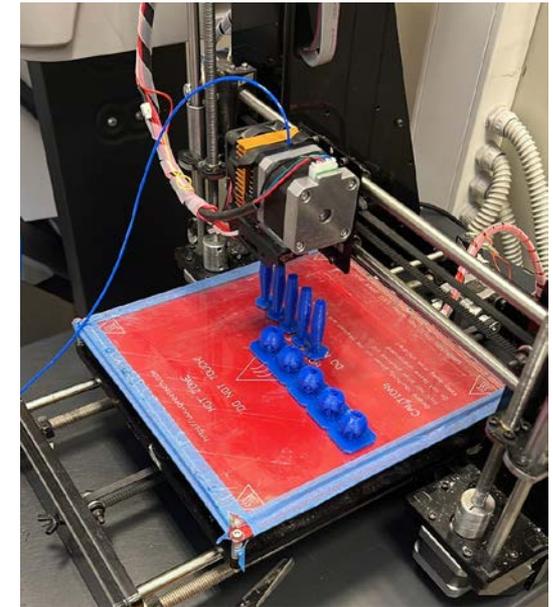
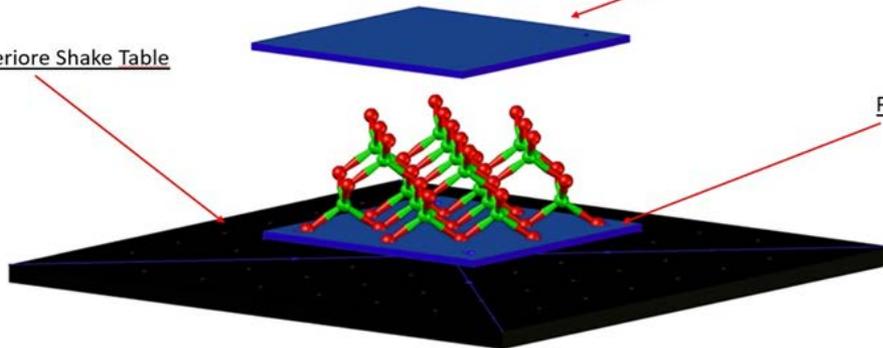


*Vista assonometrica  
del modello CAD di un  
reticolo pentamode*

Base inferiore Shake Table

Piastra superiore

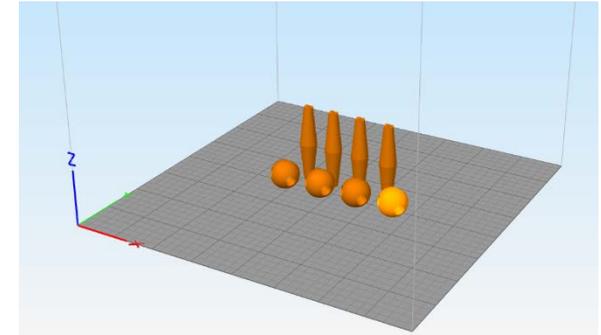
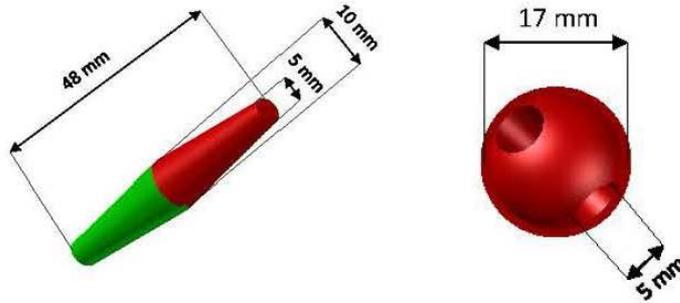
Piastra inferiore



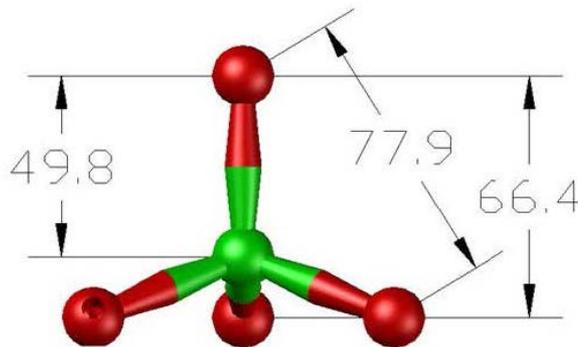
*Processo di stampa 3D*

Pentamode posizionato su Shake-Table

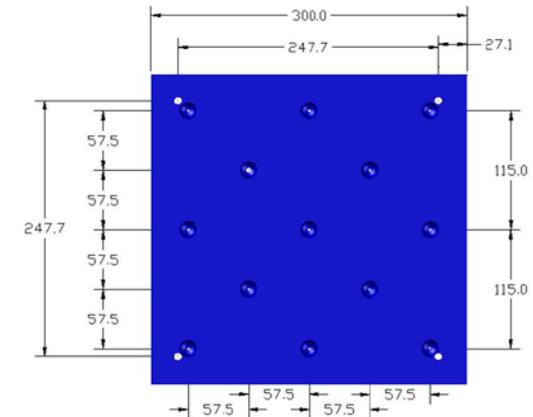
## Elementi del reticolo pentamode stampati separatamente



