

Ricerca

Sviluppo storico dei sistemi di isolamento sismico ad attrito

Historical development of friction-based seismic isolation systems

Paolo M. Calvi¹, Giulia Fagà², Gian Michele Calvi³ ■

Sommario

L'isolamento alla base si è dimostrato essere una delle più efficaci tecnologie per proteggere le infrastrutture dagli effetti dell'azione sismica. Questa rassegna scientifica tratta lo sviluppo dei sistemi di isolamento sismico ad attrito, focalizzandosi maggiormente sui sistemi che sono stati sviluppati con maggior successo e che sono stati utilizzati come misure di protezione sismica per le strutture situate in Europa. La concezione e l'implementazione del sistema Friction Pendulum, lo sviluppo dei materiali a basso attrito, gli effetti della temperatura, della pressione di contatto e della velocità, vengono discussi alla luce delle passate e recenti evidenze numeriche e sperimentali. Si discutono inoltre i pregi dei dispositivi con superfici di scorrimento multiple, quali i Friction Pendulum a doppia curvatura e i tripli Friction Pendulum, insieme alle attuali conoscenze e lacune della ricerca riguardo la loro caratterizzazione. Vengono, inoltre, presentati due casi studio europei, il viadotto di Bolu e il Progetto C.A.S.E., al fine di mostrare come gli isolatori a scorrimento possano essere impiegati per raggiungere obiettivi di progettazione altrimenti inarrivabili. Infine vengono analizzate problematiche relative all'impiego di queste tipologie di dispositivi, quali la risposta ad alte accelerazioni verticali, la potenziale perdita d'appoggio e l'importanza dello spostamento residuo.

Parole chiave: Isolamento alla base, Friction pendulum, Isolamento multi-superficie, sistemi di isolamento friction-base, protezione sismica, prestazione sismica.

Abstract

Base isolation has emerged as one of the most effective high-tech strategies for protecting infrastructure under seismic loading. This review paper discusses the historical development of friction-based seismic isolation systems, focusing on systems that have successfully been deployed and used as seismic safety measures for structures located in Europe. The conception and implementation of the Friction Pendulum system, the development of low friction materials and the effects of heating, contact pressure and velocity are discussed in light of past and recent numerical and experimental evidence. The merits of multiple surface devices, namely the Double Curvature Friction Pendulum and the Triple Friction Pendulum are also discussed, along with current knowledge and research gaps. Two European case studies, the Bolu Viaduct and the C.A.S.E. Project, are presented to illustrate that sliding base isolators can be used to meet otherwise unachievable design objectives. Finally, existing problems such as the response to high vertical accelerations, the potential for bearing uplift and the relevance of residual displacement are analyzed.

Keywords: Isolamento alla base, Friction pendulum, Isolamento multi-superficie, sistemi di isolamento friction-base, protezione sismica, prestazione sismica.

1. Introduzione

Nel contesto attuale “basato sui livelli di prestazione”, un metodo efficace per proteggere le strutture e ottenere la performance desiderata è mitigare la domanda indotta dal sisma sul sistema stesso. A tal fine, una delle soluzioni più promettenti identificate negli ultimi decenni, consiste nell'installazione di dispositivi a bassa rigidità laterale, indicati come isolatori alla base,

¹ Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, WA, USA.

² Fondazione Eucentre - Direttore Dipartimento Formazione, Pavia, Italia.

³ Scuola Universitaria Superiore, IUSS, Pavia, Italia.

al di sotto di punti chiave di supporto della struttura. L'isolamento alla base è risultato essere una delle strategie high-tech più efficaci per proteggere le infrastrutture dagli effetti dell'azione sismica sia nel campo delle nuove costruzioni che in quello dell'adeguamento di strutture esistenti.

L'obiettivo dell'isolamento alla base è di prevenire il danneggiamento delle strutture, spostando il periodo fondamentale della struttura verso il range dei periodi alti e assorbendo l'intera domanda di spostamento indotta dal moto sismico a livello del sistema di isolamento. L'isolamento di una struttura si traduce in una risposta strutturale controllata con una riduzione delle accelerazioni e delle forze laterali trasmesse alla struttura.

La ridotta domanda sismica consente alla sovrastruttura di rimanere in fase elastica, o quasi elastica, in seguito ad un evento di intensità prossima a quella di progetto. Inoltre, l'isolamento di una struttura contribuisce a ridurre la probabilità di danneggiamento delle apparecchiature sensibili agli spostamenti e alle accelerazioni, degli elementi non strutturali e al contenuto.

Numerose ricerche sono state condotte sul tema dell'isolamento alla base negli ultimi decenni e il volume di informazioni disponibili in letteratura è cresciuto significativamente, particolarmente negli ultimi 15-20 anni. Numerosi scritti eccellenti sugli sviluppi, le teorie e le applicazioni di questa tecnologia sono disponibili in letteratura fra gli altri ad esempio (Kelly, 1986; Buckle e Mayes, 1990; Soong e Constantinou, 1994; Kunde e Jangid, 2003; Symans et al., 2003 e Warn e Ryan, 2012).

Tuttavia, data la grande disponibilità di ricerche riguardo all'isolamento alla base, un singolo articolo non può fornire una disamina esaustiva della letteratura scientifica in merito. Così, gli autori si sono visti costretti a scegliere fra discutere in generale l'argomento, al costo di fornire dettagli limitati, e approfondire l'argomento, focalizzandosi solamente su determinati aspetti. Inoltre, vi è da considerare che vi è una produzione in costante aumento di nuova letteratura sia in ambito numerico che sperimentale, sull'argomento a seguito del sempre crescente interesse per il tema.

In questo contesto, questa rassegna scientifica si concentra sullo sviluppo storico dei sistemi di isolamento sismico ad attrito, ed in particolare sui sistemi impiegati ed utilizzati con successo come dispositivi di sicurezza antisismica su strutture situate in Europa.

Anche se il concetto di isolamento sismico ha più di cento anni (e.g. Barucci, 1990 e Touaillon, 1870), i moderni isolatori a scorrimento e ad attrito sono stati sviluppati verso la fine degli anni 80 e ad oggi in Europa sono relativamente poche le strutture isolate alla base.

