

ADVANTAGES AND PROBLEMS OF SEISMIC ISOLATION FOR SYSTEMS AND EQUIPMENTS

Mauro Dolce¹, Donatello Cardone²

1. DiSGG - University of Basilicata, Contrada Macchia Romana, 85100, Potenza, Italy, dolce@unibas.it

2. DiSGG - University of Basilicata, Contrada Macchia Romana, 85100, Potenza, Italy, cardone@unibas.it

1. INTRODUZIONE

In molti casi, l'ammontare economico del danno non strutturale prodotto da un terremoto supera largamente quello strutturale. Il danno non strutturale include sia quello ai cosiddetti elementi non strutturali (tamponature, tramezzi, finestre, ecc.), che quello ai beni ed alle attrezzature contenute nella struttura. Il primo risulta direttamente legato agli spostamenti interpiano prodotti dal sisma, il secondo alle accelerazioni di piano. Nel caso di edifici aventi importanza strategica nell'immediato dopo-sisma (caserme, ospedali, ecc.) o con un contenuto ad alto rischio (centrali termiche e nucleari, ecc.) o di elevato valore (musei, biblioteche, ecc.), l'esigenza di salvaguardare, in presenza di eventi sismici violenti, oltre che la struttura anche le parti non strutturali ed il contenuto, diventa tanto forte da condizionare pesantemente la progettazione strutturale stessa.

Gli effetti prodotti dal sisma sulle attrezzature ed i beni contenuti all'interno di una struttura sono determinati dalla risposta della struttura al moto del terreno e, in seconda battuta, dall'interazione fra struttura ed oggetti in essa presenti. Una situazione particolarmente sfavorevole si verifica allorché la frequenza propria di vibrazione dell'oggetto, qualora il suo comportamento sia riconducibile a quello di un oscillatore lineare, sia prossima ad una delle frequenze naturali di vibrazione della struttura. In tal caso la sintonizzazione delle frequenze proprie può generare nelle attrezzature livelli di accelerazioni talmente elevati da produrne il danneggiamento [1,2].

La tecnica dell'isolamento sismico, riducendo drasticamente sia gli spostamenti interpiano che le accelerazioni di piano, sembra essere la più efficace strategia di protezione sismica per la riduzione del danno non strutturale. Tuttavia, anche essa presenta alcune limitazioni. In effetti, i sistemi di isolamento (quasi-)elastici tendono a concentrare tutta l'energia sismica in un intervallo di frequenze piuttosto ristretto, entro cui può però cadere la frequenza propria di vibrazione di alcune tipologie di attrezzature e beni contenuti nella struttura. D'altro canto, i sistemi di isolamento fortemente non lineari e con forte smorzamento, trasferendo quantitativi consistenti di energia ai modi superiori, sono, in genere, ritenuti non in grado di ridurre efficacemente spostamenti interpiano ed accelerazioni di piano [3,4].

In questo articolo viene valutata l'efficacia di diverse tipologie di sistemi di isolamento alla base nei riguardi della protezione dei contenuti. I sistemi di isolamento considerati sono di tre tipi, e rispettivamente basati su: (i) isolatori in gomma, (ii) componenti in acciaio e (iii) leghe a memoria di forma (LMF). La risposta di oggetti posti su strutture isolate alla base viene confrontata con quella che gli stessi registrerebbero su strutture convenzionali, fisse alla base.

Il punto di partenza del lavoro è rappresentato dai risultati di un vasto programma sperimentale di prove dinamiche con tavola vibrante, su otto telai in c.a. in scala ridotta, effettuato nell'ambito del progetto di ricerca Brite - MANSIDE (Memory Alloys for New Seismic Isolation DEvices) [5]. Il confronto prestazionale, in termini di protezione del contenuto fra telai a base fissa e telai isolati e, nell'ambito di questi ultimi, fra le diverse tipologie di dispositivi di isolamento, è effettuato comparando gli spettri di risposta di piano, tratti dalle accelerazioni registrate sperimentalmente, a diversi livelli di intensità sismica (accelerazione della tavola pari a 0.1g, 0.3g e 0.5g). Al fine di meglio interpretare i risultati sperimentali, si è messo a punto un accurato modello numerico, con il quale si sono simulate tutte le prove compiute su tavola vibrante.

Nel presente lavoro, gli oggetti all'interno della struttura vengono trattati alla stregua di oscillatori elementari elastici, aventi un rapporto di smorzamento viscoso pari al 2% di quello critico, trascurando l'interazione attrezzatura-struttura nella determinazione dell'accelerazione massima indotta. L'ipotesi di assimilare i contenuti ad oscillatori lineari e di trascurare l'interazione sistema principale (la struttura) e sistema secondario (l'oggetto, l'attrezzatura) è senz'altro lecita per le strutture isolate alla base [6,7], e comunque quando la massa dell'attrezzatura è trascurabile rispetto a quella della struttura, mentre, in assenza di quest'ultima condizione, porta ad una sopravvalutazione della risposta del sistema secondario nelle strutture fisse alla base. Tale scelta è coerente con l'esigenza di non appesantire l'analisi, che qui si propone di fornire delle indicazioni di base sul problema considerato. Ulteriori approfondimenti e specifici studi saranno necessari per valutare, da un lato, gli eventuali effetti di interazione in caso di attrezzature di grande massa assimilabili a sistemi elastici, dall'altro, la risposta di attrezzature e oggetti non assimilabili a sistemi elastici lineari, ma piuttosto a corpi rigidi poggianti sul pavimento.

2. DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

2.1. Modello strutturale

Il modello strutturale provato su tavola vibrante è mostrato in figura 1(a). Esso è costituito da un telaio piano in c.a. in scala 1/3.3, riferito ad un prototipo di tre piani e due campate, avente dimensioni tipiche (altezza interpiano prototipo 3.5m \Rightarrow altezza interpiano modello 1.05m; luce campata prototipo 5.5m \Rightarrow luce campata modello 1.65m). Travi e pilastri presentano ovunque la stessa sezione, 10 x 15 cm (35 x 50 cm nella scala del prototipo). Per ragioni di uniformità, tutti i modelli provati, sia quelli isolati che quelli a base fissa, sono stati dotati di una trave di base molto rigida. Al di sotto della trave di base sono state poste delle celle di carico d'acciaio, di elevata rigidità, per la registrazione del taglio alla base e del momento ribaltante. Gli isolatori, laddove presenti, sono stati disposti al di sotto delle celle di carico.

Il prototipo è stato progettato con riferimento all'Eurocodice 8, assumendo i seguenti parametri di progetto: (i) spettro elastico di risposta per suoli di tipo B, (ii) classe di duttilità "bassa", (iii) coefficiente di struttura 2.5, (iv) accelerazione di picco pari a 0.25g.

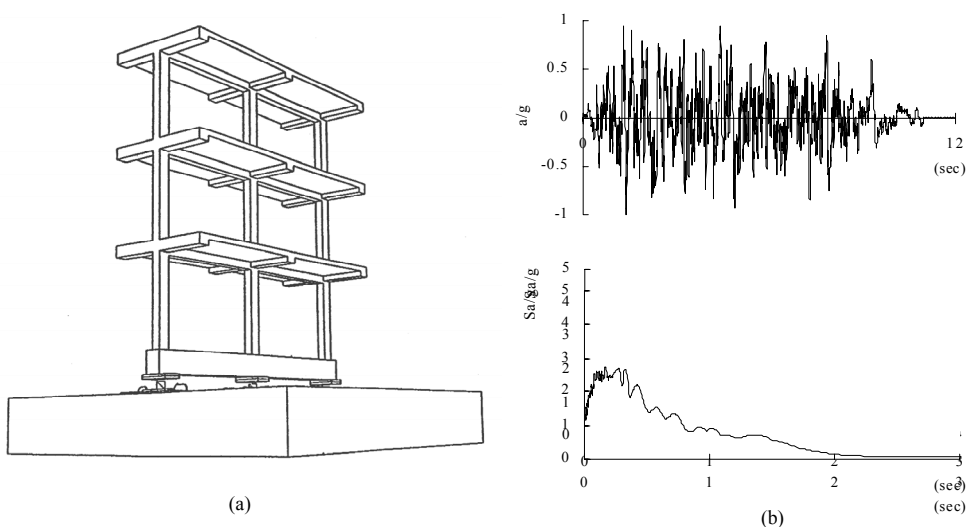


Figura 1: (a) Modello strutturale testato su tavola vibrante e (b) input sismico della tavola

La massa aggiuntiva necessaria per portare in conto i carichi permanenti non direttamente presenti nel modello e l'aliquota (1/3) di carichi accidentali associati alla destinazione d'uso assunta (200 Kg/m² per i primi due piani e 100 Kg/m² per il terzo), nonché la massa artificiale legata alla riduzione in scala del prototipo, è stata applicata sotto forma di piatti e cubi di acciaio di diverse dimensioni. Il peso totale del modello ammontava a circa 11500 Kg, di cui circa 3800 Kg come peso proprio e circa 7700 Kg come massa aggiuntiva.

2.2. Sistemi di isolamento

Il sistema di isolamento basato sulla gomma è stato progettato secondo criteri usuali [8], assumendo uno smorzamento equivalente del 10% ed un periodo della struttura isolata al vero di circa 2sec. (corrispondente ad un periodo del modello in scala di circa 1sec.). Al di sotto di ciascun pilastro è stato disposto un appoggio quadrato in gomma armata, v. fig. 2(a), di lato 100mm (sezione confinata), costituito da 16 strati di gomma di spessore 2.5mm, con modulo elastico G all'incirca pari a 0.6 N/mm², interposti a 15 lamierini d'acciaio, di spessore 1mm. I rapporti di forma primario e secondario risultavano rispettivamente pari a 10 e 2.5. Le prove di caratterizzazione dei dispositivi sono state compiute applicando uno sforzo assiale di compressione di circa 4 KN (pari ad 1/3 del peso totale della struttura), e sottoponendo l'isolatore a cicli di deformazione di ampiezza crescente, dal 5% al 200% di deformazione a taglio, con frequenze di 0.5 Hz ed 1 Hz. In figura 2(b) è mostrato il comportamento ciclico sperimentale del sistema di isolamento completo, costituito da tre appoggi in gomma.

