



*Ministero dello Sviluppo Economico*

---

Ricevuta di presentazione  
per  
Brevetto per invenzione industriale



Domanda numero: 102015000015521

Data di presentazione: 18/05/2015

**DATI IDENTIFICATIVI DEL DEPOSITO**

Ruolo	Mandatario
Data di compilazione	18/05/2015
Titolo	DISPOSITIVO DI ISOLAMENTO SISMICO
Carattere domanda	Ordinaria
Esenzione	NO
Accessibilità al pubblico	NO
Numero rivendicazioni	15
Autorità depositaria	

**RICHIEDENTI**

Natura giuridica	Persona giuridica
Denominazione	UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI SALERNO
Partita IVA	80018670655
Nazione sede legale	Italia
Tipo Società	le universita'

**DOMICILIO ELETTIVO**

Cognome/R.sociale	IP Sextant S.r.l.
Indirizzo	via Antonio Salandra 18
CAP	00187
Comune	Roma
Telefono	06 - 42272334
Fax	06 - 42274000
Indirizzo Email	info@ipsextant.eu
Riferimento depositante	P1091IT00

**MANDATARI**

Cognome	Nome
Balzano	Francesca
Scilletta	Andrea

## INVENTORI

Cognome	Nome	Nazione residenza
Fraternali	Fernando	Italia

## CLASSIFICAZIONI

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo	Descrizione
E	04	H			

## NUMERO DOMANDE COLLEGATE

## DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

Tipo documento	Riserva	Documento
Rivendicazioni in inglese	NO	P1091IT00-en claims.pdf.p7m hash: fadd311f206264c6297980e5de767d40
Disegni	NO	P1091IT00 - di.pdf.p7m hash: 75cae84e86dc2ee94f355dc3d5f2a484
Rivendicazioni	NO	P1091IT00 - RIV. IT.pdf.p7m hash: 588a65d24e4673197d98dbf65783cbbc
Riassunto	NO	P1091IT00 - Riassunto.pdf.p7m hash: 8a39ce2933c35895277eb1da83bdf8d
Descrizione in italiano*	NO	P1091IT00 - Descrizione.pdf.p7m hash: 832fa534e76a9e9e49aa609bfd591503
Lettera di Incarico	SI	hash:

RIASSUNTO  
DISPOSITIVO DI ISOLAMENTO SISMICO

-----

Dispositivo isolatore sismico conformato per essere posizionato in corrispondenza della base di un edificio per assorbire una vibrazione derivante da un movimento sismico, comprendente una struttura stratiforme (100) in cui uno strato intermedio (12) realizzato in un materiale pentamode è compreso tra un elemento laminare superiore ed un elemento laminare inferiore realizzati in un materiale rigido.

## DISPOSITIVO DI ISOLAMENTO SISMICO

\* \* \*

La presente invenzione riguarda un dispositivo isolatore conformato per isolare una struttura o una costruzione dalle vibrazioni meccaniche, in particolare dalle vibrazioni provocate da un movimento sismico.

Le onde sismiche causate dai terremoti fanno oscillare e ondeggiare le strutture in diversi modi, a seconda della frequenza, del tipo di movimento del suolo (moto sussultorio od ondulatorio), dell'altezza e della tipologia di costruzione.

Sono noti dispositivi di isolamento delle costruzioni che vengono utilizzati per evitare danni o cedimenti strutturali causati dalle oscillazioni conseguenti ad una attività sismica.

Tali dispositivi sono principalmente di tipo attivo o passivo, a seconda che richiedano o meno l'utilizzo di una fonte di energia esterna.

I dispositivi di tipo passivo utilizzano l'energia generata dalla risposta della struttura stessa per fornire le forze di controllo e di isolamento delle vibrazioni.

Nella tecnica nota, l'isolamento sismico di una struttura si ottiene disponendo la costruzione sopra un piano di isolatori di gomma - o elastomerici - multistrato, rinforzati mediante lamierini metallici.

Gli isolatori sono molto deformabili in direzione orizzontale in maniera tale da consentire una oscillazione della costruzione come un corpo rigido.

Interponendo gli isolatori, che presentano un'elevata rigidità verticale ed una bassa rigidità orizzontale, tra le fondazioni e le costruzioni si disaccoppiano le frequenze del sisma dalle frequenze della costruzione e si evita l'insorgere di fenomeni di risonanza. In questo modo la struttura isolata si comporta durante il sisma quasi come un corpo rigido che tende a rimanere fermo rispetto alle vibrazioni del terreno.

Sono anche noti dispositivi ammortizzatori di tipo viscoelastico che utilizzano la deformazione di materiali viscoelastici come mezzi per dissipare energia. I materiali viscoelastici rientrano completamente nella loro forma originale dopo

una deformazione, con un determinato ammontare di energia perso in calore. Tuttavia, la rigidità e le proprietà ammortizzanti dei polimeri viscoelastici dipendono dal livello della deformazione nel materiale, dalla sua temperatura e dalla frequenza di carico.

Uno svantaggio dei dispositivi noti è che devono essere progettati in maniera tale da presentare un periodo proprio fondamentale di oscillazione superiore a quello della struttura non isolata. Pertanto tali dispositivi comportano elevati costi di progettazione.

Un ulteriore svantaggio è che per funzionare correttamente i dispositivi dell'arte nota richiedono una movimentazione relativa tra le parti significativa.

Un ancora ulteriore svantaggio è dovuto al fatto che i materiali elastomerici sono soggetti a fenomeni di invecchiamento e di deformazione viscosa ("creep") che ne cambiano le proprietà chimico fisiche nel tempo. Si rendono pertanto necessarie frequenti operazioni di manutenzione che incidono sul costo dei dispositivi installati.

Pertanto, il problema tecnico posto e risolto dalla presente invenzione è quello di fornire un dispositivo di isolamento sismico che consenta di ovviare agli inconvenienti sopra menzionati con riferimento alla tecnica nota.

Tale problema viene risolto da un dispositivo isolatore secondo la rivendicazione 1. Caratteristiche preferite della presente invenzione sono presenti nelle rivendicazioni dipendenti della stessa.

Vantaggiosamente, il trovato oggetto della presente invenzione consente di ottimizzare le proprietà di isolamento del dispositivo tramite la possibilità di adattare le proprietà meccaniche dello strato deformabile - tramite una variazione del reticolo e del materiale - a quelle della struttura da isolare.

