

Criteria per la progettazione di dispositivi di isolamento a pendolo scorrevole

G.M. Calvi¹, D. Pietra², M. Moratti³ ■

Sommario

L'isolamento alla base degli edifici, come indicato tra gli altri da Dolce et al. (2000a; 2000b; 2001), rappresenta uno dei metodi di progettazione più efficace per il conseguimento di elevati standard prestazionali di strutture soggette ad azioni sismiche, specie se di intensità notevole. Gli isolatori definiti di tipo a scorrimento con superficie curvilinea, secondo la classificazione introdotta nelle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 (§11.9.8), che integra quanto previsto per gli isolatori a scorrimento dall'O.P.C.M. 3274 e ss.mm.ii (§10.4.2.), sono di utilizzo relativamente recente, risalendo ai primi anni novanta le prime applicazioni costruttive. I due fattori che caratterizzano la risposta dei singoli dispositivi di isolamento, e quindi della sovrastruttura, sono il raggio di curvatura della calotta sferica e le caratteristiche fisiche dell'attrito che si viene a creare tra la superficie di scivolamento e l'articolazione di movimento. Il raggio della calotta sferica è legato solamente alla geometria dell'isolatore mentre il fenomeno di tipo attritivo che si manifesta è governato dalla scelta del materiale posto a contatto con la superficie di scorrimento in acciaio. Tale materiale deve quindi soddisfare i requisiti di progetto, ovvero, garantire una sufficiente capacità

in termini di 1) carico verticale, 2) durabilità, 3) stabilità (termica, ciclica), 4) dissipazione energetica, 5) taglio massimo trasmesso in fase di risposta sismica e 6) capacità di spostamento. Le procedure di progettazione e prova dei dispositivi ad oggi previste dai codici internazionali indirizzano le attenzioni di progettista e costruttore verso un controllo del raggio di curvatura della superficie sferica e sulla valutazione del meccanismo attritivo attraverso l'analisi di attrito dinamico (μ_{din}) e statico (μ_{stat}), intesi rispettivamente come attrito per alte velocità di scorrimento ed attrito per basse velocità di scorrimento, soffermandosi però in fase progettuale sostanzialmente sul solo valore dinamico μ_{din} . Nell'articolo si valuteranno le ripercussioni nella risposta del sistema isolato con riferimento anche all'attrito di primo distacco (μ_{dist}) e in corrispondenza dell'inversione della direzione del moto di scorrimento (μ_{inv}), non esplicitamente investigati dalle attuali procedure di progettazione, qualifica ed accettazione dei dispositivi. Saranno inoltre approfondite le correlazioni tra le variazioni di sforzo assiale e di velocità di scorrimento rispetto alla caratterizzazione del meccanismo attritivo valutandone le ripercussioni progettuali in termini di modellazione lineare e non lineare dei dispositivi.

1. Introduzione

L'isolamento sismico posto tra la base e la sovrastruttura nel caso di edifici, o tra pile ed impalcato nel caso dei ponti, rappresenta una tecnica di protezione sismica con la quale è possibile garantire, mediante la concentrazione delle deformazioni nei dispositivi, un'adeguata limitazione del danno strutturale (rispettivamente dell'edificio o dell'impalcato del ponte) governando il periodo proprio di oscillazione della sovrastruttura.

Il ricorso ad un sistema di isolamento, grazie all'abbattimento della forza sismica trasmessa alla sovrastruttura rispetto a quanto accade per una tradizionale struttura non isolata, mostra

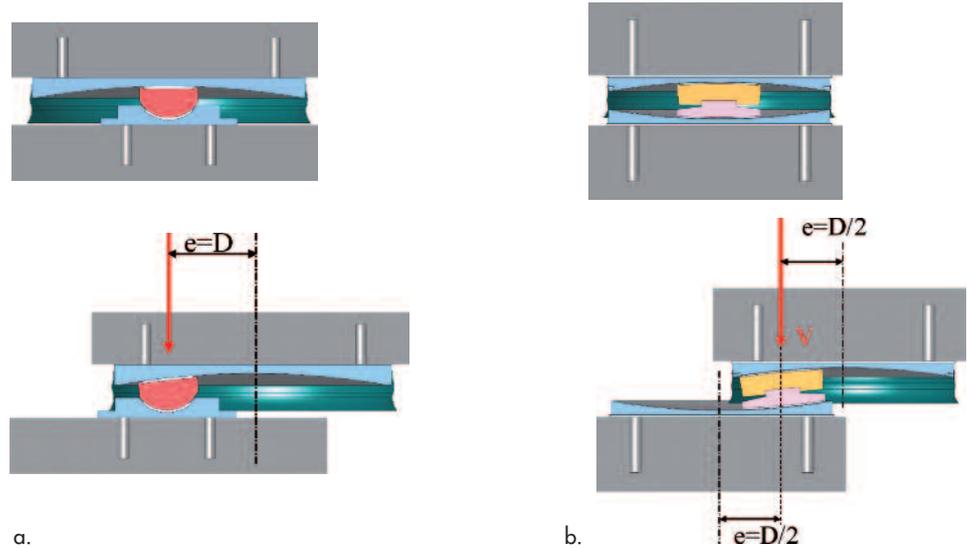
un'efficienza tecnica ed economica crescente al crescere del livello di accelerazione massima attesa al suolo per il sito di costruzione. Inoltre, l'adozione di un sistema di isolamento, prevede che sia assicurato il comportamento pressoché elastico della sovrastruttura anche per un evento sismico in condizioni ultime (implicito nell'adozione di un fattore di struttura q pari ad 1,5 per le verifiche relative allo Stato Limite di salvaguardia della Vita, secondo le Norme Tecniche 2008). Ciò comporta una limitata richiesta di duttilità della sovrastruttura a fronte di una concentrazione di domanda di spostamento in corrispondenza degli isolatori, con un conseguente quadro

¹ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - Istituto Universitario di Studi Superiori IUSS, Pavia - ✉ gm.calvi@eucentre.it

² EQCO - Earthquake Consulting s.r.l., Pavia - ✉ dario.pietra@eqco.it

³ Studio Calvi s.r.l., Pavia - ✉ matteo.moratti@studiocalvi.eu

Fig. 1
 Schema di risposta per
 azioni orizzontali: FPS a
 singola curvatura con parte
 fissa inferiore (a), FPS a
 doppia curvatura (b).



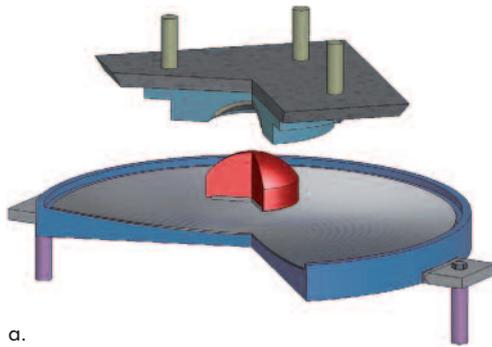
di danneggiamento atteso post-sisma assai modesto per le strutture.

1.1 Caratteristiche dei dispositivi scorrevoli a pendolo

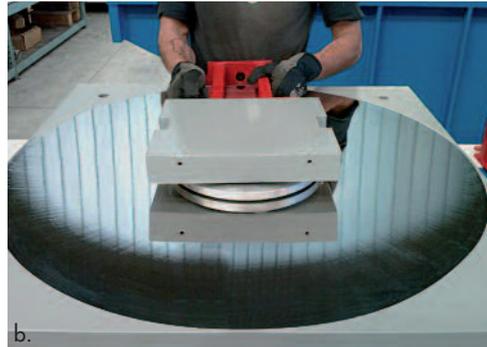
Gli isolatori del tipo a scorrimento, internazionalmente noti come Friction Pendulum System (di seguito FPS), consentono il moto orizzontale relativo tra la parte di struttura soprastante i dispositivi (sovrastuttura) e la parte sottostante, solidale al terreno (sottostruttura). Dal punto di vista tecnologico, come schematizzato in figura 1 (a) con riferimento a dispositivi a singola curvatura, il disaccoppiamento tra il moto orizzontale della sovrastuttura e quello della sottostruttura avviene grazie alla possibilità di scorrimento tra una superficie a forma di calotta sferica, realizzata in acciaio, solidale con una delle due parti della struttura isolata ed una articolazione, vincolata alla porzione opposta.

Esiste la possibilità di adottare due uguali superfici emisferiche solidali rispettivamente con sovrastuttura e sottostruttura con interposta un'articolazione (dispositivi con doppia superficie di scorrimento) come schematizzato nella figura 1 (b). Le principali differenze tra i sistemi a singola e doppia curvatura possono essere riassunte in una maggiore compattezza dei dispositivi a doppia curvatura e nella possibilità per questa tipologia di dispositivi di ripartire in modo uniforme tra sovrastuttura e sottostruttura lo spostamento relativo e, come schematizzato in figura 1, distribuire di conseguenza gli effetti flessionali conseguenti all'azione del carico verticale in posizione eccentrica rispetto all'asse dell'elemento (noti come effetti tipo $P-\Delta$). Come più diffusamente trattato in seguito, per i dispo-

sitivi a doppia interfaccia di scorrimento, l'adozione di un raggio di curvatura della superficie sferica pari alla metà del raggio di un ipotetico isolatore a singola curvatura comporta un'equivalenza per la geometria del moto oscillatorio dei due sistemi. Nel caso di isolatori a singola curvatura il dispositivo può essere installato anche con orientamento della superficie sferica opposto rispetto allo schema riportato in figura 1 (a), la simmetria radiale degli isolatori fa sì che il comportamento globale sia indipendente dalla direzione in cui oscillerà la sovrastuttura. Gli isolatori FPS, con riferimento al comportamento nei confronti delle azioni verticali, nascono come dispositivi di vincolo verticale di tipo mono-latero (solo compressione) e di ciò si deve tenere debito conto in fase progettuale. Solo negli ultimi anni la ricerca si è orientata alla progettazione di unità vincolate per azioni verticali di trazione (con il fine di evitare il distacco dell'appoggio per isolatori soggetti a decompressione per effetto del sisma e concedere quindi maggiore libertà al progettista). Dal punto di vista della risposta del sistema in caso di terremoto, tutti i dispositivi antisismici, si caratterizzano per le loro proprietà di isolamento e/o dissipazione energetica in funzione della capacità degli stessi di incrementare il periodo proprio di vibrazione del sistema e di attenuare gli effetti del sisma dissipando energia. Nello specifico gli isolatori FPS, associano alla componente di isolamento (propria del moto lungo la superficie sferica) caratteristiche di dissipazione energetica tipiche del comportamento ad attrito (che dipendono dal coefficiente di attrito dinamico μ_{din} e μ_{stat}), dal raggio di curvatura (R) e dalla domanda di spostamento (d)).



a.

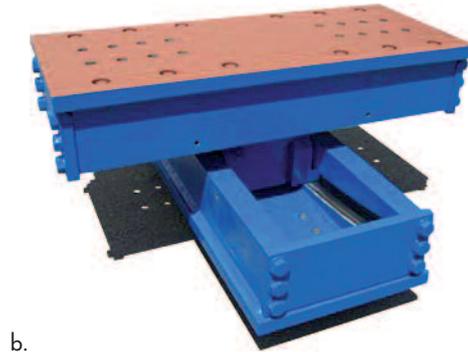


b.

Fig. 2
Schema tridimensionale (a) ed immagine reale (b) di un isolatore FPS a singola curvatura (ALGA, Italy).



a.



b.

Fig. 3
Schema tridimensionale di un isolatore FPS a doppia curvatura (FIP, Italy) (a) ed isolatore FPS a doppia curvatura con vico a trazione (Earthquake Protection System Inc., USA) (b).

Gli isolatori FPS sono ad oggi dimensionati per garantire i seguenti requisiti prestazionali che costituiscono i dati di progetto forniti dal progettista al produttore:

1. Minima capacità portante in direzione verticale (N_{dc});
2. Minima capacità di spostamento orizzontale (d_{dc});
3. Minimo smorzamento in caso di sisma (ξ_{esi});
4. Massimo taglio trasmesso alla sovrastruttura ($F_{d,max}$).

Caratteristiche peculiari di tutti gli FPS sono quelle di essere dispositivi con funzione parzialmente autocentrante e di avere rigidità orizzontale

proporzionale al carico verticale, garantendo di conseguenza la coincidenza in pianta tra centro di massa e centro di rigidità.

In figura 2 (a) e figura 2 (b) sono riportati una schematizzazione grafica ed una immagine reale di dispositivi a curvatura semplice. In figura 3 (a) e figura 3 (b) sono rappresentate altre tipologie di isolatori scorrevoli, rispettivamente isolatori a doppia superficie di scorrimento (superiore ed inferiore) ed unità con resistenza a trazione, dal funzionamento concettualmente analogo all'isolatore di figura 2, tuttavia differenti per alcuni accorgimenti tecnici, atti a prevenirne la disarticolazione per sollevamento.

2. Comportamento concettuale di dispositivi a pendolo scorrevole

Approccio tradizionale: modellazione bilineare

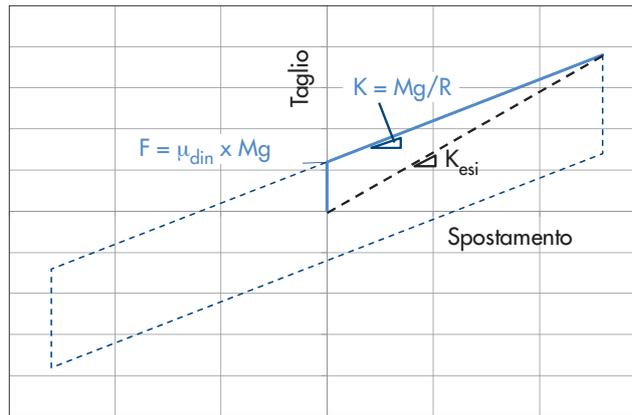
Il legame costitutivo di dispositivi di isolamento del tipo FPS in condizioni di moto (non si entra qui nel dettaglio della trattazione matematica del comportamento isteretico, per il quale si rimanda alla pubblicazione di Tsai (1997), con riferimento alla risposta nel piano orizzontale, è solitamente idealizzato come bi-lineare, in accordo con lo schema riportato in figura 4, ed è definito dalla relazione:

$$F = Mg\mu_{din} + \left(\frac{Mg}{R}\right)d \quad (1)$$

dove Mg rappresenta l'azione verticale N , risultante dal prodotto della massa M e dell'accelerazione di gravità g , R il raggio di curvatura della superficie sferica, μ_{din} il coefficiente di attrito dinamico ad alta velocità e d lo spostamento. Gli isolatori hanno rigidità teoricamente infinita fino alla rottura dei legami di attrito, ovvero in corrispondenza dell'inizio dello scorrimento. Fino alla condizione di distacco, sovrastruttura e sottostruttura sono tra loro rigidamente vincolate ed il comportamento del sistema nel suo complesso è identico a quello di una struttura non isolata. All'avvenuto superamento della soglia di attrito di distacco la rigidità del sistema risulta pari a:

$$K = \frac{Mg}{R} \quad (2)$$

Fig. 4
Esempio di idealizzazione bilineare del legame costitutivo di isolatori scorrevoli a pendolo ipotizzando azione assiale costante.



