

La modellazione delle strutture isolate in presenza di sistemi di isolamento nonlineare e l'analisi dinamica nonlineare semplificata secondo l'OPC 3274/3431 (punto 10.7.6).

Franco Braga

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università La Sapienza, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italia.

Marco Faggella

Dipartimento PRICOS, Università "G. D'Annunzio", Chieti-Pescara, Viale Pindaro 42, 65127 Pescara, Italia.

Department of Structural Engineering, University of California San Diego, 9500 Gilman Drive, MC 0085 La Jolla, California 92093-0085.

Rosario Gigliotti

C.E.R.I. Centro di Ricerca previsione, prevenzione e controllo dei Rischi geologici, Università La Sapienza, Roma, Italia.

Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria, Università della Basilicata, Potenza, Italia.

Michelangelo Laterza

Dipartimento DiSGG, Università della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano, 85100 Potenza, Italia.

Keywords: Isolamento sismico, isolatori in gomma, slitte ad attrito, nonlinearietà, analisi time history, modi superiori, modellazione nonlineare agli elementi finiti, prove di rilascio, Ordinanza 3274/3431, forze statiche equivalenti

SOMMARIO:

In contrasto con vari studi presenti in letteratura e con varie normative sull'isolamento sismico tra cui l'EC8, cui essa si ispira, la OPC 3274/3431 al punto 10.7.6 introduce un metodo semplificato per l'analisi nonlineare di edifici isolati alla base, che appare del tutto incongruente e inadeguato. Il metodo si basa sul disaccoppiamento delle equazioni del moto relative al sistema di isolamento (1 grado di libertà e massa concentrata) ed alla sovrastruttura. Le evidenze sperimentali derivanti da una campagna di prove su un edificio isolato realizzato a Rapolla (Potenza) hanno invece chiarito alcuni aspetti significativi sugli scambi energetici tra il primo modo di vibrare isolato ed i modi superiori, legati alle nonlinearietà costitutive del sistema di isolamento. Ciò si traduce in una accresciuta importanza dei modi superiori nella risposta strutturale, a conferma di quanto riconosciuto dalla comunità scientifica e tradotto in pratica nei codici internazionali. L'estensione dello studio con analisi dinamiche su modello nonlineare in presenza di forzante sismica ha ulteriormente chiarito l'inconsistenza dell'analisi semplificata proposta dalla OPC 3274/3431, e dato una misura delle sottostime delle sollecitazioni anche in configurazioni di design ottimale dei sistemi di isolamento sismico.

ABSTRACT:

In addition to the conventional time history analysis for base isolated structures, the Italian building code OPC 3274/3431 allows a simplified nonlinear dynamic analysis, described in section 10.7.6. Although the analysis methods and criteria selection sections of the Italian code are generally very similar to EC8 and other international codes, these codes do not allow such a simplified procedure. This method appears theoretically inconsistent due to an unjustified decoupling of the nonlinear equations of motions of the superstructure and of the isolation system, since the nonlinear analysis is carried out treating the structure as a rigid SDOF system. The experimental tests performed on a full-scale building constructed at Rapolla (Potenza, Italy), pointed out some important effects of energy exchange from the first isolated mode towards the higher modes, due to the nonlinearity of the isolation system. This results in an increased contribution of higher modes to the overall structural response, as already evidenced in some of the principal studies in literature and also translated into practice by the international building codes and guidelines. Some nonlinear seismic response analyses have been carried out in order to show the inconsistency of the simplified analysis of the OPC 3274/3431. This procedure considerably underestimates the forces in the structure even for practical cases of optimal design of the isolation systems.

1 INTRODUZIONE

L'isolamento sismico alla base viene estesamente usato nei paesi ad elevato rischio sismico per la protezione delle strutture e dei loro contenuti da forti terremoti. Nella progettazione del sistema di isolamento, peraltro, si possono ottenere significativi vantaggi in termini di limitazione degli spostamenti globali e del taglio alla base se ai classici isolatori gomma-acciaio (ben modellabili con modelli lineari elasto-viscosi), si accoppiano dissipatori isteretici (che necessitano di una modellazione nonlineare), così creando un sistema di isolamento "ibrido". Per le normative specifiche, a questo punto, si pone il problema di definire le modalità di progetto di tale sistema "ibrido" ed in particolare se consentire o meno il calcolo con forze statiche equivalenti e, in caso di risposta affermativa, con quale distribuzione di forze lungo l'altezza della struttura isolata. Si teme, infatti, che l'accresciuta dissipazione d'energia possa indurre, oltre agli ovvi effetti benefici in termini di riduzione dello spostamento globale e del taglio al piede, anche un aumento della risposta ai modi superiori, con conseguenti incrementi di drift, spettri di piano e tagli di piano lungo l'altezza del manufatto isolato (Skinner et al. 1993).

Al fine di garantire un'esatta descrizione della risposta dei diversi piani del manufatto nei confronti sia del modo fondamentale che dei modi superiori, le normative internazionali sull'isolamento sismico recepiscono i risultati degli studi teorici e sperimentali presenti in letteratura. Le varie normative, in linea di principio, impongono in generale l'uso dell'analisi dinamica nonlineare considerando la deformabilità della sovrastruttura, qualora il comportamento dei sistemi di isolamento non sia modellabile come lineare equivalente (FEMA 302-303 1997, FEMA 273-274 1997, CEN EC8 2003, ASSISI 2003).