Sebbene il concetto di sistema di isolamento ad attrito fosse semplice e allettante, la mancanza di una forza di ricentrimento adeguata ha ritardato l'impiego dei sistemi a scorrimento. Alcuni tentativi sono stati fatti usando una combinazione di appoggi scorrevoli piatti e "sistemi a molla" che fungessero da elementi di ricentrimento. Un esempio di questi tentativi può essere trovato nel lavoro di Kelly, Chalhouh (1990), che ha testato un sistema di isolamento realizzato utilizzando una combinazione di appoggi elastomerici e appoggi scorrevoli piatti.

Solo dopo lo sviluppo del concetto dei moderni Friction Pendulum (Zayas et al., 1987) gli isolatori a base scorrevole sono diventati una valida alternativa (e eventualmente un sostituto) delle soluzioni più tradizionali di isolamento. Questo articolo comincia analizzando un rudimentale sistema a pendolo proposto nel 1909 (vedi Barucci, 1990) per evidenziare come l'idea di isolare alla base le strutture sia stata concepita oltre 100 anni fa, ma che risultò irraggiungibile a causa delle limitazioni tecnologiche del tempo.

Viene poi introdotto il moderno Friction Pendulum, focalizzandosi su come le diverse problematiche riscontrate nel suo sviluppo siano state gradualmente superate.

Si discuteranno ampiamente le problematiche associate alle performance dei materiali di scorrimento a basso attrito, e agli effetti del surriscaldamento, della pressione di contatto e della velocità di scorrimento alla luce delle più recenti evidenze sperimentali.

Saranno quindi introdotti il Double Concave Friction Pendulum e il Triple Friction Pendulum. Si analizzeranno le loro proprietà e i loro benefici e se ne delineeranno le potenziali limitazioni prestazionali e le attuali lacune conoscitive.

Per illustrare l'utilizzo degli isolatori a base scorrevole come soluzioni antisismiche, vengono analizzati due importanti casi studio molto diversi ma al contempo molto stimolanti, quali il viadotto Bolu (Turchia) e il Progetto C.A.S.E. (Italia).

In fine verranno trattati problemi ancora esistenti nell'applicazione dei dispositivi di isolamento scorrevole quali, la risposta alle alte accelerazioni verticali, il potenziale sollevamento dell'appoggio e l'importanza degli spostamenti residui.

2. Il "pendolo Viscardini" (1909)

Nel 1909, dopo il terremoto di Messina un sistema di isolamento sismico ad attrito è stato brevettato e proposto da Mario Viscardini (vedi Figura 1 e Barucci, 1990; per una più dettagliata descrizione). Viscardini affermò che si può ottenere la piena sicurezza di una struttura permettendole di muoversi il più liberamente possibile rispetto al suolo e dichiarò che questo tipo di performance si potesse ottenere introducendo in ogni punto di contatto tra il suolo e la struttura un dispositivo costituito da un corpo sferico libero di ruotare in qualsiasi direzione all'interno di due superfici curve, la cui curvatura assicurasse una posizione di equilibrio unica.

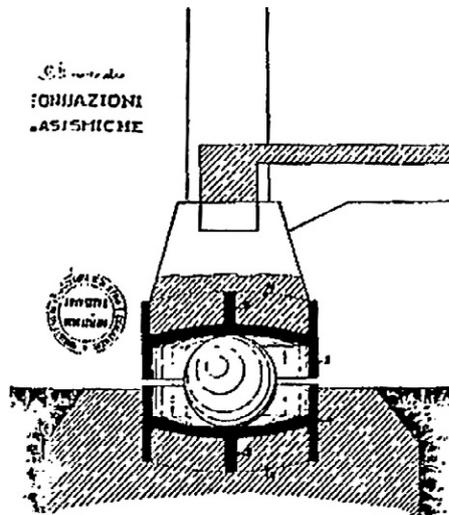


Figura 1
Il "Pendolo Viscardini",
Barucci C., La casa
mantisismica, Gangemi,
Roma, 1990.

Egli suggerì di costruire le strutture direttamente su tali dispositivi, usando delle provvisorie chiavi di taglio da rimuovere successivamente.

Questa proposta aprì un dibattito, a cui seguì una ferma decisione di rifiuto del sistema per ragioni di affidabilità.

La pietra tombale per il sistema arrivò da Arturo Danusso (1909), che scrisse: abbiamo immediatamente capito che se fosse possibile mettere in modo pratico una casa su delle molle, come un'elegante carrozza trainata da cavalli, un terremoto potrebbe andare e venire come un pacifico dondolio per la felicità degli abitanti di quella casa, ma conclude: io credo che il senso pratico dell'edilizia sia di per sé sufficiente per dissuadere dallo scegliere dispositivi meccanici a supporto di una casa stabile. Dai disegni del brevetto in Figura 1, viene assunto che il lato del pilastro sia di 300 mm e il rullo sferico abbia un diametro simile. Si suppone inoltre che le superfici sferiche superiore ed inferiore abbiano una misura di circa 600 mm e che il loro raggio di curvatura (r_s) sia di circa 1000 mm. Considerando valori ragionevoli di pressione di contatto e di deformazione, si può stimare una capacità portante verticale di circa $N = 1000$ kN.

A partire da questi valori ipotizzati, è immediato calcolare le seguenti proprietà:

Periodo di vibrazione del pendolo:

$$T_p = 4\pi \sqrt{\frac{r_s}{g}} = 4s \quad (1)$$

Rigidezza orizzontale corrispondente:

$$k_p \frac{4\pi^2 m}{T^2} = 250 \frac{kN}{m} \quad (2)$$

Si può assumere, con buona approssimazione, che la capacità di spostamento totale possa essere uguale alla differenza in diametro tra piatti e il rullo sferico, i.e. $\Delta\mu = 300$ mm.

Il calcolo della forza di attrito orizzontale V (all'inizio del movimento, in entrambi i punti di contatto, superiore e inferiore) può essere condotto tramite le equazioni standard, come:

$$V = \frac{Nb}{r} = \frac{100b}{150} = 0.67 - 3.3 kN \quad (3)$$

Dove b è una costante dipendente dal materiale e r è il raggio di curvatura del rullo sferico (precedentemente assunto pari a 150 mm).