2.2 Parametri sismici: rigidezza, periodo, smorzamento equivalente e spostamento residuo

I principali parametri del sistema di isolamento, ovvero periodo di oscillazione e capacità di dissipazione energetica sono definiti come descritto ai punti successivi.

1. *Periodo di vibrazione.* Per una corretta valutazione delle proprietà di isolamento dei dispositivi è necessario operare una distinzione in funzione del valore di rigidezza utilizzato. Se si considera la pendenza del ramo plastico di risposta, corrispondente allo stato di moto oscillatorio lungo la superficie sferica, il periodo T (cosiddetto isolato) è funzione del solo raggio di curvatura (R) della calotta ed è di fatto equivalente a quello di un pendolo:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M}{K}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M}{Mg/R}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (3)$$

Assumendo invece come riferimento il valore di rigidezza secante T_{is} allo spostamento di progetto, si ottiene:

$$T_{is} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{R}{(1 + \mu_{din}) \cdot g}} \quad (4)$$

Qualora il sistema possa essere rappresentato mediante un modello lineare equivalente (si veda §3.1), il valore del periodo ottenuto in funzione della rigidezza secante allo spostamento di progetto differisce dal corrispondente valore tangente per non più del 14% (Eq. 16). Ne consegue che anche lo scostamento, in termini di parametri di risposta dinamica, tra modello lineare e non-lineare risulta essere poco significativo. In assenza dei requisiti necessari per l'utilizzo di un modello lineare equivalente, invece, ai sensi delle Norme Tecniche (2008), per la valutazione della risposta dinamica è necessario fare ricorso ad analisi di tipo non-lineare, in grado di cogliere i fenomeni associati alla transizione da stati caratterizzati da rigidezze tra loro differenti.

2. *Capacità dissipative.* Il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_{esi} rappresentativo delle caratteristiche di dissipazione energetica del sistema ai sensi delle Norme Tecniche (2008), ottenuto per equivalenza tra energia dissipata per attrito ed energia dissipata per comportamento viscoso, come indicato all'equazione 5 (Priestley et al., 2007), è funzione del coefficiente di attrito, del raggio di curvatura e della domanda di spostamento:

$$\xi_{esi} = \frac{2 \cdot \mu}{\pi \cdot \left(\mu + \frac{d_d}{R} \right)} \quad (5)$$

in cui d_d rappresenta il valore di progetto dello spostamento per lo stato limite considerato. Ne discende che la dissipazione equivalente da adottare in un'analisi elastica è funzione dello stato limite considerato, ed assume valori differenti in relazione alla domanda di spostamento del sistema. Generalmente il valore in oggetto è riferito allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), utilizzato per la verifica delle strutture isolate. Per il dimensionamento dei dispositivi in relazione alla fragilità del sistema rispetto a meccanismi di rottura legati al superamento della capacità ultima in spostamento si fa riferimento alla domanda in condizioni di collasso (ovvero allo stato limite ultimo SLC), indicata ai sensi delle Norme Tecniche (2008) con il simbolo d_2 .

Rigidezza secante e periodo effettivo, utilizzati per analisi di tipo lineare, sono anch'essi funzione della domanda di spostamento. Il valore dei parametri deve pertanto essere definito in modo congruente con l'obiettivo di calcolo, distinguendo tra analisi atte alla verifica del comportamento strutturale, riferite allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) e quindi allo spostamento d_d , ed analisi finalizzate alla verifica della capacità dei dispositivi in condi-

zioni di collasso (stato limite SLC) e quindi allo spostamento d_2 .

Per una completa caratterizzazione del comportamento sismico degli isolatori è inoltre importante valutare l'entità del possibile spostamento residuo post-sisma, determinato dall'andamento temporale delle oscillazioni della forzante sismica, con la possibilità che le oscillazioni stesse favoriscano il riposizionamento del sistema, limitando o annullando del tutto lo spostamento al termine della fase di moto. È tuttavia possibile, indipendentemente dalla forma dell'input sismico, determinare il valore massimo che la deformazione residua può raggiungere ($d_{R,max}$), in funzione del raggio di curvatura e del coefficiente di attrito dinamico dell'isolatore:

$$d_{R,max} = \mu_{din} \cdot R \quad (6)$$

In direzione verticale l'isolatore si comporta come un appoggio fisso (molto rigido) per azioni di compressione, mentre non ha alcuna resistenza a trazione, salvo casi speciali di dispositivi dotati di specifici accorgimenti come in figura 3 (b). Solo in tal caso possono essere previste azioni di progetto di trazione mentre è ammessa la possibilità di sviluppare stati di decompressione, purché sia dimostrato che in tali condizioni il dispositivo sia in grado di garantire la propria integrità, senza fuoriuscita dell'articolazione dalla propria sede di alloggiamento o danneggiamento dell'interfaccia di scorrimento. La permanenza in compressione

degli appoggi rappresenta una condizione ovviamente necessaria per l'utilizzo di metodi di analisi di tipo lineare.

2.3 Effetti della variazione dell'azione assiale sul comportamento sismico dei dispositivi

Mentre il periodo isolato T (funzione della rigidità tangente del dispositivo durante le fasi di moto) dipende esclusivamente dal raggio di curvatura adottato per la calotta emisferica sulla quale avviene lo scorrimento relativo tra le due parti, il periodo equivalente T_{sec} (e la rigidità secante cui fa riferimento) e la forza orizzontale F sviluppate dal sistema di isolamento (Calvi et al., 2004), sono funzione diretta del carico assiale N agente a livello dei dispositivi (cui corrisponde una pressione di contatto tra la superficie di scorrimento e l'articolazione attritiva, nel seguito indicata con σ_v). Periodo equivalente e taglio sono pertanto entrambi soggetti alle continue variazioni del carico N , in seguito al sistema di forze (Fig. 5) che si oppone al momento ribaltante (M_{rib}) dovuto ad azioni orizzontali ed alla contemporanea azione sismica in direzione verticale. Le variazioni dell'azione assiale comportano irregolarità nel legame forza-spostamento degli isolatori. Si veda ad esempio il confronto tra il diagramma teorico riportato in figura 4, in cui si ipotizza azione verticale costante sul dispositivo, e quello rappresentato in figura 6, in cui si considera un'azione verticale variabile adottando la modellazione di cui al §2.1.

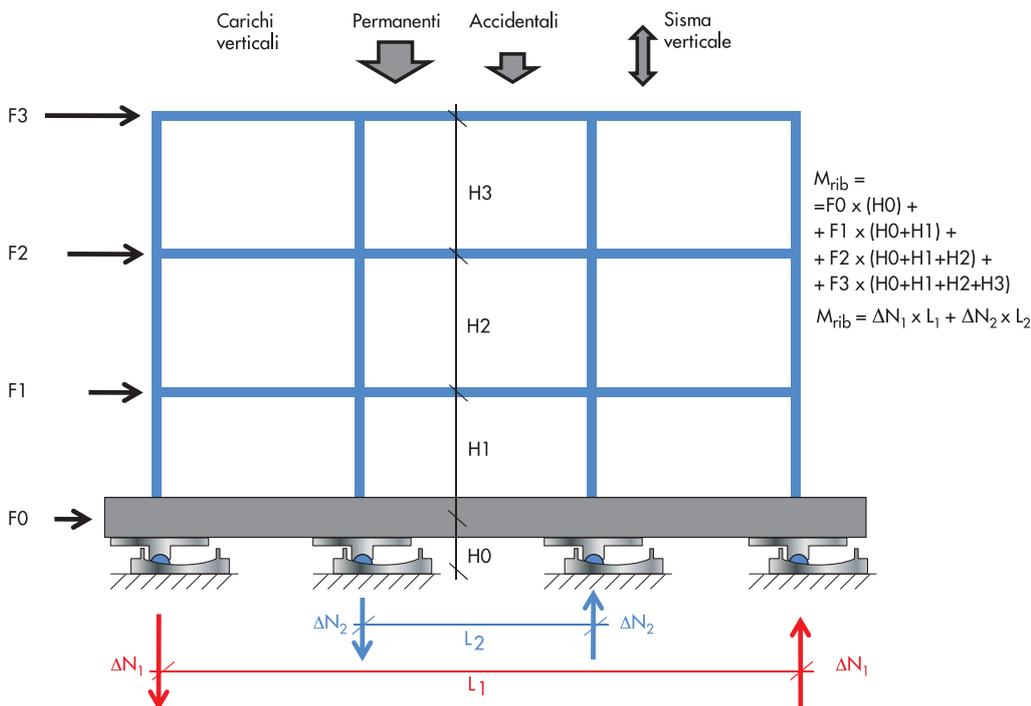
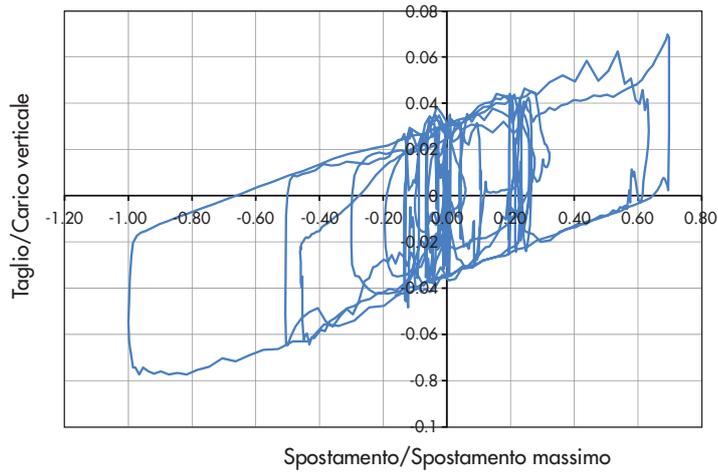


Fig. 5 Schema delle azioni assiali indotte alla base per l'equilibrio al ribaltamento in opposizione alle forze sismiche.

Fig. 6
Esempio del legame forza-spostamento di isolatori scorrevoli a pendolo comprensivo degli effetti di variazione del carico assiale con attrito dinamico costante e trascurando attrito di primo distacco e all'inversione del moto.



2.4 Variazione del comportamento ad attrito in funzione della velocità di scorrimento e della pressione di contatto

Le caratteristiche di non linearità della risposta dinamica dei dispositivi vengono ulteriormente accentuate se si considera la variazione dei coefficienti d'attrito con riferimento alla variazione di sforzo di contatto degli strati di scorrimento dell'articolazione di movimento. Come evidenziato nel corso della campagna sperimentale

effettuata da Bondonet and Filiatrault (1997) su dispositivi scorrevoli non lubrificati, la differenza tra la soglia di attrito al distacco e l'attrito sviluppato in fase di scorrimento è funzione della velocità di scorrimento e della pressione agente sulla superficie di contatto. Un estratto dei dati ottenuti è riportata in forma grafica in figura 7 e figura 8. Per sforzi di compressione compresi tra 15 e 30 MPa e velocità di scorrimento dell'ordine di 200÷300 mm/s, compatibili con le condizioni

Fig. 7
Coefficiente di attrito al distacco: andamento in funzione della velocità di scorrimento e della pressione di contatto.

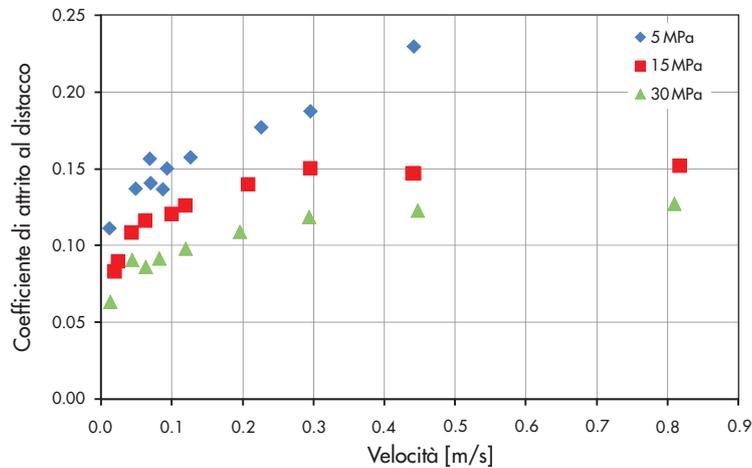
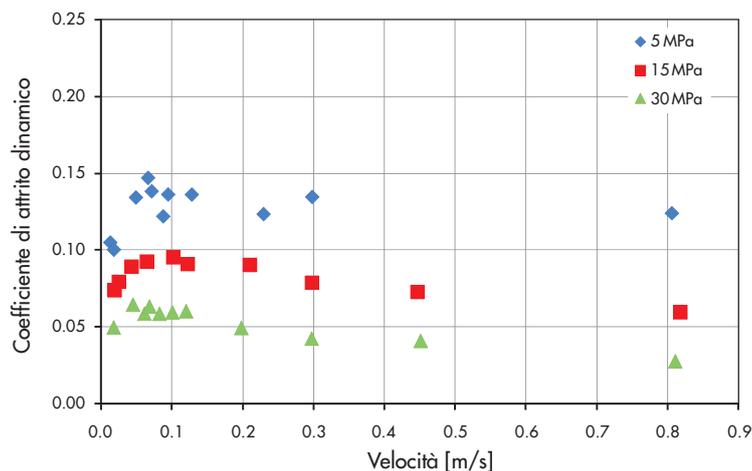


Fig. 8
Coefficiente di attrito dinamico: andamento in funzione della velocità di scorrimento e della pressione di contatto.