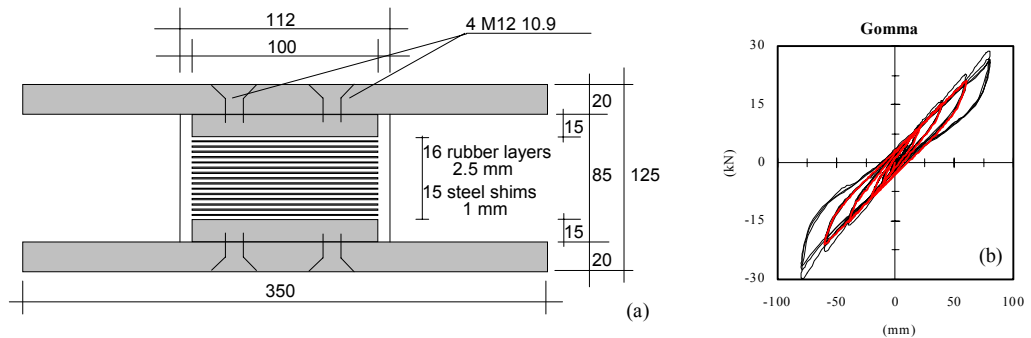


Figura 2: (a) Vista in sezione del dispositivo e (b) comportamento ciclico dei tre isolatori in gomma impiegati

Con il termine Leghe a Memoria di Forma (LMF o SMA) [9], si identifica un gruppo di leghe metalliche (Ni-Ti, Cu-Zn-Al, etc.) caratterizzate dalla capacità di subire elevate deformazioni (fino allo 8-10 %), con un comportamento marcatamente non lineare, senza deformazioni residue allo scarico. Tale proprietà prende il nome di Superelasticità ed è manifestata dalle LMF in stato austenitico, al di sopra di una certa temperatura, funzione della composizione e dal trattamento termomeccanico del materiale. La capacità di coniugare aspetti tipici del comportamento in campo elastico (assenza di deformazioni residue, ampio intervallo di deformazioni di lavoro) con aspetti tipici del comportamento in campo plastico (dissipazione di energia, buon controllo della forza), in aggiunta ad un'eccellente resistenza a fatica e ad un comportamento ciclico stabile e ripetitivo, rappresentano le prerogative delle LMF più attraenti da un punto di vista meccanico. Il progetto MANSIDE, finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del IV programma quadro, era finalizzato allo sfruttamento delle LMF per il controllo passivo delle vibrazioni prodotte dal sisma sulle strutture. Il risultato più importante del progetto fu l'ideazione, realizzazione e messa a punto di un sistema di isolamento basato su LMF, con caratteristiche ricentranti e dissipative [10].

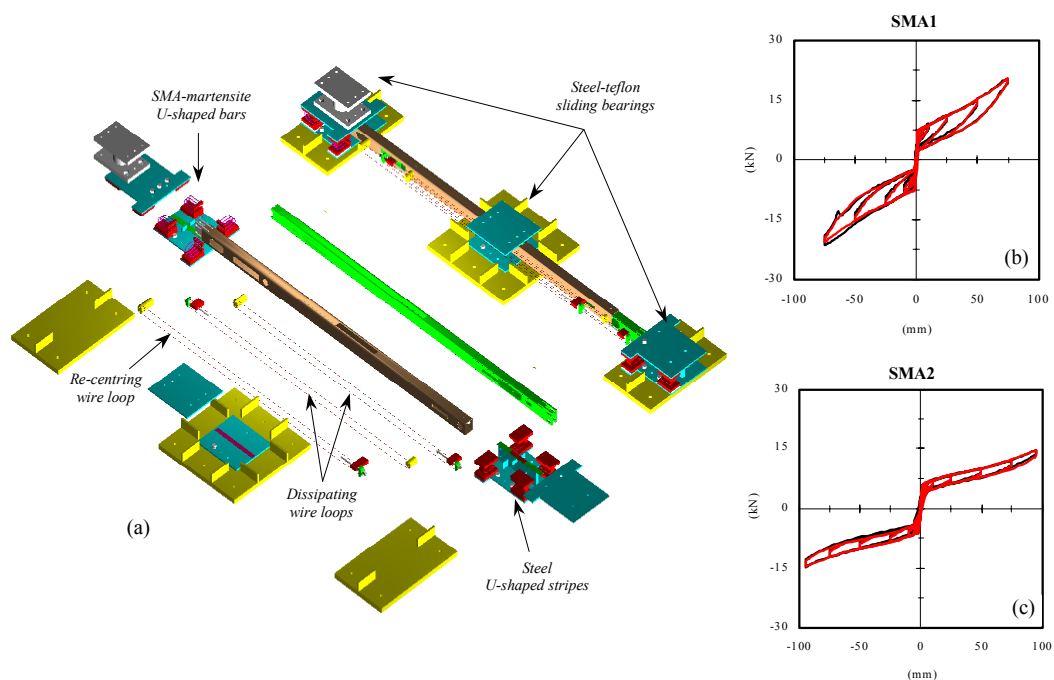


Figura 3: Dispositivo di isolamento basato su LMF: (a) vista d'insieme dell'apparato meccanico e comportamento ciclico in presenza di spire ricentranti e dissipative (b), e di sole spire ricentranti (c)

In figura 3(a) è illustrato il sistema di isolamento in scala 1:3.3, utilizzato per le prove su tavola vibrante, costituito da un dispositivo basato su fili in LMF pre-tesi, con caratteristiche ricentranti e/o dissipative, e tre appoggi scorrevoli in acciaio-teflon. Questi ultimi possono incorporare piatti di acciaio conformati ad U [11], quali elementi dissipativi alternativi ai fili in LMF. Nelle figure 3(b) e 3(c) sono mostrati i diagrammi forza-spostamento sperimentali dei due dispositivi in LMF impiegati, alternativamente, nelle prove su tavola vibrante. La figura 3(b) si riferisce ad un dispositivo (d'ora innanzi denominato per comodità sma2) realizzato con 12 spire "ricentranti" di filo da 1mm, pre-tese al 3% di deformazione. La figura 3(c), invece, riguarda un dispositivo (d'ora innanzi denominato per comodità sma1) ottenuto affiancando alle 12 spire "ricentranti", 8 spire "dissipative" di filo da 1mm, pre-tese al 4% di deformazione. Come si può osservare, entrambi i dispositivi presentano una forza supplementare di ricentraggio di almeno 3 kN, calibrata in modo da bilanciare la resistenza d'attrito sviluppata dagli appoggi scorrevoli, di circa 3 kN, e massimizzare, così, la capacità dissipativa del sistema di isolamento, mantenendone in pieno la capacità di ricentraggio.

Oltre ai due sistemi di isolamento detti, basati su LMF, se ne è considerato un terzo, realizzato inserendo, all'interno di uno degli appoggi scorrevoli, un piatto di acciaio conformato ad U, di opportune dimensioni, deformato in regime di "roller bending". Le dimensioni dell'elemento e le caratteristiche dell'acciaio sono state scelte in modo da ottenere una forza di plasticizzazione dell'ordine di 5 kN, ovvero pari circa al 5% del peso totale della struttura.

In figura 4 sono confrontate le caratteristiche meccaniche di maggior interesse dei principali sistemi di isolamento testati (risp. in gomma, in acciaio ed in LMF tipo sma2). Il comportamento quasi elastico degli isolatori in gomma, al pari di quello fortemente non lineare dei sistemi di isolamento basati su elementi in LMF ed acciaio, risulta evidente. Così come evidenti appaiono le differenze in termini di capacità dissipativa.

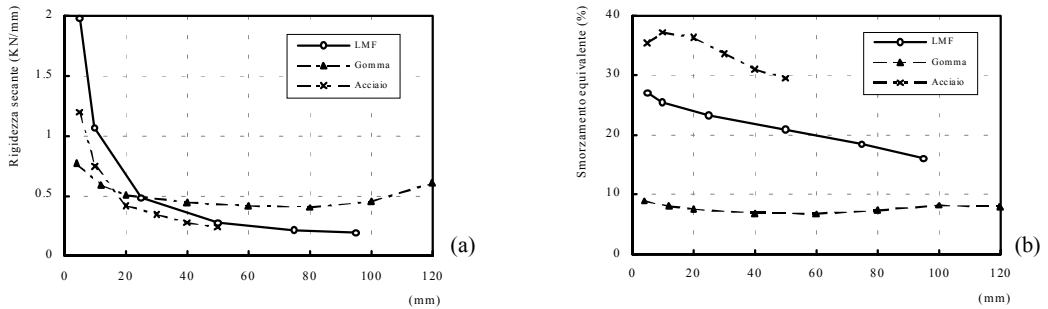


Figura 4: Confronto fra i tre sistemi di isolamento impiegati in termini di (a) rigidità e (b) smorzamento

2.3. Input sismico

Come segnale di input della tavola si è adottato un accelerogramma artificiale compatibile con lo spettro tipo B dell'EC8 (vedi figura 1(b)). La durata dell'accelerogramma selezionato è stata contratta secondo un fattore pari a $(3.3)^{1/2}$ per la congruenza con la scala del modello. Le prove su tavola vibrante sono state condotte alternando test di simulazione sismica di intensità crescente a test di esplorazione random (cioè test in cui l'input della tavola era costituito da un rumore bianco di bassa intensità), volti a cogliere lo stato di danno della struttura al procedere delle prove.

2.4. Strumentazione di prova

La strumentazione adottata per l'acquisizione della risposta dei modelli a base fissa consisteva in 23 strumenti, distribuiti come di seguito descritto. Sulla tavola: (i) un trasduttore di spostamento ad asta, (ii) un trasduttore rotazionale, (iii) un accelerometro. Sulla struttura: (iv) quattro trasduttori di spostamento a filo (uno per piano, compresa la trave di base) fissati ad una struttura di riferimento esterna alla tavola, per la valutazione degli spostamenti assoluti di piano, (v) nove strain gauge sulle celle di carico, per la valutazione dei tagli e dei momenti alla base, (vi) sette accelerometri, per la valutazione delle accelerazioni longitudinali e trasversali della struttura. Per i modelli isolati con dispositivi in LMF, agli strumenti utilizzati per i modelli a base fissa, sono stati aggiunti: (vii) un trasduttore di spostamento ad asta, per la valutazione degli spostamenti relativi all'interno del dispositivo e (viii) quattro strain gauge, per la valutazione delle deformazioni delle aste del dispositivo e quindi per la determinazione delle forze in gioco.

3. MODELLO NUMERICO

Le simulazioni numeriche sono state condotte mediante il programma agli elementi finiti non lineare DRAIN-3DX [12]. Dimensioni geometriche, masse, quantitativi e disposizione delle armature sono stati riprodotti nel modello con estrema cura. Le leggi costitutive dei materiali, ed il comportamento meccanico dei dispositivi di controllo ed input sismici sono stati ricavati sperimentalmente dalle apposite prove preliminari. In figura 5(a) è mostrata la discretizzazione in elementi finiti adottata per il telaio in c.a.. Nelle figure 5(b) e 5(c) sono riprodotte le leggi costitutive adottate per il calcestruzzo e per l'acciaio, per il quale si è assunto identico comportamento a trazione e compressione.

Per la modellazione di travi e pilastri in c.a. si è fatto ricorso all'elemento finito "a fibre" della libreria di elementi del codice di calcolo adoperato. La sezione di ciascun elemento è stata, quindi, scomposta in un certo numero di fibre di calcestruzzo ed acciaio (14 di calcestruzzo e 2 di acciaio

per le travi, 20 di calcestruzzo e 2 di acciaio per le colonne), così da differenziare il comportamento dei due materiali, e portare in conto gli effetti dello snervamento delle barre di acciaio, della fessurazione, del degrado e dello schiacciamento del calcestruzzo sulla distribuzione degli sforzi nella sezione e delle sollecitazioni fra i diversi elementi strutturali.