In Figura 1 è riportato in maniera esemplificativa lo schema dei criteri di selezione dei metodi di analisi consentiti dalle principali normative internazionali in base alle caratteristiche di isolatori e sovrastruttura, e con riferimento alle procedure comuni a vari testi.

Ai fini della selezione dell'analisi da effettuare, i sistemi di isolamento vengono classificati in due categorie, che qui di seguito verranno chiamate "lineare" e "nonlineare" a scopo esemplificativo, e la suddivisione è fatta in base a requisiti tra cui la nonlinearietà del legame, l'entità dello smorzamento equivalente, e le capacità ricentranti. Anche le configurazioni possibili di sovrastruttura vengono classificate in due gruppi, "qualunque" e "semplice" in base a criteri di geometria, estensione, regolarità e parametri di interazione col sistema di isolamento, quali il grado di isolamento.

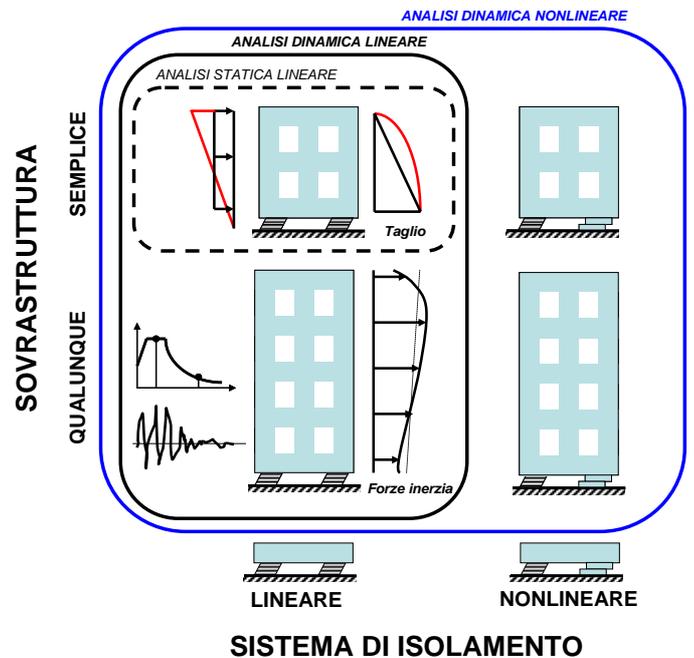


Figura 1. Normative Internazionali per l'Isolamento Sismico. Schema di combinazione delle possibili configurazioni di struttura e sistema di isolamento, e procedure di analisi consentite.

A seconda di come le due classi di strutture si combinano con le due classi di sistema di isolamento è possibile individuare tre tipi di analisi comuni alle varie normative:

- Analisi Dinamica Nonlineare
- Analisi Dinamica Lineare
- Analisi Statica Lineare

L'analisi Dinamica Nonlineare è in genere lo strumento più potente ed accurato utilizzabile, ed è in grado di coprire qualunque combinazione di struttura e sistema di isolamento.

L'analisi Dinamica Lineare vale solo in presenza di sistemi di isolamento piuttosto lineari, ma per qualunque tipo di struttura, poichè l'approccio modale consente di portare in conto ad esempio gli effetti lineari di contributo dei modi superiori o la risposta di configurazioni geometriche complesse.

L'Analisi Statica Lineare vale solo per un ristretto sottoinsieme di combinazione delle configurazioni possibili, in cui ambo la struttura e il sistema di isolamento rispondono ai requisiti menzionati di semplicità e nonlinearietà contenuta. In tal caso alcune norme prevedono forzanti di tipo uniforme mentre altre considerano forzanti triangolari.

I sistemi di isolamento "IBRIDO" sono quelli che più frequentemente ricadono nella categoria di sistemi nonlineari, per via della presenza di dispositivi isteretici o ad attrito. E' da sottolineare come in caso di sistemi di isolamento nonlineari l'analisi dinamica nonlineare è l'unico strumento in grado di descrivere in maniera realistica la risposta della struttura, a prescindere da quale ne sia la semplicità geometrica. In-

fatti la natura dinamica accoppiata delle equazioni nonlineari del moto non consente altra scelta, vista la necessità di tener conto gli effetti di suscettibilità anche dei modi superiori dovuti alla non linearità del sistema di isolamento.

Tra i vari testi di riferimento, le FEMA 274, mettono in guardia contro il rischio di eccitare i modi superiori; in tal caso, infatti, (sistemi ad alto smorzamento) si ha un andamento dei tagli di piano approssimativamente costante lungo l'altezza (figura 2), invece di (sistemi a basso smorzamento) un andamento dei tagli di piano lineare lungo l'altezza coerente con una distribuzione costante di forze: (C9.2.2.1 - “[...] for highly damped isolation systems, the shear force distribution is nearly constant over the height of the structure, whereas for lightly damped systems this distribution is approximately triangular. The latter is indicative of response in the fundamental mode of vibration, whereas the former is indicative of higher mode response, which typically accompanied by higher accelerations in upper floors”).

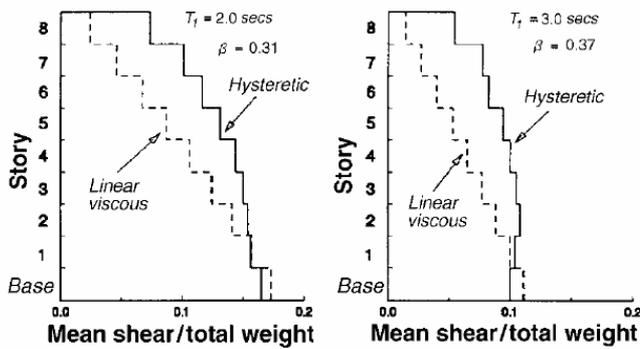


Figura 2. NEHRP FEMA 274, (Chapter 9: Seismic Isolation and Energy Dissipation (Systematic Rehabilitation) Figure C9-3), Diagramma dei tagli di piano di una struttura ad 8 piani, con isolatori visco-elastici lineari e isteretici bilineari.