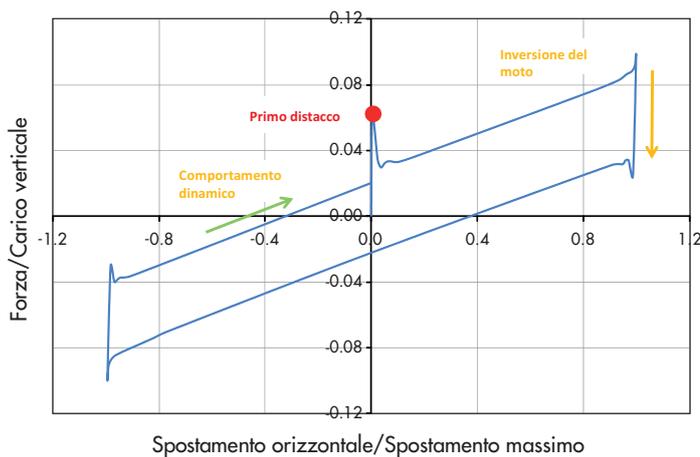


Fig. 9
Ciclo forza-spostamento di un dispositivo tipo FPS nel corso di una prova dinamica in laboratorio.

medie di progetto di dispositivi del tipo a pendolo, il valore dell'attrito al distacco può superare il doppio del corrispondente dato dinamico.

2.5 Valutazione del meccanismo attritivo in funzione dello stato di moto

Per una caratterizzazione completa del comportamento sismico dei dispositivi a pendolo è indispensabile definire le proprietà del fenomeno di attrito in corrispondenza delle diverse fasi di moto. A tale scopo occorre distinguere tra coefficiente di attrito dinamico μ_{din} , conseguito nel corso delle fasi di scorrimento con velocità medie simili a quelle di progetto, valore al distacco μ_{dist} , sviluppato in corrispondenza dell'istante immediatamente precedente l'inizio della fase dinamica di moto, e valore all'inversione del moto μ_{inv} , ovvero corrispondente agli istanti in cui cambia la direzione lungo la quale avviene lo scorrimento. Quest'ultimo valore (μ_{inv}) assume un valore intermedio tra il coefficiente di attrito dinamico (μ_{din}) ed il corrispondente dato in condizioni di primo distacco (μ_{dist}). In funzione delle caratteristiche attrittive che caratterizzano le diverse fasi di moto, il comportamento forza-spostamento orizzontale dei dispo-

sistivi in condizioni dinamiche assume un andamento analogo a quanto schematizzato in figura 9. Ai fini dell'individuazione completa dei parametri attrittivi, ai valori sopra citati occorre aggiungere il coefficiente di attrito statico μ_{stat} , ottenuto in condizioni di moto a velocità inferiori a 50 mm/s. L'attrito statico, di relativo interesse per la definizione del comportamento sismico dei dispositivi, costituisce tuttavia un parametro di riferimento utile per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dei componenti costituenti il dispositivo nel corso dei test effettuati in laboratorio. In funzione delle caratteristiche specifiche degli isolatori è evidente come i contributi di tipo non-lineare, presenti anche in altri dispositivi quali ad esempio appoggi in piombo-gomma e dissipatori in acciaio, siano particolarmente significativi. Le conseguenti ripercussioni sul comportamento sismico rappresentano pertanto un aspetto non trascurabile, sia in fase di progettazione che in sede di valutazione delle caratteristiche dei dispositivi.

2.6 Parametri applicativi per la progettazione e realizzazione di dispositivi tipo FPS

I parametri di progetto degli FPS rientrano nella

Tabella 1 - Valori di riferimento per i parametri di progetto di isolatori scorrevoli a pendolo

Parametro	Valori di riferimento
Raggio di curvatura	$R = 0.5 \text{ m} \div 7 \text{ m}$
Attrito dinamico	$\mu_{din} = 0.02 \div 0.1$
Attrito statico	$\mu_{stat} = 0.01 \div 0.08$
Attrito di primo distacco o iniziale	$\mu_{dist} = 0.04 \div 0.15$
Pressione di contatto: per valori superiori è difficile garantire la funzionalità del materiale attrittivo, anche in ragione degli effetti termici conseguenti allo scorrimento. La capacità di carico assiale è conseguentemente ricavata in funzione delle dimensioni del perno di articolazione	$\sigma_v < 200 \text{ MPa}$
Capacità di spostamento: per valori superiori è opportuna una verifica degli effetti dello spostamento verticale conseguente allo scivolamento sulla superficie emisferica	$d_d < 0.2 R$
Smorzamento viscoso equivalente	$\xi_{esi} = 0.15 \div 0.25$

maggior parte delle applicazioni nell'intervallo di valori riportati in tabella 1 che, sebbene non vincolanti, possono essere utili come riferimento, soprattutto nella fase preliminare della progettazione. In merito al coefficiente di attrito l'estremo

inferiore dei valori è indicativo di superfici di interfaccia lubrificate, mentre valori superiori sono rappresentativi di condizioni estreme in carenza di manutenzione (quindi con eventuale accumulo di sporco e polvere).

3. Criteri di modellazione

3.1 Modellazione lineare

L'idealizzazione del sistema di isolamento come una molla lineare, caratterizzata da una propria rigidezza e da un proprio smorzamento viscoso equivalente, rappresenta una ovvia semplificazione delle fasi di modellazione ed analisi. Una schematizzazione lineare quindi (Dolce e Santarsiero, 2004) può essere applicata esclusivamente previo soddisfacimento di particolari requisiti. I requisiti previsti dalle Norme Tecniche (2008) risultano particolarmente vincolanti, richiedendo in particolare quanto segue:

1. la rigidezza equivalente del sistema di isolamento deve essere almeno pari al 50% del valore secante per cicli con deformazione pari al 20% dello spostamento di riferimento. Per dispositivi a pendolo, la limitazione sopra riportata si traduce nell'imporre:

$$\frac{R}{d_{dc}} \leq \frac{1}{3\mu_{din}} \quad (7)$$

essendo d_{dc} lo spostamento del centro di rigidezza del sistema di isolamento allo stato limite ultimo considerato, R il raggio di curvatura e μ_{din} il coefficiente di attrito dinamico dei dispositivi.

Il soddisfacimento del requisito, come evidenziato negli esempi proposti nel seguito del testo, costituisce un forte vincolo sul valore del raggio (e quindi del periodo), per cui la modellazione lineare di dispositivi dal periodo elevato è possibile solo in presenza di cicli isteretici sufficientemente "sottili" (si veda ad esempio lo schema rappresentato in Fig. 12), ovvero caratterizzati da attrito basso e spostamento elevato o, in altre parole, per comportamenti poco dissipativi. Essendo lo smorzamento viscoso equivalente definito come indicato all'equazione 3, risulta:

$$\begin{aligned} \xi_{esi} &= \frac{2\mu_{din}}{\pi \cdot (\mu_{din} + d/R)} = \\ &= \frac{2}{\pi \cdot \left(\mu_{din} + \frac{d}{\mu_{din} \cdot R} \right)} \leq \frac{1}{2\pi} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\rightarrow \xi_{esi} \leq 0.159$$

2. lo smorzamento lineare equivalente del sistema di isolamento deve essere inferiore al 30%. Per dispositivi FPS il campo di applicazione interessa valori prossimi al 15% ÷ 25%, e la verifica in oggetto risulta certamente soddisfatta, in quanto vincolata dal requisito n. 1, che impone una limitazione dello smorzamento al 15.9%.

3. le caratteristiche forza-spostamento del sistema di isolamento non devono essere soggette a scostamenti superiori al 10% per effetto di variazioni:

della velocità di deformazione, in un campo del $\pm 30\%$ intorno al valore di progetto;

- o con riferimento alla velocità media di scorrimento definita in funzione del periodo tangente dell'isolatore (ovvero il periodo isolato T), in generale piuttosto elevato, è verosimile (come evidente ad esempio dall'analisi del grafico in figura 13 (b)), che tale requisito risulti soddisfatto.

- o dell'azione verticale sui dispositivi, nel campo di variabilità di progetto; Le variazioni dell'attrito in funzione di velocità e condizioni di carico non possono essere in generale trascurate e pertanto il requisito in oggetto nella maggior parte delle applicazioni non può ritenersi soddisfatto. In presenza di una componente verticale dell'accelerazione superiore a 0.1 g, è generalmente necessario il ricorso ad un'analisi comprensiva degli effetti della componente verticale del sisma, con utilizzo di un modello non-lineare in grado di riprodurre il comportamento in funzione della variazione del carico assiale. Ai sensi delle Norme Tecniche, la componente verticale deve essere necessariamente introdotta in presenza di dispositivi con rigidezza assiale relativamente modesta (inferiore ad 800 volte il valore in direzione orizzontale) – e *NON è certamente questo il caso di isolatori FPS, per i quali, in quanto realizzati con elementi in acciaio, la rigidezza assiale è dell'ordine di 10,000 volte la rigidezza orizzontale* – o per la progettazione in zone del territorio NON appartenenti alle classi sismiche 3 e 4,

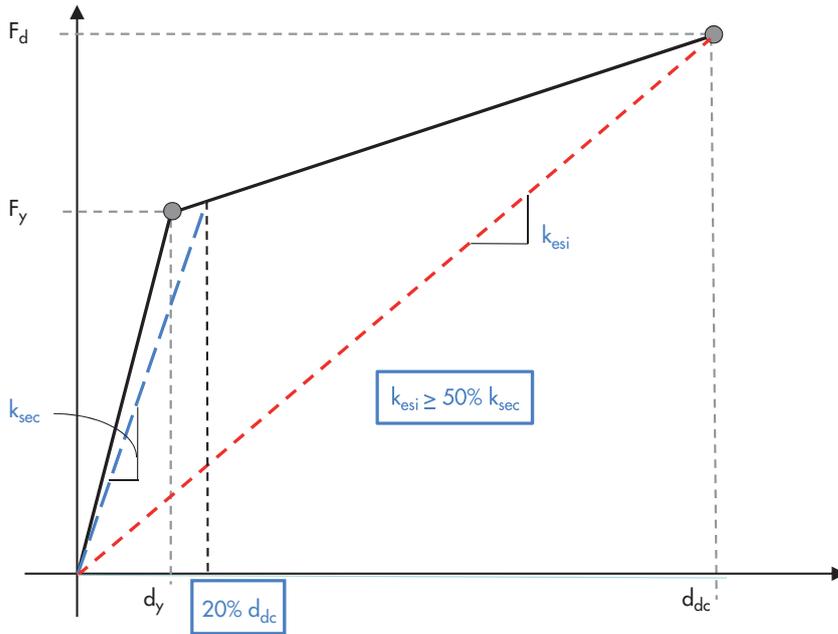


Fig. 10
Modellazione lineare del sistema di isolamento - requisito n. 1.

ovvero, la componente deve essere comunque introdotta in presenza di un'accelerazione orizzontale di picco al terreno superiore a 0.15 g.

- l'incremento della forza nel sistema di isolamento per spostamenti tra $0.5 d_{dc}$ e d_{dc} deve essere almeno pari al 2.5% del peso totale W della sovrastruttura. Tale richiesta comporta l'utilizzo di un raggio di curvatura limitato a 20 volte il valore dello spostamento di progetto. Infatti, affinché sia rispettata la condizione di verifica in oggetto, ipotizzando che lo spostamento di progetto sia compreso tra 10 cm ed 1 m, occorre utilizzare superfici con raggio di curvatura inferiore rispettivamente a 2 m e 20 m.

$$\frac{\Delta F}{W} = \frac{W \cdot \Delta d / R}{W} \xrightarrow{\Delta d = 0.5 d_{dc}} \rightarrow 0.5 \cdot \frac{d_{dc}}{R} \geq 2.5\% \rightarrow \rightarrow \frac{d_{dc}}{R} \geq 0.05 \rightarrow R \leq \frac{d_{dc}}{0.05} \rightarrow \xrightarrow{d_{dc} = 0.1m \div 1m} R \leq 2m \div 20m \quad (9)$$

Alla limitazione imposta sul raggio R corrisponde analogo vincolo in termini di periodo isolato T . Per l'intero campo dei valori ipotizzati si ottiene un periodo pari a 2.84 s, in corrispondenza del valore più basso dello spostamento, e pari a 8.97 s, per uno spostamento di progetto pari ad 1 m (si veda

anche lo schema rappresentato in Fig. 12):

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \xrightarrow{d=0.1m} T \leq 2.84s \quad (10) \quad \xrightarrow{d=1m} T \leq 8.97s$$

Dall'analisi critica dei requisiti necessari stabiliti nelle Norme Tecniche (paragrafo 7.10.5.2) per l'utilizzo di un modello lineare equivalente emerge che, in relazione al requisito n.3, non è possibile utilizzare un modello lineare equivalente, se non in presenza di una componente sismica verticale inferiore a 0.1 g. In ogni caso, quindi anche in assenza dell'accelerazione verticale, si dovrà verificare che la variazione del carico assiale sui dispositivi, che si origina in opposizione al ribaltamento indotto dalle forze orizzontali (Fig. 5), sia inferiore al 10% rispetto al valore in condizioni quasi permanenti:

$$\Delta N \leq 10\% \cdot N_{QuasiPerm} \quad (11)$$

Solo in questo caso il contributo assiale può essere ritenuto trascurabile e, se sono soddisfatte anche le altre condizioni di verifica, è possibile rappresentare gli isolatori come elementi elastici lineari con smorzamento e rigidità pari al valore effettivo (o equivalente). In caso contrario è necessario il ricorso ad analisi non-lineari, adottando una legge costitutiva idonea, comprensiva delle variazioni del taglio agente per effetto delle variazioni istantanee del carico verticale, secondo le indicazioni riportate alla sezione 3.2. In sintesi l'adozione di una analisi lineare equivalente comporta il soddisfacimento dei requisiti elencati di seguito:

Fig. 11
Modellazione lineare del sistema di isolamento – requisito n. 4.