## Modulo a quattro aste assemblato

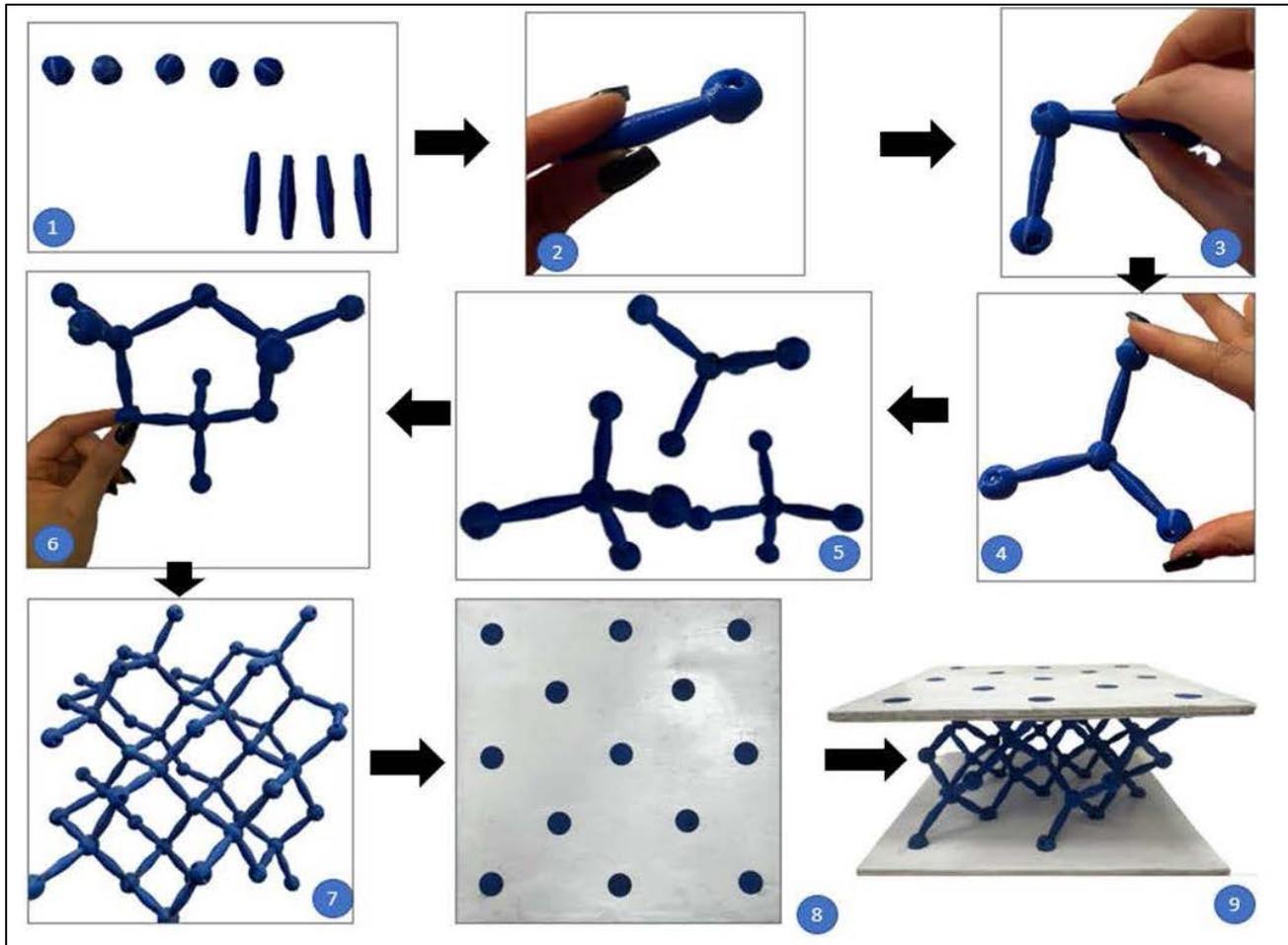


## Modello CAD per stampa 3D

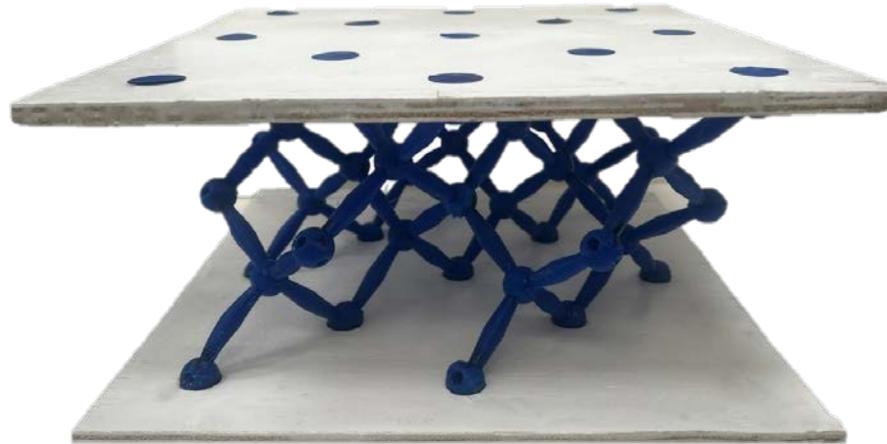


## Manifattura piastre terminali

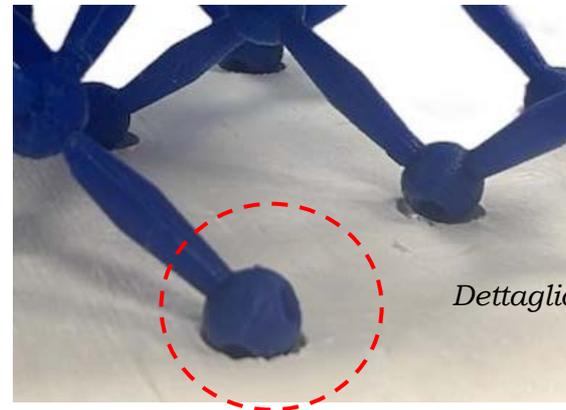
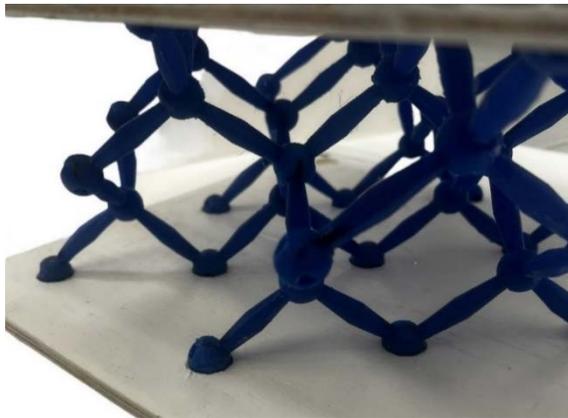
## Sequenza delle fase di assemblaggio



## Sistemi assemblati senza meccanismi di scorrimento

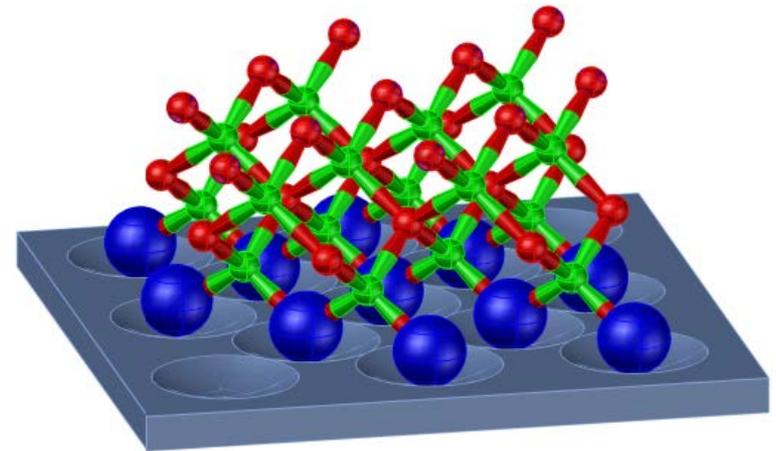
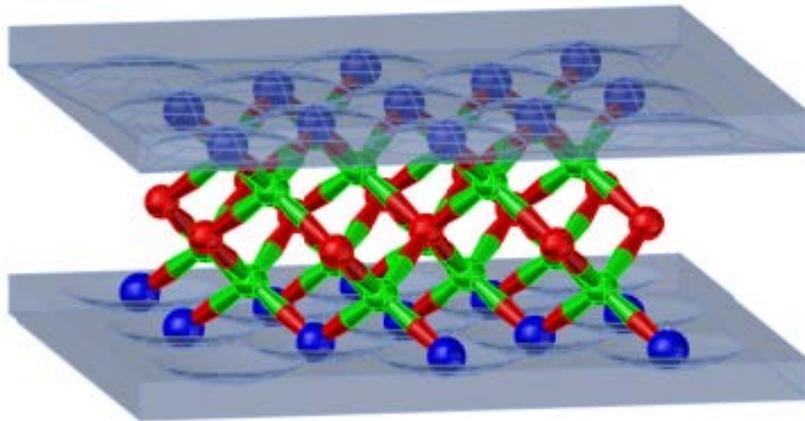


*Modello assemblato con piastre che non sono libere di  
slittare rispetto al reticolo*



*Dettaglio nodo-piastra.*

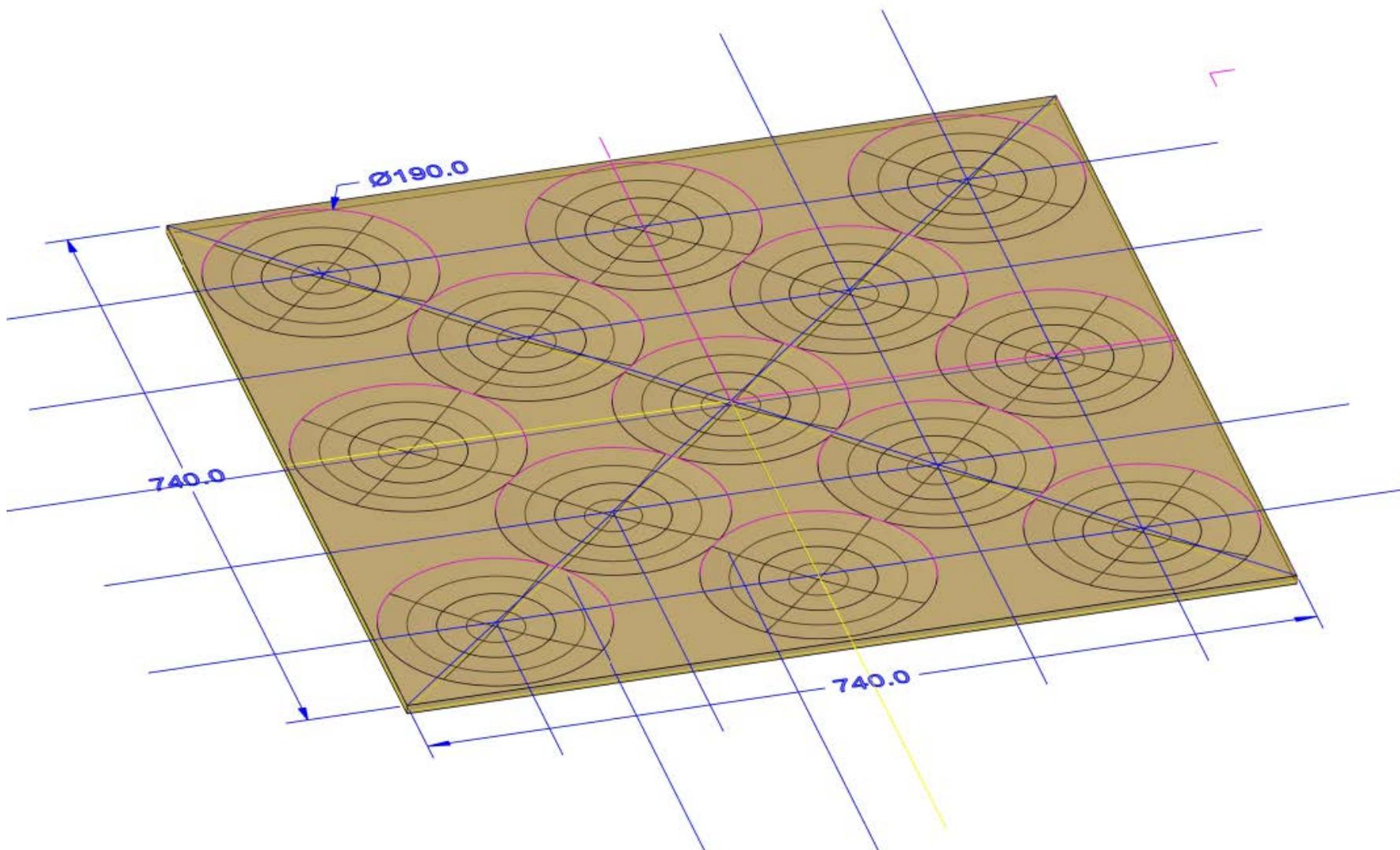
Inserimento di sfere terminali di varie dimensioni e piastre con calotte sferiche per l'attivazione di meccanismi di scorrimento a pendolo