Un ulteriore vantaggio del dispositivo oggetto della presente invenzione risiede nel fatto che esso può essere progettato in modo da possedere una capacità di isolamento totale, o pressoché totale, nei confronti delle vibrazioni indotte da onde di taglio. L'isolamento offerto da tale dispositivo nei confronti delle onde

di taglio è infatti pressoché totale in presenza di un modulo di elasticità tangenziale del dispositivo circa pari a zero; è invece parziale in corrispondenza di un modulo di elasticità tangenziale di qualche ordine di grandezza inferiore al modulo di compressibilità volumetrica, seppur diverso da zero.

I dispositivi di isolamento sismico di tecnica nota in gomma e lamierini metallici non sono in grado di raggiungere moduli di elasticità tangenziale prossimi allo zero e, contemporaneamente, moduli di compressibilità volumetrica sufficientemente elevati, il che rende tali dispositivi non particolarmente adatti all'isolamento sismico di strutture ed edifici molto deformabili, che siano dotati di periodi propri di vibrazione particolarmente elevati.

Un ancora ulteriore vantaggio è la possibilità di aumentare la durata del ciclo di vita del dispositivo, ad esempio variando il materiale dello strato deformabile, senza cambiare le proprietà elastiche del dispositivo stesso che sono legate alla struttura reticolare dello strato deformabile.

Ancora, vantaggiosamente, il trovato oggetto della presente invenzione consente una misurazione ed una regolazione dinamica delle proprietà del materiale deformabile aumentando quindi l'efficacia dell'isolamento.

Altri vantaggi, caratteristiche e le modalità di impiego della presente invenzione risulteranno evidenti dalla seguente descrizione dettagliata di alcune forme di realizzazione, presentate a scopo esemplificativo e non limitativo.

La presente invenzione verrà ora descritta, a titolo illustrativo, ma non limitativo, secondo sue preferite forme di realizzazione, con particolare riferimento alle Figure dei disegni allegati, in cui:

la Figura 1a mostra una prima vista schematica frontale di una struttura stratiforme di una forma di realizzazione del dispositivo di isolamento secondo la presente invenzione;

la Figura 1b mostra la struttura di Figura 1a in una conformazione deformata;

la Figura 2 mostra una vista prospettica di una cella unitaria (a) e di una cella primitiva (b) del reticolo di Figura 1a;

la Figura 3 mostra un grafico di confronto tra curve di carico  $\tau/\gamma$  relative al trovato secondo l'invenzione ed un dispositivo della tecnica nota;

la Figura 4 mostra un grafico di confronto tra curve di carico  $\sigma/\epsilon$  relative al trovato secondo l'invenzione ed un dispositivo della tecnica nota;

la Figura 5 mostra un grafico di confronto tra curve relative a simulazioni della tecnica nota; e

la Figura 6 mostra una cella primitiva pentamode (a), cubica semplice (b), BCC (c), Octet truss (d) e Tetracaidecadrica (e).

Facendo riferimento alle Figure 1a ed 1b, si può osservare che in una preferita forma di realizzazione il dispositivo isolatore sismico secondo la presente invenzione comprende una struttura stratiforme 100 ed è conformato per essere posizionato in corrispondenza della base di un edificio per assorbire una vibrazione derivante da un movimento sismico. La struttura stratiforme presenta uno strato intermedio 12 realizzato in un materiale almeno parzialmente deformabile del tipo pentamode. Lo strato intermedio è compreso tra un elemento laminare superiore 11 ed un elemento laminare inferiore 13 realizzati in un materiale rigido, ad esempio un materiale metallico tipo l'acciaio.

Vantaggiosamente, i cosiddetti *pentamode* sono materiali reticolari che presentano moduli di elasticità a compressione ed a taglio regolabili in funzione delle dimensioni delle membrane e dei nodi e delle proprietà meccaniche dei materiali utilizzati. I pentamode rientrano nel campo dei metamateriali e sono formati da reticoli strutturali di tipo periodico a diverse scale, opzionalmente combinabili con masse concentrate e/o materiali matrice. I materiali pentamode presentano proprietà meccaniche non convenzionali, che sono strettamente correlate alle caratteristiche geometriche dei reticoli strutturali che li compongono e solo in parte minore alla natura dei materiali utilizzati. Tali proprietà comprendono ad esempio rapporti tra resistenza (o rigidità) e peso di tipo "estremo" (ovvero dotati di modi di deformazione molto soffici e modi di deformazione molto rigidi); eccellenti capacità di recupero della deformazione; comportamento auxetico (caratterizzato da coefficienti di Poisson minori di zero); capacità di isolamento dalle

vibrazioni pressoché totale in corrispondenza di opportuni intervalli di frequenza (materiali “band-gap”); capacità di isolamento acustico e di ri-direzione delle vibrazioni meccaniche; densità di massa e rigidezze effettive pressoché nulle o minori di zero in campo dinamico; indici di rifrazione negativi; funzionamento come superlenti acustiche e/o per il confinamento locale di onde meccaniche.

I materiali pentamode sono anche noti come “materiali estremi”. Tale definizione è stata introdotta per raggruppare una varietà di materiali compositi, reticoli periodici, schiume strutturali, materiali cellulari, che mostrano contemporaneamente modi di deformazione molto “soffici” e modi di deformazione molto “rigidi”. I materiali estremi sono individuati come unimode, bimode, trimode, quadramode o pentamode, in relazione al numero di modi soffici che presentano.

In particolare, i reticoli pentamode, presentano cinque modi soffici ed un solo modo rigido. Quest’ultimo coincide con il modo di deformazione volumetrica del materiale (cosiddetta deformazione “sferica”).

Un materiale pentamode pertanto presenta un modulo di elasticità volumetrica molto elevato e moduli di elasticità tangenziale sostanzialmente nulli o pressappoco pari a zero.

Si tratta di materiali solidi che hanno comportamento meccanico molto simile a quello dei materiali fluidi (ovvero bassa comprimibilità ed elevata deformabilità a taglio).

Un recente studio (A.N. Norris, *Mechanics of elastic networks. Proceeding of the Royal Society of London A*, 470, 20140522, 2014) presenta un approccio dal discreto al continuo per la stima dei moduli elastici di diverse strutture reticolari periodiche, che includono materiali con celle unitarie di tipo pentamode, celle a cristallo cubico semplice, celle a cristallo cubico a corpo centrato (BCC), celle “octet truss” e celle a geometria tetracaedrica. Si riportano di seguito, brevemente, i principali risultati ottenuti in tale studio, con riferimento al caso generale di un reticolo periodico dello spazio a  $d$ -dimensioni. La cella primitiva di tale reticolo, definita come il volume più piccolo che genera il reticolo attraverso la tassell-

lazione dello spazio (insieme di poliedri adiacenti identici che ricoprono completamente lo spazio tridimensionale), sia composta da un poliedro costruito intorno ad un nodo centrale ed includa un numero  $Z$  di nodi vicini (di frontiera) collegati al nodo centrale attraverso membrane solide (o aste). Si conviene di denotare con il simbolo  $V$  il volume occupato da tale cella. Con riferimento alle suddette tipologie di celle unitarie esaminate, il tensore di elasticità effettivo del reticolo (scala mesoscopica) è dotato di simmetria cubica, essendo caratterizzato da soli tre coefficienti di rigidezza tra loro indipendenti (coefficienti  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  e  $C_{44}$  nella notazione di Voigt).