Le incertezze relative alle proprietà dei materiali disponibili all'inizio del XX secolo permettono unicamente di ipotizzare il valore della costante b tra 0.1 (ad esempio per acciai temprati usati per la realizzazione di rulli sferici) e 0.5 (per esempio per l'acciai come quelli utilizzati nelle applicazioni ferroviarie). Tuttavia, questa mancanza di conoscenza non è considerata critica, dal momento che ne risulta un coefficiente di attrito equivalente μ sempre inferiore all'1%:

$$\mu = \frac{2V}{N} = 0.13 - 0.67\% \quad (4)$$

Considerando un valore medio di $\mu = 0.4$, la relazione tra forza e spostamento che può caratterizzare il pendolo di Viscardini

è riprodotta in Figura 2. Viene mostrato come la forza orizzontale applicata, normalizzata rispetto al peso della struttura, corrisponda a un'accelerazione di 0,4% g all'inizio del movimento e di 7,9% g in corrispondenza del raggiungimento dello spostamento massimo.

Ad un ciclo isteretico con queste caratteristiche corrisponde uno smorzamento equivalente molto basso (ξ_e), leggermente superiore al 3%:

$$\xi_e = \frac{2\mu N}{\pi V_{max}} = 3.2\% \quad (5)$$

Quanto presentato sopra suggerisce che il dispositivo di Viscardini avrebbe potuto avere una capacità di carico verticale e uno spostamento orizzontale accettabile per un campo di applicazioni ragionevolmente ampio, tuttavia la forza di taglio necessaria a innescare il movimento del sistema era certamente troppo bassa, tale da indurre oscillazioni negli edifici per effetto di venti moderati e azioni accidentali.

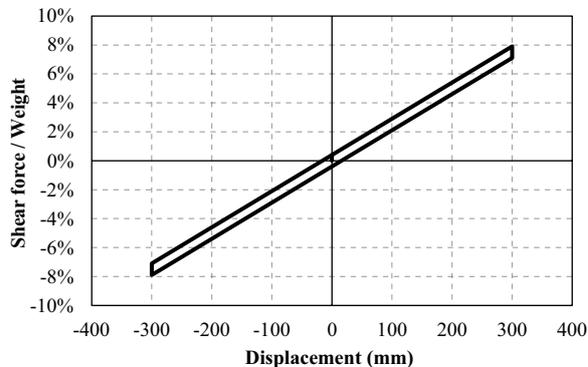
Forse, se non rimosse, le chiavi di taglio temporanee che Viscardini aveva raccomandato per la fase di costruzione, avrebbero potuto funzionare come utili vincoli sacrificabili in caso di terremoto, ma questa opzione rimase inesplorata. Inoltre, la ridotta capacità di dissipazione di energia che caratterizzava il dispositivo, non sarebbe stata efficace per limitare la domanda di spostamento in regioni ad alta sismicità.

Nonostante questi difetti, il dispositivo Viscardini può essere considerato come uno degli "antenati" degli isolatori ad attrito, che ottanta anni dopo sarebbero stati ulteriormente sviluppati e adottati.

Ad oggi, sono stati proposti, sviluppati e adottati diversi sistemi di questa "famiglia" e su di essi migliaia di prove sperimentali sono state eseguite in tutto il mondo.

All'interno del contesto europeo, la rassegna recentemente pubblicata da Barone S. et al. (2017) risulta essere la più completa circa i risultati sperimentali relativi alla stima delle proprietà di scorrimento di isolatori ad attrito.

Figura 2
Grafico forza-spostamento
del dispositivo di Viscardini
in base ai valori assunti.



3. Il sistema del friction pendulum (1980)

3.1 Concetto e sviluppi

Negli anni 80, Victor Zayas rivisitò l'idea di isolare degli edifici usando dispositivi il cui funzionamento fosse basato sull'attrito e sulla risposta a pendolo (brevetto depositato il 12 dicembre 1985 e pubblicato il 24 febbraio 1987).

Il concetto, la progettazione, la modellazione e la caratterizzazione sperimentale del sistema (denominato Friction Pendulum System) sono descritti in un report pubblicato nel 1987 (Zayas et al., 1987) e in un articolo a rivista pubblicato nel 1990 (Zayas et al., 1990). La lettura di questi documenti è molto interessante e dovrebbe essere fatta da chiunque lavori sul tema dell'isolamento alla base con dispositivi ad attrito.

Il brevetto indica campi di applicazione con velocità tra 0 e 0.9 m/s, capacità di carico comprese tra 7 e 210 MPa, coefficienti d'attrito compresi tra 5% e 20% e raggi di curvatura fra 0.9 e 15 m.

Diversi degli estremi di questi campi di applicazione molto ampi sono risultati successivamente tecnicamente impossibili da raggiungere, tuttavia la scelta di considerare range così grandi può essere giustificata con il desiderio di coprire con il brevetto tutte le possibili applicazioni e i possibili sviluppi futuri del sistema.

Uno dei disegni originali inclusi all'interno del brevetto e riportato in Figura 3a (viene riportata solo la definizione dei 3 componenti più importanti, per maggiori dettagli si rimanda al documento originale), mostra un dispositivo abbastanza diverso dal

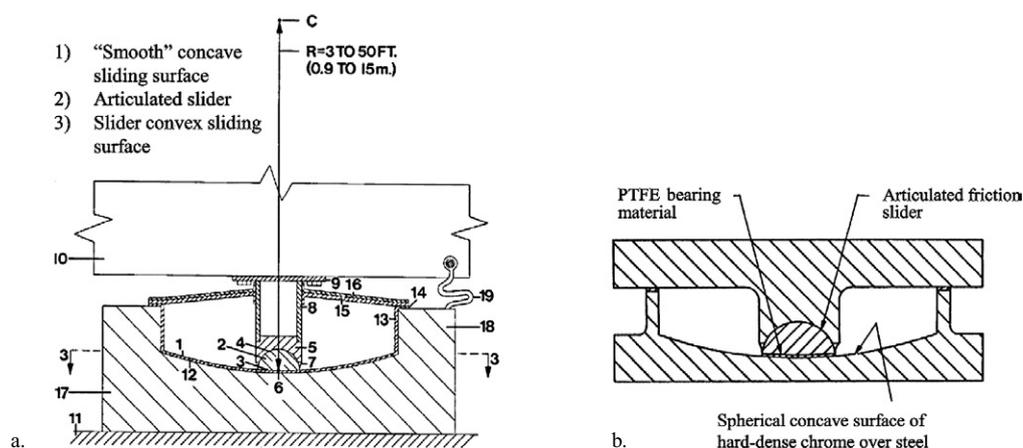


Figura 3
Il "sistema Friction Pendulum": (a) come descritto da Zayas V., 1987; (b) come descritto da Zayas et al., 1987 e Zayas et al., 1990.

prototipo successivamente realizzato e descritto nel report e nell'articolo, mostrato in Figura 3b. Ad esempio, dal confronto tra le due figure risulta evidente che alcuni problemi relativi alla concentrazione di sforzi e deformazioni nel calcestruzzo erano già stati compresi e affrontati.