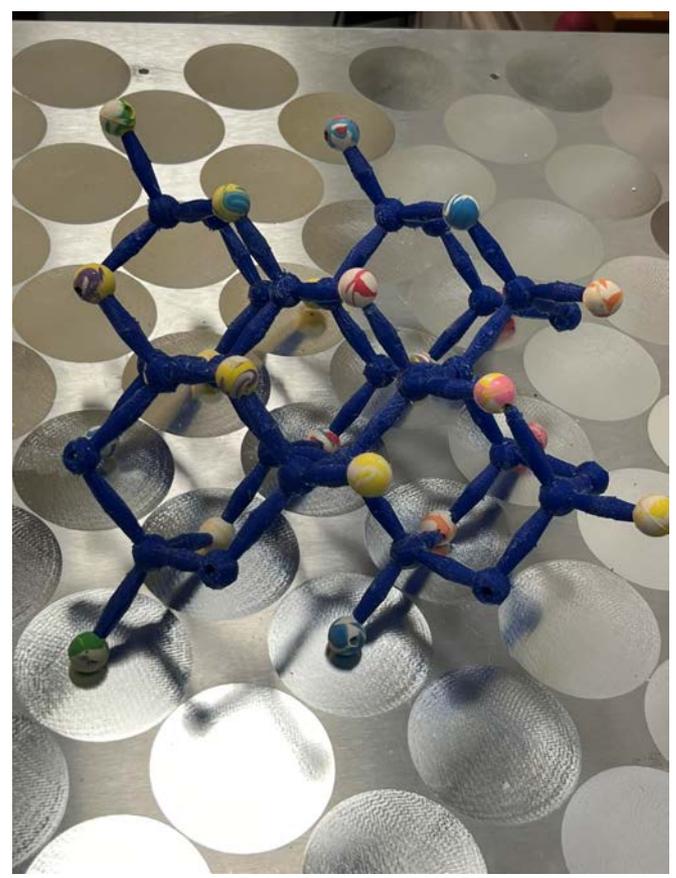
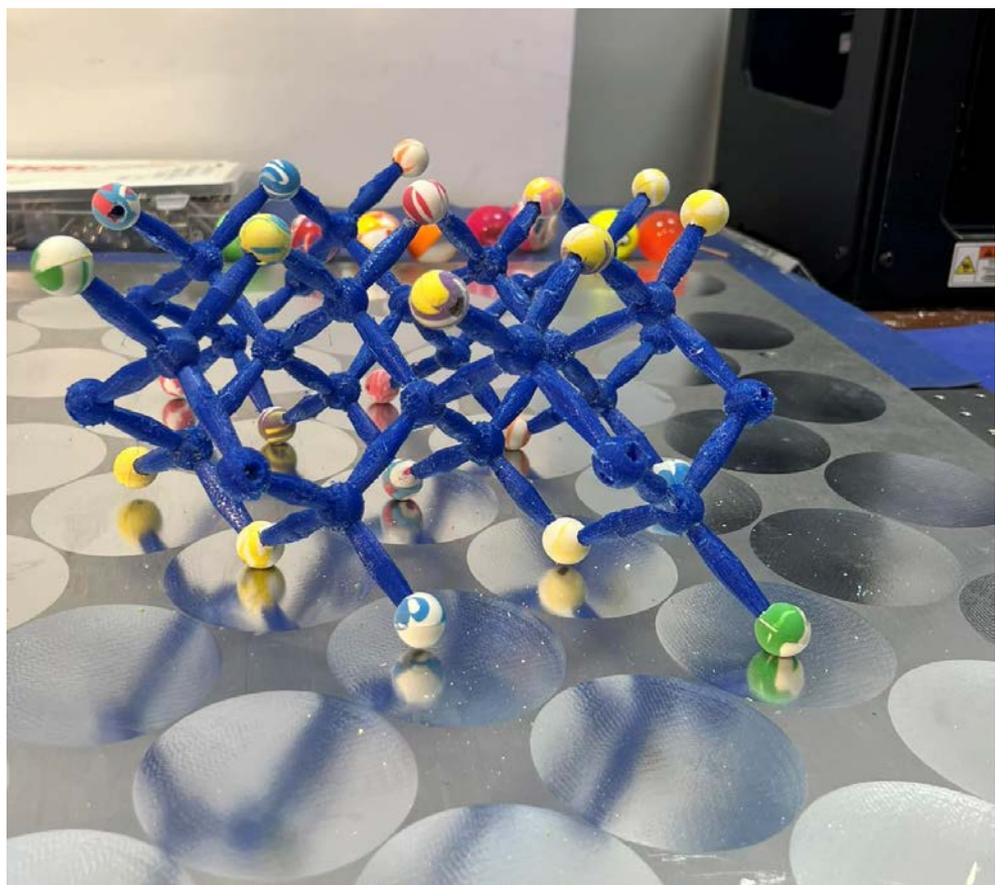
# PROGETTO NOACRONYM METAISOLATOR



PROGRAMMA DI  
VALORIZZAZIONE  
#NOACRONYM+

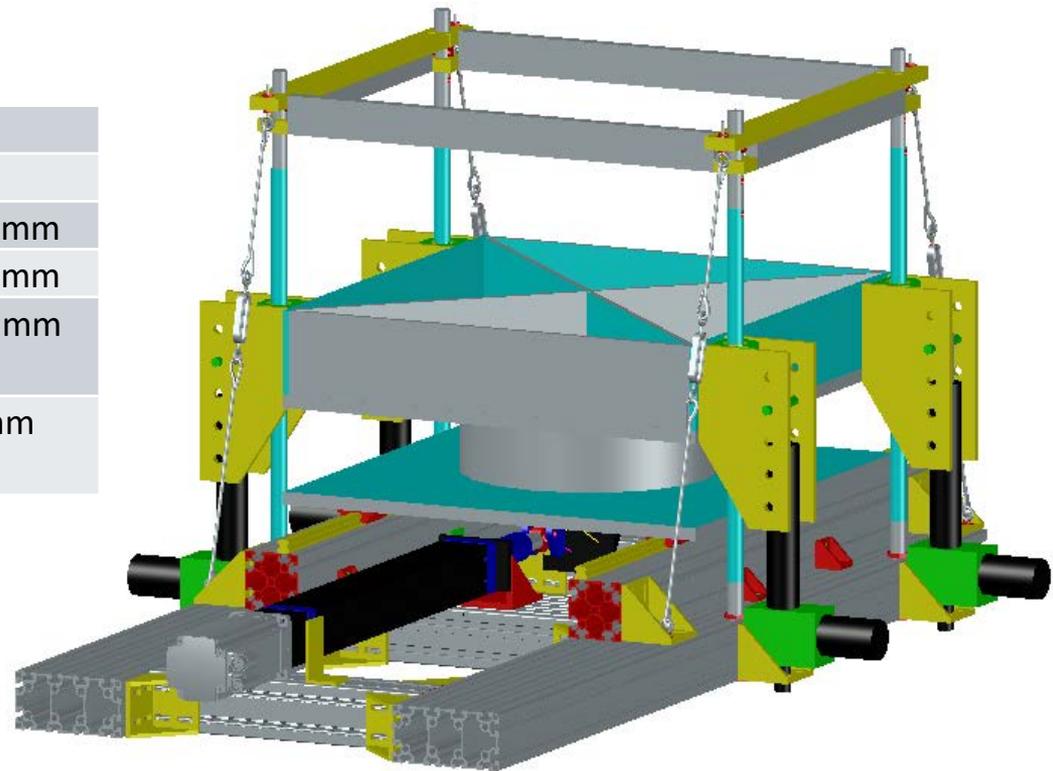


## Prototipo con piastre e sfere per attivazione di meccanismi a pendolo



## Tavola vibrante utilizzata per validazioni sperimentali Laboratorio Prove Materiali e Strutture “STRENGTH” Università degli Studi di Salerno

Forza verticale max	30 KN
Forza orizzontale max	3 KN
Piastra di base	700 x 700 mm
Piastra di carico superiore	700 x 700 mm
Altezza tra le piastre di base e di carico	150 – 450 mm
Spostamento max della piastra di base	+/- 200 mm



Esperimento di validazione con modello in scala ridotta statua Xoanon su isolatore, costruito sulla base di opportuni principi di riscaldamento. Si esaminano eccitazioni alla base variabili da 1Hz a 3Hz.

NON si osservano fenomeni di rocking di rilievo. Si tenga presenza che la statua non è stata staffata alla base superiore dell'isolatore pentamode. Le oscillazioni osservate non compromettono la stabilità del modello di statua esaminato.



Esperimento di validazione con modello in scala ridotta statua Xoanon NON isolato. Eccitazioni alla base variabili da 1Hz a 3Hz.