Le deformabilità assiali e flessionali delle membrane del reticolo sono rispettivamente definite come segue:

$$M_i = \int_0^{R_i} \frac{dx}{E_i A_i} \quad (1)$$
$$N_i = \int_0^{R_i} \frac{x^2 dx}{E_i I_i}$$

dove:  $x$  è un'ascissa introdotta lungo lo sviluppo longitudinale della generica membratura, con origine nel nodo di confluenza delle membrane all'interno della cella unitaria;  $R_i$ ,  $E_i$ ,  $A_i$  e  $I_i$  sono rispettivamente la lunghezza, il modulo di Young, l'area della sezione retta ed il momento d'inerzia della sezione retta della  $i$ -esima asta, che si assume dotata di simmetria polare ( $i = 1, \dots, Z$ ).

Trascurando le forze che nascono nelle membrane a seguito della deformabilità dei nodi e seguendo l'approccio dal discreto al continuo suggerito dal lavoro di Norris, è agevole pervenire ai risultati presentati in Tabella 1 (in cui sono riassunte alcune celle unitarie e proprietà meccaniche di forme di realizzazione alternative di materiali reticolari).

In particolare,  $K = (C_{11} + 2C_{12})/3$  denota il modulo di comprimibilità volumetrica (o modulo elastico di volume);  $G = \mu_1 = C_{44}$  denota il modulo di elasti-

rità (o modulo elastico di taglio) principale e  $\mu_2 = (C_{11} - C_{12})/2$  denota un secondo modulo di elasticità tangenziale del reticolo.

Tutti i reticoli esaminati in Tabella 1, con eccezione di quello corrispondente al caso con  $Z = 14$  (reticolo a celle tetracaidecaedriche), sono caratterizzati da membrature tra loro tutte identiche, che sono ossia dotate da valori uguali delle quantità  $R_i$ ,  $M_i$ , e  $N_i$ , nel seguito denotati, rispettivamente, con i simboli  $R$ ,  $M$  e  $N$ . La cella *tetracaidecaedrica* deriva invece dall'unione di una cella cubica semplice con lati di lunghezza  $a$  ( $Z = 6$ ) - composta da membrature tra loro identiche dotate di lunghezza  $R_1 = \sqrt{2}a$  e deformabilità  $M_1$  e  $N_1$  - e di una cella BCC ( $Z = 8$ ) troncata con un ottaedro regolare dotato di spigoli di lunghezza  $a$  - composta da membrature tra loro identiche con lunghezza  $R_2 = \sqrt{\frac{3}{2}}a$  e deformabilità  $M_2$  e  $N_2$ .

Il comportamento limite del reticolo dominato dalla deformabilità estensionale (o "stretch-dominated regime") è caratterizzato da deformabilità flessionali tendenti ad infinito ( $N_i \rightarrow \infty$ ), ossia da rigidzze flessionali trascurabili rispetto a quelle estensionali.

In corrispondenza di tale regime, è possibile dedurre dai risultati riportati in Tabella 2 riportata di seguito (che mostra le proprietà geometriche di uno strato intermedio pentamode di forme realizzative alternative del dispositivo isolatore secondo l'invenzione) che il reticolo pentamode ( $Z = 4$ ) ha entrambi i moduli elastici a taglio nullo ( $G = \mu_2 = 0$ ) e soltanto il modulo di volume  $K$  diverso da zero. Tale regime corrisponde in effetti al comportamento pentamode teorico richiamato in presenza, con 5 modi di deformazioni soffici ed un solo modo di deformazione rigido (il modo di deformazione con variazione di volume del materiale o modo di deformazione sferico).

Tale comportamento meccanico è del tutto analogo a quello dei materiali fluidi con viscosità pressoché nulla, il che giustifica la definizione di materiale "fluidico" di tipo "solido" (o "solid-water"), che spesso viene attribuita al reticolo pentamode.

Cella primitiva	$K$	$G/K$	$\mu_2/K$	$V$
Pen- tamode (Z=4) Figura 6a	$\frac{4R^2}{9MV}$	$\frac{9M}{4M + 2N}$	$\frac{3M}{2N}$	$\frac{64}{3\sqrt{3}}R^3$
Cubica semplice (Z=6) Figura 6b	$\frac{2R^2}{3MV}$	$\frac{3M}{2N}$	$\frac{3}{2}$	$8R^3$
BCC (Z=8) Figura 6c	$\frac{8R^2}{9MV}$	$1 + \frac{M}{2N}$	$\frac{3M}{2N}$	$\frac{32}{3\sqrt{3}}R^3$
“Octet truss” (Z=12) Figura 6d	$\frac{4R^2}{3MV}$	$\frac{3}{4} + \frac{3M}{4N}$	$\frac{3}{8} + \frac{9M}{8N}$	$4\sqrt{2}R^3$
Tetra- caidro (Z=14) Figura 6e	$\frac{1}{9V} \left[ \frac{6R_1^2}{M_1} + \frac{8R_2^2}{M_2} \right]$	$\frac{3}{2} \frac{1/M_1 + 1/N_2}{1/M_1 + 1/M_2}$	$\frac{1/N_2 + 2/M_2 + 3/N_1}{2(1/M_1 + 1/M_2)}$	$8\sqrt{2}a^3$

Tabella 1

Il dispositivo isolatore secondo la presente invenzione comprende uno strato intermedio 12 almeno parzialmente deformabile, ovvero uno strato di materiale che sia in particolare deformabile per assorbire forze di taglio. In particolare, il materiale pentamode utilizzato è conformato come un reticolo compren-

dente una pluralità di celle unitarie 45, opzionalmente conformate come un cristallo cubico a facce centrate, come mostrato in Figura 2 (a). E' comunque possibile prevedere altre forme di realizzazione presentanti altre geometrie pentamode, realizzando, in maniera del tutto arbitraria, reticoli che presentino un numero di membrane concorrenti nel generico nodo pari a  $d+1$ , dove  $d$  indica la dimensione spaziale del dispositivo ( $d=3$  nel caso di dispositivi tridimensionali;  $d=2$  nel caso di dispositivi bidimensionali).