2 EVIDENZE SPERIMENTALI SU EDIFICIO REALE E MODELLO 3D NONLINEARE: IL PROGETTO DI RICERCA “RAPOLLA”.

Lo studio dei test di rilascio a spostamento iniziale di circa 15cm effettuati su un reale edificio isolato a tre piani, (Braga et al 2005b), ha messo in evidenza l'influenza della non linearità del sistema di isolamento sulla risposta dinamica dell'intera struttura. Sono stati testati un sistema di isolamento a soli isolatori in elastomero armato (28HDRB “High Damping Rubber Bearings”), ed un sistema IBRIDO (12HDRB + 16Friction Sliders) composto da isolatori HDRB con funzione di richiamo elastico ed isolatori a scorrimento (“Friction Sliders”) con funzione di dissipazione di energia per attrito (Braga et al 2004, Braga et al. 2005a).

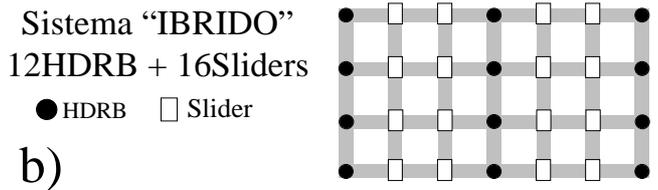


Figura 3. Edificio isolato (a) e distribuzione in pianta dei dispositivi nella configurazione di prova: 12HDRB + 16Friction Sliders (b).

L'analisi della risposta del sistema IBRIDO (Figura 3) ha permesso di osservare alcuni interessanti fenomeni legati all'accoppiamento nonlineare della risposta di struttura e isolatori. L'identificazione dinamica sui segnali di accelerazione ha fornito i periodi T_1 e T_2 relativi ai principali modi di vibrare eccitati (Figura 4). La sovrastruttura è presente con periodi attorno agli 0.15sec. Il modo isolato ha periodo pari a 2.28 sec. Il periodo della struttura corrispondente a base fissa è circa 0.24sec, pertanto il grado di isolamento della struttura vale $I=9.5$. Lo smorzamento equivalente ξ è pari al 30%.

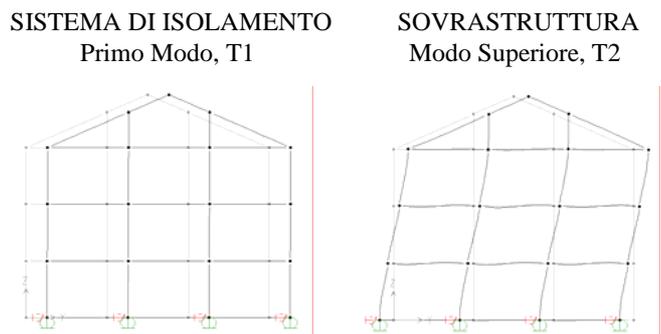


Figura 4. Principali modi di vibrare eccitati sull'edificio isolato.

Se il sistema di isolamento fosse lineare ed avesse la stessa rigidità secante, da un punto di vista progettuale e dell'analisi, tale struttura soddisferebbe ampiamente i requisiti per la conduzione di un'analisi statica lineare poichè il grado di isolamento secante è ben superiore a 3. Pertanto, in caso di azione sismica, sarebbe lecito parlare di bassa partecipazione diretta dei modi superiori. Infatti le masse parteci-

panti relative al secondo modo sarebbero pressoché nulle, e le equazioni modali del moto perfettamente disaccoppiate.

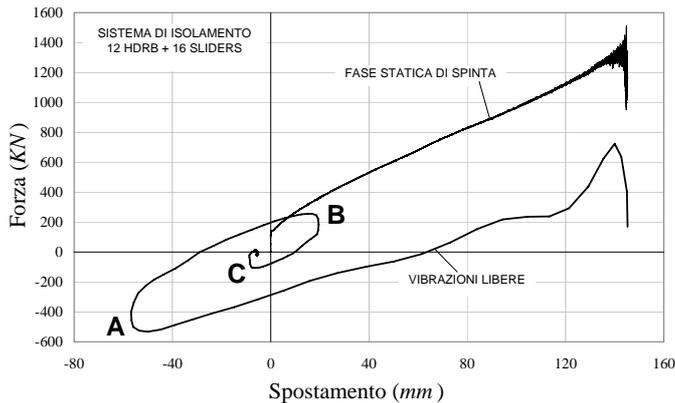


Figura 5. Sistema di isolamento IBRIDO. Legame sperimentale forza-spostamento nella fase statica di carico e in rilascio.

Tuttavia il sistema in esame è nonlineare ed anche l'osservazione dei segnali lo rivela, attraverso caratteristiche di risposta assolutamente non proprie di sistemi lineari. La Figura 5 mostra le oscillazioni libere attraverso i diagrammi forza orizzontale-spostamento orizzontale. Sono evidenti i cambi di rigidità, con dei rami a rigidità elevata nelle inversioni di moto A, B, C, dovuti alla presenza di dispositivi ad attrito. Più significativa, ai fini dell'evidenziazione degli effetti che la non linearità del sistema "ibrido" comporta, risulta la Figura 6 che confronta i segnali di accelerazione del 1° modo di vibrare (riconducibile al modo isolato) e del drift totale (riconducibile al 2° modo di vibrare).