SI OSSERVANO marcati fenomeni di rocking per frequenze di 2-3 Hz. Tali fenomeni porterebbero il modello di statua ad esibire un pericoloso meccanismo di ribaltamento in corrispondenza di un evento sismico reale.

(si rimanda alla presentazione dedicata della dott.ssa Adinolfi per maggiori dettagli)





## ***Considerazioni conclusive – 1/2***

- Le attività svolte nell'ambito del progetto METAISOLATOR hanno condotto allo sviluppo di un sistema di prototipazione rapida per isolatori pentamode e all'esecuzione di test di validazione in ambiente rilevante (TRL 5) del Proof-of-Concept METAISOLATOR.
- È stato verificato che le proprietà meccaniche dei mataisolatori pentamode dipendono in larga misura dalla geometria della microstruttura reticolare, più che dalla composizione chimica del materiale (in altre parole, questi sistemi si comportano come metamateriali meccanici). Pertanto, è possibile progettare la microstruttura del reticolo per ottenere una risposta specifica in relazione al manufatto da isolare.
- L'inserimento di meccanismi di scorrimento a pendolo alle basi terminali dell'isolatore pentamode ha permesso di integrare un ulteriore meccanismo di regolazione, che consente di evitare fenomeni di rocking alle frequenze desiderate.
- La personalizzazione del dispositivo si configura come un elemento distintivo: è possibile sviluppare reticoli e sistemi di scorrimento diversi in base al tipo di elemento da isolare.



## Considerazioni conclusive – 2/2

- Le attività future saranno orientate a raggiungere un TRL 6 attraverso una validazione in ambiente industrialmente rilevante del Proof-of-Concept METAISOLATOR.
- Il mercato offre una gamma di prodotti finalizzati all'isolamento di manufatti d'arte, come ad esempio ISOLART®, prodotto dalla FIP MEC S.r.l., illustrato nel corso di questa presentazione. Si tratta di una linea di prodotti speciali per l'isolamento sismico, sviluppata per la protezione delle opere d'arte, ma applicabile anche ad altri oggetti leggeri, come container, server, apparecchiature critiche o dispositivi particolarmente sensibili alle accelerazioni.
- A differenza dei competitor presenti sul mercato, uno dei punti di forza del progetto METAISOLATOR è rappresentato dalla semplicità di implementazione e utilizzo, con la possibilità di personalizzare e adattare la geometria del reticolo e dei sistemi di scorrimento a pendolo in funzione delle esigenze d'uso e degli spazi disponibili, facendo uso di tecniche di prototipazione rapida facilmente accessibili. La soluzione proposta si distingue inoltre per un significativo abbattimento dei costi, grazie al potenziale impiego della stampa 3D e alla possibilità di utilizzare materiali eco-sostenibili di diverse tipologie.



# ***Grazie per l'attenzione***

***Segue la presentazione della dott.ssa  
Valentina Adinolfi***

***«Esperimenti di Validazione del Proof-of-Concept  
Metaisolator»***

# PROGETTO NOACRONYM METAISOLATOR

Collaborazione tra l'Università degli Studi di Salerno -  
Provincia di Avellino - Museo Irpino

31 Gennaio 2025

## *Esperimenti di Validazione del Proof-of-Concept Metaisolator*

**Ing. Valentina Adinolfi**

**Lavoro in collaborazione con Proff. Fernando Fraternali ed Ada Amendola,  
Ingg. Giovanni Germano e Sara Antinozzi**

***Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno***

PROGRAMMA DI  
VALORIZZAZIONE  
#NOACRONYM+



## Indice

### 1. Introduzione

- 1.1 Principi base della realizzazione di modelli strutturali in scala ridotta
- 1.2 Leggi di similitudine adottate

### 2. Realizzazione di un modello in scala ridotta della statua Xoanon

- 2.1 Cenni Storici
- 2.2 Formule di riscaldamento adottate
- 2.3 Scansione del modello in scala ridotta
- 2.4 Stampa 3D

### 3. Setup sperimentale

- 3.1 Shake Table
- 3.2 Modello di Isolatore Pentamode
- 3.3 Protocollo di Prova

### 4. Descrizione delle prove di validazione

### 5. Commenti sui risultati dei test di validazione

### 6. Considerazioni conclusive

## 1. Introduzione

### *1.1 Principi base della realizzazione di modelli strutturali in scala ridotta*

La realizzazione di **modelli strutturali in scala ridotta** è una tecnica utilizzata per studiare e testare il comportamento di strutture reali attraverso **repliche in scala**. Questo approccio è utile quando testare la struttura reale sarebbe **troppo costoso, difficile o rischioso**.

E' necessario rispettare una serie di principi che garantiscano che il modello riproduca correttamente il comportamento della struttura reale. Questi si basano sulla similitudine e sui concetti di **forza, geometria, materiali, deformazioni e carichi**.

## 1.2 Legge di similitudine adottate

Le leggi di similitudine sono frequentemente adottate nell'esecuzione di test meccanici su modelli in scala ridotta. Nel presente lavoro viene fatto uso delle leggi di similitudine di

Cauchy, che si traducono nelle relazioni riportate in tabella. Si utilizzano il pedice **p** per indicare le grandezze relative al «**prototipo**» da isolare (l'opera d'arte reale) e il pedice **m** per rappresentare le grandezze relative al «**modello**» in scala ridotta

Parameter	Symbol	Scale factor
Length	L	$L_p/L_m=\lambda=3$
Elasticity modulus	E	$E_p/E_m=e=1$
Specific mass	$\rho$	$\rho_p/\rho_m=\rho=1$
Area	A	$A_p/A_m=\lambda^2=9$
Volume	V	$V_p/V_m=\lambda^3=27$
Mass	m	$m_p/m_m=\lambda^3=27$
Displacement	d	$d_p/d_m=\lambda=3$
Velocity	v	$v_p/v_m=1$
Acceleration	a	$a_p/a_m=\lambda^{-1}=1/3$
Weight	W	$W_p/W_m=\lambda^3=27$
Force	F	$F_p/F_m=\lambda^2=9$
Moment	M	$M_p/M_m=\lambda^3=27$
Stress	$\sigma$	$\sigma_p/\sigma_m=1$
Strain	$\varepsilon$	$\varepsilon_p/\varepsilon_m=1$
Time	t	$t_p/t_m=\lambda=3$
Frequency	f	$f_p/f_m=\lambda^{-1}=1/3$

*Fattori di scala dettati dalla legge di similitudine di Cauchy, secondo [Candeias et al., 2004]*

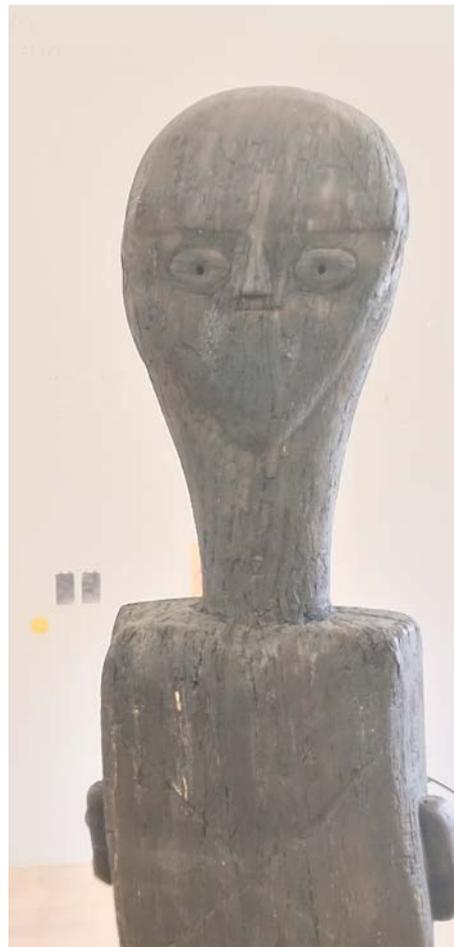
## 2. Realizzazione di un modello in scala ridotta della statua Xoanon

### 2.1 Cenni storici

Lo **Xoanon**, conservato al Museo Irpino di Avellino, è uno dei reperti più importanti della collezione e rappresenta una delle statue più significative ritrovate in Campania, in particolare nella Valle d'Ansanto (AV). Scoperto negli anni '50 nel letto di un torrente da Giovanni Oscar Onorato, lo Xoanon è una **figura antropomorfa stilizzata** con naso triangolare, occhi ovali e una bocca a tratto orizzontale. La croce sul petto potrebbe **avere un significato simbolico** o stilistico, forse legato ad un corpetto indossato sopra una tunica, fermato da una fibula, che ricorda una croce di Sant'Andrea. Sebbene l'interpretazione del simbolo rimanga incerta, lo Xoanon è considerato un **reperto rilevante** per la comprensione delle popolazioni della regione. L'arte dello Xoanon, che risale probabilmente al **periodo protostorico (VIII-VII secolo a.C.)**, riflette le influenze culturali e religiose che stavano diffondendosi nella Campania pre-romana. Sebbene non strettamente legata alla scultura greca classica, la statua presenta tratti stilizzati che suggeriscono l'uso in **contesti religiosi (totem)**. La croce sul petto potrebbe avere un significato legato a pratiche di culto o a tradizioni di offerta. Lo Xoanon si inserisce in un panorama di reperti archeologici che testimoniano il **sincretismo culturale** tra influenze locali e greche, indicando una fusione di tradizioni nella regione.