Preferibilmente, ciascuna cella unitaria comprende quattro celle primitive tra loro tassellate, ovvero adiacenti. Come mostrato in Figura 2(b), una cella primitiva comprende quattro membrane 14 ( $Z=4$ ), opzionalmente posizionate secondo una struttura tetraedrica. Pertanto, tassellando quattro celle primitive si ottiene una cella unitaria che contiene complessivamente 16 membrane.

Come mostrato in figura 2(b) la forma di realizzazione preferita del dispositivo secondo la presente invenzione prevede una cella unitaria avente forma di cristallo cubico a facce centrate, con un lato di lunghezza  $a$  e membrane (14) tutte di uguale lunghezza  $R$ .

In particolare, la lunghezza  $R$  delle membrane è legata alla dimensione  $a$  (ovvero alla cosiddetta "costante") caratteristica del reticolo, attraverso la seguente relazione:

$$R = \frac{\sqrt{3}a}{4} \quad (2)$$

In particolare, come mostrato nelle Figure 2(a) e 2(b), le membrane 14 della cella unitaria 45 sono conformate come un elemento oblungo a diametro variabile, ad esempio la forma di ciascuna membratura comprende due tronchi di cono tra loro uniti in corrispondenza della base di diametro maggiore.

Nel presente esempio ciascuna membratura è simmetrica rispetto ad una propria porzione di mezzeria. Nella forma di realizzazione preferita, ciascuna membratura presenta un diametro massimo  $D$  in corrispondenza della mezzeria ed un diametro minimo  $d$  in corrispondenza di ciascuna estremità.

In forme di realizzazione alternative, le membrature 14 possono presentare lunghezze e forme diverse tra loro.

Le analisi che seguono si riferiscono a reticoli pentamode generati attraverso tassellazione di celle unitarie del tipo di quella illustrata in Figura 2 (a).

Le conclusioni di sotto riportate possono tuttavia essere agevolmente generalizzate a qualsiasi altra tipologia di reticolo pentamode, che presenti membrature con dimensioni caratteristiche diverse in corrispondenza della mezzeria e delle estremità.

Nel presente esempio, nella cella di Figura 2 (b), la legge di variazione del raggio  $r$  della generica sezione retta di una membrature 14 con l'ascissa  $x$  è la seguente

$$r(x) = r_{min} + \left( \frac{r_{max} - r_{min}}{R/2} \right) x, \quad 0 \leq x < \frac{R}{2} \quad (3)$$

$$r(x) = r_{max} - \left( \frac{r_{max} - r_{min}}{R/2} \right) \left( x - \frac{R}{2} \right), \quad \frac{R}{2} \leq x \leq R \quad (3)$$

dove si è posto  $r_{min} = d/2$  e  $r_{max} = D/2$ .

Utilizzando le precedenti relazioni, e tenendo conto che la sezione retta corrente della generica membratura ha area e momento d'inerzia rispettivamente pari a:

$$A(x) = \pi[r(x)]^2 \quad \text{e} \quad I(x) = \pi \frac{[r(x)]^4}{4},$$

si ottengono le seguenti espressioni delle deformabilità assiale e flessionale della generico elemento oblungo:

$$M = \frac{R}{\pi E r_{max} r_{min}} \quad (4)$$
$$N = \frac{R^3 (2r_{max}^2 + r_{max} r_{min} + r_{min}^2)}{3 \pi E r_{max}^3 r_{min}^3}$$

In cui  $E$  denota il modulo di Young del materiale della membratura 14. Utilizzando le espressioni di  $M$  ed  $N$  nelle espressioni di  $K$  e del rapporto  $G/K$  forniti nella Tabella 1 (per  $Z=4$ ), si ottiene:

$$K = \frac{4R^2}{9VM} = \frac{\pi E d D}{64\sqrt{3}R^2},$$
$$G = \frac{9\sqrt{3}\pi(dD)^3 E}{768(dDR)^2 + 512(d^2 + 2D^2 + dD)R^4} \quad (5)$$

$$\frac{G}{K} = \left[ \frac{4}{9} + \frac{8(2D + dD + d^2)R^2}{27d^2D^2} \right]^{-1} \quad (6)$$

In un ulteriore studio effettuato nella tecnica nota (M. Kadic, et Al. On the Practicability of pentamode mechanical metamaterials. Applied Physics Letters, 100, 191901, 2012) è stata valutata una stima numerica del rapporto  $G/K$  mediante rilevazioni di dati ottenuti da simulazioni numeriche agli elementi finiti sulla deformazione di reticoli pentamode sotto pressioni idrostatiche e sollecitazioni di taglio puro.

La stima numerica fornita nell'arte nota ha le seguente espressione:

$$\frac{G}{K} = \left[ \left( \frac{R}{d} \right)^2 \sqrt{\frac{R}{D}} \right]^{-1} \quad (7)$$

In Figura 5 è mostrato un confronto tra le espressioni del rapporto  $G/K$  corrispondenti ai due modelli suddetti (ovvero un confronto tra le espressioni (7) e (8)).

In particolare, i dati mostrati in Figura 5 sono stati ottenuti assumendo una costante caratteristica del reticolo  $a=15\text{mm}$  ( $R=6.5\text{mm}$ ); rapporti  $D/a$  pari a  $D/a=0.174$ ,  $D/a=0.087$  oppure  $D/a=0.044$ ; e facendo variare il rapporto  $d/D$  da zero a uno. Nel grafico mostrato in Figura 5 le curve continue son state ottenute appli-

cando la relazione analitica (7) mentre le curve tratteggiate sono relative alla relazione empirica (8).

Nel presente esempio, i casi limite  $d/D=0$  e  $d/D=1$  corrispondono, rispettivamente, ad una struttura pentamode in regime dominato dalla deformabilità estensionale (connessioni nodali del tipo a cerniera), e ad una struttura pentamode con elementi oblunghi cilindrici a sezione costante (rigidezza flessionale diversa da zero).

Le differenze tra i valori ottenuti applicando la relazione empirica e la relazione analitica suddette sono giustificate dal fatto che la formula analitica (7) è stata ottenuta sulla base di un modello che adotta elementi trave per le membrature (teoria monodimensionale), mentre la formula numerica (7) è stata ottenuta a partire da modelli agli elementi finiti con elementi solidi 3d (mesh di elementi finiti tetraedrici).