La qualità e la quantità di risultati sperimentali contenuti nel rapporto (Zayas et al., 1987) è stata raramente eguagliata da ricerche successive. I test sono stati eseguiti su una tavola vibrante a 6-gdl, utilizzando quattro variazioni della struttura isolata, con periodi variabili da 0,23 e 0,99 s, e due diverse scalature temporali della storia di accelerazione del terreno, in modo da simulare edifici con 4-30 piani. Uno dei provini è stato ulteriormente modificato includendo 4 livelli di massa ed eccentricità nella rigidezza.

Sono stati applicati cinque differenti set di accelerogrammi con fattori di amplificazione variabili fra 1 a 3, raggiungendo accelerazioni spettrali massime comprese tra 0.32 g e 2.70 g.

Sono stati valutati sia numericamente che sperimentalmente gli effetti dell'accelerazione verticale, includendo il potenziale sollevamento del dispositivo.

I risultati ottenuti erano sostanzialmente in linea con quanto oggi chiunque si aspetterebbe e prevedrebbe, con alcuni punti che meritano di essere sottolineati:

- L'esame combinato del sistema di isolamento, della struttura e dello spostamento totale registrato, mostra risultati che sono in pieno accordo con ciò che sarebbe stato suggerito circa vent'anni dopo (Priestley et al., 2007). Si noti che questo è in qualche modo in contrasto con l'approccio progettuale utilizzato negli anni ottanta (e negli anni novanta) per le strutture isolate, che era basato sull'applicazione di uno spettro di risposta in accelerazione, modificato.
- Sorprendentemente, lo spostamento residuo non è stato studiato in dettaglio considerando le ampiezze delle misurazioni riportate (mai superiori a 0,33 pollici, circa 8 mm), molto più piccole di qualsiasi altro ragionevole spostamento anelastico residuo. È un peccato che questo tema non sia stato maggiormente studiato nella ricerca, dato che un'indagine sperimentale della stessa estensione non è mai stata replicata per strutture isolate dalla base. Nel frattempo, il tema della limitazione degli spostamenti residui ha acquisito importanza, ispirando limitazioni all'interno dei codici normativi (ad esempio per quanto riguarda il raggio di curvatura e la capacità di dissipazione di energia), non necessariamente coerenti con le emergenti evidenze sperimentali. Più specificamente, alcuni recenti studi sperimentali e numerici (Cardone e Gesualdi, 2017; Ponzo et al., 2017; Cardone et al., 2015; Quaglini et al., 2017 e Quaglini, 2017) hanno dimostrato che le attuali prescrizioni dell'Eurocodice (CEN. Eurocode 8, 2005) relative alla capacità di ricentrimento non sono conservative per gli slider a superficie curva, in particolare in presenza di terremoti le cui registrazioni presentino impulsi a bassa frequenza indotti da fenomeni di direttività, e hanno suggerito di adottare dei requisiti più restrittivi.
- La coincidenza teorica del centro di massa della sovrastruttura e del centro di rigidezza del sistema di isolamento (la "rigidezza" del pendolo è uguale al peso supportato diviso per il raggio di curvatura) è stata dimostrata sperimentalmente.
- Gli effetti di una forte variazione del carico verticale, a causa della risposta accoppiata delle azioni orizzontali e verticali, hanno dimostrato di avere un'influenza limitata sulla domanda di spostamento orizzontale. Tuttavia, non è stata notata, la potenziale significativa variazione del taglio e della flessione agente su ciascuna colonna (Calvi et al., 2004): al tempo, l'uso di dispositivi di isolamento come "fusibili" di protezione locale, all'interno di uno schema di gerarchia delle resistenze, non era ancora stato identificato come possibile obiettivo.
- Il materiale a basso attrito utilizzato è semplicemente descritto come PTFE ed è indicato che il coefficiente di attrito dinamico da utilizzare nelle simulazioni analitiche dovrebbe essere assunto pari all'8%. È stato riportato che questo valore "è superiore all'attrito quasi-statico perché il coefficiente di attrito del materiale di scorrimento aumenta con l'aumento della

velocità”. Si afferma inoltre che ciò è in accordo “con le note proprietà di attrito dipendenti dalla velocità del materiale dei cuscinetti in PTFE”. In realtà, questo è in contrasto con i risultati di migliaia di test eseguiti su diversi materiali a basso attrito e dispositivi di isolamento, che evidenziano una tendenza esattamente opposta. Questa apparente contraddizione è probabilmente dovuta all’effetto combinato della velocità e della temperatura: in generale, temperature più elevate favoriscono una riduzione dei valori del coefficiente di attrito e la temperatura aumenta con la velocità e la pressione (Barone et al., 2017). Il coefficiente di attrito risultante (in un punto specifico in un istante specifico) dipende dall’effetto combinato di velocità, pressione e temperatura (Quaglini et al., 2014; si veda anche la sezione 4 di questo articolo) con effetti globali difficili da prevedere.

3.2 Ulteriore sviluppo e attuazione pratica

Il sistema Friction Pendulum (FP) è in grado di soddisfare diversi obiettivi prestazionali, ma è particolarmente efficace nell’accomodare richieste di spostamento estremamente elevate indotte dai terremoti, ad esempio in applicazioni come i ponti di grandi dimensioni. Questa qualità si è rivelata estremamente preziosa negli anni novanta in California: i terremoti di Loma Prieta (1989) e Northridge (1994) avevano appena dimostrato, ancora una volta, l’inadeguatezza della maggior parte dei ponti e il Caltrans (il Dipartimento dei Trasporti della California) stava lanciando un ambizioso programma di miglioramento delle infrastrutture stradali e, in particolare, dei sette principali ponti a pedaggio.

Il Caltrans ha finanziato la realizzazione del Sismic Response Modification Device (SRMD), un sistema per eseguire test sperimentali estremamente potente implementato presso l’Università della California, a San Diego (Shorthreed et al., 2002). Questa apparecchiatura di prova consentiva il collaudo controllato di sistemi Friction Pendulum di grandi dimensioni e, allo stesso tempo, l’esecuzione di verifiche sperimentali che prima erano impossibili. Delle numerose prove eseguite, non tutti i risultati sono stati resi pubblici (per ragioni di riservatezza espresse dal produttore o dal cliente), ma non vi è dubbio che durante le prove sono emersi molti problemi dagli isolatori di nuova concezione, che sono stati progressivamente risolti (Shorthreed et al., 2002).