*Prototipo della statua Xoanon  
(Museo Irpino, Avellino)*



Rilievo fotografico statua Xoanon presso  
Museo Irpino Avellino

## 2.2 Formule di scaling adottate

Le seguenti formule di scaling sono utilizzate per **adattare le grandezze geometriche e meccaniche del modello in scala ridotta** rispetto a quelle **della struttura reale**, al fine di simularne correttamente il comportamento fisico sotto prove su shake-table.

### Fattore di scala geometrico $\lambda$

- $$\lambda = \frac{L_p}{L_m} = \frac{1420}{290} = 4,90$$

$L_p$  = Altezza reale del prototipo statua Xoanon [mm]

$L_m$  = Altezza del modello della statua Xoanon [mm]

$\lambda$  = Fattore di scala

### Scaling del peso

- $$W_m = \frac{W_p}{\lambda^3} = \frac{20}{(4,90)^3} = 0,17 \text{ [kg]}$$

$W_p$  = Peso del prototipo della statua Xoanon [kg]

$W_m$  = Peso del modello della statua Xoanon [kg]

$\lambda$  = Fattore di scala

Peso reale del modello stampato in 3D: 0.19 kg

### Scaling della frequenza

- $$f_m = f_p * \lambda = 1.0 * 4,90 = 4.90 \text{ [Hz]}$$

$f_p$  = Frequenza target della statua isolata [Hz]

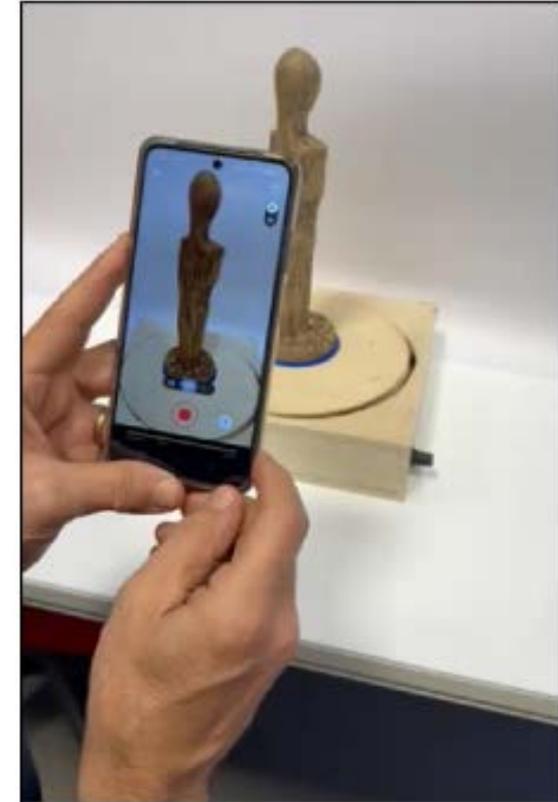
$\lambda$  = Fattore di scala

## 2.3 Scansione del modello in scala ridotta

A partire da un **modello fisico (prototipo)** è necessario l'utilizzo di uno strumento (*Fotogrammetria, Scanner o Laser-Scanner*) in grado di effettuare una scansione 3D per ottenere un modello digitale. Questo processo consente di avere una replica esatta del prototipo che verrà quindi utilizzata per la stampa 3D.



Modello in resina della statua Xoanon  
(Museo Irpino)



Processo di acquisizione attraverso  
scanner

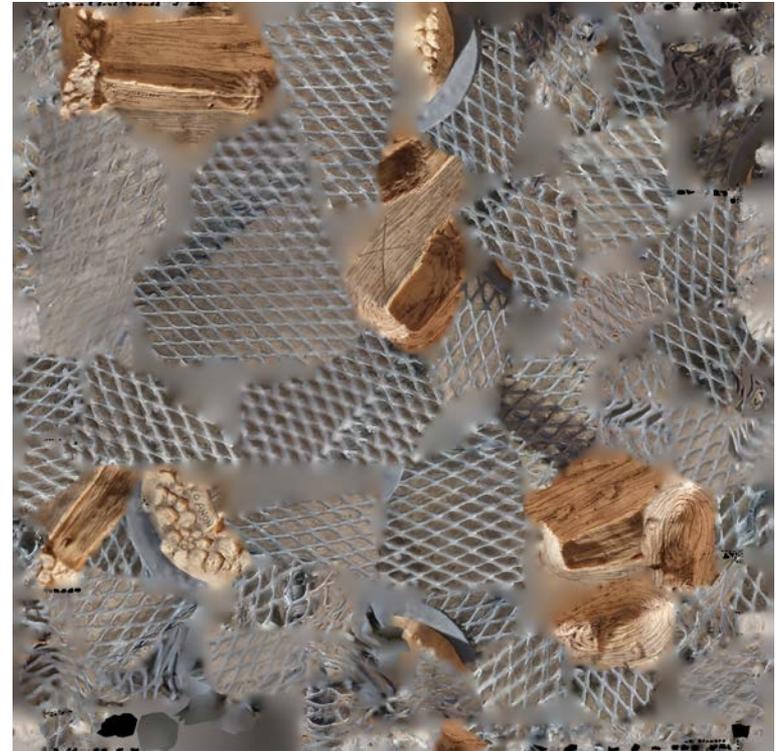


*Prototipo in scala reale*

*Modello in scala ridotta*

## *Elaborazione del modello digitale*

La fase di **elaborazione del modello digitale per la stampa 3D** prevede la conversione di un modello 3D in un file compatibile con la stampante 3D. Attraverso vari passaggi tecnici, il modello viene ottimizzato per la stampa, assicurando precisione, solidità e alta qualità.



*Frames elaborati attraverso  
l'acquisizione scanner*

## *Conversione in formato stampabile*

La **conversione in formato stampabile** consente di **trasformare un modello digitale tridimensionale in un file che può essere interpretato e utilizzato dalla stampante.**

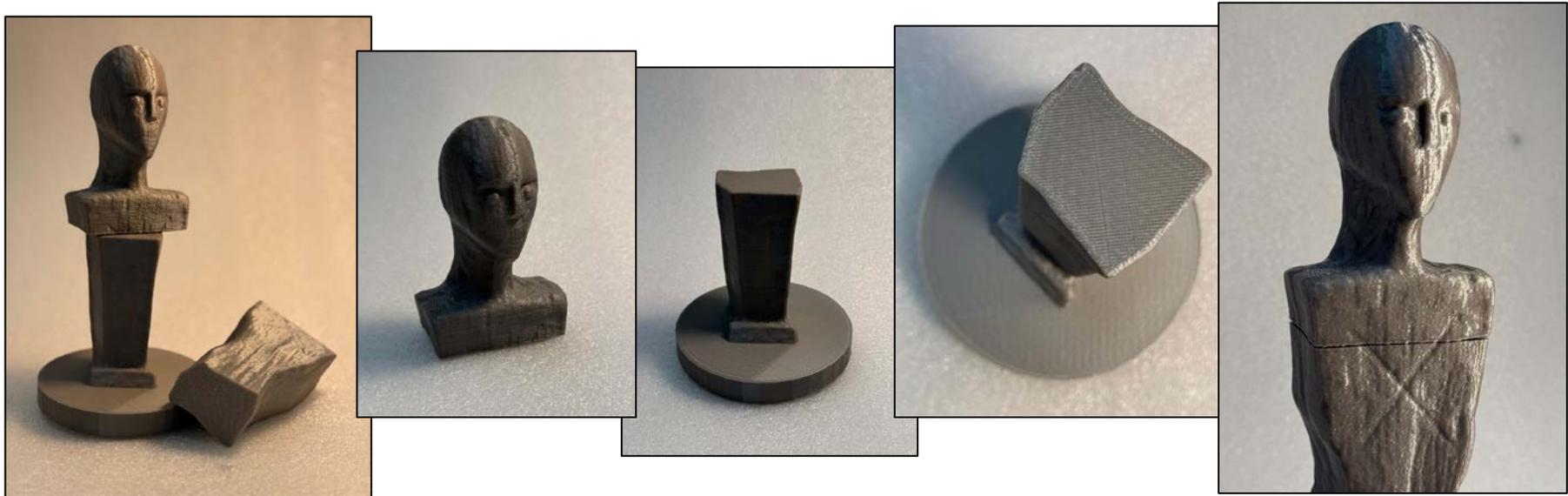
Inizialmente il modello creato con software di progettazione (CAD), non risulta immediatamente compatibile con la stampante, che necessita di un formato di file specifico per eseguire correttamente il processo di stampa.