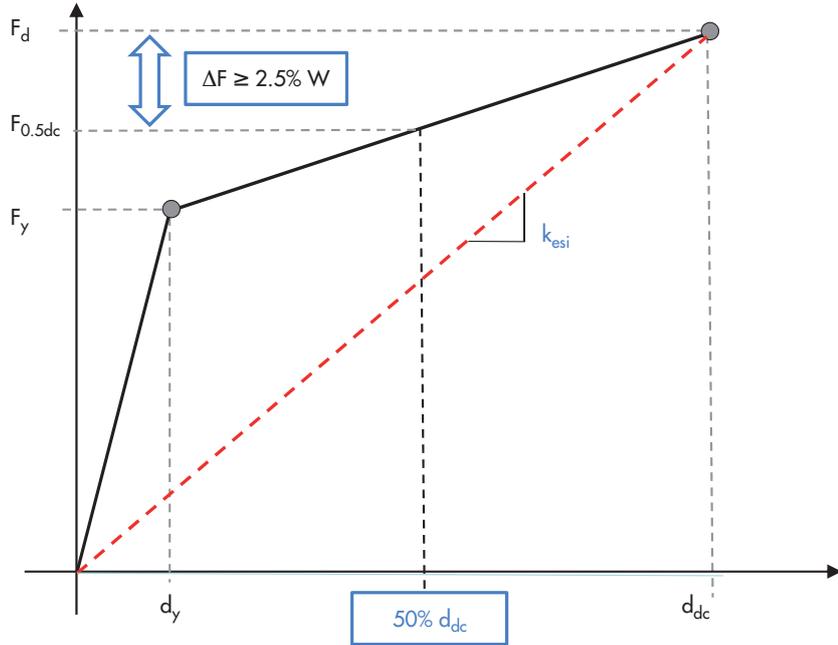
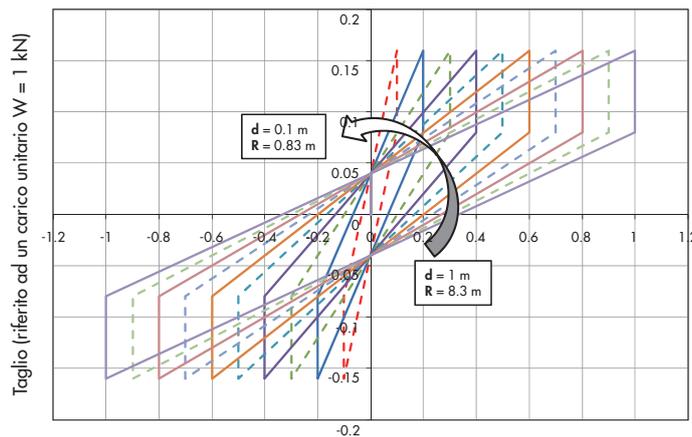


Fig. 12
Ciclo di isteresi di dispositivi FPS conformi ai requisiti per l'analisi lineare ($\mu_{din} = 0.04$; forza orizzontale riferita ad un valore unitario del carico assiale W).



requisito 1:

$$\frac{R}{d_{dc}} \leq \frac{1}{3\mu_{din}} \quad (12)$$

$$\xi \leq 0.159 \quad (13)$$

requisito 2: implicitamente soddisfatto verificato il requisito n. 1.

requisito 3: non sussiste la necessità di includere la componente verticale di accelerazione, in funzione della zona interessata dall'intervento, ed essendo comunque:

$$\Delta N_{sism} \leq 10\% \cdot N_{QuasiPerm.} \quad (14)$$

requisito 4:

$$R \leq \frac{d_{dc}}{0.05} \quad (15)$$

e quindi un periodo effettivo T_{esi} necessariamente superiore all'86.7% del valore tangente T:

$$\frac{T_{esi}}{T} > \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\mu_{din} R}{d_{dc}}}} \xrightarrow{\frac{\mu R}{d_{dc}} = \frac{1}{3}} \sqrt{\frac{1}{1 + 1/3}} = \quad (16)$$

$$= 0.867 \rightarrow \frac{T_{esi}}{T} > 0.867 \rightarrow T_{esi} > 86.7\% \cdot T$$

In funzione dei dati ottenuti è chiaro come nell'ambito dell'approccio lineare alla modellazione, lo scarto in termini di periodo utilizzando il valore secante o tangente della rigidezza è comunque contenuto al più attorno al 14%.

3.2 Modellazione non-lineare

Qualora non sussistano le condizioni di cui alla sezione precedente, o comunque i dispositivi siano soggetti a stati di decompressione, la verifica deve essere eseguita attraverso metodi di analisi non-

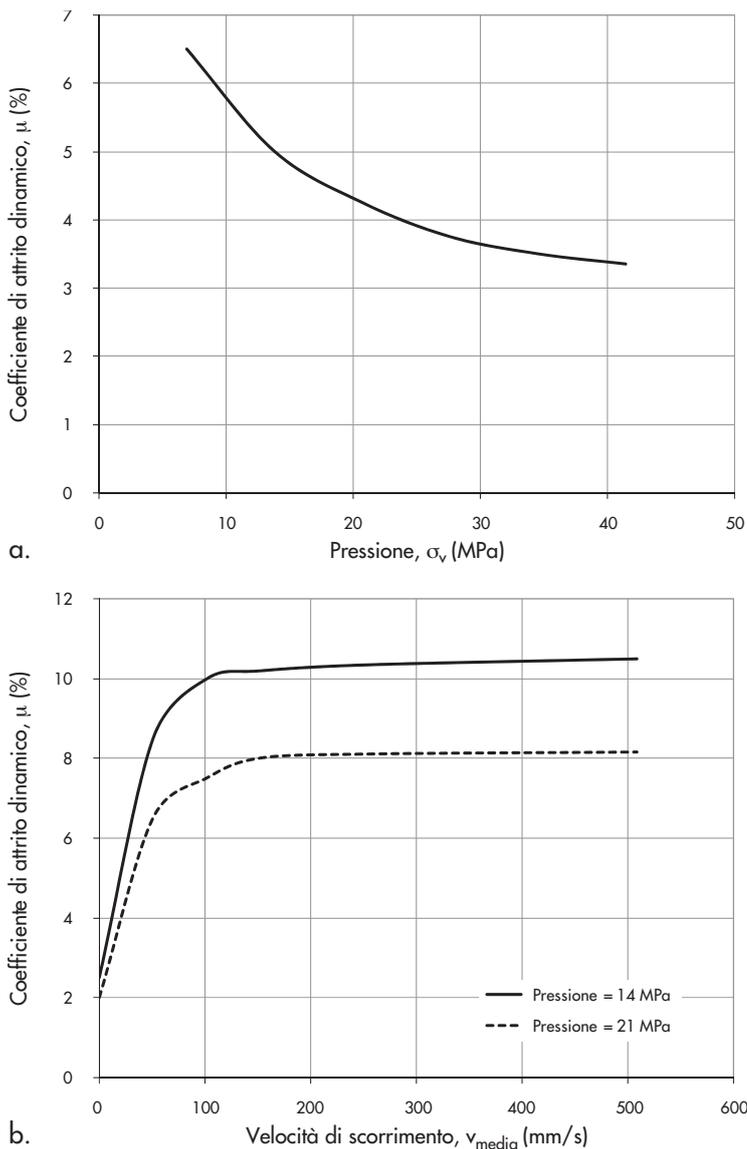


Fig. 13
Variazione del coefficiente di attrito dinamico in funzione della pressione di contatto (a) e della velocità di scorrimento (b).

lineare con integrazione al passo delle equazioni del moto.

I parametri del dispositivo, ovvero il raggio di curvatura della superficie sferica, il carico assiale di progetto, il coefficiente di attrito dinamico e l'attrito di condizioni di primo distacco, non definiscono completamente il legame costitutivo, influenzato anche dagli effetti di variazione del coefficiente di attrito in funzione:

- A. delle oscillazioni istantanee del carico verticale;
- B. della velocità di scorrimento;
- C. della transizione dal valore di distacco al valore dinamico a moto avviato, sia all'attivazione del dispositivo sia in corrispondenza dei punti di inversione della direzione di scorrimento (Fig. 9).

Il comportamento ad attrito tra l'acciaio ed il materiale utilizzato all'interfaccia di scorrimento, è stato oggetto di numerosi studi sperimentali

(Constantinou et al., 1987; Constantinou et al., 1990; Mokha et al., 1990; Mokha et al., 1991; Bondonet and Filiatrault, 1997) atti ad identificare la dipendenza del coefficiente di attrito dalla pressione agente sulla superficie di contatto e dalla velocità di scorrimento relativo. La variazione del coefficiente di attrito dinamico è implementata nei principali programmi specialistici di analisi strutturale. Nella maggior parte dei programmi di calcolo il modello implementato per la definizione dell'azione sviluppata per attrito (F_{μ}) è conforme alle equazioni 17 e 18 (Tsai (1997), Almazan et al. (1998) e Almazan and De la Llera (2002)), nelle quali con μ_{fast} and μ_{slow} si indica il valore assunto per velocità di scorrimento (v) rispettivamente a basse ed elevate, W è il carico verticale agente, k è la rigidezza a taglio dell'elemento prima dello scorrimento, e z rappresenta una variabile interna necessaria all'identificazione del limite del taglio oltre il

quale ha avvio il moto. La variazione è calibrata in base all'esito di prove in laboratorio quali ad esempio i dati rappresentati in figura 13 (Constantinou et al. nel 1987).

$$F_{\mu} = -W \cdot \mu_{din} \cdot z \quad \text{con } z = \frac{k}{W \cdot \mu_{din}} \cdot \begin{cases} (1-z^2) \cdot v & \text{se } z \cdot v > 0 \\ v & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu_{din} = (\mu_{fast} - \mu_{fast} - \mu_{slow}) \cdot e^{-\alpha v} \quad (18)$$

La formulazione utilizzata riproduce quindi un incremento dell'attrito dinamico con la velocità, che tuttavia ha meno influenza sulla risposta rispetto della transizione tra il regime al distacco ed il comportamento in fase di moto. Trascurando infatti l'amplificazione del fenomeno di attrito al distacco (punto C), sia all'avvio che in corrispondenza dell'inversione della direzione di spostamento, il modello comporta una sotto-stima delle forze di attrito a basse velocità di scorrimento. Attualmente non sono disponibili formulazioni in grado di riprodurre i fenomeni di transizione, ed è pertanto indispensabile il ricorso a valutazioni semplificate, come proposto in questo articolo al paragrafo 4.1.1. È peraltro evidente come un simile approccio costituisca un'approssimazione, comunque utile in sede di predimensionamento, ma che andrebbe verificata mediante l'utilizzo di modelli numerici più raffinati. Si ritiene pertanto importante lo sviluppo di formulazioni analitiche in grado di riprodurre il comportamento di

attrito al primo distacco e la transizione con le condizioni dinamiche del moto.

Le Norme Tecniche (2008), al §7.10.5.2, indicano come "nel caso in cui si adotti un modello non lineare, il legame costitutivo dei singoli dispositivi del sistema di isolamento deve riprodurre adeguatamente il loro comportamento nel campo di deformazioni e velocità che si verificano durante l'azione sismica, anche in relazione alla corretta rappresentazione dell'energia dissipata nei cicli di isteresi" fornendo indicazioni precise in termini di requisiti generali. La definizione specifica di quali fenomeni non lineari debbano essere rappresentati dal modello adottato è demandata al progettista. Dalla discussione sin qui presentata sembrerebbe di poter concludere che:

- qualora il ricorso ad un modello non lineare sia necessario, in quanto il sistema di isolamento è soggetto a variazioni significative dell'azione assiale agente (requisito n. 3), il modello dovrà riprodurre i fenomeni conseguenti alla fluttuazione del carico verticale. È questo il caso della formulazione sopra esposta alle equazioni 17 e 18;
- se il calcolo lineare non è possibile in quanto, sebbene il requisito n.3 risulti soddisfatto, vi è una violazione di una qualsiasi tra le altre tre prescrizioni, è possibile effettuare l'analisi anche utilizzando più semplici modelli bilineari, ovvero riproducendo la variazione della pendenza del legame forza-spostamento in direzione orizzontale ma assumendo che la soglia di snervamento dei dispositivi subisca alterazioni trascurabili.

4. Progettazione del sistema di isolamento

Il sistema di isolamento deve essere dimensionato in modo tale da assicurare la protezione della sovrastruttura nei confronti delle azioni indotte dal sisma. La progettazione deve tener conto di tutte le possibili condizioni che si possono determinare nel corso delle fasi di risposta, in modo tale da individuare le più gravose per ciascuna delle verifiche da effettuare.

4.1 Condizioni di verifica

4.1.1 Comportamento al distacco

Il sistema isolato, prima che inizi la fase di scorrimento per effetto del sisma, non è attivato ed il comportamento è equivalente a quello di una struttura a base fissa, caratterizzata dal proprio periodo di vibrazione. La corrispondente forzante in accelerazione è quella ottenuta dallo spettro di risposta el-

stico per il livello di smorzamento proprio della sovrastruttura. Questa condizione si ripropone poi in corrispondenza delle fasi di inversione del moto (o di scarico), laddove è necessario che si arrivi a rottura dei legami di attrito tra le superfici a contatto affinché sia possibile la ripresa del moto. Gli effetti di amplificazione dei fenomeni attritivi si verificano in modo analogo sia alla fase iniziale di innesco del moto, sia in corrispondenza dei punti di inversione della direzione di scorrimento.

La verifica in corrispondenza delle condizioni precedenti al distacco è rappresentativa di uno stato di sollecitazione indipendente dalla successiva fase di moto dinamico e deve costituire parte integrante delle verifiche di calcolo, quasi fosse una condizione statica sussidiaria. Precedentemente al distacco il sistema può essere schematicamente attraverso un corpo di peso W_s , appoggiato su un piano di scorrimento con attrito sta-

tico pari a μ_{dist} , sul quale è applicata una forza proporzionale all'accelerazione sismica agente.