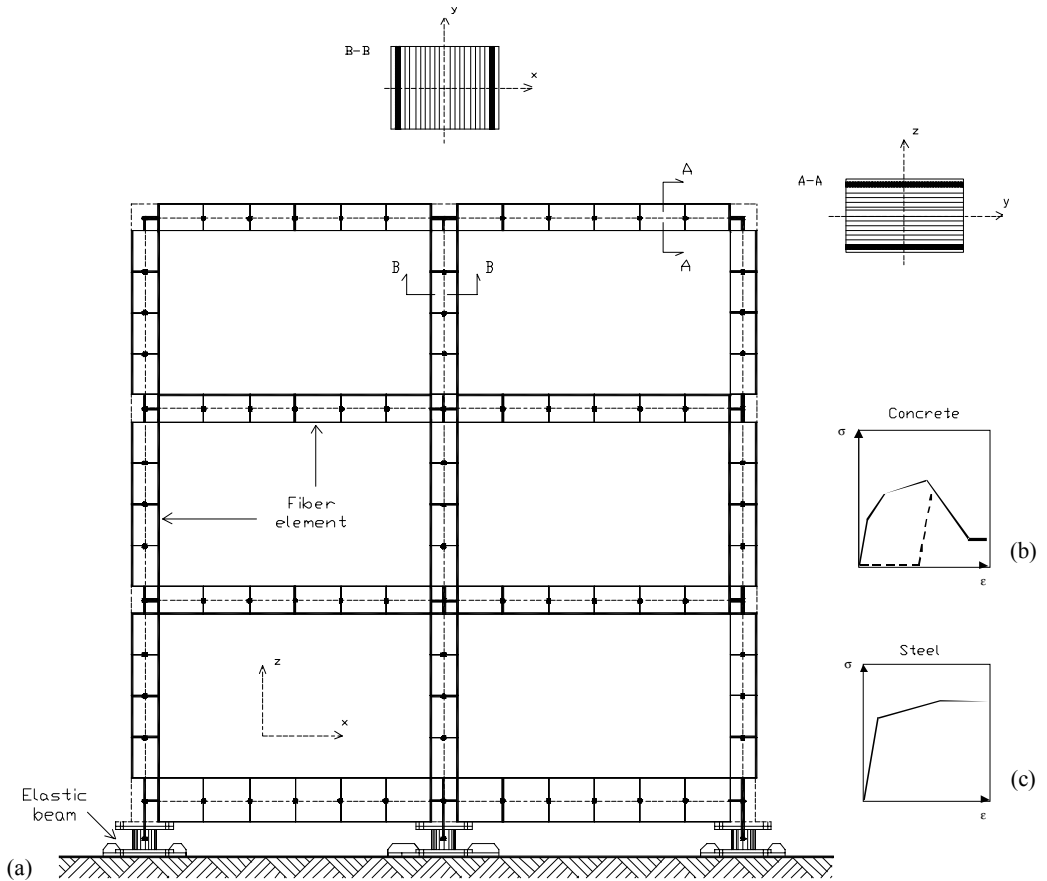


Figura 5: (a) Modellazione numerica del telaio con elementi finiti a fibre e (b,c) leggi costitutive dei materiali

Ciascun elemento strutturale è stato suddiviso in un certo numero di elementi a fibre (4 per i pilastri, 6 per le travi), di diversa lunghezza, allo scopo di cogliere la reale disposizione delle armature longitudinali lungo l'elemento. Per portare in conto l'effettiva rigidità dei nodi, in corrispondenza delle estremità di ciascun elemento si sono introdotti dei bracci rigidi di lunghezza pari ad $1/4$ dell'altezza della sezione dell'elemento ortogonale. Le celle di carico sono state modellate con degli elementi trave a comportamento elastico e bracci rigidi di collegamento.

La modellazione del comportamento ciclico dei dispositivi, è stata effettuata sulla scorta dei risultati sperimentali delle prove condotte presso il laboratorio del DiSGG dell'Università della Basilicata, preliminarmente alle prove su tavola vibrante, combinando opportunamente elementi elastoplastici con elementi elastici non lineari. L'attrito degli appoggi acciaio-teflon è stato portato in conto attraverso un elemento finito a comportamento rigido-plastico, caratterizzato da una forza di scorrimento pari circa al 3% del peso totale della struttura, in accordo con quanto osservato sperimentalmente. Per gli isolatori in gomma, invece, si sono considerati due modelli diversi, l'uno di

tipo isteretico, l'altro di tipo visco-elastico. Il modello isteretico è stato ottenuto sovrapponendo una serie di elementi a comportamento elasto-plastico inelastico. Le caratteristiche dell'elemento visco-elastico, invece, sono state definite in funzione dell'ampiezza di oscillazione (vedi figura 4). Nelle figure 2 e 3 sono posti a confronto i comportamenti ciclici sperimentali (curve in nero) e numerici (curve in rosso) di alcuni dei dispositivi di isolamento considerati. L'elevato grado di accuratezza raggiunto nella definizione dei modelli numerici risulta evidente. Per maggiori informazioni sulla modellazione dei dispositivi si rimanda a [13].

L'intera massa della struttura è stata concentrata nei nodi di piano del modello. Come eccitazione sismica si sono utilizzati gli accelerogrammi registrati sulla tavola durante le prove sperimentali.

Lo smorzamento equivalente della struttura in c.a. è stato assunto come un parametro del problema ed identificato attraverso il confronto fra la risposta sperimentale e quella numerica della struttura in termini di spostamenti di piano, attraverso la minimizzazione dell'errore ai minimi quadrati.

4. RISULTATI

4.1. Risposta strutturale

In figura 6 sono riportate le accelerazioni di picco registrate ai diversi piani dei modelli considerati (base fissa, isolamento in gomma, isolamento con LMF ed acciaio), al crescere della PGA. Prima di esaminare i risultati, occorre fare due osservazioni. La prima è che, sebbene sulla carta i modelli siano identici, esistono differenze sostanziali nelle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, essendo essi stati realizzati a distanza di diversi mesi l'uno dall'altro. In particolare, il modulo di Young secante, valutato ad $1/3$ della tensione di schiacciamento, risulta pari a 22500 MPa, nel modello fisso alla base, a 28000 MPa, nel modello con isolatori in gomma, ed a 26500 MPa, nel modello con isolamento in LMF/acciaio. La seconda osservazione è che, durante la fase di calibrazione della tavola precedente alle prove sul modello con isolatori in gomma, si è accidentalmente generata un'accelerazione di picco di circa 1g, che ha danneggiato sia gli isolatori che il telaio in c.a.. Sostituiti gli isolatori danneggiati, le prove sono andate avanti come da programma, su un telaio che presentava in partenza un quadro fessurativo già evidente ed una frequenza di vibrazione del secondo modo di circa il 16% minore di quella che avrebbe dovuto essere con il telaio integro. In termini di rigidezza, ciò equivale ad una differenza dell'ordine del 30%.

Nella figura 6 si nota che, nello schema a base fissa, l'accelerazione alla base è amplificata dalla struttura, ed assume valori da 2 a 3 volte maggiori in sommità, in accordo con lo spettro EC8/B, essendo circa 0.45 sec il periodo proprio di vibrazione della struttura in vera grandezza. Per il modello con isolatori in gomma, l'accelerazione in sommità si attesta su valori dello stesso ordine di grandezza di quelli alla base o leggermente inferiori. In presenza di dispositivi di isolamento in LMF, l'accelerazione in sommità risulta dello stesso ordine di grandezza di quella registrata sul telaio a base fissa, per basse intensità sismiche (0.14g), e dello stesso ordine di grandezza di quella registrata sul telaio con isolatori in gomma, ad elevate intensità sismiche (0.5g). Ciò riflette in pieno il comportamento fortemente non lineare del dispositivo in LMF (v. figura 5), che risulta molto rigido per piccole oscillazioni, tanto da far comportare la struttura come se fosse fissa alla base, e via via più deformabile al crescere dell'ampiezza di oscillazione, così da produrre una significativa elongazione del periodo equivalente della struttura.

In figura 7 sono riportate le storie delle accelerazioni del terzo piano, e le corrispondenti FFT, relative alle prove a 0.3g (PGA) sui modelli isolati e non. Le ampiezze dello spettro di Fourier indicano l'importanza relativa delle diverse armoniche che concorrono a determinare la risposta dinamica della struttura. Come si può osservare, sia per il telaio a base fissa che per quello isolato con dispositivi in gomma, la risposta è dominata dal primo modo di vibrare della struttura. L'elongazione del periodo di vibrazione prodotta dagli isolatori in gomma, naturalmente, si traduce in un drastico abbattimento dell'energia sismica in ingresso.

L'aspetto degli spettri di Fourier relativi ai modelli isolati con dispositivi in LMF ed acciaio risulta profondamente diverso da quello relativo all'isolamento in gomma. In particolare, al posto di un unico picco, ben definito e piuttosto elevato, localizzato in corrispondenza della frequenza fondamentale di vibrazione della struttura isolata, fanno la comparsa due curve a campana, aventi ampiezza ed area sottesa paragonabili, e posizionate nell'intorno delle frequenze di vibrazione del primo e secondo modo della struttura isolata. Il comportamento fortemente non lineare dei dispositivi di isolamento in questione fa sì che l'energia sismica associata al primo modo non si concentri più in corrispondenza di un'unica frequenza di vibrazione, ma si distribuisca su un certo intervallo di frequenze, corrispondenti ai diversi valori di rigidità secante esibiti dal dispositivo al variare dell'ampiezza di oscillazione. Oltre a ciò occorre osservare come il secondo modo di vibrare (fortemente condizionato dalle caratteristiche di rigidità della struttura in c.a.) abbia un'importanza nettamente maggiore rispetto a quella assunta in presenza di isolatori in gomma, e paragonabile a quella del primo modo. Ciò è da ricondurre verosimilmente alla forma dei cicli di isteresi esibiti dai dispositivi in esame, ed in particolare alla presenza dell'attrito. Infatti, come evidenziato in [14], all'atto dell'inversione del moto la resistenza di attrito esercitata dagli appoggi scorrevoli acciaio-teflon cambia istantaneamente di segno, generando una discontinuità nella forza nei cicli di isteresi. Tale discontinuità determina vibrazioni sulle alte frequenze, che vengono trasmesse dalla base all'intera struttura, eccitando i modi superiori al primo. Per i dispositivi in LMF, è presumibile che qualcosa di simile accada anche ogni volta che il dispositivo passa per la posizione di partenza, ove si registra una brusca variazione della forza, e, di nuovo, vibrazioni sulle alte frequenze. Quanto detto finora è chiaramente visibile nelle storie temporali delle accelerazioni di piano. Nel caso degli isolatori in gomma, esse presentano un andamento sostanzialmente sinusoidale, mentre, nel caso dei dispositivi di isolamento in LMF ed acciaio, vedono una serie di armoniche ad alte frequenze sovrapposte ad una portante di forma sinusoidale. Da notare, anche, le differenze fra l'andamento delle accelerazioni nel tempo, in presenza di dispositivi in LMF e di dispositivi in acciaio. Ovviamente i fenomeni descritti sono tanto più accentuati ed hanno, nei confronti della risposta strutturale, un peso tanto maggiore quanto minore è l'accelerazione massima alla base (PGA), perché più numerose e frequenti risultano le inversioni nella direzione del moto. Al crescere della PGA, di fatto, l'aspetto delle FFT relative ai modelli con isolatori in LMF (non mostrate in figura 7) tende sempre più ad assomigliare a quello delle corrispondenti FFT relative ai modelli con isolatori in gomma: il secondo modo perde progressivamente di importanza, mentre il picco relativo al primo si fa sempre più marcato e meglio definito e tende inoltre a spostarsi verso frequenze di vibrazione minori, come conseguenza dell'aumento dell'ampiezza di oscillazione alla base.