Questo lavoro ha reso possibili livelli di prestazione e applicazioni altrimenti molto difficili, se non impossibili da raggiungere. Un esempio di questo è il ponte Benicia-Martinez, adeguato all’interno del programma lanciato dal Caltrans. Il miglioramento del ponte includeva tutti i dispositivi di appoggio esistenti, che sono stati sostituiti con dispositivi FP con una capacità nominale di spostamento di 53 pollici (1346 mm), una capacità di carico verticale di 5 milioni di libbre (circa 23.000 kN) e un periodo di vibrazione effettivo di 5 s. Ogni dispositivo aveva un diametro di circa 4 m e un peso di circa 18 kN (Zayas et al., 2001).

Con il tempo sono emersi numerosi problemi e difficoltà riguardo all’uso dei FP, come è normale con le nuove tecnologie. Fra questi, la variazione del coefficiente di attrito in funzione della temperatura e dello sforzo assiale, gli effetti dello stick-slip e la potenziale delaminazione. Queste problematiche saranno discusse in modo più dettagliato nelle sezioni successive.

3.3 Influenza della variazione di temperatura

La variazione di temperatura in un dispositivo a scorrimento può essere approssimativamente stimata calcolando il flusso di calore indotto dall’energia totale dissipata durante la risposta ad una data storia di spostamenti relativi. L’energia dissipata totale (E_{tot}) su ciascuna superficie di scorrimento è la somma delle aree racchiuse da tutti i cicli forza-spostamento. Assumendo costanti il coefficiente di attrito e la forza assiale applicata, l’energia è quindi il prodotto di una forza di attrito costante (μN) moltiplicata per lo spostamento relativo totale percorso:

$$\xi_e = \frac{2\mu N}{\pi V_{max}} = 3.2\% \quad (6)$$

La variazione di temperatura (ΔT) di un corpo, indotta dall’assorbimento dell’energia (E_a), dipende dalla sua massa (M) e dalla sua capacità termica specifica (C_v , approssimativamente pari a 500 J/kg °C nel caso dell’acciaio):

$$E_{tot} = \mu N \Delta_{tot} \quad (7)$$

Per quanto riguarda un dispositivo a doppia superficie di scorrimento, l’aumento della temperatura nelle piastre in acciaio inossidabile e nello slider interno non è facile da stimare, per diversi motivi:

- La diversa conduttività termica dell’acciaio e del materiale termoplastico, causa una grande discontinuità nel flusso termico generato verso la superficie concava in acciaio (Quaglini et al., 2014);
- La conducibilità termica relativamente bassa dei materiali plastici, tende a limitare gli effetti del riscaldamento dello strato esterno del cuscinetto in contatto con la superficie concava in acciaio, con effetti minori sulla temperatura della massa;
- La stima della temperatura sulla superficie del cuscinetto dovrebbe quindi tenere conto (i) dell’equilibrio termico tra il cuscinetto e la superficie concava; (ii) del flusso di calore generato, principalmente diretto verso la piastra di acciaio; (iii)

della conduzione del calore attraverso la piastra di acciaio; e (iv) del flusso di calore intermittente generato in diversi punti della superficie concava in acciaio quando entra in contatto con lo slider (ad es. Quaglini et al., 2014; Constantinou, 2007; Kumar et al., 2015 e Lomiento et al., 2013).

Per valori standard di questi parametri di controllo, possono verificarsi variazioni locali di temperatura tra 15 e 30 ° C per ciclo, con variazioni di temperatura totali che possono superare i 100 °C durante una prova standard di 3 cicli a massimo spostamento.

Per questo motivo, la norma europea sui dispositivi antisismici EN 15129 (2010), specifica che è necessario prestare attenzione nell'esecuzione dei programmi di test al fine di garantire che eventuali test eseguiti in rapida successione non surriscaldino eccessivamente l'isolatore. [...] È consigliabile dividere il programma di prove in gruppi di test. Dopo aver eseguito un gruppo, l'isolatore viene lasciato raffreddare a una temperatura specificata dal produttore [...] (punto 8.3.4.1.1). Le prove prescritte dalla EN 15129 per gli isolatori scorrevoli sono riportate parzialmente nella Tabella 1. Si può notare come il numero massimo di cicli completi prescritti al massimo spostamento di progetto (dbd) non sia mai maggiore di 3.

Al contrario, i problemi di surriscaldamento non sono stati affrontati correttamente all'interno delle norme AASHTO (1999), che prescrivono di sottoporre ogni dispositivo scorrevole ai protocolli di prova riassunti in Tabella 2. Sulla base di quanto discusso in questa sezione, è evidente che una sequenza di venti cicli a spostamento di progetto senza prevedere del tempo di "raffreddamento" (Test 4, Tabella 2) comporterebbe in principio un aumento della temperatura di diverse centinaia di gradi. Un tale aumento di temperatura comporterebbe una forte variazione del coefficiente di attrito apparente e, in conclusione, una rottura del materiale. Questa osservazione è stata presa in considerazione ed è risultata, nell'edizione 2014 di AASHTO (2014), nella rimozione del Test 4 dal protocollo di prova.

4. Sviluppo di materiali a basso attrito

4.1 PTFE, Materiali a base di polietilene e poliammide

I dispositivi testati e prodotti in California erano basati su un cuscinetto di scorrimento in materiale a basso attrito derivato dal politetrafluoroetilene, noto anche come PTFE (o Teflon) dal nome di un noto marchio che utilizza una formula derivata dal PTFE. Secondo i dati disponibili in letteratura, il PTFE ha le proprietà fondamentali elencate nella Tabella 3.

Non appena è scaduto il brevetto dei dispositivi FP, diverse società concorrenti (principalmente europee) hanno iniziato a sviluppare materiali alternativi, principalmente basati su formule derivate da polietilene (PE) e poliammide (PA).