In funzione di considerazioni di equilibrio delle forze si ottiene:

$$\begin{cases} d = 0 \\ F_h = M_p \cdot a_g + M_e \cdot (a_g \cdot \beta) \rightarrow \text{cond. di equilibrio} \\ F_R = F_\mu \end{cases} \rightarrow \begin{cases} d = 0 \\ F_h = F_R \rightarrow M_p \cdot a_g + M_e \cdot (a_g \cdot \beta) = F_\mu \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} d > 0 \\ F_h = M_s \cdot a_s \rightarrow \text{al distacco} \\ F_R = \mu_{dist} \cdot W_s \end{cases} \rightarrow \begin{cases} d \equiv 0 \\ F_h = M_p \cdot a_{g0} + M_e \cdot (a_{g0} \cdot \beta) \\ F_R = \mu_{dist} \cdot W_s \end{cases} \rightarrow \begin{cases} d \equiv 0 \\ F_h = F_R \rightarrow a_{g0} = \frac{W_s \cdot \mu_{dist}}{M_p + \beta \cdot M_e} \end{cases} \quad (20)$$

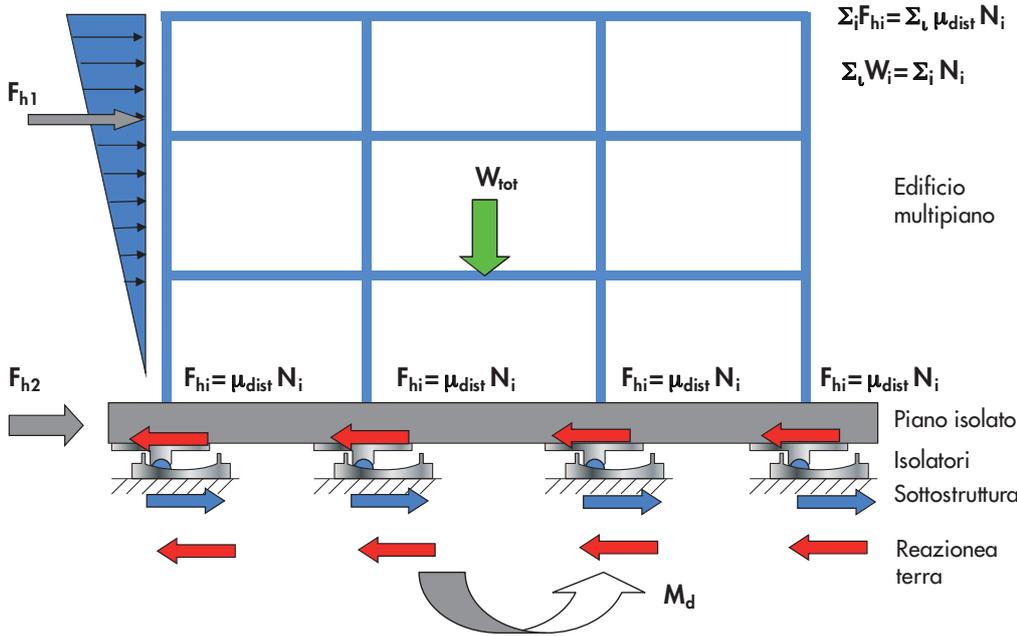


Fig. 14
Schema delle forze in condizioni primo distacco

dove β rappresenta il coefficiente di amplificazione spettrale, funzione del periodo della sovrastruttura, ed il peso totale della struttura W_s , è suddiviso in una componente relativa al solo edificio W_e ed al contributo W_p relativo ad una eventuale piastra di ripartizione dei carichi a livello del sistema di isolamento (con M_s , M_e ed M_p sono indicati i corrispondenti valori della massa). Riconducendo il tutto in termini di azione sismica, il problema all'innesco del moto consiste nell'identificare la soglia di accelerazione al terreno (a_{g0}), introducendo il pedice 0 per identificare la condizione di inizio scorrimento, necessaria all'attivazione degli isolatori, ovvero tale da indurre il superamento della forza di attrito statico che blocca i dispositivi. La forza che è trasmessa dagli isolatori alla sottostruttura può essere suddivisa in una componente dovuta alla

piastra di base (rigidamente vincolata al terreno fino al distacco), pari a $M_p \times a_{g0}$, ed una seconda componente data dal taglio alla base dell'edificio, pari a $M_e \times \beta \times a_{g0}$, essendo β il funzione di amplificazione spettrale in relazione al periodo T_e dell'edificio. Come rappresentato graficamente in figura 15 è utile introdurre una forma spettrale di riferimento, vale a dire uno spettro di progetto scalato ad un valore di accelerazione di picco al terreno comodo per il calcolo parametrico da effettuare (nell'esempio proposto in figura 15 si assume $a_g = 0.01g$). Una volta definita la forma spettrale di riferimento, o spettro base, l'accelerazione di picco al suolo necessaria all'attivazione del moto (a_{g0}), noti i parametri identificativi dello spettro F_0 ed S (secondo le Norme Tecniche al §3.2.3), si ottiene moltiplicando lo spettro base per il parametro α :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{W_s \cdot \mu_0}{M_p + \beta \cdot M_e} = \frac{W_s \cdot \mu_0}{M_p + (S \cdot F_0) \cdot M_e} \text{ con } \begin{cases} \mu_0 \text{ in } [\%] \\ a_g = 0.01g \end{cases} \\ a_{g0} = \alpha \cdot a_g \end{cases} \quad (21)$$

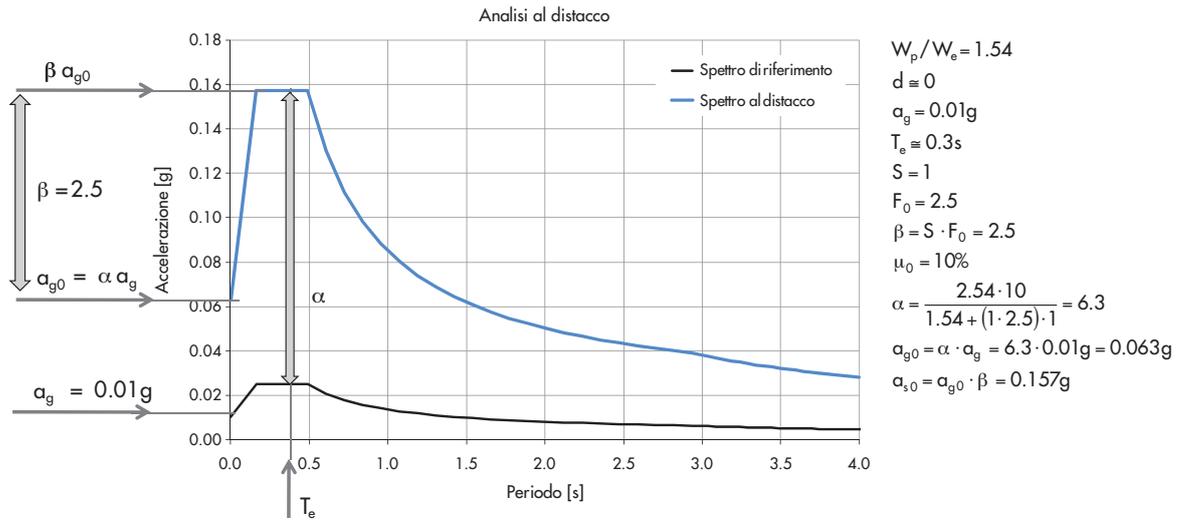


Fig. 15
Schema di analisi sismica in condizioni primo distacco.

nella quale il valore del coefficiente di attrito è introdotto in %.

In figura 15, insieme alla rappresentazione grafica è riportato un esempio di calcolo, sulla base di dati iniziali congruenti con quelli utilizzati nel seguito nel testo.

Per rendere ancor più esplicito il comportamento del sistema strutturale all'innesco degli isolatori, si riportano a titolo di esempio alcuni risultati ottenuti dall'analisi di un sistema isolato costituito da fondazione, isolatori ed una piastra superiore sulla quale è costruito un edificio di 3 piani. Dall'analisi della risposta riportata in figura 16 appare chiaro come la piastra non subisce spostamenti rispetto alle colonne sottostanti per tutte le fasi precedenti l'attivazione degli isolatori, mentre l'edificio si deforma a ciascun piano seguendo il modo principale di vibrazione (in questo caso circa 0.5 s).

All'aumentare della resistenza per attrito al distacco, crescono anche le forze che vengono trasmesse alla sovrastruttura. In funzione del rapporto che sussiste tra coefficiente di attrito al primo distacco e dinamico, che può arrivare fino a 2.5, la condizione di verifica al distacco può risultare la più gravosa per le verifiche di

resistenza della sovrastruttura. In funzione del valore assunto dal coefficiente di attrito al distacco (μ_{dist}) e dinamico (μ_{din}), e dall'entità dello spostamento (d):

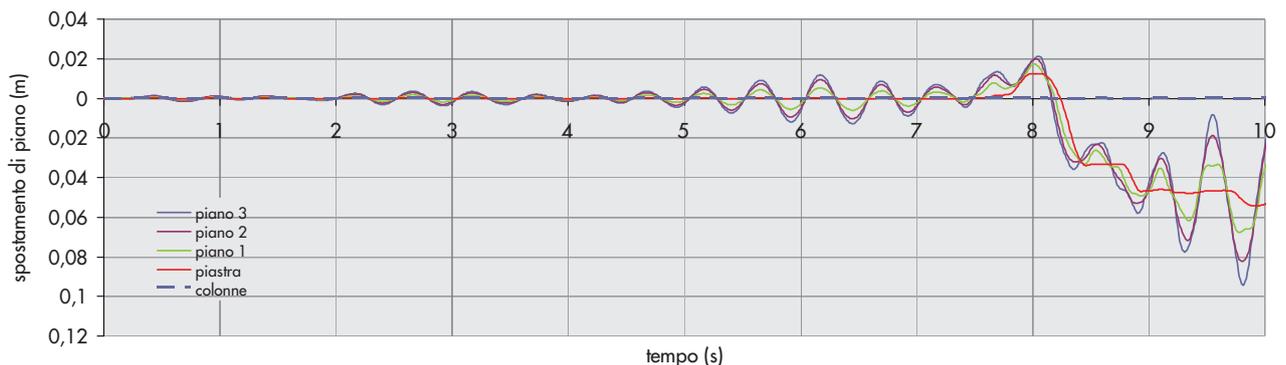
$$F_{dist} = \mu_{dist} \cdot W$$

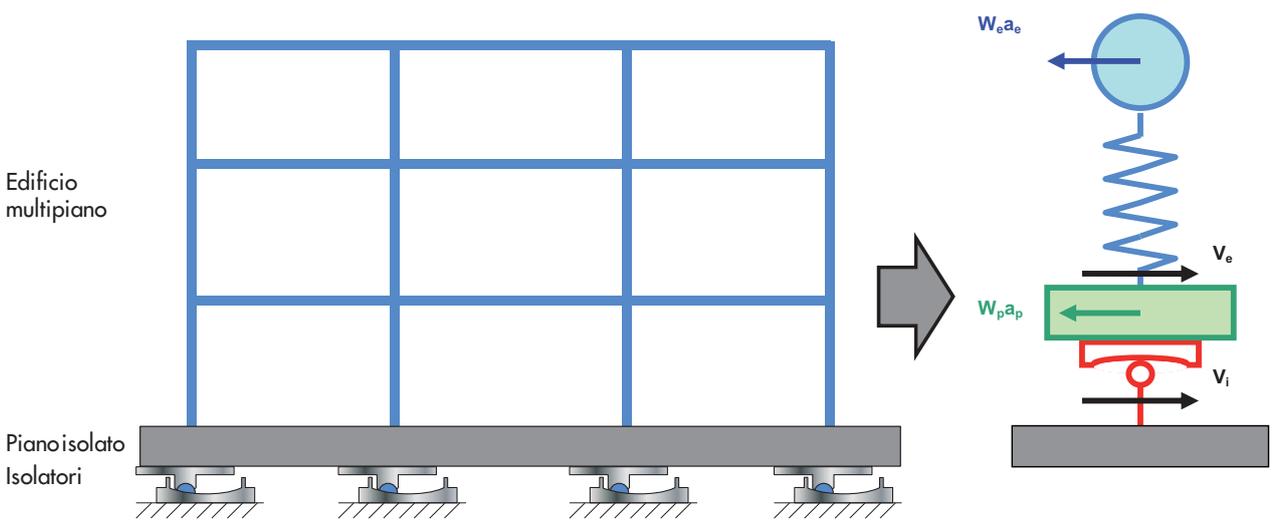
$$F_{din} = \mu_{din} \cdot W + \frac{W}{R} \cdot d \quad (22)$$

È possibile ridurre il valore dell'attrito al distacco prevedendo specifici accorgimenti quale ad esempio la lubrificazione delle superfici, la cui efficacia deve essere tuttavia oggetto di verifica in sede di valutazione sperimentale delle caratteristiche dei dispositivi.

Per l'analisi al distacco si ritiene che debba essere utilizzato il valore del carico verticale corrispondente alla combinazione quasi permanente delle azioni, senza introdurre la componente sismica verticale. Per la valutazione preliminare del taglio agente alla base dell'edificio all'attivazione degli isolatori è possibile seguire la procedura indicata nel seguito, nella quale la sovrastruttura è ricondotta ad un sistema a 2 gradi di libertà, rappresentativi delle masse collocate al piano isolato e del contributo dell'edificio soprastante (Fig. 17). Il sistema di isolamento

Fig. 16
Spostamento orizzontale di un edificio a 3 piani oltre il livello isolato (dettaglio della fase iniziale di moto).





si considera infinitamente rigido, in quanto impedisce ogni spostamento fino al superamento della soglia di attrito al distacco, mentre per l'edificio si assume la rigidezza corrispondente al primo modo di vibrazione. Il peso sismico dell'edificio è indicato con W_e , il peso del piano di posa dell'edificio è identificato come W_p . Il contributo dei modi superiori, qualora ritenuto significativo in funzione delle caratteristiche della struttura in esame, può essere introdotto con facilità, considerando il rispettivo valore del periodo e della massa partecipante, analogamente alla procedura che si adotta per un'analisi modale con spettro di risposta.