In figura 8 si riportano le storie degli spostamenti alla base ed i cicli di isteresi dei quattro sistemi di isolamento considerati, così come registrati durante le prove a 0.3g. I risultati sperimentali (curve in nero), confrontati con quelli tratti dal modello numerico (curve in rosso), mostrano l'ottimo accordo tra sperimentazione e simulazione numerica. In merito alla risposta della struttura, si nota il valore dello spostamento massimo alla base, che risulta minore in presenza di sistemi di isolamento in LMF e in acciaio, e l'ottimo controllo della forza trasmessa alla sovrastruttura da parte degli stessi sistemi, ed in particolare di quello basato su dispositivo in LMF solo ricentrante (sma2). In termini generali, quindi, i sistemi di isolamento basati su componenti in LMF e in acciaio, dando vita a spostamenti interplanetari minori, appaiono in grado di assicurare livelli di protezione maggiori di quelli offerti dagli isolatori in gomma, sia nei confronti della struttura che delle parti non strutturali. Per maggiori informazioni a riguardo si rimanda a [13].

4.2. Effetti prodotti dal sisma sul contenuto strutturale

Nelle figure 9-12 sono riportati gli spettri di risposta elastici, al 2% di smorzamento, ricavati dalle accelerazioni registrate al primo e terzo piano dei modelli testati, con riferimento a tre livelli di

intensità sismica (PGA), pari circa a 0.15g, 0.3g e 0.5g. La scala dei periodi è stata riportata a quella della struttura in vera grandezza, moltiplicando i valori di calcolo per un fattore pari alla radice della scala del modello, $(3.3)^{1/2}$. Per il telaio a base fissa, gli spettri relativi a 0.5g sono assenti, in quanto la struttura è collassata prima del raggiungimento di tale intensità. Inoltre, sempre per lo stesso modello, lo spettro del primo piano è stato sostituito con quello del secondo per la mancata acquisizione dell'accelerazione del primo piano.

Nelle figure 9-12, agli spettri di risposta tratti per via sperimentale (curve in nero) sono sovrapposti quelli ricavati per via numerica (curve in rosso). Come si può vedere, per tutti i casi considerati, l'accordo fra risultati sperimentali e numerici risulta eccellente, a conferma del notevole grado di accuratezza del modello numerico nel cogliere il comportamento reale, sia della struttura in c.a., che dei dispositivi d'isolamento eventualmente presenti. Il modello numerico messo a punto può, pertanto, costituire un'ottima base di partenza per un'approfondita indagine parametrica, che appare la logica prosecuzione del presente lavoro. Negli spettri di risposta relativi al telaio con isolatori in gomma, sono presenti due curve in rosso, ricavate dalle simulazioni numeriche, l'una a tratto spesso, l'altra a tratto sottile. La prima è stata ricavata adottando per gli isolatori il modello visco-elastico, la seconda quello isteretico. L'importanza che riveste la scelta del modello appare evidente. Il modello visco-elastico, in genere preferito a quello isteretico per la sua semplicità e da alcuni ritenuto anche più affidabile, non è però in grado di cogliere adeguatamente i contributi alla risposta dei modi superiori al primo.

In tabella 1 sono elencate le frequenze corrispondenti ai picchi delle FFT, riportate anch'esse alla struttura in vera grandezza. Confrontando questi valori con quelli corrispondenti ai picchi degli spettri di risposta delle figure 9-12, si conferma che essi coincidono quasi perfettamente, evidenziando i pericoli connessi a fenomeni di sintonizzazione ("tuning") della frequenza delle attrezzature e oggetti assimilabili a oscillatori lineari con una delle frequenze naturali di vibrazione della struttura.

Per la struttura fissa alla base il fenomeno del "tuning" si presenta quando la frequenza di vibrazione dell'oscillatore elementare risulta molto prossima a quella del primo modo di vibrare della struttura. In corrispondenza di una PGA pari a 0.14g ciò avviene intorno ai 2.8 Hz nella scala del modello (1.5 Hz per la struttura in vera grandezza) e l'accelerazione massima indotta sull'attrezzatura risulta dell'ordine di 5g, con conseguenze facilmente immaginabili in termini di danno.

Per la struttura dotata di isolatori in gomma si hanno due fenomeni di "tuning" molto evidenti. Il primo si presenta quando la frequenza di vibrazione dell'attrezzatura risulta simile a quella dell'isolatore, il secondo quando essa risulta uguale alla frequenza del secondo modo di vibrare della struttura. Quest'ultimo fenomeno si risente maggiormente al primo piano, probabilmente a causa del quadro fessurativo preesistente nella struttura, e si accentua sempre più al crescere dell'intensità sismica. Da notare anche il doppio picco che caratterizza il primo fenomeno di "tuning" a 0.3-0.5g, nel quale si legge chiaramente l'andamento decrescente della rigidità secante dell'isolatore in gomma al crescere della deformazione a taglio. Al crescere della PGA da 0.13g a 0.52g, l'accelerazione massima indotta su attrezzature con periodi di vibrazioni elevati, dello stesso ordine di grandezza del periodo fondamentale della struttura isolata (1-1.4 sec nella scala del modello; 2-2.5 sec in vera grandezza) passa da circa 1g a circa 2.5g. Parallelamente attrezzature con periodi di vibrazione bassi, prossimi a 0.2 sec nella scala del modello (0.35 sec in vera grandezza), possono registrare accelerazioni massime superiori a 2g, se si fa riferimento al terzo piano, o addirittura fino circa a 3.5g, se si considera il primo.

Per le strutture dotate di dispositivi di isolamento in LMF o in acciaio, vi è un solo fenomeno di "tuning" ben evidente, ed è quello che si verifica allorché la frequenza di vibrazione dell'attrezzatura risulta prossima a quella del secondo-terzo modo di vibrare della struttura. Come si può vedere, infatti, gli spettri di risposta presentano, alle alte frequenze, due picchi distinti, l'uno in corrispondenza di un periodo pari a 0.1 sec (0.06 sec nella scala del modello), l'altro in corrispondenza di un periodo pari a 0.23 sec (0.13 sec nella scala del modello). I periodi di

vibrazione detti corrispondono al secondo e terzo modo di vibrare della struttura isolata (vedi tabella 1). Attrezzature con periodi di vibrazione compresi fra 0.1 e 0.23 sec, montate sulla sommità del modello dotato di dispositivi di isolamento in LMF o in acciaio sperimentano accelerazioni massime dell'ordine di 2.5g e 2g rispettivamente, senza grosse variazioni al crescere dell'intensità sismica agente. Tali valori risultano dello stesso ordine di grandezza di quelli relativi alla struttura con isolatori in gomma, con la differenza che, con l'isolamento in LMF, il "tuning" si estende anche al terzo modo strutturale, ampliando, così, la zona "a rischio" per l'attrezzatura. Passando ad analizzare la restante parte dello spettro di risposta relativo al telaio con dispositivi di isolamento in LMF o in acciaio, si nota come, sia a 0.14g, che a 0.3g, il fenomeno del "tuning" a basse frequenze sia praticamente assente. Il comportamento fortemente non lineare dei dispositivi d'isolamento basati su componenti in LMF ed acciaio, infatti, produce un'elongazione del periodo che dipende dall'ampiezza della risposta. In pratica, durante l'evento sismico la rigidezza secante del dispositivo, e con essa il periodo equivalente di vibrazione della struttura, varia di continuo, evitando così che si abbia una vera e propria sintonizzazione fra la risposta dinamica del sistema principale (la struttura) e quella del sistema secondario (l'attrezzatura). Di conseguenza, l'accelerazione massima subita da attrezzature poste sulla struttura isolata con dispositivi in LMF o acciaio si attesta su valori all'incirca costanti in un ampio intervallo di periodi di vibrazione, risultando sensibilmente minore di quella che può interessare attrezzature montate sulla struttura con isolatori in gomma. Come si può osservare in figura 10, infatti, l'isolamento in gomma può determinare un'accelerazione massima di circa 2g sulle attrezzature con bassa frequenza di vibrazione. Di contro, l'accelerazione massima registrata con sistemi di isolamento in LMF si attesta mediamente su valori dell'ordine di 0.75g, e non supera 0.5g con sistemi di isolamento basati su componenti in acciaio. Al crescere dell'intensità sismica (vedi figura 12) le cose cambiano leggermente e lo spettro di risposta relativo alla struttura dotata di dispositivi di isolamento in LMF tende ad assomigliare di più a quello osservato in presenza di isolatori in gomma.

In figura 13 sono confrontati, per ciascuna intensità sismica considerata, gli spettri di risposta presentati in precedenza. In questo caso gli spettri sono adimensionalizzati rispetto all'accelerazione massima alla base. Per facilitare l'analisi di figura 13, in tabella 2 sono riportati i valori dell'accelerazione massima sperimentata da quattro oscillatori elementari particolari, con frequenza di vibrazione pari ad una delle frequenze naturali di vibrazione della struttura. In particolare, l'oscillatore No. 1 risulta sintonizzato sul primo modo della struttura fissa alla base in stato elastico, l'oscillatore No. 2 sul primo modo della struttura isolata con appoggi in gomma, l'oscillatore No. 3 sul secondo modo della struttura dotata di dispositivi in LMF, ed, infine, l'oscillatore No. 4 sul secondo modo della struttura con isolatori in gomma. Queste sono le situazioni più pericolose che si possono presentare per ciascuno dei sistemi di isolamento considerati, e per esse valgono le considerazioni di seguito riportate.