Nella sua formulazione di base, il polietilene è la plastica comune e, come riassunto nella Tabella 3, ha proprietà che sono difficilmente compatibili con le prestazioni richieste per costruire un dispositivo di isolamento. Tuttavia, si può notare che è possibile ottenere caratteristiche più favorevoli alterando la chimica del polimero. Così alcune aziende sono state in grado di produrre materiali a partire dal polietilene che si sono dimostrati efficaci per applicazioni di isolamento alla base. Questi materiali sono stati validati sperimentalmente, brevettati e hanno ricevuto l'approvazione tecnica europea (ETA) che ne consente l'uso. Il materiale a base polietilene attualmente utilizzato dalle aziende europee è denominato UHMWPE (polietilene ad altissimo peso molecolare) e consiste in un polimero costituito da lunghe catene molecolari di PE con peso molecolare compreso tra 2×10^6 e 6×10^6 g/mol (si noti che il PE standard lineare a bassa densità ha un peso molecolare dell'ordine di 500-2000 g/mol). L'aumento della lunghezza delle catene molecolari comporta un aumento della resistenza, del modulo elastico e della resistenza all'usura del materiale e una diminuzione della sua duttilità. Alcune proprietà di interesse per i materiali UHMWPE sono fornite all'interno della Tabella 3.

Tabella 1 - Parte delle prove prescritte per la verifica del comportamento degli isolatori scorrevoli. (tratta da EN 15129).

Tipo di test	Spostamento	Numero di cicli completi
Service	Max. non seismic movement	20
Benchmark	$1.0 \times d_{bd}$	3
Dynamic 1	$0.25 \times d_{bd}$	3
Dynamic 2	$0.5 \times d_{bd}$	3
Dynamic 3	$1.0 \times d_{bd}$	3
Integrity of overlay	$1.0 \times d_{bd}$	3
Seismic	$1.0 \times d_{bd}$	3
Bi-directional	$1.0 \times d_{bd}$	3
Property verification	$1.0 \times d_{bd}$	3
Ageing	$1.0 \times d_{bd}$	3

Tabella 2 - Parte delle prove prescritte per la verifica del comportamento degli isolatori scorrevoli. (tratta da AASHTO 1999).

Tipo di test	Spostamento	Numero di cicli completi
Test 1 Thermal	Max. thermal displacement	3
Test 2 Wind and Braking	Corresponding to max. wind/braking load	20
Test 3 Seismic	1.0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, and 1.25 x dbd	3
Test 4* Seismic	1.0 x dbd	20
Test 5 Wind and Braking	Corresponding to max. wind/braking load	3
Test 6 Seismic Performance Verification	1.0 x dbd	3
Test 7 Stability Verification	Article 15.4	1

* No longer prescribed in AASHTO [34].

Tabella 3 - Proprietà dei materiali a basso attrito.

	PTFE*	PE*	UHMWPE*	PA*
Unit mass (kg/m ³)	2200	900	950	1100
Melting temperature (°C)	335	120	130–136	200–350
Unconfined compression strength (MPa)	25	12–33	38–50	55–220
Friction coefficient on polished steel (%)	5–10	15	5–10	10–20

* Values intended as simple references.

I materiali a base di poliammide sono più vari, esistono in natura e possono essere prodotti artificialmente. I derivati di poliammide comprendono materiali ben noti come il nylon. È altresì chiaro che materiali con caratteristiche adatte ad applicazioni di isolamento alla base (come quelli riassunti nella Tabella 3) dovevano essere inventati, brevettati e verificati, prima che potessero ottenere una ETA (non ancora concessa a qualsiasi materiale a base di poliammide).

Il PTFE è ancora utilizzato dall'azienda produttrice originale ed è stato recentemente ri-visitato da altre società, per produrre ulteriori materiali efficaci per dispositivi a scorrimento (Barone et al., 2017).

Le proprietà meccaniche dei materiali a basso attrito attualmente in uso, insieme ai risultanti dispositivi di isolamento, saranno discussi nelle sezioni seguenti, è tuttavia evidente che la ricerca e lo sviluppo di nuovi materiali possono ancora fornire risultati utili, con spazio per ulteriori innovazioni nel campo.

4.2 Pressione di contatto tipica

Le tipiche pressioni medie di contatto per i diversi materiali di scorrimento a basso attrito sono nell'intervallo 40-50 MPa per PTFE, 40-45 MPa per UHMWPE e 55-65 MPa per PA. Tuttavia, questi valori possono variare in modo significativo, a causa delle diverse proprietà del materiale o perché spesso la pressione di contatto viene utilizzata come parametro per variare il coefficiente di attrito apparente, che tende a diminuire per livelli di pressione più elevati, come mostrato in Figura 4.

Coerentemente con i valori di pressione riportati, le superfici di scorrimento sono generalmente più piccole (diametro tipico compreso tra 170 e 300 mm) per PA rispetto a PE (diametro tipico compreso tra 250 e 480 mm). Superfici di scorrimento di diametro più piccolo possono ovviamente implicare significativi risparmi in termini di costo, in quanto a parità di capacità di spostamento è possibile realizzare dispositivi più piccoli. Tuttavia, cuscinetti di scorrimento più piccoli tendono ad essere caratterizzati da rapporti di aspetto più grandi e, di conseguenza, da momenti flettenti interni più grandi, che si traducono in una maggiore concentrazione di sforzi nella zona di contatto tra i cuscinetti e le superfici di scorrimento.

4.3 Variazione del coefficiente di attrito

Il coefficiente di attrito dinamico apparente varia nell'intervallo 3,0-4,5% per i materiali di scorrimento a base PA, 4,5-6,0% per quelli a base PE e 6,0-8,0% per quelli a base PTFE. Tuttavia, questi valori devono essere trattati con cautela per due importanti motivi: (i) le proprietà di scorrimento di questi materiali a basso attrito possono variare significativamente in funzione di numerosi di parametri e due dispositivi soggetti a condizioni identiche, fatti di materiali identici, possono ancora esibire coefficienti di attrito diversi (vedi la prossima sezione); (ii) è possibile riscontrare una grande variazione del valore del coefficiente di attrito all'interno dello stesso dispositivo. Ad esempio, il valore del coefficiente di attrito può diminuire progressivamente con il numero di cicli forza-spostamento completati, in funzione della sensibilità agli effetti di distacco all'inizio del moto (spesso chiamati "stick-slip") o per effetto del progressivo surriscaldamento. Va anche notato che, in questo contesto, il coefficiente di attrito è stato studiato solo a livello macro, principalmente per lo sviluppo di calcoli orientati agli impieghi pratici.