Considerando che prima del distacco si ha un comportamento rigido dell'isolatore, l'accelerazione a_p alla base dell'edificio è uguale a quella del terreno ($a_p = a_{g0}$) e la sovrastruttura si comporta come se fosse a base fissa. L'accelerazione agente sul sistema ad un grado di libertà rappresentativo dell'edificio è pari a:

$$a_e = \beta \cdot a_{g0} \quad (23)$$

ed il massimo valore per il taglio alla base è pari a:

$$V_e = W_e \cdot a_e = W_e \cdot \beta \cdot a_{g0} \quad (24)$$

Note le masse ed il coefficiente di attrito al distacco, si può ricavare l'accelerazione minima al terreno a_g necessaria all'attivazione del movimento e la corrispondente sollecitazione di taglio alla base dell'edificio. Essendo V_i il valore del taglio necessario all'innesco degli isolatori, μ_{dist} il valore dell'attrito al primo distacco, W_p il peso della piastra e W_e il peso dell'edificio, si ottiene:

$$V_i = \mu_{dist} \cdot (W_p + W_e) = M_p \cdot a_p + M_e \cdot a_e = a_{g0} \cdot (M_p + \beta \cdot M_e) \quad (25)$$

$$a_{g0} = \frac{\mu_{dist} \cdot (W_p + W_e)}{M_p + \beta \cdot M_e} \quad (26)$$

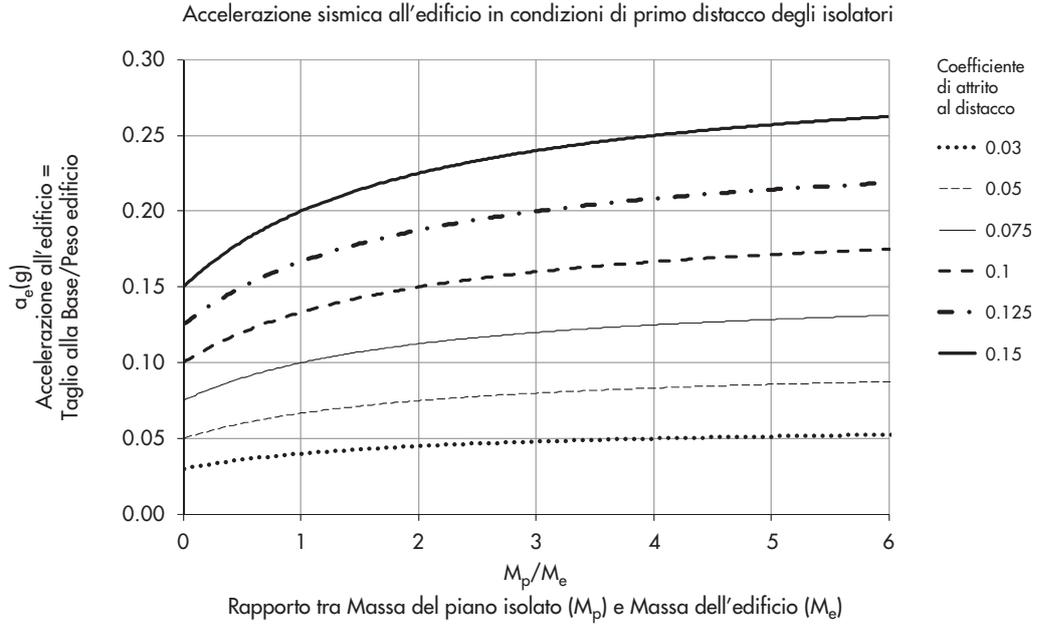
In figura 18 è riportato il valore di a_{g0} ottenuto per diversi valori del rapporto tra massa dell'edificio e massa del piano isolato, al variare del coefficiente di attrito al distacco. Emerge come sia possibile che, all'aumentare del coefficiente di attrito e per edifici relativamente leggeri rispetto al piano di base, l'accelerazione imposta all'edificio possa essere superiore al valore letto al terreno (a_g) e possa essere superiore a quanto ottenuto in condizioni dinamiche di risposta. Ad esempio, per un edificio di massa pari a circa il 65% della massa del piano isolato ($M_p/M_e = 1.54$) ed ipotizzando un coefficiente di attrito al distacco pari a 10%, l'accelerazione trasmessa all'edificio è di circa 0.063 g β (ovvero, il corrisponde valore dell'accelerazione di picco al terreno a_g è ovviamente pari 0.063 g). Il taglio corrispondente alla base dell'edificio è quindi definito come:

$$V_e = M_e \cdot a_e = M_e \cdot 0.063g \cdot \beta \quad (27)$$

Dall'analisi dei dati rappresentati in figura 18 emerge inoltre come l'utilizzo di una piastra di massa elevata rispetto a quella dell'edificio soprastante comporti un incremento dell'azione di taglio agente sulla sovrastruttura in condizioni di distacco, al contrario di quanto accade con l'utilizzo di elementi in gomma, per i quali ad una massa elevata della piastra di base corrispondono migliori prestazioni in termini di iso-

Fig. 17
Schema del sistema terreno - isolamento - edificio.

Fig. 18
Accelerazione alla base dell'edificio al primo distacco del sistema di isolamento (in funzione del rapporto tra massa del piano isolato e massa dell'edificio).



lamento dell'edificio. Un valore del rapporto M_p/M_e pari a 2 rappresenta un utile limite di riferimento almeno in fase preliminare.

Per sollecitazioni sismiche alla base con accelerazione di picco inferiore al valore a_{g0} non si innesca alcun moto a livello del sistema di isolamento. Il confronto tra il dato ottenuto e la forzante di progetto per gli stati limiti di esercizio (a_{SLE}) consente, se necessario, di rivedere le ipotesi di calcolo affinché siano compatibili con le condizioni reali, utilizzando un modello a base fissa, o con isolatori, rispettivamente nel caso in cui $a_{SLE} < a_{g0}$, oppure $a_{SLE} > a_{g0}$.

L'approccio di calcolo è valido in condizioni di spostamento iniziale (d_0) diverso da zero, semplicemente modificando le equazioni di equilibrio (Eq. 19, Eq. 20) secondo la formulazione indicata in equazione 28 e 29, che consente quindi una valutazione del taglio in corrispondenza dei punti di inversione del moto. In tale condizione è verosimile assumere per il coefficiente di attrito all'inne-

sco del moto un valore intermedio tra quello dinamico e quello di primo distacco, considerando che allo stato iniziale è necessaria la rottura di legami di attrito più forti, a causa della permanenza della medesima configurazione nel tempo. Il rapporto tra coefficiente di attrito di distacco e dinamico può assumere valori dell'ordine di $1.5 \div 2$.

La normativa in vigore non prescrive esplicitamente controlli con riferimento alla condizione di primo distacco, sia in fase di calcolo che in sede di verifica sperimentale delle caratteristiche dei dispositivi, rimettendo al progettista l'obbligo di una corretta schematizzazione del fenomeno fisico. Tralasciando la verifica relativa all'attrito di primo distacco, ed ipotizzando che sussistano tutti i requisiti necessari per una modellazione lineare del sistema di isolamento, la struttura verrebbe dimensionata come nell'esempio seguente.

1. Identificazione dello spettro di progetto: si assume a titolo di esempio lo spettro per terreno di categoria B (Norme Tecniche 2008),

$$\begin{cases} d - d_0 = 0 \\ F_h = M_p \cdot a_g + M_e \cdot (a_g \cdot \beta) \\ F_R = F_\mu \end{cases} \rightarrow \text{cond. di equilibrio} \rightarrow \begin{cases} d - d_0 = 0 \\ F_h = F_R \rightarrow M_p \cdot a_g + M_e \cdot (a_g \cdot \beta) = F_\mu \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} d - d_0 > 0 \\ F_h = M_s \cdot a_s \\ F_R = \mu_0 \cdot W_s + \frac{W_s \cdot d_0}{R} \end{cases} \rightarrow \text{al distacco} \rightarrow \begin{cases} d - d_0 \cong 0 \\ F_h = M_p \cdot a_{g0} + M_e \cdot (a_{g0} \cdot \beta) \\ F_R = \mu_0 \cdot W_s + \frac{W_s \cdot d_0}{R} \end{cases} \quad (29)$$

$$\rightarrow \begin{cases} d - d_0 \cong 0 \\ F_h = F_R \rightarrow a_{g0} = \frac{W_s \cdot \mu_0 + \frac{W_s \cdot d_0}{R}}{M_p + \beta \cdot M_e} \end{cases}$$

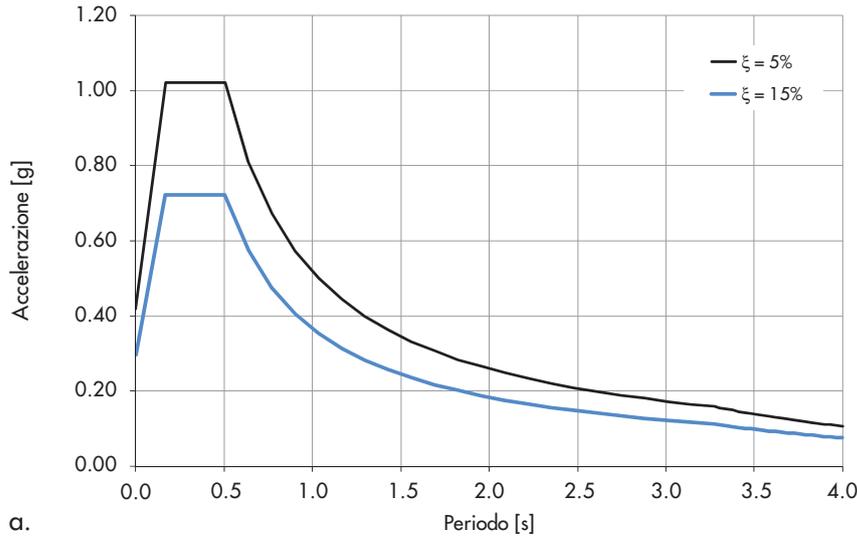
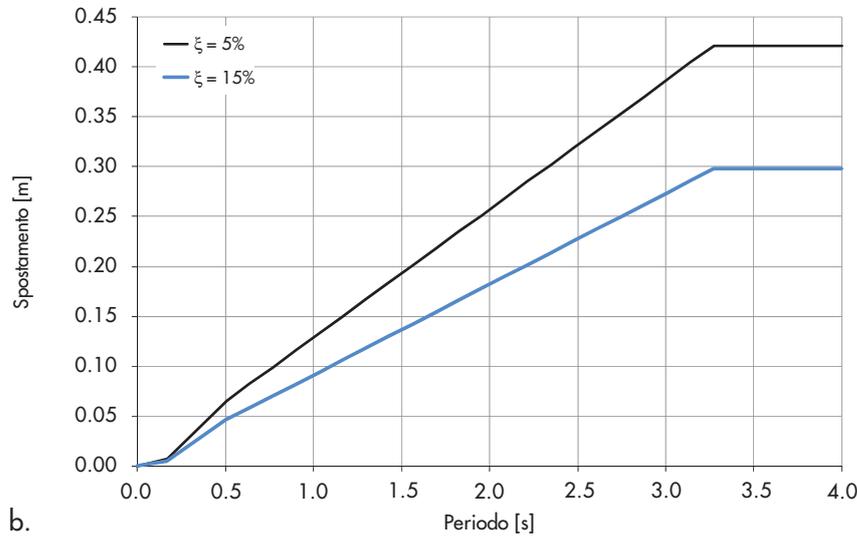


Fig. 19
Spettro di progetto in accelerazione (a) e spostamento (b) per terreno in categoria B, a_g pari a 0.42g, per uno smorzamento del 5% e del 15%.



per una accelerazione di picco al terreno pari a 0.42 g (Fig. 19). L'azione sismica utilizzata è volutamente elevata (potrebbe corrispondere ad un periodo di ritorno 2000 anni) al fine di considerare una condizione limite sull'intero territorio italiano.

- Definizione delle caratteristiche dei dispositivi: si assume per il raggio di curvatura R un valore pari a 2.4 m e per il coefficiente di attrito (dinamico) μ_{din} il valore del 4%. Lo smorzamento equivalente allo spostamento di progetto (0.3 m) è del 15%;

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2.4}{g}} = 3.1s \quad (30)$$

$$\xi_{esi} = \frac{2 \cdot \mu_{din}}{\pi \cdot (\mu_{din} + d_{dc}/R)} = 0.15 \quad (31)$$

- In corrispondenza del periodo isolato, e per uno smorzamento pari al 15%, si ottiene un'accelerazione pari a 0.12 g (0.17 g secondo lo spettro con $\xi_{esi} = 5\%$).

- Nota l'accelerazione è definito il taglio di progetto alla base dell'edificio:

$$V_e = M_e \cdot a_e = M_e \cdot 0.12g \quad (32)$$

L'azione di taglio agente in condizioni di primo distacco è definita dal valore riportato in equazione 27. Nell'ipotesi che il coefficiente di amplificazione spettrale β sia pari a 2.5, si ottiene un valore del taglio al distacco pari a 0.157 W_e . I valori ipotizzati per coefficiente di attrito dinamico e di primo distacco sono compatibili con risultati ottenuti in laboratorio (e.g. Bondonet and Filtrault, 1997) ed è in questo caso evidente come la condizione di primo distacco sia la più gravosa.

Seguendo la procedura delle norme, il taglio alla base verrebbe sottostimato di circa il 24% ($0.12 / 0.157 = 76\%$). Questa differenza cresce al ridursi del valore delle ordinate dello spettro di progetto, come evidenziato in un secondo esempio proposto nel seguito, assumendo uno

spettro con accelerazione di picco al suolo pari a 0.25 g (che potrebbe corrispondere ad un periodo di ritorno 500 anni).

Per garantire la compatibilità con una schematizzazione lineare equivalente (Eq. 7), il raggio di curvatura R deve essere limitato a circa 1.5 m. Si assume $R = 1.4$ m. Per il coefficiente di attrito (dinamico) μ_{din} si ipotizza sempre il valore del 4%. Allo spostamento di progetto (0.176 m in funzione dello spettro ipotizzato) si ottiene uno smorzamento equivalente del 15%, ipotizzando che l'azione sismica sia rappresentata da una forma spettrale analoga a quella del precedente esempio, ridotta in funzione dell'accelerazione di picco al terreno di 0.25 g (Fig. 20).