(i) L'oscillatore No. 1, montato sul telaio a base fissa, sperimenta, a 0.16g, un'accelerazione circa 34 volte maggiore di quella alla base. Questo valore dà conto dei rischi a cui sono soggette le attrezzature poste all'interno di una struttura convenzionale, qualora si dovesse manifestare un fenomeno di "tuning", cosa praticamente inevitabile dato il gran numero e la varietà di attrezzature presenti in molte delle strutture di interesse. La presenza di isolatori alla base porta in ogni caso ad una drastica riduzione dell'accelerazione massima registrata dall'oscillatore elementare considerato. In particolare, in presenza di isolatori in gomma, l'accelerazione massima risulta circa 1.5 volte maggiore di quella alla base, in pratica a prescindere dall'intensità sismica agente. In presenza di dispositivi in LMF, invece, le cose migliorano al crescere dell'intensità sismica. Già a 0.3g, comunque, il dispositivo in LMF tipo sma2 e quello in acciaio determinano un'accelerazione massima sull'oscillatore elementare considerato di solo il 10-20% maggiore di quella alla base. A 0.5g, poi, in presenza del dispositivo in LMF tipo sma1, l'amplificazione risulta di appena il 7% maggiore di quella alla base. A conti fatti, quindi, l'impiego dei dispositivi in LMF o in acciaio risulta più

conveniente dell'utilizzo di quelli in gomma, se l'obiettivo è quello di proteggere attrezzature con frequenze di vibrazione prossime a quella della struttura fissa alla base. Ponendo infatti a confronto le prestazioni offerte dal sistema di isolamento in LMF tipo sma1 con quelle offerte dagli isolatori in gomma, si nota come in presenza del primo l'accelerazione massima non supera 0.7g, mentre per il secondo essa cresce, al crescere dell'intensità sismica, raggiungendo valori di 0.88g a 0.52g di PGA.

- (ii) Il comportamento all'incirca lineare degli isolatori in gomma porta a concentrare in un range di frequenze piuttosto ristretto gran parte dell'energia sismica in ingresso. Se, come ipotizzato, la frequenza di vibrazione dell'attrezzatura è simile a quella della struttura isolata, si ha una forte amplificazione degli effetti prodotti dal sisma su questi ultimi. Al contrario, il comportamento fortemente non lineare dei dispositivi in LMF e in acciaio fa sì che l'energia sismica in ingresso si distribuisca su un range piuttosto ampio di frequenze, con conseguente scomparsa del fenomeno di "tuning". A 0.3g, ad esempio, l'accelerazione massima registrata dall'oscillatore elementare considerato, posto in sommità della struttura con isolatori in gomma, risulta circa 2.5 volte maggiore di quella registrata in presenza di isolatori in LMF, e circa 3.5 volte maggiore di quella registrata in presenza di dispositivi in acciaio. L'elevata quantità d'energia in un intervallo di periodi elevati, può risultare pericolosa nei problemi di ribaltamento di oggetti di grandi dimensioni, quali statue, serbatoi, mobili, ecc., il cui comportamento non è assimilabile a quello di un oscillatore lineare. In tal caso l'utilizzo di isolatori a comportamento elastico può risultare addirittura svantaggioso rispetto allo schema a base fissa.
- (iii) In presenza di dispositivi di isolamento in LMF, l'accelerazione subita dall'oscillatore elementare No. 3 risulta circa 5-7 volte maggiore di quella alla base e circa 4-6 volte maggiore di quella registrata in presenza di isolatori in gomma. In termini assoluti, l'accelerazione massima subita da oscillatori elementari montati sulla sommità della struttura dotata di sistemi d'isolamento in LMF varia da circa 0.9g a circa 2.4g, al crescere della PGA da 0.14g a 0.5g. Si osserva, comunque, che tali valori sono dello stesso ordine di grandezza di quelli registrati con il telaio a base fissa, considerato che quest'ultimo entra in fase post-elastica a 0.28g. Ciò significa che le vibrazioni ad alte frequenze trasmesse dal sistema di isolamento in LMF durante l'azione, pur se fastidiose, non determinano un peggioramento rispetto alla situazione di partenza, relativa al telaio fisso alla base.
- (iv) In generale, tutte le diverse tipologie di dispositivi di isolamento assicurano, nei confronti dell'oscillatore elementare No. 4, un livello di protezione superiore a quello del telaio a base fissa. Fra le diverse tipologie di dispositivi di isolamento, però, quelli in LMF ed in acciaio forniscono le prestazioni migliori, a causa del fenomeno di "tuning" che peggiora significativamente le cose in presenza di isolatori in gomma. A 0.3g, ad esempio, l'oscillatore elementare considerato, montato sulla sommità della struttura isolata alla base con dispositivi in acciaio, subisce un'accelerazione massima pari circa alla metà di quella ottenuta con isolatori in gomma (0.46g contro 1.19g).

Per comodità di interpretazione, nelle figure 14 e 15 è mostrato, rispettivamente, come gli spettri di risposta relativi al telaio isolato con dispositivi in gomma ed in LMF tipo sma1 si diversificano ai vari piani ed al crescere dell'intensità sismica. Da notare in particolare come l'efficacia del sistema di isolamento in LMF aumenti al crescere dell'intensità sismica.

5. CONCLUSIONI

Lo studio condotto ha chiaramente dimostrato l'efficacia dell'isolamento sismico nel ridurre gli effetti prodotti dal sisma su oggetti e attrezzature presenti sulla struttura. Lo studio effettuato, tuttavia, ha anche messo in evidenza come le diverse tipologie di sistemi di isolamento abbiano maggiore o minore efficacia nei diversi intervalli di frequenza e possano anche dar vita a problemi sulla risposta sismica del contenuto. In particolare, i dispositivi a comportamento non lineare,

basati su componenti in LMF e/o acciaio, pur limitando maggiormente gli spostamenti alla base e controllando meglio la forza trasmessa alla sovrastruttura, generano vibrazioni sulle alte frequenze nella struttura, che da questa vengono poi trasmesse alle attrezzature in essa presenti. Tali vibrazioni sono generate dalle brusche variazioni di forza che si registrano in questi dispositivi all'atto dell'inversione del moto e/o nel passaggio dallo zero in spostamento. Attrezzature con elevata frequenza di oscillazione possono risentire in modo significativo di questo effetto. L'efficacia dei sistemi fortemente non lineari è migliorabile ulteriormente riducendo la forza limite, in corrispondenza della quale la rigidità si riduce sensibilmente. Questo parametro è, peraltro, fortemente condizionato da altre esigenze, legate all'entità degli spostamenti massimi durante l'azione sismica e, per i dispositivi isteretici, degli spostamenti residui al termine dell'azione. I dispositivi a comportamento lineare (appoggi in gomma), concentrando gran parte dell'energia sismica in un intervallo piuttosto ristretto di frequenze, possono produrre preoccupanti amplificazioni della risposta per attrezzature con elevati periodi di vibrazione, vicini a quello del sistema strutturale isolato. La stessa condizione può determinare problemi di ribaltamento di oggetti pesanti e/o di grandi dimensioni, il cui comportamento dinamico è fortemente non lineare. Anche per i sistemi di isolamento in gomma, un'opportuna calibrazione della frequenza propria del sistema strutturale deve conciliarsi con altre esigenze di progetto (eccessiva deformabilità, sensibilità ad altre azioni ambientali, etc.) che ne limitano fortemente il campo di variabilità. In conclusione, le differenti proprietà dei sistemi d'isolamento considerati permettono di effettuare la scelta più appropriata in relazione alla natura e, dunque, alle caratteristiche dinamiche dei contenuti da proteggere.

Riferimenti bibliografici

1. E. Suarez and M.P. Singh, *Seismic response of SDF equipment-structure system*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113 No. 1, 1987, pp. 16-30.
2. A.G. Hensryed and K.M. Lei, *Parametric studies on the response of equipment in resilient-friction base isolated structures subjected to ground motion*, Engineering Structures, Vol. 15, No. 5, 1993, pp. 349-357.
3. J.A. Inaudi and J.M. Kelly, *Optimum damping in linear isolation systems*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, 1993, pp. 583-598.
4. J.M. Kelly, *The role of damping in seismic isolation*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, 1999, pp. 3-20.
5. Proceedings of the Final Workshop on the MANSIDE (Memory Alloys for Seismic Isolation DEVICES) project, Rome 28-29 January 1999. See also www.dstn.it/ssn/Prog/1999/MANSIDE/atti/index.html.
6. H.C. Tsai and J.M. Kelly, *Seismic response of the superstructure and attached equipment in a base-isolated building*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, 1989, pp. 551-564.
7. J.M. Kelly and D.E. Chitty, *Control of seismic response of piping systems and components in power plants by base isolation*, Engineering Structures, Vol. 2, No. 3, 1980, pp. 187-198.
8. M. Dolce, *Design Guidelines for Isolated Buildings in Italy*, Proc. International Post SMiRT Conference Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures, Agosto 1993, Capri.
9. T.W. Duerig, K.N. Melton, D. Stoeckel, and C.M. Wayman (Editors), *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*, Butterworth-Heinemann Ltd, London, 1990.
10. M. Dolce, D. Cardone and R. Marnetto, *Implementation and Testing of Passive Control Devices Based on Shape Memory Alloys*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, 2000, .
11. M. Dolce, B. Filardi, R. Marnetto, D. Nigro, *Experimental Tests and Applications of a New Biaxial Elastoplastic Device for the Passive Control of Structures*, Atti del 4th World Congress on joint sealants and bearing systems for concrete structures, Sacramento, California 1996.
12. V. Pankash, G.H. Powell and S. Campbell., *DRAIN-2DX: Base program Description and User's Guide*, Berkeley, California (USA), 1993.
13. D. Cardone, *Le Leghe a Memoria di Forma per la Protezione Sismica delle Strutture*, Tesi di Dottorato in Ingegneria Strutturale.
14. J.M. Kelly and H.C. Tsai, *Seismic response of light internal equipment in base-isolated structures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, 1985, pp. 711-732.