A cavallo di ciascuna inversione del moto isolato la sovrastruttura subisce delle riprese di deformazione sulle frequenze di uno o più modi superiori, dovute al temporaneo ricollegarsi delle interfacce ad attrito degli isolatori a scorrimento. Le riprese di drift e dell'accelerazione sarebbero ingiustificate se si trattasse di un sistema lineare sia perché i modi superiori hanno coefficiente di partecipazione quasi nullo, sia soprattutto perché il moto avviene in assenza di forzante esterna. Tuttavia l'accoppiamento nonlineare del sistema dinamico fa sì che i modi superiori ricevano energia dal modo isolato in corrispondenza dei punti singolari di transizione A, B, C. Per queste ragioni in presenza di una struttura siffatta riveste fondamentale importanza la scelta di un metodo di analisi accurato quale l'analisi dinamica nonlineare. Come verrà mostrato in seguito un'analisi dinamica nonlineare semplificata come quella suggerita dalla 3274 (Dolce et al. 2003), fornirebbe risultati del tutto a sfavore di sicurezza, come già evidenziato in alcuni studi (Braga et al. 2005b) per via sia dell'assunzione di indeformabilità della sovrastruttura (sistema ad 1GDL), sia della violazione dell'accoppiamento nonlineare tra i modi.

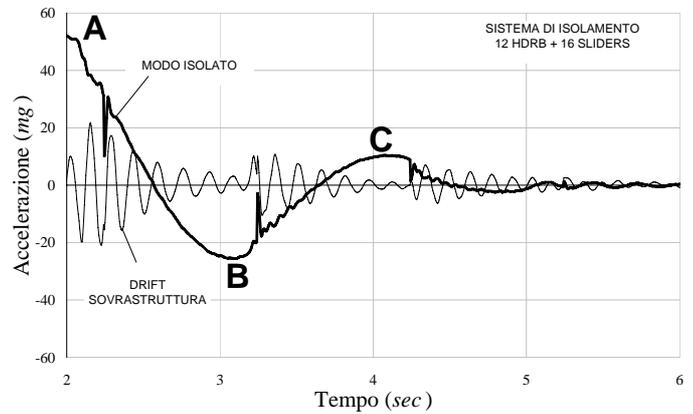


Figura 6. Segnali sperimentali di accelerazione del 1° modo (modo isolato, linea spessa) e del secondo modo (modo sovrastrutturale o da drift, linea sottile) per la struttura con sistema di isolamento IBRIDO.

Al fine di evidenziare il ruolo che tali effetti hanno in fase progettuale e nell'analisi, è utile osservare alcuni risultati ottenuti con un modello nonlineare tridimensionale dell'edificio agli elementi finiti (Faggella 2002), usando il programma di calcolo SAP2000nl. La sovrastruttura è stata modellata con elementi lineari, includendo anche le tamponature (Figura 7).

Ogni singolo dispositivo di isolamento è stato modellato con elementi nonlineari, usando il modello di Bouc-Wen per gli isolatori elastomerici, e l'elemento Friction Pendulum per gli scivolatori, entrambi inclusi nella libreria del programma. Così come le norme prevedono per tale struttura in fase progettuale, si è usata l'analisi dinamica nonlineare anche nello studio della sperimentazione effettuata.

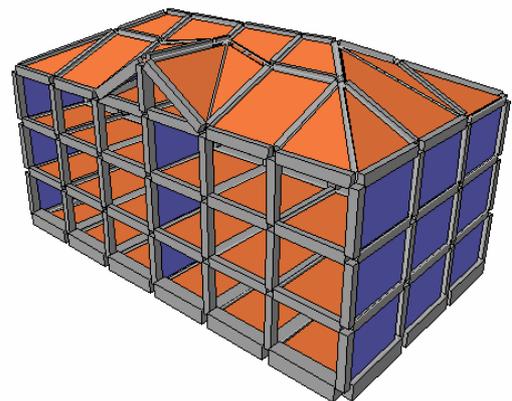


Figura 7. Modello nonlineare agli elementi finiti della struttura isolata (Faggella 2002).

La simulazione delle prove sperimentali di rilascio ha permesso di evidenziare ancora una volta gli effetti di accoppiamento dei modi superiori, come è mostrato dalla Figura 8 e Figura 9.

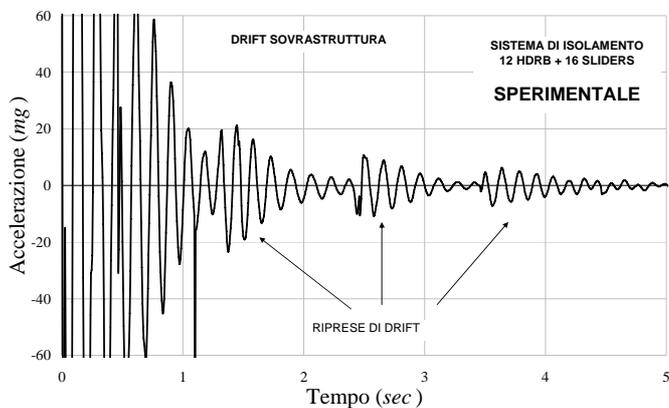


Figura 8. Risposta sperimentale, effetti di non linearità.