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{1.4}{g}} = 2.37s \quad (33)$$

$$\xi_{esi} = \frac{2 \cdot \mu_{din}}{\pi \cdot (\mu_{din} + d_{dc} / R)} = 0.15 \quad (34)$$

Sulla base dei risultati ottenuti emerge come:

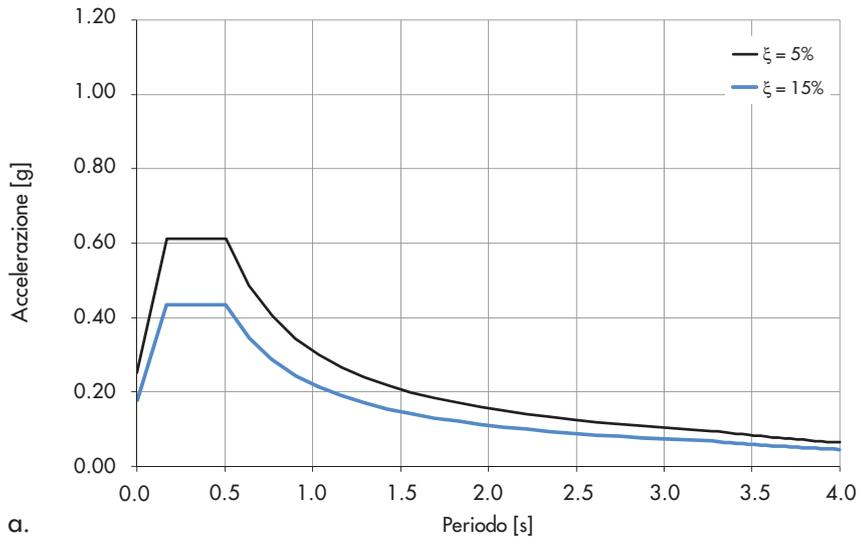
In corrispondenza del periodo isolato il valore di accelerazione per uno smorzamento pari al 15% è di 0.10 g (0.15 g secondo lo spettro con $\xi_{esi} = 5\%$).

Il taglio di progetto alla base dell'edificio vale:

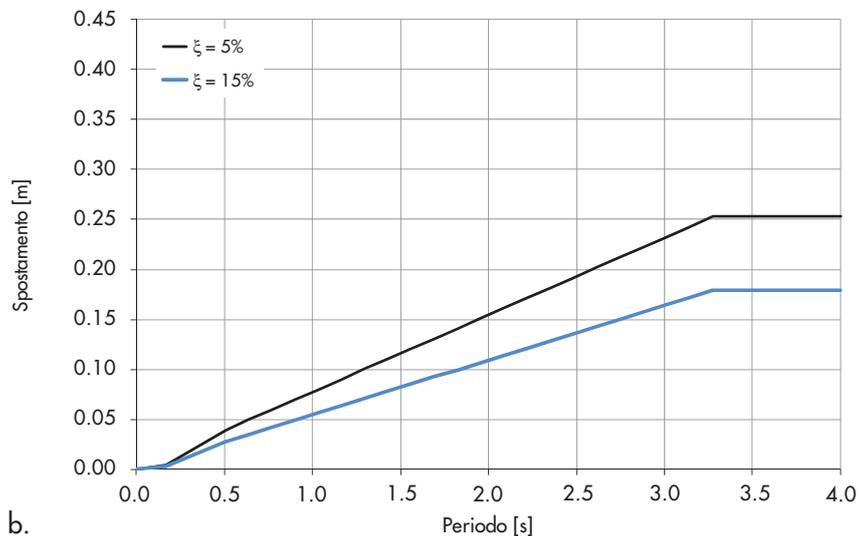
$$V_e = M_e \cdot a_e = M_e \cdot 0.10g \quad (35)$$

Trascurando l'analisi di primo distacco il valore del taglio di calcolo alla base della struttura risulterebbe sottostimato di circa il 36% (0.10 g anziché 0.157 g). Essendo la domanda di taglio ottenuta in condizioni di primo distacco indipendente rispetto al periodo di ritorno dell'azione sismica, il taglio ottenuto trascurando il contributo di primo distacco comporta una sottostima del valore dell'accelerazione, più elevata per eventi più frequenti.

Fig. 20
Spettro di progetto in accelerazione (a) e spostamento (b) per terreno in categoria B, a_g pari a 0.25 g, per uno smorzamento del 5% e del 15%.



a.



b.

4.1.2 Condizioni di verifica

Il dimensionamento dei dispositivi e la valutazione della risposta sismica del sistema isolato devono essere effettuati distinguendo tra le diverse condizioni di verifica di seguito elencate (per l'identificazione della combinazione di carico si fa riferimento alla terminologia ed agli acronimi utilizzati nelle Norme Tecniche):

1. **Stato limite di prevenzione del collasso** (SLC, comprensive della componente verticale): sono agenti i carichi gravitazionali relativi alla combinazione quasi permanente ai quali si aggiunge la componente verticale del sisma. Quest'ultima, la cui ampiezza dipende dalle condizioni locali della forzante, ha valore sia positivo che negativo e pertanto il corrispondente contributo deve essere alternativamente addizionato o sottratto al carico assiale in condizioni quasi permanenti. Questo stato limite rappresenta la condizione di riferimento per la verifica di capacità dei dispositivi di isolamento, al fine di verificare che non vi siano elementi soggetti a trazione e per verificare che gli isolatori garantiscano la sufficiente capacità portante in direzione verticale e consentano lo scorrimento in direzione orizzontale. Con riferimento ad una verifica di integrità del materiale a basso attrito inserito all'interfaccia tra perno e calotta emisferica, al quale si richiede di preservare la propria funzionalità anche in presenza del valore di picco del carico verticale e del massimo spostamento atteso.
2. **Condizioni iniziali**, si considerano agenti i soli carichi gravitazionali con il valore quasi permanente di combinazione, in quanto è verosimile ipotizzare che la struttura sia sottoposta, oltre ai carichi permanenti (pesi propri e portati), solamente ad una frazione delle azioni accidentali. Questa condizione è rappresentativa dello stato di sollecitazione prevalente nell'arco dell'intera vita di progetto degli isolatori. La condizione quasi permanente rappresenta peraltro anche un livello medio nelle fasi di azione del sisma, rispetto al quale si hanno le fluttuazioni conseguenti principalmente alla componente verticale di accelerazione e secondariamente anche alle componenti orizzontali. Lo stato quasi permanente di carico si ritiene pertanto essere il più rappresentativo per la caratterizzazione delle specifiche di progetto degli isolatori (coefficiente di attrito e smorzamento equivalente), e per la valutazione del comportamento del sistema di iso-

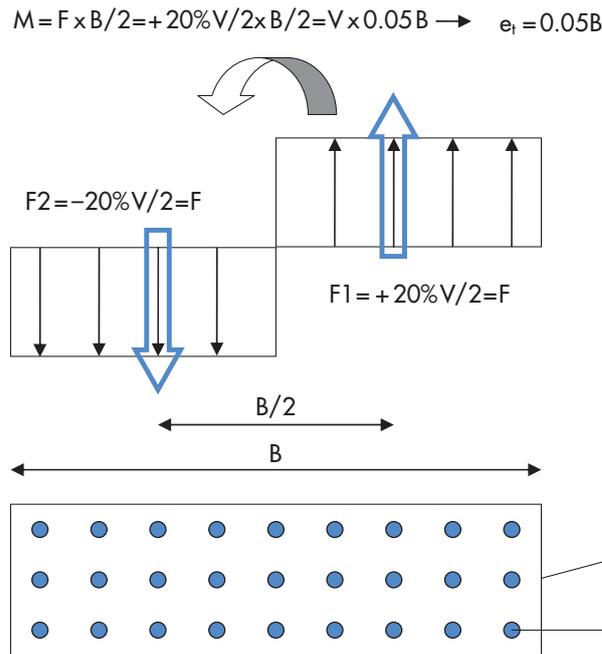
lamento in condizioni primo distacco. Il coefficiente di attrito, sia per il valore dinamico che per quello di primo distacco e statico, è particolarmente soggetto alle variazioni della pressione di contatto agente lungo l'interfaccia di scorrimento, e quindi dal carico assiale. Avere una stima realistica dell'attrito che si sviluppa in corrispondenza del carico di progetto, tenuto conto anche della incidenza di quest'ultimo sulla definizione della domanda di spostamento (un attrito elevato comporta un incremento del taglio resistente ed una diminuzione delle deformazioni), diventa pertanto uno degli aspetti chiave per un dimensionamento efficiente del sistema di isolamento.

3. **Stato limite ultimo per azioni gravitazionali** (SLU): sono agenti i carichi gravitazionali relativi alla combinazione fondamentale, definita nelle Norme Tecniche al §2.5.3. Le azioni assiali derivanti dall'analisi ed agenti a livello degli isolatori, qualora maggiormente gravose rispetto a quanto ottenuto per lo SLC, devono essere adottate per le verifiche, secondo le medesime procedure di cui al punto 1.

4.2 Fenomeni torsionali

La sovrastruttura, per effetto del sisma, è sottoposta ad un moto di traslazione, con deformazioni concentrate a livello del sistema di isolamento. I dispositivi scorrevoli a pendolo, in virtù della teorica dipendenza diretta tra la resistenza sviluppata nei confronti delle azioni orizzontali ed il valore del carico verticale agente sui dispositivi comportano l'assenza (ideale) di eccentricità tra centro di massa della sovrastruttura (coincidente con il punto di azione della forzante sismica) e centro di rigidità del sistema di isolamento. Si ritiene tuttavia, in relazione alla possibilità che i dispositivi abbiano caratteristiche differenti, anche solo entro le tolleranze consentite nell'ambito della fornitura ($\pm 20\%$), non si possa prescindere dalla valutazione in sede di progetto dall'effetto di moti di tipo torsionale, al fine di un corretto dimensionamento della capacità di spostamento degli isolatori, nonché dei giunti di separazione tra la struttura isolata e le opere circostanti. Ad una possibile alterazione della distribuzione della rigidità contribuisce inoltre il livello della effettiva pressione di contatto sui singoli isolatori. Ipotizzando come caso limite che metà degli isolatori sviluppino un taglio resistente superiore del 20% rispetto al valore nominale, mentre sull'altra metà la reazione abbia un identico scarto ma in

Fig. 21
Schema di distribuzione delle forze di taglio in condizioni di estremo dei valori dei parametri degli isolatori rispetto al loro valore nominale.



V = Taglio totale trasmesso dal sistema di isolamento (valore nominale)

F = Taglio sviluppato dalla metà dei dispositivi installati, considerandone scarto (positivo e negativo) del 20% rispetto al valore nominale

e_t = eccentricità per effetto di variabilità/tolleranze delle caratteristiche dei dispositivi rispetto al valore nominale

segno opposto, in accordo con lo schema concettuale e la simbologia di figura 21, si origina un'azione torcente equivalente all'introduzione in sede di analisi di un'eccentricità e_t pari al 5% della dimensione in pianta della sovrastruttura

nella direzione ortogonale a quella di azione del sisma. Tale situazione può rappresentare la condizione limite di massima eccentricità, cui corrisponde il raggiungimento del massimo momento torcente per effetti accidentali.

5. Prove di qualificazione ed accettazione dei dispositivi

I test in laboratorio finalizzati alla qualificazione o all'accettazione dei dispositivi hanno l'obiettivo rispettivamente di definire le caratteristiche di progetto o verificare la conformità alle specifiche della fornitura di provenienza.

Il comportamento in direzione orizzontale dei dispositivi è valutato per mezzo di test statici o dinamici, imponendo cicli di spostamento di ampiezza e velocità stabilite in normativa sulla base dei parametri di progetto. Contemporaneamente al moto orizzontale è applicata un'azione verticale, rappresentativa delle condizioni di carico assiale.

La velocità di scorrimento media ed il valore di picco ottenute nel corso di test dinamici con forzante in spostamento di tipo sinusoidale, in funzione del periodo di oscillazione dei dispositivi ed allo spostamento di progetto, sono definite rispettivamente come:

$$v_{media} = 4 \cdot d_d / T \quad (36)$$

$$v_{max} = 2\pi \cdot d_d / T \quad (37)$$

non definiscono quale sia il valore da utilizzare per il periodo, se quello tangente o secante allo spostamento di progetto. Una possibile scelta operativa è quella di prevedere che le prove siano effettuate utilizzando una funzione di spostamento sinusoidale calibrata in funzione del periodo isolato (o tangente, Eq. 3), ritenendo tali ipotesi maggiormente aderenti alle reali condizioni di moto in fase dinamica. Si ritiene infatti che la funzione di carico in spostamento debba essere congruente con il comportamento dell'isolatore, per il quale è realistico ipotizzare che lo scorrimento avvenga in funzione delle caratteristiche di vibrazione del pendolo, ovvero con velocità media definita in equazione 36, raggiungendo picchi del valore riportato in equazione 37.

Il carico assiale da utilizzare in sede di prova dovrebbe essere stabilito distinguendo tra le diverse condizioni di verifica, ovvero utilizzando:

- Il valore massimo dell'azione assiale di progetto tra quanto ottenuto allo SLU o allo SLC, rispettivamente per la valutazione della capacità portante e per la verifica di integrità del materiale di interfaccia;
- Il valore quasi permanente del carico assiale, per la verifica del comportamento sismico dei dispositivi.

Relativamente alle procedure di prova ed accetta-

zione dei dispositivi, al paragrafo 11.9.8 delle Norme Tecniche, si dice di “verificare che il coefficiente d’attrito sia, comunque, sempre inferiore al valore di progetto per variazioni nell’ambito della fornitura, della temperatura e della frequenza di prova”. Nella medesima sezione della normativa è peraltro indicato che la determinazione statica del coefficiente d’attrito deve essere effettuata “per almeno tre valori della compressione, costante durante la prova, pari al carico verticale V di esercizio, e ai valori di progetto sotto azioni sismiche V_{max} e V_{min} ”. Al fine di eliminare la possibilità di interpretazioni, con riferi-

mento ad entrambe le citazioni sopra riportate, potrebbe risultare utile indicare a quale combinazione di carico fare riferimento per la determinazione del valore di progetto dell’azione verticale, nonché definire il valore del periodo da utilizzare per la caratterizzazione della funzione di carico orizzontale. In virtù delle considerazioni riportate in precedenza al §4.1.1, si ritiene che la valutazione del coefficiente di attrito di inizio scorrimento debba costituire parte integrante e necessaria delle prove di qualificazione, necessarie alla caratterizzazione dei dispositivi, e dei successivi test di accettazione.