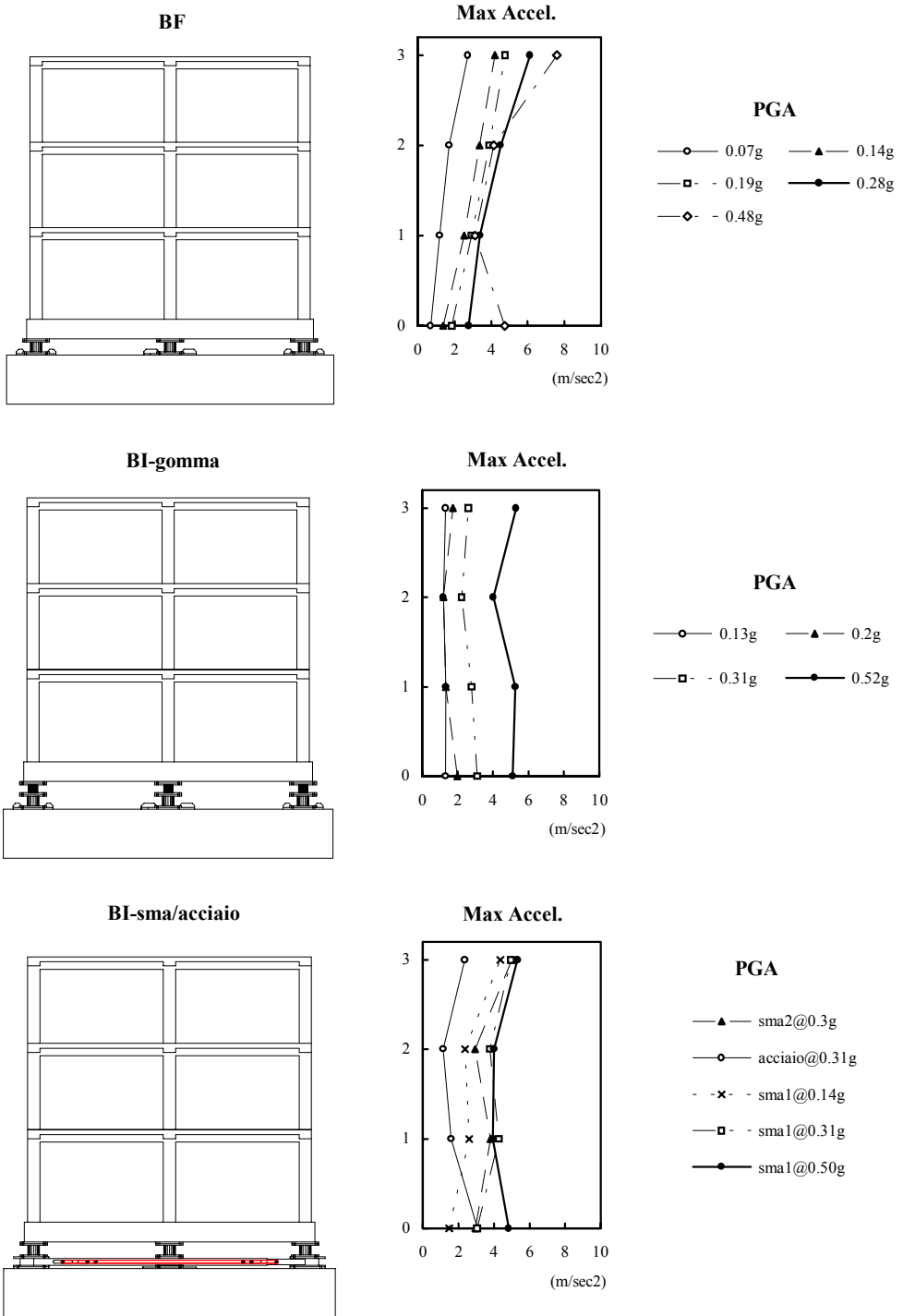


Figura 6: Accelerazioni di picco registrate ai diversi piani dei diversi modelli al crescere della PGA (*BF*: telaio a base fissa; *BI-gomma*: telaio con isolatori in gomma; *BI-sma1*: telaio con dispositivo di isolamento in LMF ricentrante e dissipativo; *BI-sma2*: telaio con dispositivo di isolamento in LMF solo ricentrante; *BI-acciaio*: telaio con dispositivo di isolamento basato su elementi in acciaio)

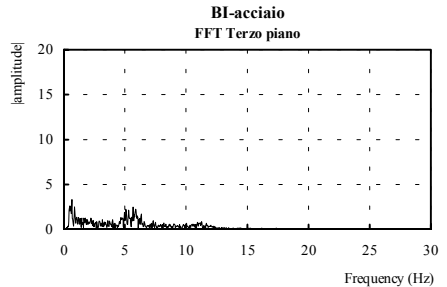
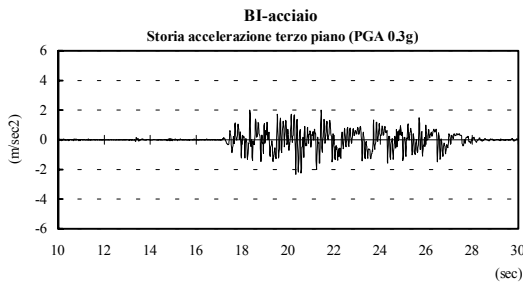
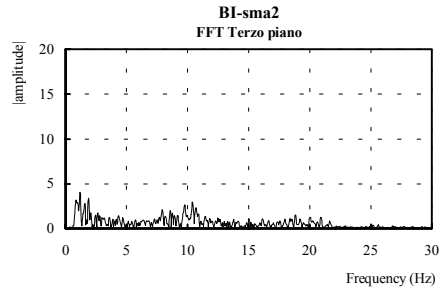
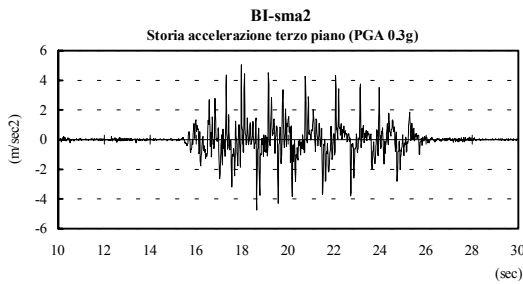
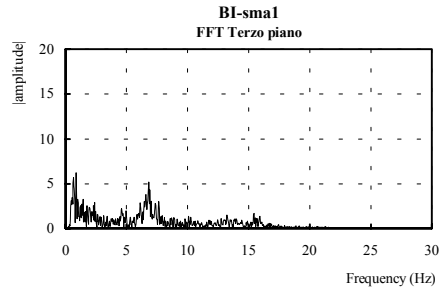
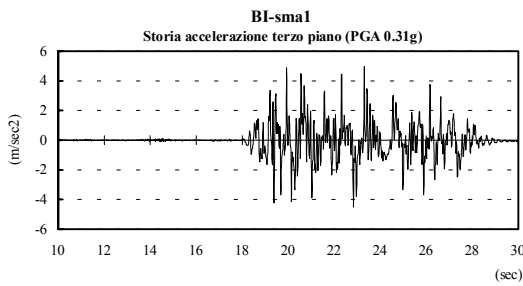
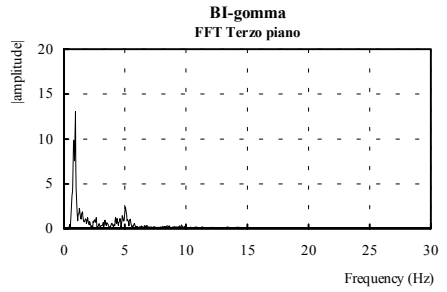
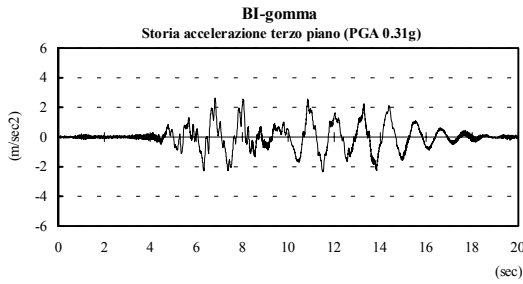
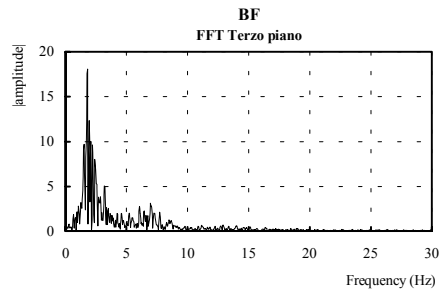
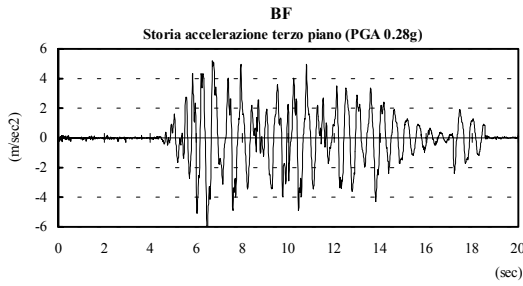


Figura 7: Storie accelerazioni terzo piano, ed associate FFT, registrate durante le prove a 0.3g su modelli isolati e non (*BF*: a base fissa; *BI-gomma*: con isolatori in gomma; *BI-sma1*: con dispositivo di isolamento in LMF ricentrante e dissipativo; *BI-sma2*: con dispositivo di isolamento in LMF solo ricentrante; *BI-acciaio*: con dispositivo di isolamento basato su elementi in acciaio)

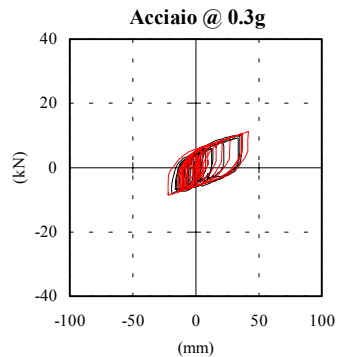
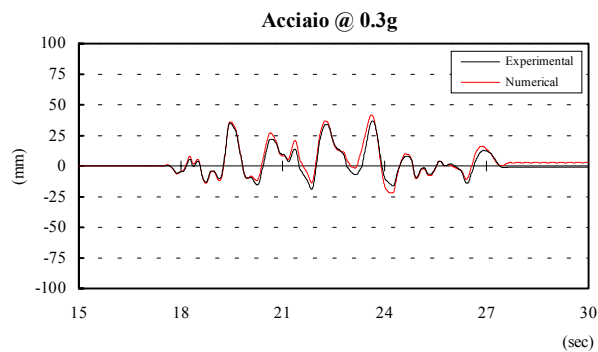
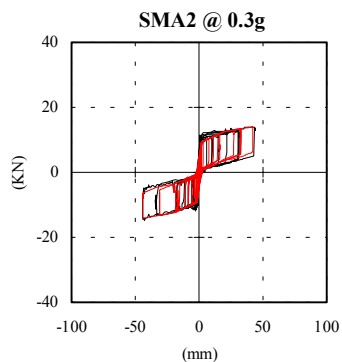
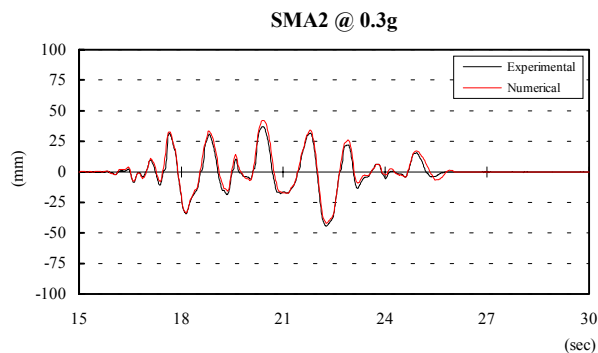
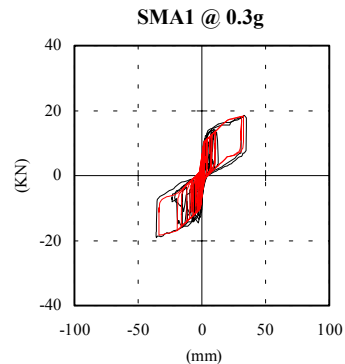
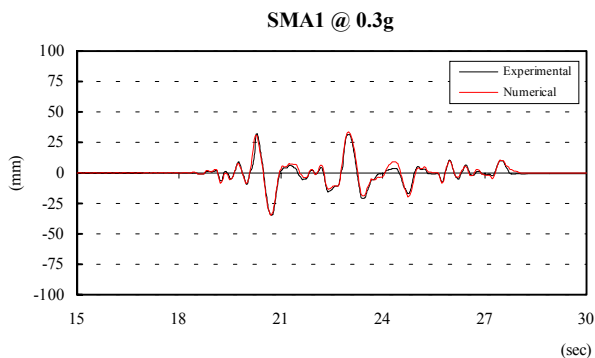
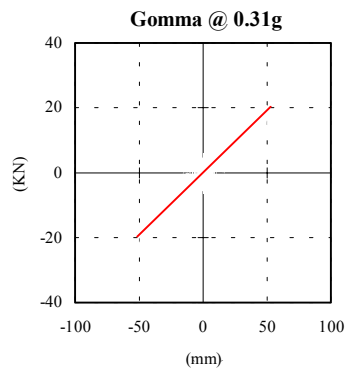
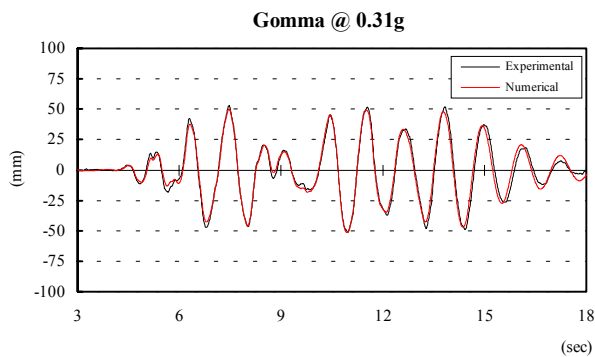