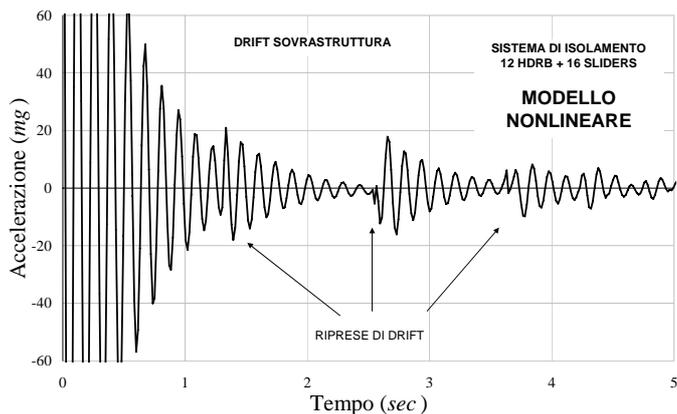


Figura 9. Risposta numerica, effetti di non linearità.

I moduli di analisi e gli elementi inclusi nel codice di calcolo usato consentono quindi di riprodurre gli effetti che la non linearità del sistema di isolamento ha sulla risposta della sovrastruttura. Le riprese di accelerazione osservate nei segnali sperimentali hanno luogo anche nel modello numerico. Tali riprese non sarebbero osservabili se si utilizzasse un modello semplificato ad 1GDL dell'edificio, in cui alla sovrastruttura verrebbero impediti le forme di inflessione dei modi superiori.

E' da ricordare come, in presenza di forzante sismica si avrebbe un'ancora più accresciuta risposta dei modi superiori, per via non solo dell'accoppiamento non lineare osservato nei test e ben riprodotto dall'analisi dinamica non lineare, ma soprattutto per via della soglia di forza di attrito di 200KN circa, che porta temporaneamente la struttura in condizioni di base fissa finché il taglio di base non vince la soglia di attrito.

3 ANALISI SEMPLIFICATA OPC 3274-3431: STUDIO NUMERICO SU MODELLO SHEAR-TYPE.

Alla luce degli aspetti evidenziati è comprensibile come nessuna delle norme internazionali, in presenza di sistemi di isolamento piuttosto non lineari, ammetta strumenti semplificati per l'analisi di situazioni intermedie, in cui almeno solo la sovrastruttura

abbia caratteristiche di semplicità. Al contrario l'Ordinanza 3274, (OPCM N.3274 2003) che in generale rispetta fedelmente l'impianto delle altre norme, in questo caso consente un'analisi semplificata a sovrastruttura rigida, assolutamente inadeguata nei confronti degli effetti di accoppiamento non lineare dei modi di vibrare. Nell'ambito di un testo che ricalca fedelmente l'EC8, l'Ordinanza al punto 10.7.6 aggiunge, in maniera assolutamente originale, (Dolce et al. 2003, Dolce et al. 2004), la possibilità di effettuare un calcolo con forze statiche equivalenti basate sul solo primo modo (accelerazioni lungo l'altezza proporzionali alle masse, Figura 10) per strutture con caratteristiche di regolarità ma qualunque sia la non linearità del sistema di isolamento (Tabella. 1), vale a dire senza porre limitazioni sul tipo di dispositivi (10.7.6 *Analisi dinamica non-lineare* - "[...] Nel caso in cui sussistano le condizioni per l'esecuzione di analisi statiche lineari specificate al punto 10.7.4, con la sola eccezione del comportamento del sistema d'isolamento, si potrà utilizzare un modello semplificato del sistema strutturale, considerando la struttura come una massa rigida, collegata a terra tramite elementi che riproducano correttamente il comportamento del sistema d'isolamento risultante dal contributo di tutti i suoi dispositivi.

Lo spostamento ottenuto dall'analisi verrà assunto come spostamento di progetto del sistema d'isolamento, mentre l'accelerazione massima sulla massa rigida sarà utilizzata per la valutazione delle forze d'inerzia da applicare ai singoli piani nella formula del par. 10.7.4, in sostituzione di $S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$ [...]").

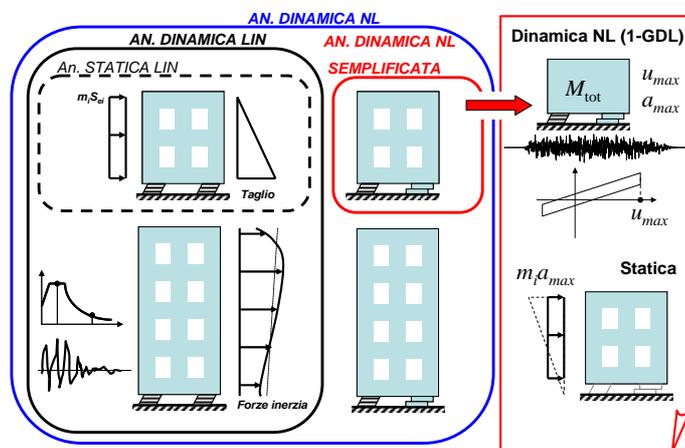


Figura 10. OPCM 3274/3431. Quadro delle configurazioni strutturali e dei metodi di analisi. Introduzione della "Analisi Nonlineare Semplificata", mirata ad analizzare configurazioni intermedie in presenza di sistemi di isolamento qualsiasi, ma sovrastrutture non complesse.