*Modellazione in ambiente mockup-Simplify3D®*

## 2.4 Stampa 3d

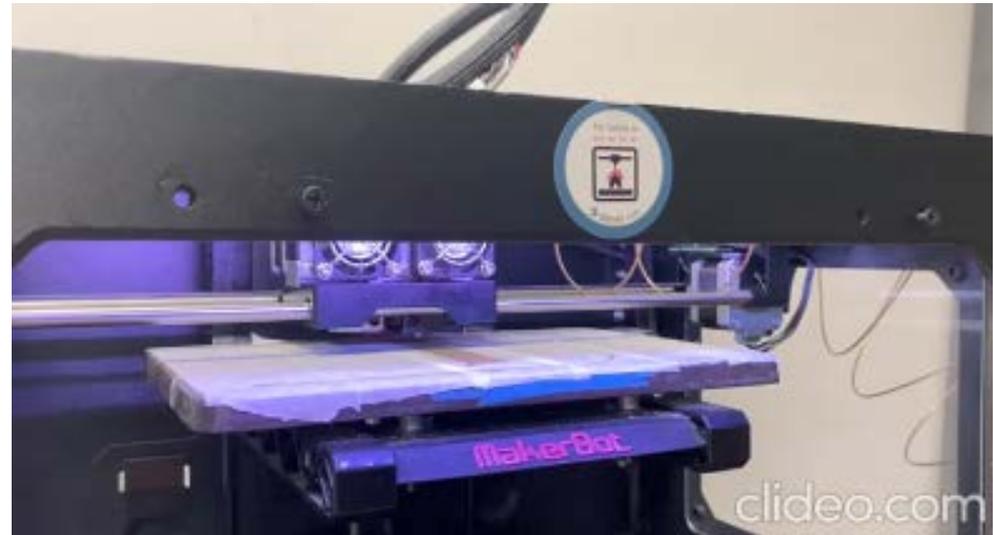
La **stampa 3D**, o **fabbricazione additiva**, è una tecnologia in grado di creare oggetti tridimensionali a partire da un modello digitale. Contrariamente ai metodi tradizionali di produzione, che rimuovono materiale da un blocco (come il fresaggio o la tornitura), la stampa 3D costruisce gli oggetti layer dopo layer con l'aggiunta di materiale. Il modello in questione è stato stampato utilizzando **Acido Polilattico - PLA**, un materiale ecologico e facilmente lavorabile, noto per la sua versatilità e la sua bassa tossicità.



Dettagli modello della statua Xoanon 3D stampato presso il Rapid Prototyping Lab  
(Università degli Studi di Salerno)

## Stampa 3D dell'oggetto

Quando il G-code è caricato, la macchina **stampa** il modello. La stampante deposita strati successivi di materiale (layer), che si solidificano man mano che vengono sovrapposti. Ogni strato è stampato con precisione, seguendo il percorso e le istruzioni definite dal G-code generato dal software di slicing.



Impostazione del processo di stampa- Rapid Prototyping Lab  
Università degli Studi di Salerno

## Step fondamentali

**Scansione 3D dell'oggetto fisico**



Lo scanner 3D rileva la **geometria dell'oggetto** con l'emissione di luce o raggi laser e misura la riflessione per creare un modello digitale.

**Elaborazione del modello digitale**



Il prodotto è una **mesh tridimensionale**, costituito da poligoni (facce). I software di modellazione 3D «puliscono», «riparano» ed «ottimizzano» il modello, eliminando imperfezioni o aggiungendo dettagli

**Conversione in formato stampabile**



Il modello digitale viene **convertito in un formato compatibile** con la stampa 3D. Il software di slicing, prepara il modello scomponendolo in strati sottili.

**Stampa 3D dell'oggetto**



Il processo di stampa avviene per **layer**. La qualità dipende dalla precisione della scansione, dalla risoluzione e dal materiale utilizzato.

## 3. Set up sperimentale adottato

### 3.1 Shake - Table

Le **Shake-Tables** sono utilizzate per studiare la risposta di modelli, sia in scala ridotta che reale, di strutture agli eventi sismici, applicando storie di spostamenti alle piastre che inducono vibrazioni nella struttura durante il test. Le principali caratteristiche del set-up includono la **capacità di imporre spostamenti laterali** di grande entità e di forme diverse (come triangolari o sinusoidali), **l'applicazione di carichi verticali** molto elevati e il **raggiungimento di elevate velocità di picco** nel movimento orizzontale.



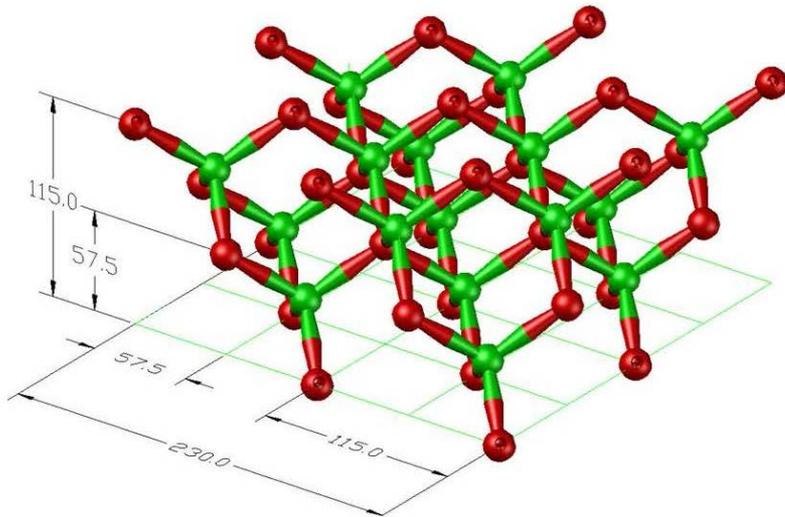
*Fotografia della Shake Table assemblata - Laboratorio STRENGHT  
(Univeristà degli Studi di Salerno)*

Weight (kN)	2.94
Total Length $L \times$ Width $W \times$ Height $H$ (mm) <sup>1</sup>	2570 $\times$ 1200 $\times$ 1000
Base plate dimensions (mm)	700 $\times$ 700
Top plate dimensions (mm)	700 $\times$ 700
Vertical distance base-top plate (mm)	20 – 550
Maximum horizontal force (kN)	3
Maximum vertical load (kN)	30
Maximum displacement of the base plate (mm)	$\pm$ 200
Maximum frequency (Hz)	20
Maximum velocity (m/s)	1
Maximum acceleration (m/s <sup>2</sup> )	3
External transverse beams dimensions (mm)	1800 $\times$ 900
Central transverse beam dimensions (mm)	900 $\times$ 900
Linear guideways length <sup>2</sup> (mm)	1200

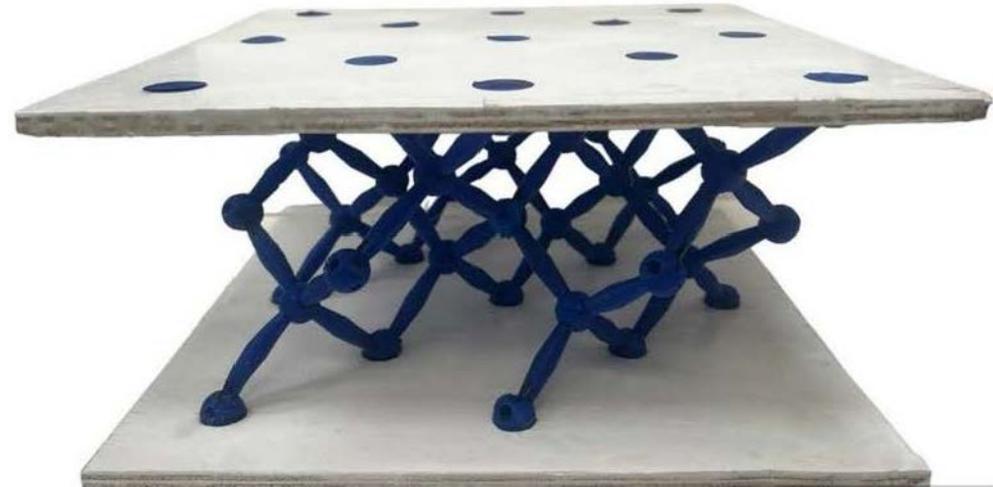
*Proprietà target del setup della Shake Table [Germano et al., 2023]*

## 3.2 Modello di isolatore pentamode

Il processo di fabbricazione consiste nell'assemblaggio di componenti stampati in 3D per creare i giunti e gli elementi di supporto del reticolo, utilizzando filamenti di TPU tramite **modellazione a deposizione fusa**.