Due tipici cicli forza di taglio - spostamento, relativi a materiali derivati da PA e PE, sono mostrati in Figura 5. Un effetto

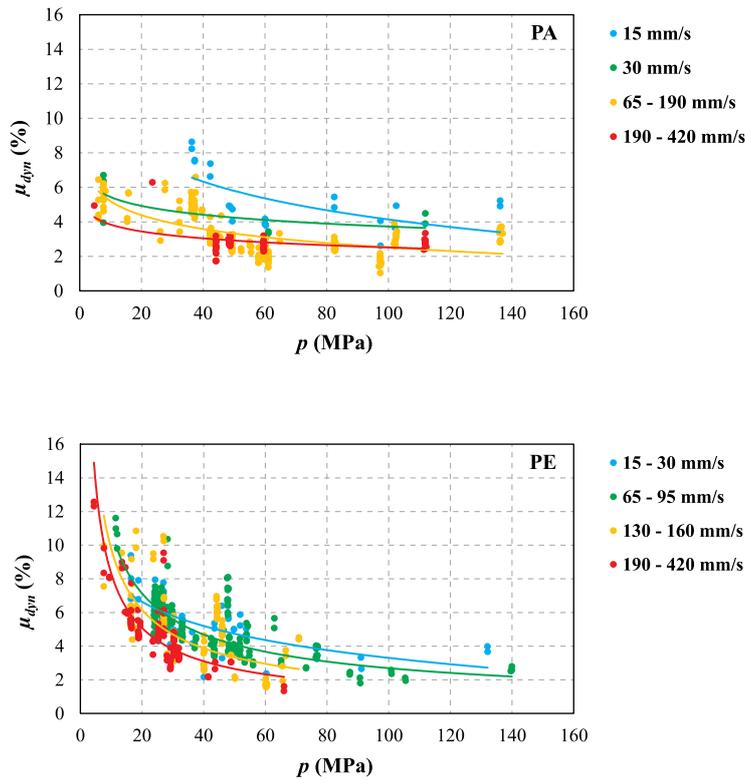


Figura 4
Coefficiente di attrito dinamico (μ_{dyn}) come funzione della pressione di contatto (p) e della velocità superficiale media (v_{ave}), per materiali derivati da PA e PE (Barone et al., 2017).

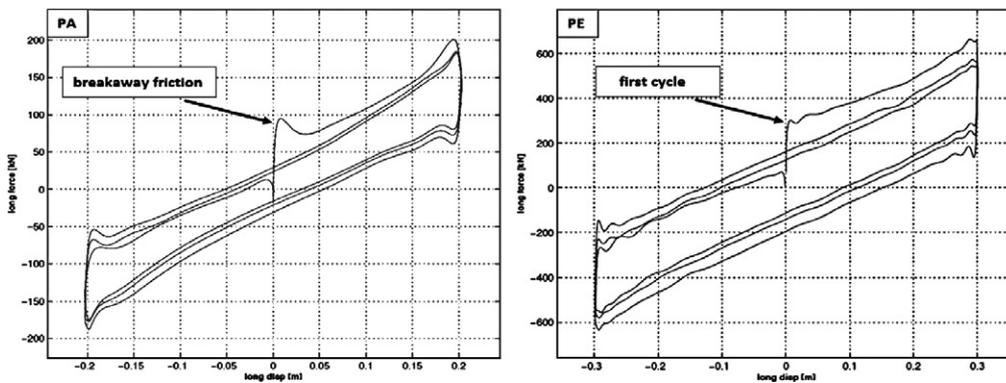


Figura 5
Tipici cicli forza - spostamento, relativi a materiali derivati da PA e PE (Barone et al., 2017).

stick-slip significativo è evidente nella risposta del dispositivo basato su PA (a sinistra), mentre questo effetto è molto meno pronunciato nell'isteresi che caratterizza quello con materiale di scorrimento a base PE (a destra). È inoltre possibile osservare una significativa riduzione del coefficiente di attrito apparente con l'aumentare del numero di cicli, particolarmente evidente nella risposta del dispositivo basato su PE e nei primi due cicli della risposta.

Queste osservazioni sono rappresentative di una tendenza generale: i materiali derivati da PA nella maggior parte dei test sperimentali disponibili sono risultati caratterizzati da un significativo effetto stick-slip, all'inizio del moto e all'inversione dell'azione orizzontale, mentre i materiali a base PE (allo stesso modo i materiali PTFE) hanno evidenziato risposte isteretiche con minori effetti di stick-slip.

Considerando l'espressione dello smorzamento equivalente (ξ_e), indicata nell'equazione 2, è evidente che esiste una correlazione lineare tra ξ_e e il coefficiente di attrito μ , se il carico assiale, la rigidità equivalente e lo spostamento di progetto sono mantenuti costanti.

Vale la pena notare che la presenza di stick-slip nella risposta ha l'effetto indesiderato di far aumentare la forza di taglio alla base trasmessa all'edificio isolato ed è quindi difficile associare la sua presenza a qualsiasi fenomeno positivo. Al contrario, uno smorzamento equivalente più alto comporta un aumento della dissipazione di energia e ha quindi l'effetto positivo di ridurre la domanda in spostamento.

La limitazione del taglio alla base sostenuto da un edificio isolato è chiaramente uno degli scopi principali dell'adozione di questa soluzione. Ciò si traduce in un'applicazione ovvia dei principi di gerarchia delle resistenze e nella conseguente protezione dell'edificio a qualsiasi livello di danno desiderato, compresa l'immediata operatività dopo un evento sismico (Christopoulos e Filiatrault, 1990).

Sfortunatamente, il taglio massimo sperimentato dall'edificio non coincide necessariamente con il massimo taglio trasmesso al livello di isolamento, a causa della usuale presenza di una platea di fondazione (che ha una massa e una risposta dinamica intrinseca) appena al di sopra degli isolatori, e a causa dei possibili effetti di modi superiori che possono spostare la forza di taglio risultante in corrispondenza di uno dei piani superiori.

La combinazione di questi effetti con i fenomeni di stick-slip e con la variazione del coefficiente di attrito effettivo tra il primo e i cicli successivi, spesso comporta l'insorgere di forze di taglio nell'intervallo di quelle prevedibili assumendo un coefficiente di attrito due volte maggiore del valore nominale. Questo concetto sarà ulteriormente discusso nella Sezione 4.4.

4.4 Effetti della pressione di contatto, velocità e temperatura

Come già detto, tutti i materiali a basso attrito conosciuti presentano una certa correlazione del coefficiente d'attrito con la pressione e con la velocità (guarda per esempio Mokha, 1990). Parte di questo effetto è certamente dovuto al legame tra attrito e temperatura, ma questa correlazione non spiega del tutto le evidenze sperimentali.