Figura 8: Storia spostamenti e cicli di isteresi a 0.3g (PGA) dei diversi dispositivi di isolamento testati

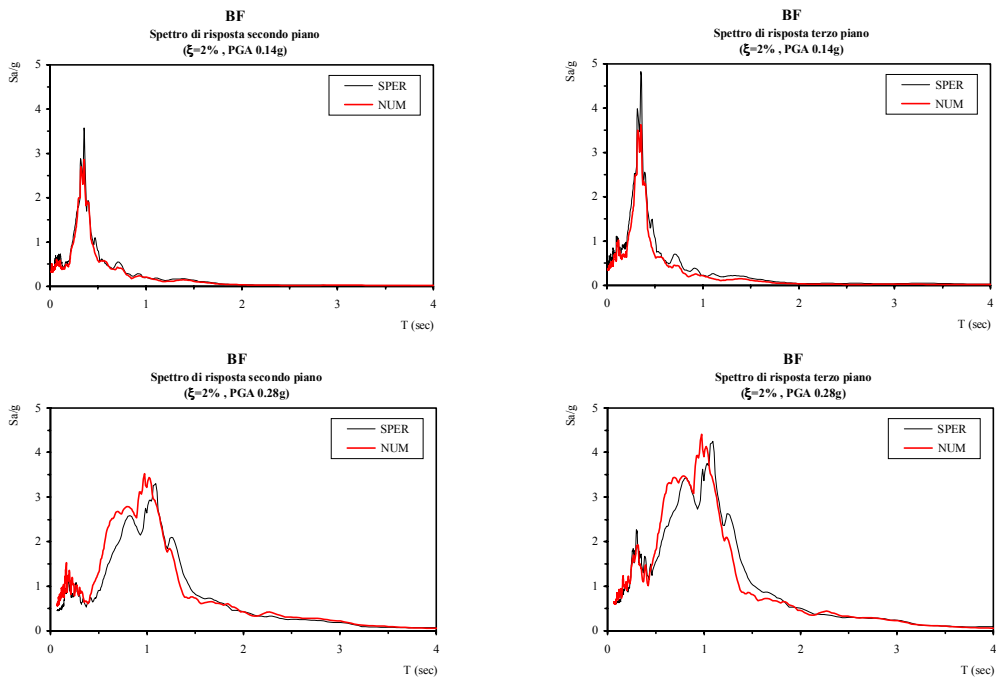


Figura 9: Spettri di risposta elastici al 2% di smorzamento viscoso relativi al secondo e terzo piano del modello a base fissa, per PGA pari rispettivamente a 0.14g e 0.28g

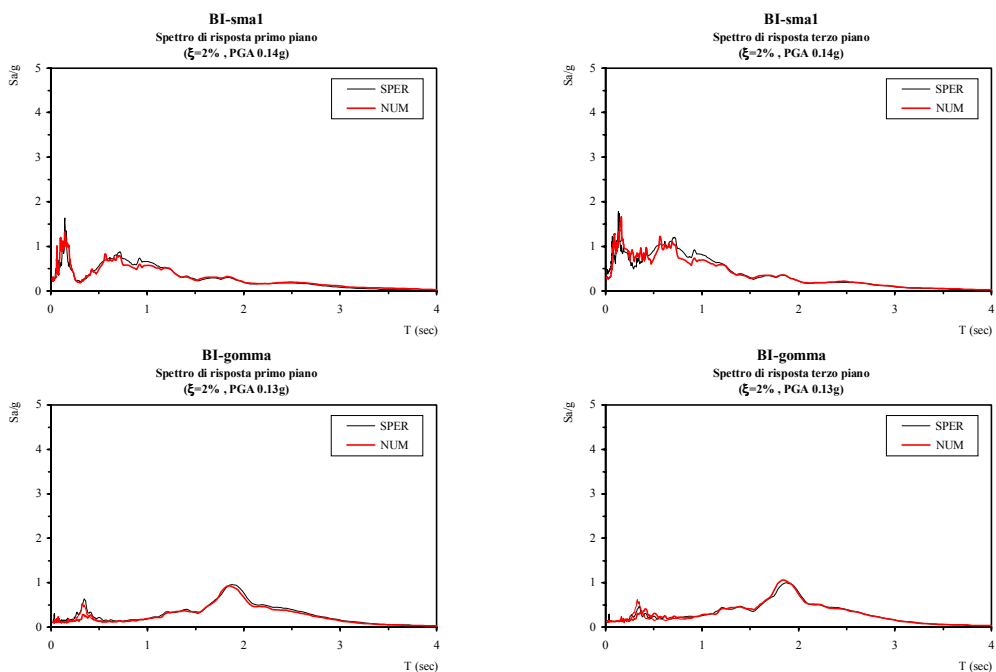


Figura 10: Spettri di risposta elastici al 2% di smorzamento viscoso relativi al primo e terzo piano del modello isolato con dispositivi in gomma e LMF tipo sma1, per PGA pari a 0.14g

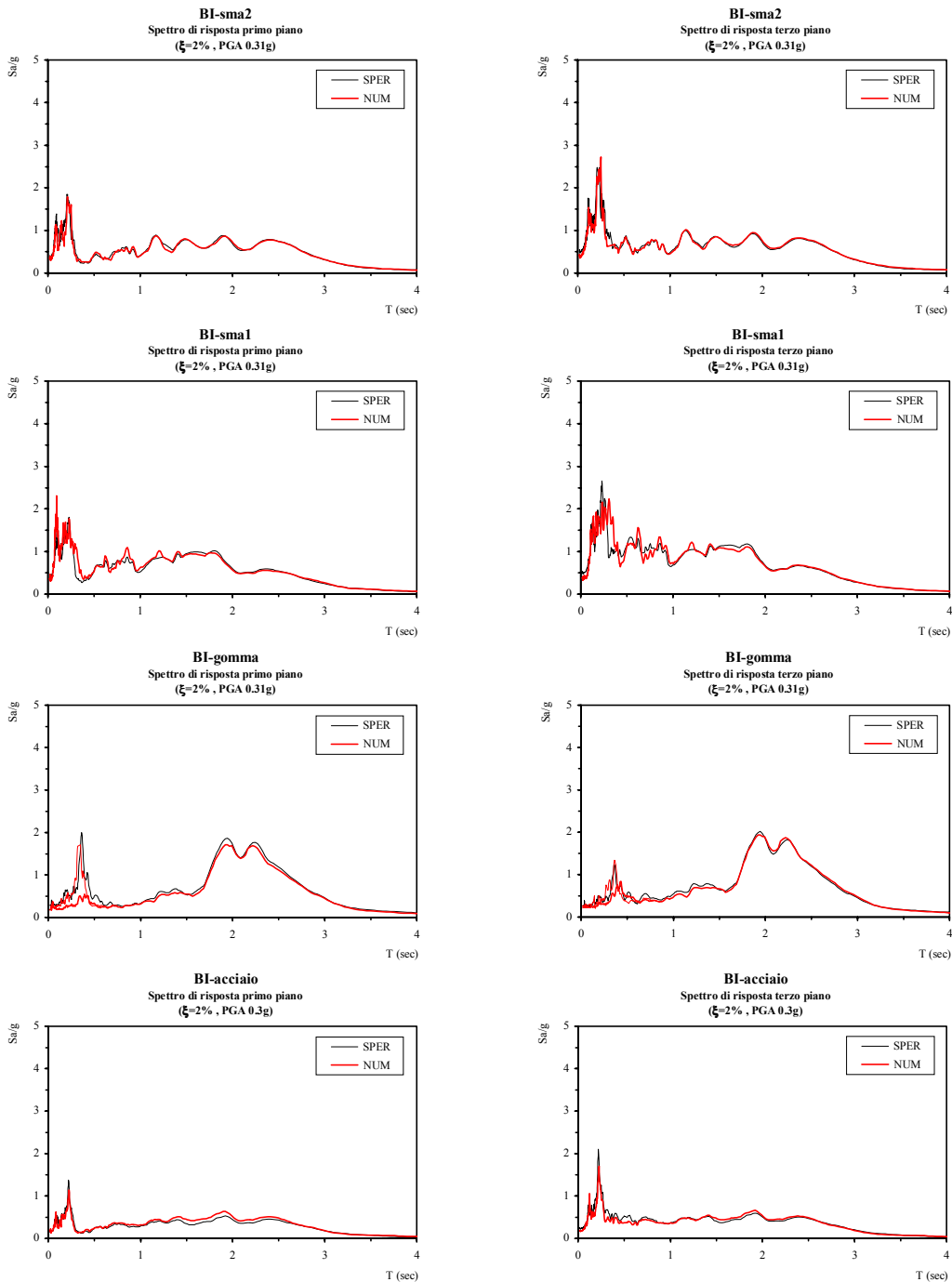


Figura 11: Spettri di risposta elastici al 2% di smorzamento viscoso relativi al primo e terzo piano del modello isolato rispettivamente con dispositivi in gomma, LMF tipo sma1, LMF tipo sma2 ed acciaio. PGA pari circa a 0.3g