Entrambe le stime evidenziano che i moduli a taglio dei reticoli pentamode possono essere regolati progettando opportunamente le dimensioni caratteristiche degli elementi oblunghi  $d$  e  $D$ . Pertanto, vantaggiosamente, le proprietà meccaniche ed acustiche di un reticolo pentamode variano, progettando opportunamente la forma di ciascuna membratura (ad esempio variando il rapporto  $d/D$ ) e dipendono principalmente dalla geometria dei reticoli stessi.

Inoltre, seppure in maniera secondaria rispetto alla geometria dei reticoli, le suddette proprietà variano in funzione dello specifico materiale con il quale vengono realizzate le membrature.

In particolare, la capacità dissipativa del dispositivo isolatore secondo la presente invenzione può essere modulata tramite una opportuna scelta del materiale utilizzato per la realizzazione dei reticoli pentamode. Ad esempio, le membrature 14 possono essere realizzate in materiale metallico, facendo uso di capacità di dissipazione di energia del materiale per effetto di deformazioni in regime anelastico; oppure, opzionalmente, in materiale polimerico o vetroso, utilizzando la capacità di dissipazione di energia del materiale per effetto di deformazioni tangenziali.

La specifica conformazione della struttura reticolare contribuisce a definire le proprietà meccaniche in fase elastica del materiale pentamode. Inoltre, la possibilità di scegliere un determinato materiale per la realizzazione del reticolo pentamode - a parità di struttura e quindi di proprietà meccaniche in fase elastica - permette di adattare le capacità di dissipazione energetica e la durata del ciclo di vita del dispositivo isolatore (ovvero la sua durabilità) alle effettive condizioni di impiego, riducendo inoltre i costi di manutenzione necessari.

Pertanto, è possibile adattare le proprietà meccaniche degli isolatori pentamode a quelle della struttura o dell'edificio da isolare, variando la geometria del reticolo pentamode e la natura dei materiali impiegati (come mostrato ad esempio nella relazione (6) e nella Tabella 2). Al contrario, negli isolatori elastomerici di tipo noto, il raggiungimento di valori molto bassi del modulo di elasticità tangenziale si accompagna tipicamente ad una drastica riduzione della capacità portante verticale, rendendo tali isolatori non particolarmente adatti a strutture con periodi propri di vibrazione molto elevati (ad esempio edifici particolarmente alti, strutture molto deformabili, fondazioni su suoli particolarmente soffici, ecc.).

Inoltre, tramite la progettazione e la realizzazione di isolatori in materiale laminato composito ottenuti disponendo strati soffici pentamode con diverse geometrie e materiali tra stati rigidi di confinamento, è possibile ottimizzare le proprietà del dispositivo isolatore in relazione alle necessità d'impiego.

Tale possibilità è molto limitata negli isolatori elastomerici attualmente disponibili in commercio, dal momento che in questi ultimi l'unica variabile di laminazione utilizzabile per la progettazione ottimizzata di dispositivi laminati compositi consiste nella scelta del tipo di gomma (naturale o sintetica) da impiegare per gli strati deformabili.

In una forma di realizzazione alternativa, il dispositivo isolatore secondo la presente invenzione comprendente inoltre un elemento centrale (cosiddetto "nucleo") realizzato in materiale dissipativo, opzionalmente in piombo, al fine di aumentare le capacità dissipative del dispositivo stesso.

Una forma di realizzazione ulteriore del dispositivo secondo la presente invenzione prevede inoltre dei sensori posizionabili in corrispondenza di elementi selezionati dei reticoli pentamode per consentire una misurazione della risposta del reticolo a sollecitazioni esterne e valutare ad esempio uno stato di degrado della struttura.

Opzionalmente, tramite il posizionamento di almeno un attuatore in corrispondenza del reticolo è possibile effettuare una regolazione dinamica delle proprietà stesse del reticolo.

La regolazione dinamica delle proprietà del dispositivo può essere ottenuta introducendo attuatori di principio qualsiasi, che siano in grado di modificare la lunghezza e/o lo stato di sollecitazione delle membrane che compongono il dispositivo (quali, ad esempio, attuatori meccanici, elettrici, piezoelettrici, elettromagnetici, telescopici, in leghe a memoria di forma, alle varie scale). In particolare, tramite un opportuno posizionamento degli attuatori sarà possibile modificare le caratteristiche geometriche e/o meccaniche, ovvero le dimensioni e/o le masse, delle giunzioni interposte tra le membrane.

In particolare, posizionando opportuni attuatori e/o sensori ad esempio in corrispondenza di una membratura o di una giunzione del reticolo, sarà possibile variare la risposta del dispositivo a seconda della specifica sollecitazione ricevuta e misurata.

Il reticolo pentamode del dispositivo secondo la presente invenzione può essere inoltre vantaggiosamente fabbricato con moderne tecniche di stampa 3D, additiva o sottrattiva, a diverse scale. Tale tecnica prevede il trasferimento di elaborati di disegno computazionale assistito ("computer aided design" o CAD), prodotti da una fase preliminare di ottimizzazione della geometria e del materiale del dispositivo, ad una stampante 3D che può impiegare uno o più materiali di stampa (materiali metallici, polimerici, ecc.).

Gli inventori del presente trovato secondo la presente invenzione hanno eseguito un'analisi comparativa tra alcune forme di realizzazione di dispositivi isolatori secondo la presente invenzione e sistemi di isolamento e dissipazione di tipo

tradizionale, evidenziando il notevole vantaggio tecnico degli isolatori pentamode nel campo dell'ingegneria strutturale, grazie all'agevole regolazione delle loro proprietà meccaniche e di durabilità, in funzione della geometria dei reticoli pentamode e delle caratteristiche dei materiali impiegati, ed alla possibilità che essi offrono di realizzare sistemi laminati compositi di tipo non convenzionale.

Si prenda in esame un isolatore elastomerico commerciale di diametro  $\varnothing 33.5''$  ( $0.8509m$ ) ed altezza  $13.85''$  ( $0.3518m$ ), che sia composto da 29 strati in gomma spessi  $7mm$ , 28 spessori in acciaio da  $3.04mm$ , due strati in gomma terminali spessi  $31.8mm$  e due elementi in acciaio di chiusura (isolatore Tipo E [RB-800] prodotto dalla Dynamic Isolation Systems, Inc, McCarran, NV, USA, di seguito denominato come "isolatore elastomerico di confronto"). Le Figure 3 e 4 mostrano le risposte isteretiche (a bassa dissipazione) di tale isolatore, in termini di cicli di carico a velocità costante tensione tagliante ( $\tau$ ) - deformazione tagliante ( $\gamma$ ) e tensione normale ( $\sigma$ ) - deformazione assiale ( $\varepsilon$ ).