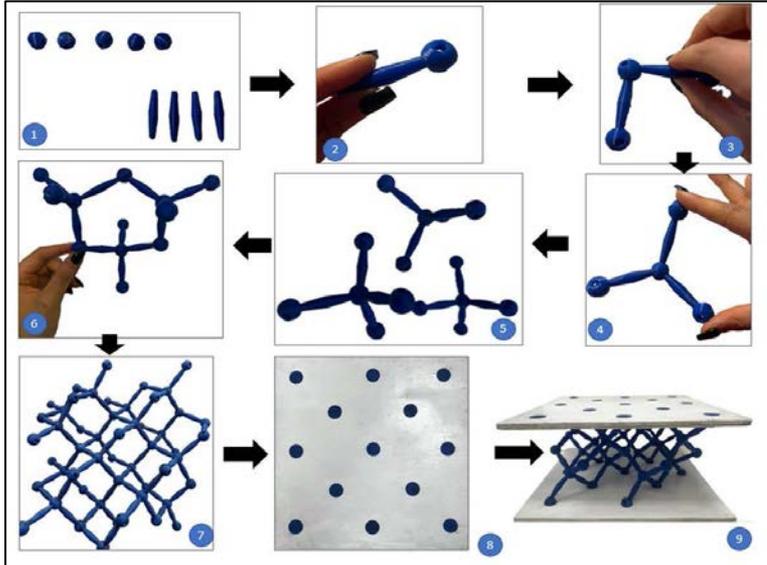
Vista assonometrica dell'isolatore pentamode  
[Adinolfi et al., 2025]



Vista assonometrica del PMB assemblato con piastre di irrigidimento  
[Adinolfi et al., 2025]

Il modello utilizzato si compone di **64 aste e 50 nodi**, stampati considerando un'angolazione di 90 gradi rispetto al piano di posa.

## 3.2 Modello di isolatore pentamode



*Snapshot estrapolati dal video di assemblaggio  
[Adinolfi et al., 2025]*

L'assemblaggio del reticolo pentamode è stato realizzato inserendo gli elementi di supporto nei giunti nodali sferici e incollandoli insieme.

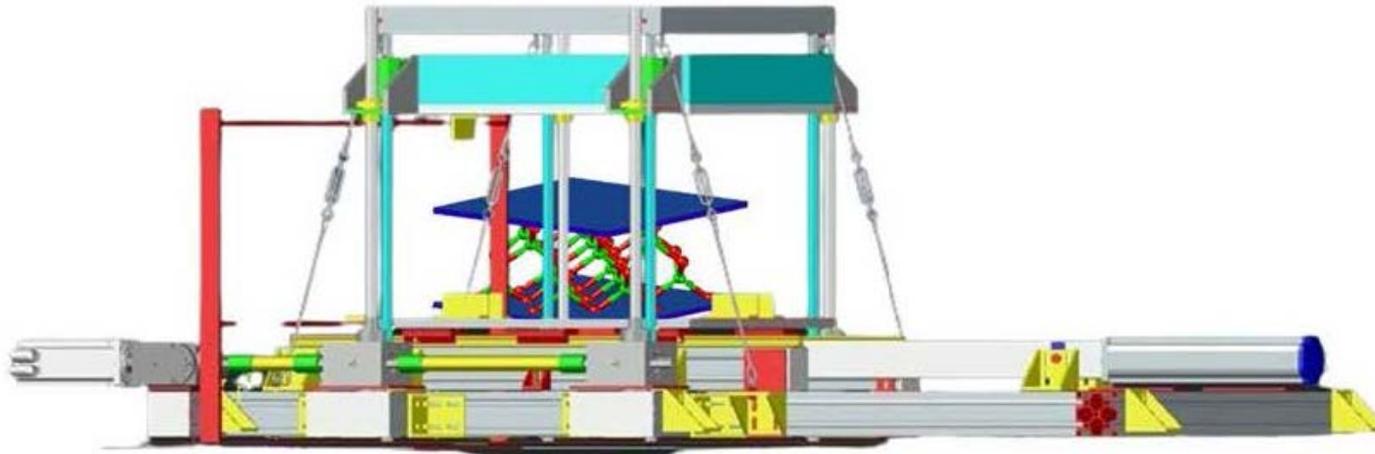


*Video della procedura di assemblaggio  
[Adinolfi et al., 2025]*

Successivamente, il reticolo è stato **confinato tra piastre di irrigidimento** terminali in legno (300 mm x 300 mm, spessore 10 mm), create fresando un pannello di compensato multistrato ottenendo 13 alloggiamenti per nodi.

## 3.3 Protocollo di prova

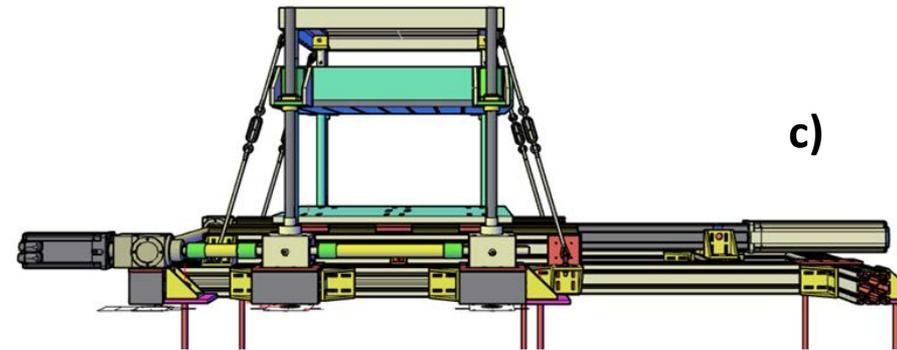
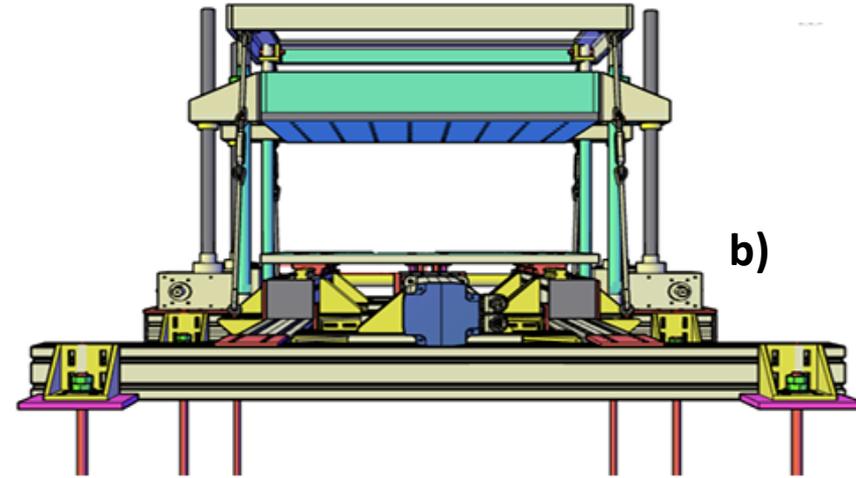
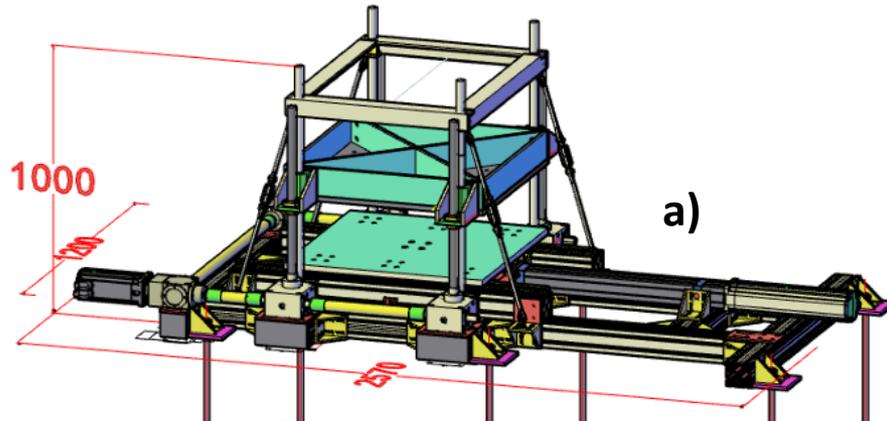
L'isolatore pentamode è stato installato sul piatto inferiore della Shake-Table attraverso bullonatura. Lo **spostamento orizzontale viene acquisito con l'uso di un sensore laser** puntato sulla tavola inferiore avente una precisione di 0,01 mm, posizionato inferiormente al piatto della Shake Table. L'acquisizione dei dati è stata effettuata utilizzando il sistema StrainSmart® 8000 di Micro-Measurements.



*Modello CAD del setup sperimentale Shake Table - isolatore Pentamode*  
*Laboratorio STRENGTH- Università degli Studi di Salerno*  
*[Adinolfi et al., 2025]*

## 3.3 Protocollo di prova

Il caso in esame presenta un setup ideato per applicare una forza orizzontale al piatto inferiore della tavola in grado di generare uno **spostamento laterale** pari a  $\pm 30\text{mm}$  con una frequenza da 1 fino a 3Hz, ed uno spostamento laterale pari a  $\pm 10\text{mm}$  con una frequenza da 1Hz fino a 5Hz.