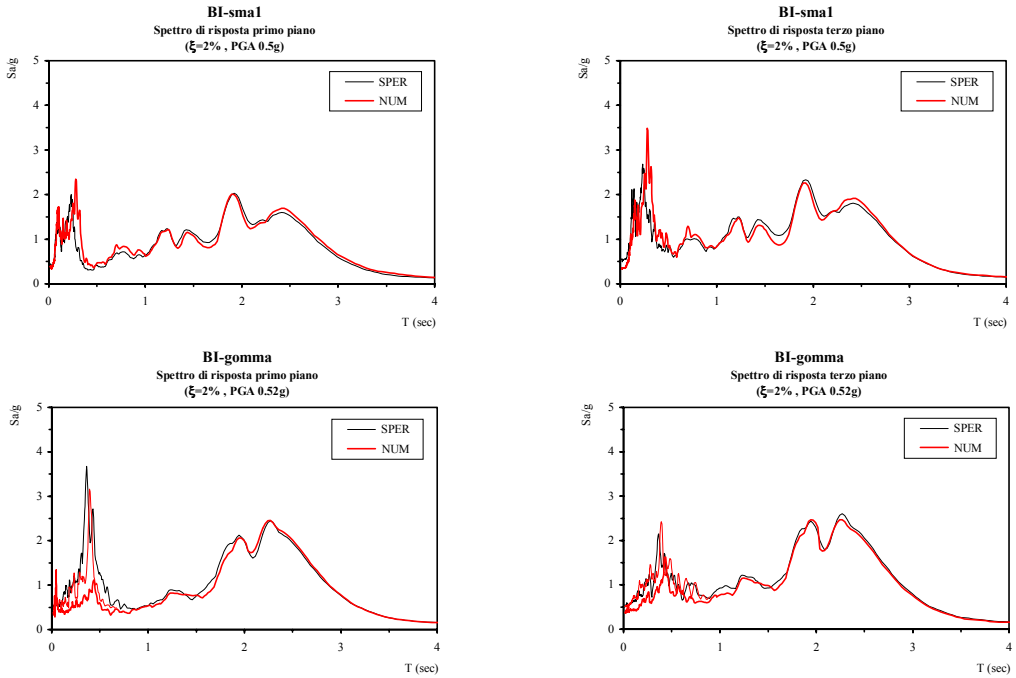


Figura 12: Spettri di risposta elastici al 2% di smorzamento viscoso relativi al primo e terzo piano del modello isolato con dispositivi in gomma e LMF tipo sma1, per PGA pari circa a 0.5g

Tabella 1: Frequenze di picco relative alle FFT registrate durante i test

	PGA	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
BF	0.14g	1.55	5.55	-
	0.28g	0.99	3.84	-
BI-gomma	0.13g	0.52	2.76	-
	0.31g	0.51	2.79	-
BI-sma1	0.52g	0.44	2.80	-
	0.14g	1.37	6.26	13.46
	0.31g	0.70	4.43	8.15
BI-sma2	0.50g	0.52	4.23	7.99
	0.30g	0.53	4.59	8.74
BI-acciaio	0.31g	0.52	4.54	8.81

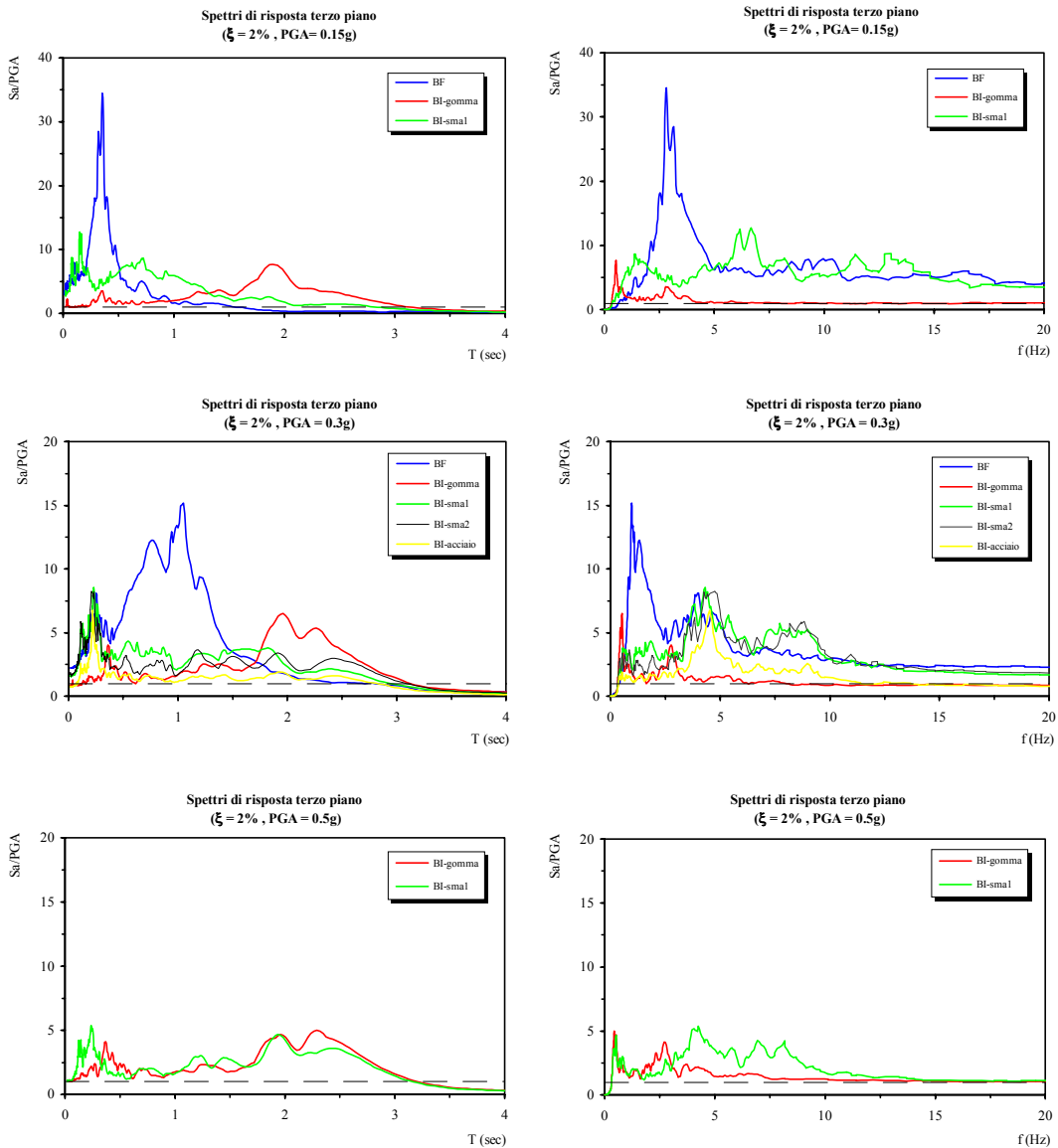


Figura 13: Confronto fra spettri di risposta elastici, adimensionalizzati rispetto all'accelerazione massima della tavola, al variare del tipo di sistema di isolamento impiegato e per tre diversi valori della PGA.

(*BF*: telaio a base fissa; *BI-gomma*: telaio con isolatori in gomma; *BI-sma1*: telaio con dispositivo di isolamento in LMF ricentrante e dissipativo; *BI-sma2*: telaio con dispositivo di isolamento in LMF solo rientrante; *BI-acciaio*: telaio con dispositivo di isolamento basato su elementi in acciaio. La linea orizzontale tratteggiata corrisponde ad un rapporto S_a/PGA pari ad 1)

Tabella 2: Fattori di amplificazione della accelerazione massima alla base da parte della struttura (3° piano) e dei quattro oscillatori elementari (SDOF) considerati

	PGA	3° piano	SDOF 1	SDOF 2	SDOF 3	SDOF 4
BF	0.14g	3.17	33.9	1.83	6.60	6.10
	0.28g	2.22	9.70	1.76	4.97	5.57
BI-gomma	0.13g	1.01	1.46	6.88	3.56	1.14
	0.31g	0.85	1.38	6.35	3.87	1.22
	0.52g	1.04	1.69	4.60	4.02	2.10
BI-sma1	0.14g	3.05	5.13	1.59	4.38	6.28
	0.31g	1.63	2.29	2.53	3.36	7.79
	0.50g	1.09	1.07	3.86	2.6	4.80
BI-sma2	0.30g	1.69	1.18	2.58	3.29	7.65
BI-acciaio	0.31g	0.76	1.10	1.80	1.52	5.50

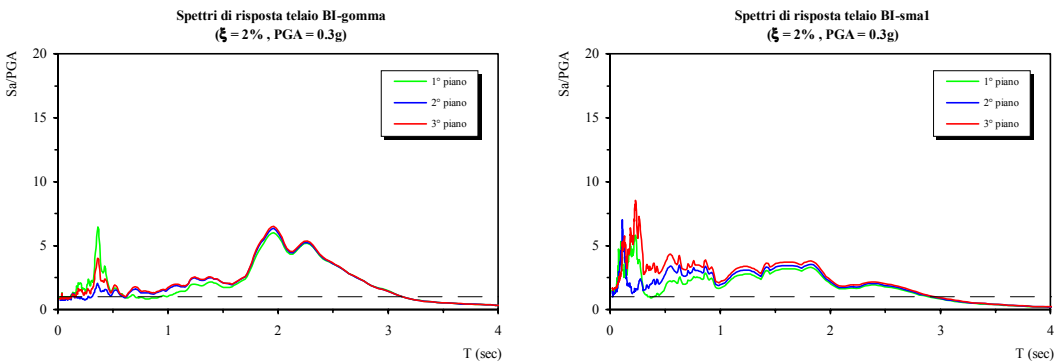


Figura 14: Spettri di risposta adimensionalizzati al variare del piano considerato, per il modello con isolatori in gomma (a sinistra), ed in LMF tipo sma1 (a destra). PGA pari a 0.3g

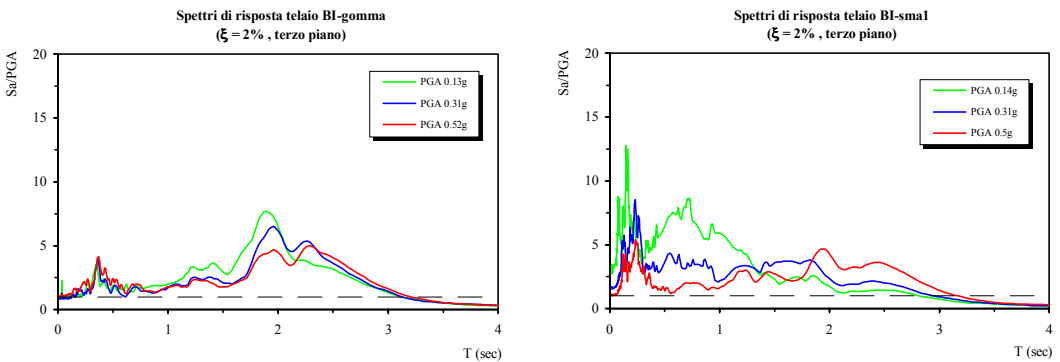


Figura 15: Spettri di risposta del terzo piano adimensionalizzati al crescere della PGA, per il modello con isolatori in gomma (a sinistra), ed in LMF tipo sma1 (a destra)