Queste ultime sono state ottenute applicando un precarico verticale  $\sigma = 0.31MPa$  (fonte: Caltrans Testing Facility, University of California, San Diego). I risultati sperimentali mostrati nelle Figure 3 e 4 forniscono un modulo a taglio medio  $\bar{G} = 0.791MPa$ , ed un modulo a compressione medio del sistema composito gomma-acciaio pari a:  $\bar{E}_c = 330MPa$ .

Forme di realizzazione dei dispositivi isolatori secondo la presente invenzione, che nel seguito saranno detti semplicemente "isolatori pentamode" o PMB (acronimo del termine inglese "PentaMode Bearing"), possono essere progettati disponendo strati di reticoli pentamode ("strati soffici o deformabili") alternati a lamierini in materiale "duro", quale ad esempio, strati in acciaio ("strati rigidi").

La Tabella 2 riporta le proprietà meccaniche delle forme di realizzazione diversi tipi di isolatori pentamode siffatti. Gli strati pentamode di tali sistemi sono realizzati replicando la cella unitaria illustrata in Figura 2(b) per  $n_a \times n_a$  volte nel piano orizzontale e per  $n_v$  volte in direzione verticale.

In Tabella 2 si è assunto - a puro titolo di esempio -  $n_v = 1$ , ottenendo uno spessore dello strato pentamode pari a:  $t \equiv a$ . Nella stessa Tabella, sempre a titolo esemplificativo, per il materiale dello strato pentamode sono stati presi in esame, in alternativa, un acciaio con modulo di Young  $E = 206 \text{ GPa}$  (ottenendo gli isolatori pentamode SPMB1 e SPMB2) ed il polimero "FullCure850 VeroGray" con modulo di Young  $E = 1.4 \text{ GPa}$ , che viene comunemente impiegato come materiale di stampa nelle stampanti 3D prodotte dalla nota ditta Stratasys® (ottenendo gli isolatori pentamode PPMB1 and PPMB2). Gli isolatori in Tabella 2 corrispondono a diversi valori dei parametri geometrici  $a$ ,  $D$  e  $d$ , che individuano la geometria del reticolo pentamode.

Per la stima del modulo elastico a taglio dell'isolatore pentamode è stata utilizzata la suddetta formula (5), mentre per il calcolo del modulo elastico a compressione è stata utilizzata la seguente formula:

$$E_c = 6.73GS_1^2 \quad (8)$$

dove si è introdotto il seguente fattore di forma:  $S_1 = \frac{L^2}{4tL} = \frac{n_a}{4n_v}$ , avendo denotato con  $L$  il lato dello strato intermedio pentamode.

Le formule suddette conducono ad ottenere un modulo di taglio  $G = 0.791 \text{ MPa}$  ed un modulo a compressione  $E_c = 341 \text{ MPa}$  per tutti gli isolatori pentamode descritti in Tabella 2. Si noti che tali moduli sono praticamente coincidenti con quelli medi dell'isolatore elastomerico di confronto (rispettivamente  $\bar{G} = 0.791 \text{ MPa}$  e  $\bar{E}_c = 330 \text{ MPa}$ ), il che dimostra la capacità dei sistemi pentamode analizzati di replicare le proprietà meccaniche e di isolamento di un isolatore elastomerico di tipo commerciale.

Le Figure 3 e 4 mostrano un confronto tra le curve sperimentali tensioni-deformazioni di tale isolatore e leggi lineari tensioni-deformazioni corrispondenti ai moduli elastici degli isolatori pentamode in Tabella 2, trascurando, in prima approssimazione, le proprietà di dissipazione energetica di questi ultimi sistemi.

In particolare, la Figura 3 mostra un confronto tra il legame costitutivo a taglio degli isolatori pentamode (PMBs) in Tabella 2 e la risposta sperimentale a taglio di un isolatore elastomerico di confronto. La Figura 4 mostra un confronto tra il legame costitutivo assiale degli isolatori pentamode in Tabella 2 e la risposta sperimentale di un isolatore elastomerico di confronto.

Isolatore	$t \equiv a [mm]$	$R [mm]$	$n_a$	$L = n_a a [m]$	$d = \frac{D}{2} [mm]$
SPMB1	5	2.17	32	0.16	0.19
SPMB2	10	4.33	32	0.32	0.37
PPMB1	5	2.17	32	0.16	0.66
PPMB2	10	4.33	32	0.32	1.32

Tabella 2

Sono stati progettati e confrontati diversi dispositivi basati sull'utilizzo di reticoli pentamode confinati tra piastre in materiale duro, stimando per ciascuno di essi le principali caratteristiche meccaniche, ossia il modulo di elasticità tangenziale (o modulo di taglio) ed il modulo elastico a compressione. I risultati ottenuti hanno consentito di mettere in luce che la risposta meccanica degli isolatori pentamode può essere modulata progettando in maniera opportuna le rigidità flessionali e le caratteristiche geometriche delle membrature e dei nodi dei reticoli pentamode. Si è anche osservato che tali caratteristiche possono essere rese praticamente coincidenti con quelle di isolatori elastomerici di tipo tradizionale.

In quel che precede sono state descritte le preferite forme di realizzazione e sono state suggerite delle varianti della presente invenzione, ma è da intendersi che gli esperti del ramo potranno apportare modificazioni e cambiamenti senza con ciò uscire dal relativo ambito di protezione, come definito dalle rivendicazioni allegate.