Si fa notare che nel successivo testo OPCM 3431, l'ultimo periodo viene eliminato, lasciando posto a: "[...] Lo spostamento ottenuto dall'analisi verrà assunto come spostamento di progetto del sistema d'isolamento, mentre l'accelerazione massima sulla massa rigida sarà utilizzata, nell'ipotesi di distribuzione linearmente crescente lungo l'altezza dell'accelerazione, per la valutazione delle forze d'inerzia da applicare ai singoli piani nella formula (4.2) del

par. 4.5.2, in sostituzione di $S_d(T_1)$. [...]”, vale a dire, la distribuzione di accelerazioni uniformi e quindi forze ai piani proporzionali alle masse, viene sostituita, nel passare dalla OPC 3274 alla OPC 3431, con un andamento di forze lineare ai piani, analogo a quello usato per l’analisi statica lineare di edifici a base fissa.

Tabella. 1. Ordinanza 3274. Condizioni per l’analisi non-lineare semplificata.

SISTEMA DI ISOLAMENTO O TIPO DI DISPOSITIVO	
1	Nessuna condizione
STRUTTURA (punto 10.7.4):	
1	Regolarità in pianta (punto 4.3)
2	$H < 20\text{m}$; max 5 piani
3	$B < 50\text{m}$
4	$I = T_{is}/T_{bf} > 3$; $T_{is} < 3\text{sec}$
5	$K_v/K_{esi} > 800$
6	$T_v < 0,1\text{ sec}$
7	No trazione
8	Eccentricità $e_{tot} < 3\%$

I possibili effetti di tale prescrizione sono stati valutati effettuando alcune analisi nonlineari, i cui risultati vengono riportati qui di seguito, modellando sia la deformabilità della sovrastruttura sia le non-linearità del sistema di isolamento di un edificio con struttura regolare, dotato di un sistema ibrido (richiamatori elastici affiancati a slitte ad attrito). Sia le caratteristiche strutturali sia quelle del sistema di isolamento scelto (riportate in Tabella 2 ed in Figura 11) risultano realistici e convenientemente adottabili. La struttura ed il sistema di isolamento presentano, infatti, delle caratteristiche prossime a quelle dell’edificio di Rapolla nella configurazione sperimentale IBRIDA, descritta in precedenza.

Tabella 2. Parametri della struttura shear-type.

T_{bf} (sec)	0,547
I	5,187
T_{is} (sec)	2,837
NL	0,393
ξ (%)	25
d_{dc} (mm)	128,094
K_{esi} (KN/mm)	6,173
K_e (KN/mm)	1300
K_y (KN/mm)	3,746
Q_y (KN)	311,847

La struttura è stata schematizzata con un modello shear-type. E’ a 5 piani, alta 20m, con masse e rigidità uniformi in altezza, dotata di pianta regolare avente dimensioni 20m x 15m, e con 20 pilastri per ogni piano. Il periodo in condizioni a base fissa è $T_{bf} = 0,547$ sec. La massa totale della struttura, comprensiva di quella del livello di isolamento, è di 1260t.

K_{esi} è la rigidità secante del sistema di isolamento, K_e la rigidità del ramo elastico, K_y la rigidità in fase di scorrimento (fase plastica), Q_y la soglia di forza di attrito. Il periodo isolato T_{is} (sistema 1GDL a sovrastruttura rigida) valutato sulla rigidità secante K_{esi} allo spostamento di progetto d_{dc} è di 2,837sec. Il grado di non-linearità NL vale 0,393.

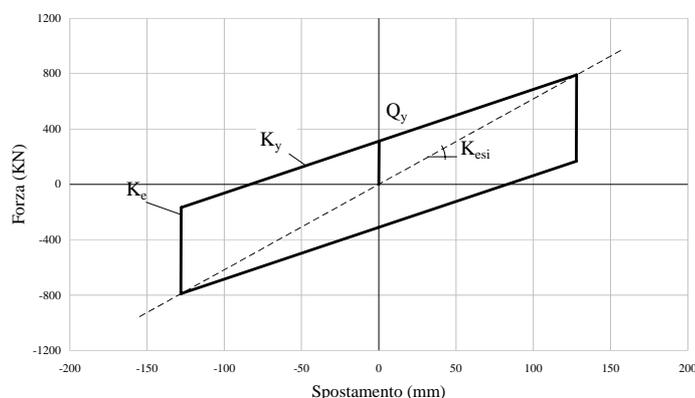


Figura 11. Legame costitutivo nonlineare del sistema di isolamento usato nell’analisi numerica.

L’analisi è stata effettuata usando il programma SAP2000nl, e modellando il sistema di isolamento con le effettive proprietà nonlineari, mentre la sovrastruttura è stata considerata elastica considerandone la reale deformabilità, a differenza di quanto suggerisce l’analisi semplificata dell’Ordinanza 3274 che consentirebbe di assumere la sovrastruttura come infinitamente rigida. Si è usato il programma SIMQKE per generare le storie di accelerazione al suolo, a partire dallo spettro elastico per le strutture isolate, con $PGA = 0,35g$ e terreno tipo A.