*Differenti viste del modello CAD della Shake Table a) Vista isometrica complessiva b) Vista frontale c) Vista laterale [Germano et al., 2023]*

## 4. Descrizione delle prove di validazione

*Test effettuati senza senza Pentamode*



Spostamento laterale =  $\pm 10$  mm  
f: 1-5 Hz



Spostamento laterale =  $\pm 30$  mm  
f: 1-3 Hz

## 4. Descrizione prove

*Test effettuati con Pentamode*



Spostamento laterale = +/- 10 mm  
f: 1-5 Hz



Spostamento laterale = +/- 30 mm  
f: 1-3 Hz

## 5. Commenti sui risultati dei test di validazione

Come si è visto nella presentazione del Prof. Fraternali, la condizione di ribaltamento o "overturning" (con conseguente attivazione del fenomeno di rocking) «del provino si verifica quando il **momento ribaltante** ( $M_{ov}$ ) supera il **momento stabilizzante** ( $M_{st}$ ):

$$\begin{aligned} M_{ov} &= m_s H |\ddot{u}_g + \ddot{x}_b| \\ M_{st} &= m_s (g + \ddot{v}_g) B \\ M_{ov} \geq M_{st} &\Rightarrow |\ddot{u}_g + \ddot{x}_b| \geq \frac{B}{H} (g + \ddot{v}_g) \end{aligned}$$

La suddetta relazione può essere espressa in termini di frequenza sollecitante, ammettendo di applicare una legge di spostamento sinusoidale alla base del provino. Si ottiene la seguente formula della frequenza di overturning teorica  $f_{ov}$  in assenza di isolamento

$$u_g = u_0 \sin(\omega t) \quad \text{Legge di spostamento della tavola}$$

$$\dot{u}_g = u_0 \omega \cos(\omega t) \quad \text{Velocità della tavola}$$

$$\ddot{u}_g = -u_0 \omega^2 \sin(\omega t) \quad \text{Accelerazione della tavola}$$

$$|\ddot{u}_{g,max}| = u_0 \omega^2 = u_0 (2\pi f)^2 \quad \longrightarrow \quad u_0 4\pi^2 f^2 \geq \frac{B}{H} g \quad \longrightarrow \quad f_{ov} = \sqrt{\frac{B g}{4 \pi^2 u_0 H}}$$

↑  
*Accelerazione massima della tavola*

↑  
*Frequenza teorica di overturning in assenza di isolamento*

## 5. Commenti sui risultati dei test di validazione

Nei test in assenza di isolamento sul modello Xoanon in scala ridotta si ottengono dalla formula di  $f_{ov}$  le seguenti frequenze teoriche di ribaltamento

con  $u_0 = 10$  mm (frequenza massima di sollecitazione pari a 5 Hz)

$$f_{ov} = \sqrt{\frac{49,5 * 9,81}{125 * 4\pi^2 * 0,01}} = 3,13 \text{ Hz}$$

con  $u_0 = 30$  mm (frequenza massima di sollecitazione pari a 3 Hz)

$$f_{ov} = \sqrt{\frac{49,5 * 9,81}{125 * 4\pi^2 * 0,03}} = 1,81 \text{ Hz}$$

Tali frequenze sono state riscontrate, con buona approssimazione, durante i test di validazione.

In presenza di isolamento pentamode, al contrario, **NON si sono riscontrati fenomeni di ribaltamento e di rocking per frequenze sollecitanti da 1 a 5 Hz**. Si ricordi che la frequenza target del modello isolato in scala ridotta è pari approssimativamente a 5 Hz.

## 6. Considerazioni conclusive - 1/2

In conclusione, l'impiego dell'isolatore Pentamode ha dimostrato di offrire un **significativo miglioramento** nella protezione del modello di statua Xoanon. Quest'ultimo è stato realizzato in scala ridotta, utilizzando opportune formule di scaling, al fine di riprodurre il comportamento sotto sisma della statua reale. I test su tavola vibrante hanno evidenziato l'assenza di pericolosi fenomeni di rocking nel modello di statua isolato.

Si può concludere che gli isolatori Pentamode offrono diversi vantaggi per la protezione sismica delle opere d'arte, configurandosi come dispositivi particolarmente competitivi rispetto ad altre tecnologie disponibili sul mercato. Alcuni dei principali vantaggi sono elencati di seguito:

- **Comportamento metamateriale:** I sistemi PB possono essere facilmente progettati per resistere a tensioni e per ottenere prestazioni specifiche, sfruttando principalmente la **geometria** della microstruttura reticolare oltre che la composizione chimica del materiale.
- **Personalizzazione della microstruttura:** È possibile modificare il reticolo per ottenere **combinazioni desiderate** di risposta a taglio e compressione, migliorando la versatilità del sistema.

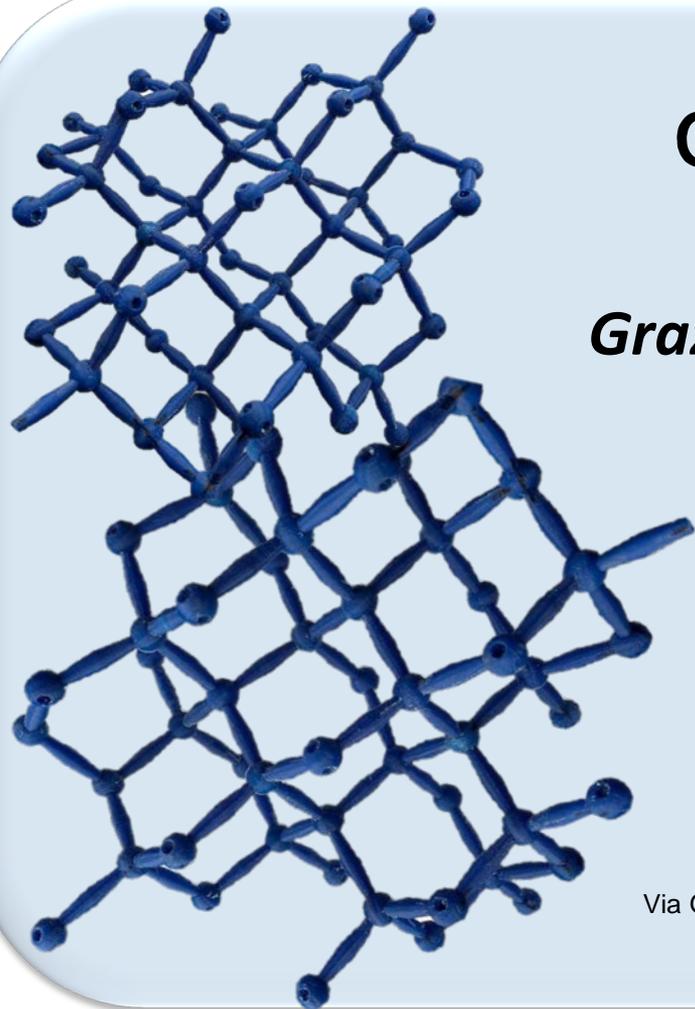
## 6. Considerazioni conclusive - 2/2

- **Uso di materiali diversi:** Si possono impiegare **materiali rigidi** per le piastre di irrigidimento e **materiali morbidi** per le barre (come nylon o PMMA), per ottimizzare le proprietà meccaniche e di dissipazione.
- **Semplicità di implementazione e utilizzo:** Si può personalizzare e adattare la geometria del reticolo in funzione delle esigenze d'uso e degli spazi disponibili, facendo uso di tecniche di prototipazione rapida facilmente accessibili.
- **Estensioni future del presente studio:** raggiungimento di un livello di maturità tecnologica (TRL) pari a 6 attraverso una validazione in ambiente industrialmente rilevante del Proof-of-Concept METAISOLATOR.

***Queste conclusioni evidenziano i vantaggi e le possibilità offerte dai sistemi Pentamode in contesti di isolamento sismico delle opere d'arte.***

## Principali riferimenti bibliografici

1. Amendola, A., Smith, C.J., Goodall, R., Auricchio, F., Feo, L., Benzoni, G., **Fraternali, F.** Experimental response of additively manufactured metallic pentamode materials confined between stiffening plates. COMPOSITE STRUCTURES, 142, 254–262, 2016.
2. Amendola, A., Carpentieri, G., Feo, L., **Fraternali, F.** Bending dominated response of layered mechanical metamaterials alternating pentamode lattices and confinement plates. Composite Structures, 157, 71–77, 2016.
3. **Fraternali, F.**, Amendola, A. Mechanical modeling of innovative metamaterials alternating pentamode lattices and confinement plates. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 99, 259-271, 2017
4. **Fraternali, F.**, Amendola, A., Benzoni, G. Innovative seismic isolation devices based on lattice materials: A review. Ingegneria Sismica, 35(4), 93-113, 2018
5. **Adinolfi, V.**, Germano, G. On the discrete assembly of additively manufactured pentamode lattices confined between stiffening plates. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 47, 70, 2025.
6. Germano G., Qaderi S., Adinolfi V., de Castro Motta J., Benzoni G., Amendola A., Ruzzene M., **Fraternali F.**, Design and modeling of an in-house-built shake table setup for testing prototypes of innovative seismic isolators. Ing. Sismica, 40(1), 58-73, 2023.
7. Candeias P., Costa A.C., Coelho E., Shaking table tests of 1:3 reduced scale models of four-story unreinforced masonry buildings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 2199; 2004.



**diciv** Dipartimento di  
*Ingegneria Civile*

*Grazie per l'attenzione!*

Per info e curiosità  
[vadinolfi@unisa.it](mailto:vadinolfi@unisa.it)  
[www.diciv.unisa.it](http://www.diciv.unisa.it)

Università degli Studi di Salerno  
**Dipartimento di Ingegneria Civile**  
Via Giovanni Paolo II, 13284084 Fisciano (SA)