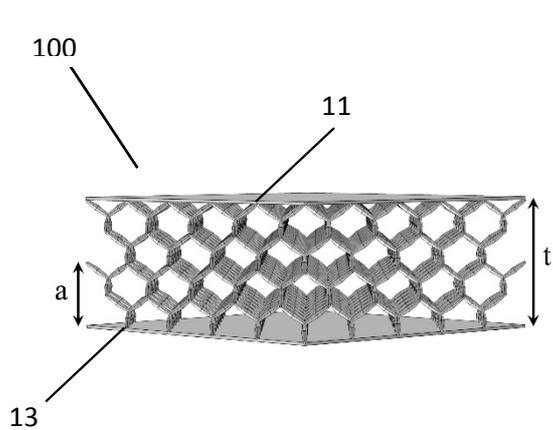


Fig. 1a

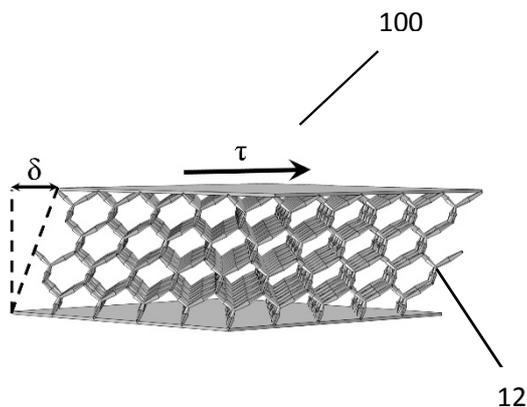


Fig. 1b

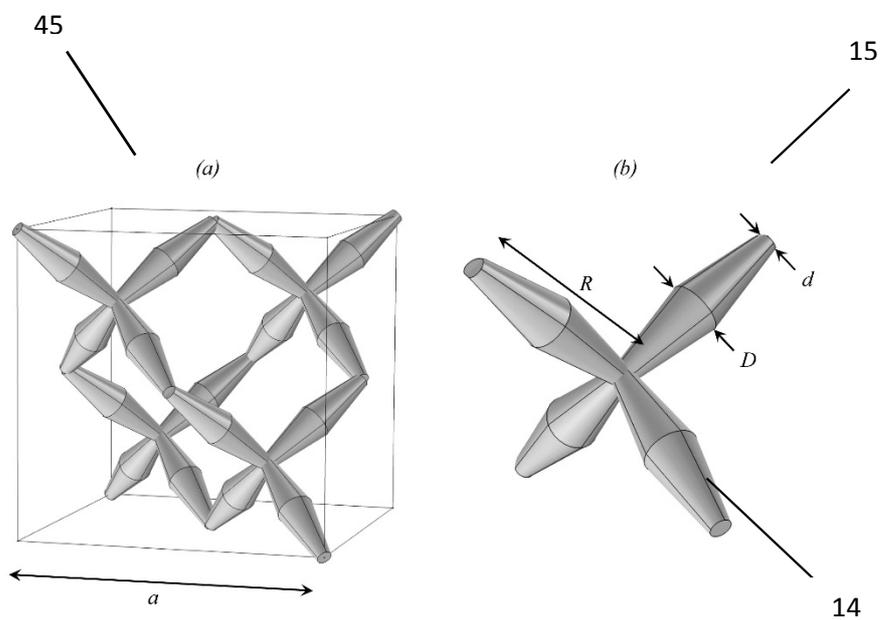


Fig. 2

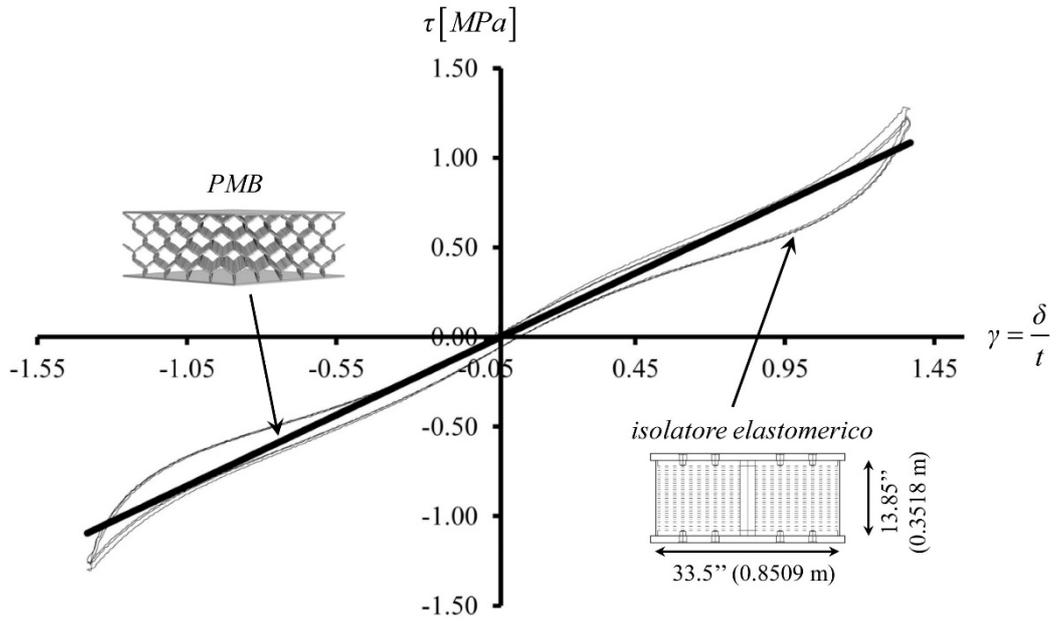


Fig. 3

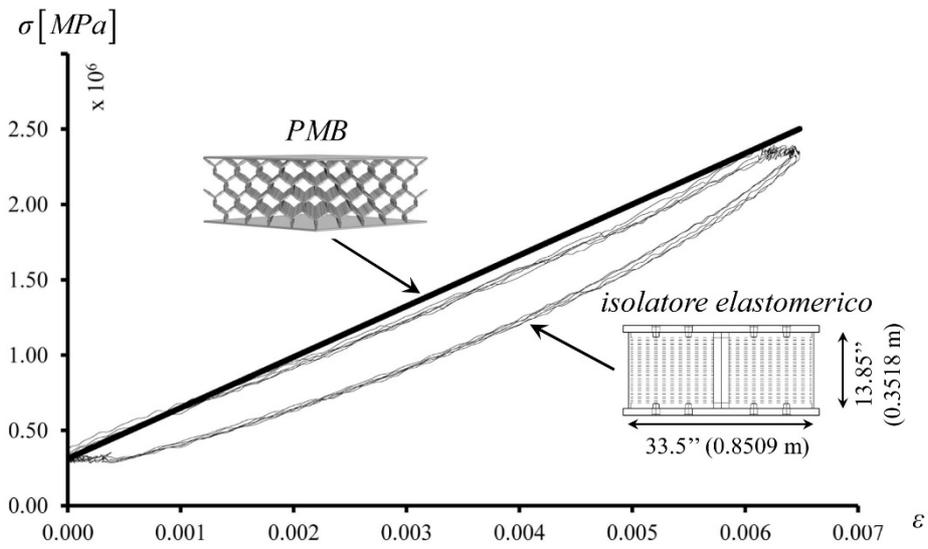


Fig. 4

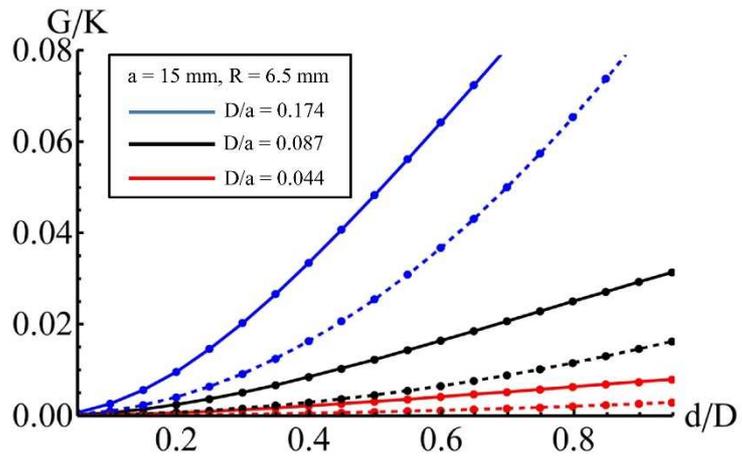


Fig. 5

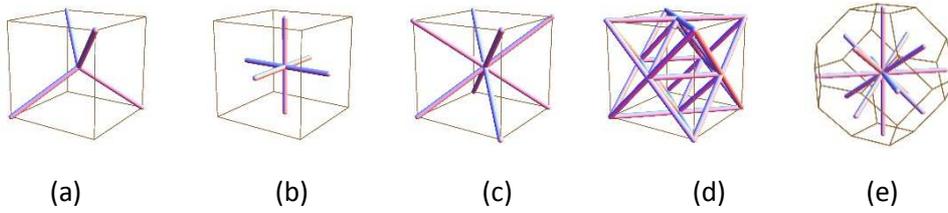


Fig. 6

## RIVENDICAZIONI

1. Dispositivo isolatore sismico conformato per essere posizionato in corrispondenza della base di un edificio per assorbire una vibrazione derivante da un movimento sismico, comprendente una struttura stratiforme (100) in cui uno strato intermedio (12) realizzato in un materiale almeno parzialmente deformabile, è posizionato tra un elemento laminare superiore (11) ed un elemento laminare inferiore (13) realizzati in un materiale rigido, caratterizzato dal fatto che detto strato intermedio è realizzato in materiale pentamode.
2. Dispositivo isolatore secondo la rivendicazione precedente, in cui detto materiale pentamode è conformato come un reticolo comprendente una pluralità di celle unitarie (45).
3. Dispositivo isolatore secondo la rivendicazione precedente, in cui ciascuna cella unitaria (45) di detta pluralità di celle unitarie (45) è conformata come un cristallo cubico a facce centrate.
4. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 2 o 3, in cui ciascuna di dette celle unitarie (45) comprende quattro celle primitive (15) tra loro adiacenti.
5. Dispositivo isolatore secondo la rivendicazione precedente, in cui ciascuna di dette celle primitive (15) comprende quattro membrane (14).
6. Dispositivo isolatore secondo la rivendicazione precedente, in cui dette membrane (14) sono posizionate secondo una struttura tetraedrica.
7. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 5 o 6, in cui ciascuna di dette membrane (14) è conformata come un elemento oblungo a diametro variabile.
8. Dispositivo isolatore secondo la rivendicazione precedente, in cui detto elemento oblungo presenta un diametro (D) massimo in corrispondenza di una porzione di mezzeria ed un diametro minimo (d) in corrispondenza di ciascuna estremità.
9. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni dalla 5 alla 8, in cui dette membrane (14) hanno uguale lunghezza (R).

10. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni dalla 5 alla 9, in cui dette membrature (14) sono realizzate in materiale metallico, opzionalmente in materiale ceramico, più opzionalmente in materiale polimerico.
11. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti in cui almeno uno di detti strato superiore e strato inferiore è realizzato in acciaio.
12. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente almeno un sensore posizionato o posizionabile in corrispondenza di detto reticolo per consentire una misurazione di una sollecitazione ricevuta.
13. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente almeno un attuatore posizionato o posizionabile in corrispondenza di detto reticolo per consentire una regolazione dinamica del reticolo stesso.
14. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente inoltre un elemento centrale realizzato in materiale dissipativo, opzionalmente in piombo.
15. Dispositivo isolatore secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, comprendente una pluralità di strutture stratiformi (100) ed una pluralità di strati intermedi (12) tra loro alternati.

## CLAIMS

- 1.** Seismic isolator device shaped to be positioned at the base of a building to absorb a vibration arising from a seismic movement, comprising a layered structure (100) in which an intermediate layer (12) made of a material at least partially deformable, is located between an upper laminar element (11) and a lower laminar element (13) made of a rigid material, characterized in that said intermediate layer is made of a pentamode material.
- 2.** Isolator device according to the previous claim, wherein said pentamode material is shaped as a lattice comprising a plurality of unit cells (45).
- 3.** Isolator device according to the previous claim, wherein each unit cell (45) of said plurality of unit cells (45) is shaped like a face-centered cubic crystal.
- 4.** Isolator device according to any one of claims 2 or 3, wherein each of said unit cells (45) includes four primitive cells (15) adjacent to each other.
- 5.** Isolator device according to the previous claim, wherein each of said primitive cells (15) comprises four members (14).
- 6.** Isolator device according to the previous claim, wherein said member (14) are positioned according to a tetrahedral structure.
- 7.** Isolator device according to any one of claims 5 or 6, wherein each of said member (14) is shaped as an oblong element with a variable diameter.
- 8.** Isolator device according to the previous claim, wherein said oblong element has a diameter (D) maximum at a centerline portion and a minimum diameter (d) at each end.
- 9.** Isolator device according to any of claims 5 to 8, wherein said member (14) have equal length (R).
- 10.** Isolator device according to any of claims 5 to 9, wherein said member (14) are made of metallic material, optionally in the ceramic material, more optionally

in polymeric material.

- 11.** Isolator device according to any one of the preceding claims wherein at least one of said upper layer and lower layer is made of steel.
- 12.** Isolator device according to any one of the preceding claims, comprising at least one sensor positioned or positionable at said lattice to allow for a measurement of a received solicitation.
- 13.** Isolator device according to any one of the preceding claims, comprising at least one actuator positioned or positionable at said lattice to allow a dynamic adjustment of the lattice itself.
- 14.** Isolator device according to any one of the preceding claims, further comprising a central element made of dissipative material, optionally made of lead.
- 15.** Isolator device according to any one of the preceding claims, comprising a plurality of layered structures (100) and a plurality of intermediate layers (12) alternating between them.