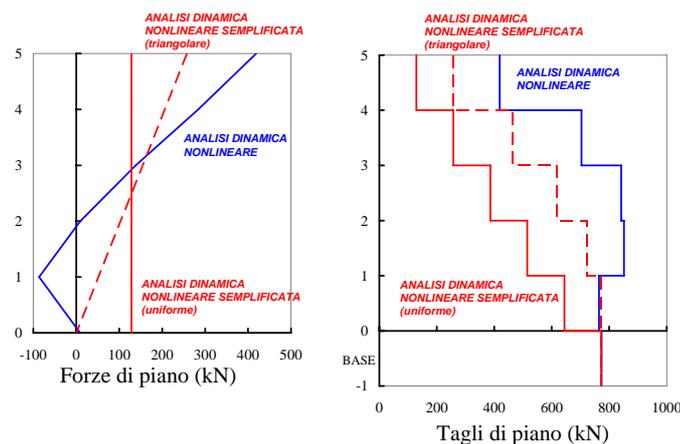


Figura 12. Forze equivalenti di piano (a) derivate dall’analisi Time History NL, forze statiche con distribuzione uniforme e linearmente crescente lungo l’altezza. Andamento dei tagli di piano (b) ottenuti dall’analisi Time History NL e coerenti con le due differenti distribuzioni di forze statiche.

In figura 12 viene riportata la media dei massimi tagli di piano ottenuta dalle analisi nonlineari con i diversi accelerogrammi usati. Si può notare come, usando una corretta analisi dinamica nonlineare, che

implica una modellazione accurata della deformabilità della sovrastruttura, si hanno, soprattutto a metà altezza ed in sommità, tagli molto maggiori rispetto ai valori calcolati col metodo nonlineare semplificato della 3274 che assume la sovrastruttura come infinitamente rigida. Ciò è in accordo con quanto osservano le FEMA 274 al punto C9.2.2.1. Sul taglio alla base, invece, la coincidenza è pressoché totale. Sempre in figura 12 sono inoltre riportate le diverse distribuzioni delle forze di piano corrispondenti alle diverse analisi. Tali distribuzioni mettono in luce con chiarezza l'attivazione dei modi superiori e si discostano sia dalla distribuzione di forze statiche uniforme in altezza (OPC 3274), corrispondente all'assunzione di moto rigido della struttura in elevazione, sia dalla distribuzione triangolare (OPC 3431). Ovviamente ciò si traduce in significative differenze nell'andamento dei tagli di piano lungo l'altezza.

In definitiva, l'analisi semplificata a sovrastruttura rigida è in grado di riprodurre abbastanza bene la risposta isteretica del sistema di isolamento. Tuttavia, trascurando del tutto la deformabilità ai piani, non tiene conto dei modi superiori, e quindi ignora gli incrementi di taglio ai piani dovuti alla momentanea eccitazione diretta della sovrastruttura legata alla nonlinearietà del sistema di isolamento. Per la struttura in esame, l'aver assicurato implicitamente bassa partecipazione dei modi superiori scegliendo un elevato grado di isolamento secante $I = T_{is}/T_{bf} > 3$ per il sistema lineare equivalente, non è sufficiente ad escluderne il contributo nella risposta nonlineare complessiva.

4 CONCLUSIONI.

Gli studi condotti negli ultimi due decenni ed il conseguente sviluppo di codici antisismici hanno favorito una sempre crescente diffusione delle applicazioni dell'isolamento sismico in tutto il mondo. Le case produttrici di software stanno rispondendo alle esigenze dell'ingegneria antisismica, sviluppando e commercializzando codici di calcolo sempre più potenti e mirati ad applicazioni specifiche. Anche le commissioni normative di vari paesi esposti a rischio sismico seguono da vicino le richieste della pratica professionale e le offerte dei produttori di dispositivi, pubblicando norme tecniche e linee guida in grado di orientare ed assistere i tecnici sia nella fase progettuale che nella scelta delle procedure e degli strumenti di analisi. Per quanto riguarda l'isolamento sismico, è comunemente riconosciuta sia l'efficacia dei convenzionali isolatori in gomma, che la convenienza, in molti casi, di sistemi misti comprendenti anche dispositivi a comportamento meccanico più complesso. Le norme tecniche ed i software di calcolo consentono al tecnico specializzato di condurre analisi nonlineari per la progettazione di strutture

con sistemi di isolamento comprendenti anche dispositivi ad attrito o isteretici, aventi comportamento fortemente nonlineare.

Ai fini dell'analisi le varie norme sismiche internazionali sono generalmente in accordo nel classificare le configurazioni strutturali in base a criteri di regolarità e geometria, ed i sistemi di isolamento in base alle proprietà meccaniche ed alle caratteristiche di linearità o nonlinearietà. A seconda di come diverse strutture si combinano con sistemi lineari o nonlineari, le norme suggeriscono l'impiego di modelli di calcolo anch'essi lineari o nonlineari, e consentono in generale la conduzione di analisi statiche lineari, analisi dinamiche lineari, ed analisi dinamiche nonlineari. In caso di sistemi di isolamento fortemente nonlineari, ed a prescindere dalla semplicità della sovrastruttura, i vari testi sono in accordo unanime nell'imporre l'uso dell'analisi dinamica nonlineare, che rappresenta l'unico strumento affidabile. Infatti, studi di riferimento teorico-sperimentali presenti in letteratura già da più di dieci anni, hanno evidenziato sia il diverso comportamento sismico esibito da strutture ad isolamento lineare e nonlineare, sia l'inadeguatezza di metodi di analisi semplificati nel descrivere la risposta nonlineare dei sistemi di isolamento ed il loro accoppiamento nonlineare con la sovrastruttura.