6. Posa in opera e protezione da agenti atmosferici

Installazione

L’installazione dei dispositivi può avvenire in modo diretto, cioè prima della realizzazione della sovrastruttura, o in modo indiretto ovvero successivamente alla realizzazione di parte della sovrastruttura che, in questo caso, è sostenuta da appoggi temporanei prima dell’installazione dei dispositivi.

Le operazioni di posa diretta sono più complicate sia in relazione alla necessità di garantire la perfetta planarità e anche per la necessità di proteggere il dispositivo durante le lavorazioni (si pensi alle conseguenze di una percolazione all’interno della superficie di scorrimento di boiaccia cementizia nel corso del getto, Fig. 22). Si ritiene importante la definizione, anche a livello normativo, delle tolleranze limite per la posa corretta degli isolatori, dell’ordine di 0,005 rad a causa della limitata capacità di rotazione dell’articolazione, altrimenti passibile di concentrazioni locali di sforzo in configurazione deformata.

Nei casi di posa diretta, quindi, deve essere posta particolare attenzione nell’evitare movimenti relativi tra le componenti dell’isolatore. I blocchi che impediscono movimenti relativi devono avere un’elevata resistenza, per le possibili sollecitazioni indotte, nel caso di sovrastruttura in c.a. gettato in opera, dalla posa di armature – solitamente molto fitte in corrispondenza delle zanche superiori del dispositivo - e dalle successive fasi di getto e di vibratura del conglomerato (Fig. 23).

Le operazioni di posa indiretta richiedono il sollevamento della sovrastruttura (Fig. 24) per eliminare i sostegni temporanei dopo la posa dell’isolatore. Alternativamente è praticabile l’adozione di puntellazioni complesse, quali le scatole a sabbia, caratterizzate da una possibilità di scarico assiale. Questa procedura di installazione, che

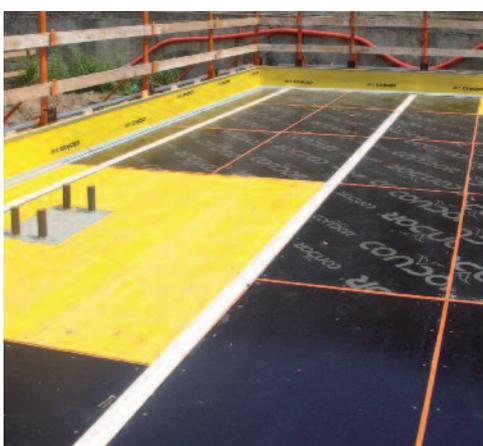


Fig. 22
Posa diretta di un isolatore. Nel dettaglio di destra si nota il foglio di plastica protettiva da ripiegare lungo i bordi per evitare le percolazioni di boiaccia nel corso del getto.



Fig. 23
Gabbia d’armatura posata in corrispondenza dell’ancoraggio dell’isolatore di cui alla figura precedente.



Fig. 24. Posa indiretta di dispositivi di isolamento: sollevamento (a) con martinetti idraulici e posa (b) del dispositivo con piastre di spessorazione.

consente maggior precisione, è però tendenzialmente più costosa. La posa indiretta può consentire di svincolare la produttività in cantiere dai tempi di costruzione prova ed accettazione dei dispositivi che possono essere sostituiti, come sostegni verticali, da apparecchi temporanei in acciaio di facile reperibilità e basso costo.

6.2 Aspetti manutentivi

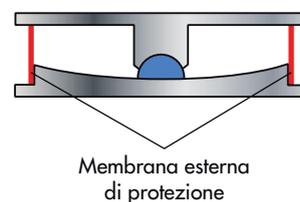
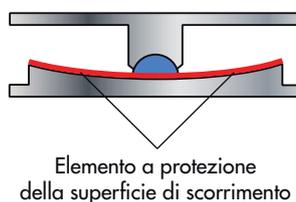
Per aspetti legati ad esigenze di buona manutenzione ed alla conservazione delle caratteristiche nel tempo, i dispositivi devono essere dotati di protezioni delle superfici di scorrimento. L'elemento di protezione può essere costituito da una semplice membrana che ricopre la calotta in acciaio esposta alle azioni provenienti dall'esterno (Fig. 25 (a)), oppure più efficacemente da una guaina esterna che, saldata alla piastra superiore ed inferiore, chiuda l'intercapedine tra le due piastre (Fig. 25 (b)). In entrambi i casi l'elemento protettivo, una barriera contro polvere, sporco, umidità ed eventuale formazione di ghiaccio sul piano di scorrimento, ha funzione sacrificale in caso di sisma, e dovrà essere ripristinato successivamente all'evento. Elementi in materiale plastico possono trovare agevole impiego. L'utilizzo di uno schema a pendolo invertito, in cui la superficie concava sia solidale alla sovrastruttura e rivolta verso il basso, risulta certamente favorevole ad una limitazione del deposito di polvere sull'interfaccia di scorrimento. L'introduzione di simili accorgimenti è particolarmente importante per dispositivi a doppia curvatura, al fine ulteriore di evitare che le mol-

teplici interfacce di scorrimento si deteriorino in modo diverso, con possibili ripercussioni sul comportamento globale dell'isolatore. Si noti infatti come la polvere tenderà a depositarsi sulla superficie inferiore sulla quale potrà svilupparsi un attrito più elevato rispetto a quello contemporaneamente agente al livello della piastra superiore. Ne consegue come all'attivazione del moto, lo scorrimento relativo avverrà lungo la calotta superiore (ad attrito minore), mentre il perno resterà fisso nella sua posizione iniziale rispetto alla superficie inferiore, fintanto che il taglio agente non raggiungerà la soglia di distacco dell'interfaccia inferiore. Essendo identico il taglio che si trasmette sulle due superfici è evidente che fintanto che non viene attivato il pattino inferiore (come indicato in Fig. 26), l'isolatore risulta equivalente ad uno con raggio di curvatura $R_{sup} = R_{inf}$ e coefficiente di attrito μ_{sup} . Le deformazioni si concentreranno quindi all'interfaccia superiore, con la possibilità che le stesse superino il limite di progetto. La superficie superiore, con riferimento al diagramma riportato in figura 26, è soggetta ad uno spostamento differenziale (d_{sup}) rispetto all'interfaccia inferiore, proporzionale al raggio ed alla differenza tra l'attrito ai due piani, pari a:

$$\left(\mu_{sup} + \frac{d_{sup}}{R_{sup}} \right) \cdot W = \mu_{inf} \cdot W \rightarrow \left(\mu_{sup} + \frac{d_{sup}}{R/2} \right) = \mu_{inf} \rightarrow d_{sup} = (\mu_{inf} - \mu_{sup}) \cdot \frac{R}{2} \quad (38)$$

Si ritiene pertanto opportuno contemplare tra i requisiti di progetto le specifiche prestazionali

Fig. 25. Dettaglio costruttivo per la protezione della superficie di scorrimento da agenti esterni: schema mediante ricoprimento della calotta (a), schema di installazione di una membrana esterna (b).



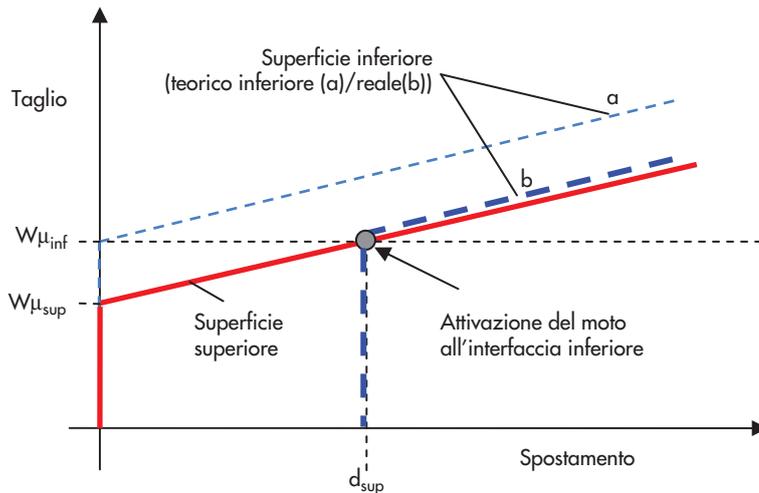


Fig. 26
Schema di attivazione differenziata di isolatori a doppia curvatura.

degli elementi di protezione esterna, con l'obiettivo di garantire la protezione omogenea delle superfici di scorrimento. Come già prescritto dalle Norme Tecniche (2008) è inoltre indispensabile redigere un idoneo piano di manutenzione e contemplare sin dalla fase di

progetto le procedure di eventuale sostituzione dei dispositivi, valutando i punti di forza per i sollevamenti e le ripercussioni di eventuali distorsioni verticali imposte sulla sovrastruttura per poter estrarre il dispositivo (di solito dell'ordine di 4-5 mm).

7. Conclusioni

La progettazione di sistemi di isolamento del tipo scorrevole a pendolo, la definizione delle caratteristiche dei singoli dispositivi, gli aspetti relativi alle procedure di prova in laboratorio e di installazione in cantiere sono stati oggetto di un'attenta disamina, anche con riferimento ai contenuti delle Norme Tecniche (2008) attualmente in vigore.

È stata individuata la necessità di introdurre in fase di progettazione, di analisi, e nel corso dei test in laboratorio, la distinzione tra condizioni di moto, stato di primo distacco e punti di inversione della direzione di spostamento dei dispositivi, in quanto contraddistinte da caratteristiche di attrito tra loro differenti. Per la valutazione al primo distacco, ed in corrispondenza degli istanti di inversione della direzione di oscillazione, è stato proposto un metodo di analisi basato su considerazioni di equilibrio, evidenziando come tali condizioni possano costituire l'elemento vincolante in sede di verifica, con valori del taglio alla base della sovrastruttura anche di oltre il 30% superiori rispetto al valore riscontrato nel corso delle fasi dinamiche di moto.

È stata inoltre sottolineata l'importanza di garan-

tire la congruenza tra ciascuna delle condizioni di verifica del sistema di isolamento ed il valore dell'azione verticale contemporaneamente agente, proponendo suggerimenti per una revisione di alcune regole normative.

Sono stati esaminati aspetti che riguardano la possibilità di utilizzare modelli lineari equivalenti per la caratterizzazione del comportamento sismico di isolatori a pendolo, evidenziandone le limitazioni e le ripercussioni sul dimensionamento dei dispositivi. Le principali lacune delle formulazioni non-lineari attualmente implementate in codici di calcolo strutturale sono state inoltre oggetto di scrutinio.

Con riferimento alle procedure di prova in laboratorio ai fini della qualificazione ed accettazione degli isolatori, sono state individuati alcuni aspetti che richiedono un approfondimento, proponendo alcuni suggerimenti migliorativi.

Infine, l'attenzione è stata focalizzata su alcuni accorgimenti tecnici riguardanti i dispositivi, finalizzati in particolare alla protezione nei confronti degli agenti esterni e alle modalità di installazione, allo scopo di preservare inalterate nel tempo le caratteristiche dell'interfaccia di scorrimento.

Bibliografia

Almazan J.L., De la Llera J.C., Inaudi J.A. (1998) - Modeling aspects of structures isolated with the Frictional pendulum system, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 27, pp. 845-867.

Almazan J.L., De la Llera J.C. (2002) - Analytical model of structures with frictional Pendulum isolators, *Earthquake engineering and structural dynamics*, 31, pp. 305-332.

Bondonet G., Filiatrault A. (1997) - Frictional response

- of PTFE sliding bearings at high frequencies, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 2, No.4.
- Calvi G.M., Ceresa P., Casarotti C., Bolognini D., Auricchio F., (2004) - Effects of axial force variation on the seismic response of bridges isolated with friction pendulum systems *JEE*, Vol.8 (Special Issue 1), pp.187-224.
- Constantinou M.C., Caccese J., Harris H.G. (1987) - Frictional characteristics of teflon-steel interfaces under dynamic conditions, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 15, 751-759.
- Constantinou M.C., Mokha A., Reihorn A. (1990) - Teflon bearings in base isolation. II: Modeling, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, 455-473.
- Dolce M., Laterza M., Masi A., Troiano F. (2000a) - Adeguamento sismico di edifici in c.a. mediante isolamento alla base: applicazione ad un caso reale, *Protezione sismica dell'edilizia esistente e di nuova edificazione attraverso sistemi innovative*, Final Workshop, 12-13 maggio 2000, Napoli.
- Dolce M., Masi A., Telesca F. R. (2000b) - Applicabilità dell'isolamento alla base per l'adeguamento sismico di edifici esistenti in c.a., *Atti del Workshop su 'Protezione Sismica dell'Edilizia Esistente e di Nuova Edificazione Attraverso Sistemi Innovativi'*, Napoli.
- Dolce M., Cardone D., Ponzo F.C., Nigro D. and Nicoletti M. (2001) - Confronto sperimentale di diversi sistemi di isolamento sismico su telaio in c.a. in scala 1:2.5, *Atti del X Convegno ANIDIS 'L'ingegneria Sismica in Italia'*, Potenza.
- Dolce M., Santarsiero G. (2004) - Development of regulations for seismic isolation and passive energy dissipation of buildings and bridges in Italy and Europe, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 2991.
- Mokha A.S., Constantinou M.C., Reihorn M.A. (1991) - Further results on frictional properties of Teflon bearings, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No.2.
- Mokha A.S., Constantinou M.C., Reihorn A. (1990) - Teflon bearings in base isolation. I: Testing, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 116, 438-454.
- Norme Tecniche (2008) - Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 14/01/2008, *Gazzetta Ufficiale* 04/02/2008, Italia.
- O.P.C.M. 3431 (2005) - O.P.C.M. 3431/05 09/05/2005. Ulteriori modifiche ed integrazioni all'OPCM 3274/03 and O.P.C.M. 3274, 20/03/2003 [2003] Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, Italy.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. (2007) - *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italy, 720 pp.
- Roussis P.C., Constantinou M.C. (2006) - Uplift-restraining Friction Pendulum seismic isolation system, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 35, 577-593.
- Tsai C.S. (1997) - Finite element formulations for friction pendulum seismic isolation bearings, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, 29-49.