La recente normativa antisismica italiana esula invece dalla linea tracciata da tutte le altre norme internazionali e dai principali studi specialistici in merito all'analisi dinamica nonlineare ed alla gerarchia delle configurazioni e delle procedure utilizzabili. I testi delle Ordinanze 3274 e 3431 si sforzano di fornire uno strumento intermedio definito "analisi dinamica nonlineare semplificata" per l'analisi di strutture semplici e basse ma qualunque sia la nonlinearietà del sistema di isolamento. In sintesi tale procedura si propone di semplificare l'analisi con l'uso di forze statiche equivalenti aventi profilo proporzionale alle masse o lineare, ma tuttavia attribuisce a strutture dotate di isolamento qualunque aspetti propri soltanto di sistemi di isolamento lineari.

Col presente lavoro si è cercato di mettere in guardia contro i rischi connessi all'uso dell'analisi semplificata, e si è richiamata l'attenzione sulle ragioni per cui tutte altre norme sottolineano l'importanza di una corretta analisi dinamica nonlineare. Si è posto l'accento sugli effetti di partecipazione nonlineare dei modi superiori in presenza di strutture relativamente basse (da 3 a 5 piani) isolate con sistemi IBRIDI composti da isolatori HDRB + slitte ad attrito.

Lo studio dei risultati delle prove di rilascio sull'edificio di Rapolla isolato con sistema nonlineare IBRIDO ha ribadito e confermato con evidenze sperimentali le ragioni per cui un'analisi semplificata che considera la sovrastruttura come rigida anche in presenza di isolatori nonlineari non viene presa in considerazione da nessuna altra norma internaziona-

le. Si è potuto osservare che, anche in assenza di forzante sismica, i modi di vibrare superiori contribuiscono alla risposta soprattutto in accelerazione ed inducono quindi inflessione e stati di sollecitazione aggiuntivi anche nella sovrastruttura. L'uso di un modello nonlineare tridimensionale agli elementi finiti dell'intero edificio e dei singoli dispositivi ha permesso di riprodurre i risultati sperimentali mediante analisi time history nonlineare. Anche il modello ha evidenziato la presenza di effetti di accoppiamento nonlineare della risposta modale visibili attraverso riprese di accelerazione da drift del tutto analoghe a quelle osservate nei test.

Si è studiato inoltre il comportamento sismico di una struttura più alta (5 piani) di tipo shear-type con isolamento IBRIDO confrontando sia l'analisi dinamica nonlineare prescritta dai codici internazionali, sia l'analisi dinamica nonlineare semplificata dell'Ordinanza 3274/3431. È emerso che la procedura della norma italiana induce delle grosse sottostime delle sollecitazioni dovute all'impropria adozione di un modello rigido per la sovrastruttura. In presenza di azione sismica l'effettiva deformabilità della sovrastruttura e la violazione dell'accoppiamento nonlineare delle equazioni del moto insito nella procedura semplificata possono portare a differenze in difetto sui tagli ad alcuni piani anche superiori al 50%.

BIBLIOGRAFIA

- FEMA 302-303, (1997). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*.
- FEMA 273-274, (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.
- CEN, European Committee for Standardisation, (2003). *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance*, PrEN 1998-1, Draft No 6, January 2003.
- ASSISI (2003). *Design Rules and Guidelines for Structures Provided with Passive Control Systems of Seismic Vibrations applied or proposed in Armenia, Chile, France, Italy, Japan, Mexico, P.R.China, Russian Federation, USA*. Technical Report A/03-01, ENEA ed. per ASSISI, Bologna, Settembre 2003.
- OPCM N.3274 del Presidente del Consiglio dei Ministri (2003). *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. Roma 20/03/2003, (G.U. n. 105, Serie generale, 8 maggio 2003).
- OPCM N.3431 del Presidente del Consiglio dei Ministri (2005). *Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del PCM n. 3274 del 20 marzo 2003, recante «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*. Roma, 3/5/2005.
- M. Dolce, G. Santarsiero, (2003). *Progress on development of design rules for seismic vibrations control techniques of civil structures in the European Union*. 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Yerevan, Armenia, October 6-10, 2003.
- M. Dolce, G. Santarsiero, (2004). *Stato dell'applicazione delle tecniche di isolamento sismico in Italia ed all'estero: aspetti normativi*. XI Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Genova, Italia, gennaio 2004.
- Skinner R.I., Robinson W.H., Mc Verry G.H., (1993). *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & sons.
- F. Braga, M. Laterza, (2004). *Field testing of low-rise base isolated building*. Engineering Structures, Vol./Iss. 26/11, pp. 1599-1610.
- F. Braga, R. Gigliotti, M. Laterza (2001). *Seismic Isolation Using Slide and Rubber Bearings: Large Amplitude Free Vibration Tests on "Rapolla Residence Building"*. 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures. Assisi, Italy, October 2-5, 2001.
- F. Braga, M. Faggella, R. Gigliotti, M. Laterza, (2005). *Nonlinear dynamic response of HDRB or Hybrid HDRB-Friction Sliders base isolation systems*. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 3 n. 3, Springer editor.
- F. Braga, M. Faggella, R. Gigliotti, M. Laterza (2005). *Effetti delle non-linearità costitutive dei sistemi di isolamento sismico e metodi semplificati per la valutazione della risposta*. Ingegneria Sismica, Vol.2, Patron editore.
- F. Naeim, J. M. Kelly, (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley & sons.
- M. Faggella, (2002). *Prove Dinamiche Sperimentali su un Edificio Isolato alla Base e Loro Elaborazione Teorica*. Tesi di laurea, Università della Basilicata, relatori F. Braga e M. Laterza.
- SAP2000, (2002). *Analysis reference manual, Version 8.0*. Computers & Structures inc. Berkeley, California, USA .
- D. Gasparini, E. Vanmarcke, (1976). *Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.