Sfortunatamente, anche a livello globale, pressione e velocità relativa cambiano continuamente durante la risposta alle azioni dinamiche:

- La velocità deve essere prossima allo zero ad ogni inversione di ciclo, ed è pari a zero in ogni fase della risposta con una forza di taglio applicata più bassa di un certo coefficiente di attrito moltiplicato per la forza verticale. Da questo punto di vista, la risposta alle sollecitazioni sismiche consiste in un numero di semi-cicli interrotti da fasi prolungate di relativa immobilità.
- La forza normale applicata su ogni dispositivo varia continuamente, in funzione delle componenti di sollecitazione verticali e/o a causa delle azioni di ribaltamento.

A livello locale, ovvero in corrispondenza di ogni infinitesimale punto di contatto, la pressione varia a causa della presenza di un momento interno dovuto allo spessore finito del cuscinetto di scorrimento (le forze di taglio in corrispondenza delle superfici di attrito superiore ed inferiore non agiscono sullo stesso piano orizzontale).

Come conseguenza di una disomogenea distribuzione delle pressioni di contatto, gli sforzi di taglio sono di pari passo non uniformi, dato che il coefficiente di attrito locale dipende dalla pressione.

Questo effetto può indurre una rotazione del cuscinetto d'attrito, che comporta differenti velocità locali e spostamenti relativi imprevedibili.

Entrambe queste tendenze (la rotazione e lo spostamento casuale) sono state osservate sperimentalmente.

La combinazione di tutti questi effetti è piuttosto scoraggiante rispetto alla possibilità di prevedere accuratamente la risposta di un sistema isolato, in particolare poiché la micro-modellazione viene di solito evitata a causa della sua complessità e dei costi computazionali associati.

Tuttavia, studi numerici (e.g. Calvi et al., 2004) ed evidenze sperimentali (e.g. Al-Hussaini et al., 1994) indicano chiaramente che utilizzare "proprietà medie" appropriate, fornisca approssimazioni accettabili della storia di spostamento relativo. Sembra infatti che la maggior parte degli effetti si compensino vicendevolmente una volta combinati per valutare la storia di spostamento globale di un sistema di isolamento complesso.

Questa osservazione non si applica necessariamente alla distribuzione delle forze di taglio, che può produrre una forza di taglio globale con conseguenti forze di taglio locali e componenti torsionali potenzialmente pericolose. Sembra che studi numerici approfonditi basati su evidenze sperimentali affidabili possano ancora produrre risultati rilevanti in questo ambito.

È evidente che la pressione e la velocità sono i parametri fondamentali che governano la generazione di energia a livello locale in ogni punto di contatto e conseguentemente, il flusso di calore locale. È perciò ragionevole cercare di combinare tutti gli effetti per valutare il coefficiente di attrito locale istantaneo. Questo approccio è stato provato da Quaglini et al. (2014), che ha considerato un micro-modello di un dispositivo di isolamento, separando gli effetti di velocità e temperatura calcolando la variazione di temperatura come funzione del flusso di calore. Nel caso specifico considerato, si è ipotizzato che il coefficiente di attrito variasse tra il 12% e il 4% in funzione della velocità, e che l'effetto del surriscaldamento sul coefficiente attrito potesse essere circa 0.4% per grado celsius. Variazioni locali di temperatura oltre i 100 gradi centigradi sono state rilevate numericamente e confermate sperimentalmente. Per range di velocità tipici, la temperatura è risultata essere il parametro di gran lunga dominante.

5. Sviluppi di dispositivi multi-superficie

Nonostante la loro notevole influenza sulla performance sismica di edifici e ponti, gli isolatori FP tradizionali presentano delle limitazioni (Fenz e Constantinou, 2008; Calvi e Ruggiero, 2016). Pertanto la ricerca di sistemi di isolamento alla base più

efficienti ha suscitato l'interesse di molti studiosi ed è stato oggetto di numerosi progetti di ricerca in tutto il mondo. Questi sforzi hanno portato alla realizzazione di una varietà di sistemi ad attrito che, almeno in determinate situazioni, dovrebbe migliorare la performance degli isolatori FP tradizionali. Esempi di tali sistemi includono Isolatori a pendolo a frequenza variabile (Murnal e Sinha, 2002, sistemi scorrevoli multipli (e.g. Fenz e Constantinou (2008); Fenz e Constantinou (2006); Fenz e Constantinou (2008); Tsai et al. (2010) e Lee e Constantinou (2016)) e sistemi ad attrito variabile (Calvi e Ruggiero, 2016; Panchal e Jangid, 2009; Calvi et al., 2016 e Calvi e Timsina, 2017). Alcuni di questi sistemi sono stati sviluppati con successo ed impiegati, mentre altri sono ancora ad uno stadio preliminare di sviluppo.

A tale scopo le due alternative agli isolatori FP standard che sono state (o sono tutt'ora) impiegate con successo ed usate per proteggere strutture reali in Europa sono il Friction Pendulum a Doppia Curvatura (DCFP) e il Triple Friction Pendulum (TFP).

Questi due sistemi, insieme ai benefici che i sistemi multisuperficie comportano per quanto concerne la protezione degli elementi strutturali e non strutturali e la probabilità di collasso, vengono approfonditi in maggiore dettaglio nelle seguenti sottosezioni.

5.1 Friction pendulum a doppia curvatura

L'idea di dispositivi di appoggio ad attrito con due superfici scorrevoli esiste da molto tempo. Alcuni sistemi rudimentali furono elaborati e brevettati negli Stati Uniti (es. Touaillon, 1870; Bechtol, 1907) e in Europa (Barucci, 1990) più di cento anni fa. Tuttavia, c'è voluto parecchio tempo prima che i moderni Friction Pendulum a doppia curvatura venissero effettivamente sviluppati, implementati e testati. La prima esperienza con il DCFP di cui gli autori sono a conoscenza è documentata in Hyakuda et al. (2001), dove gli autori presentano la descrizione e la risposta sismica osservata di una struttura in Giappone, isolata con apparecchi DCFP.

Lo sviluppo iniziale dei DCFP fu principalmente dettato dal desiderio di creare dei dispositivi di isolamento alla base in grado di raddoppiare la capacità di spostamento degli equivalenti FP. Come conseguenza, (Hyakuda et al., 2001) ha preso in considerazione dispositivi con superfici di scorrimento con analoghi raggi di curvatura, uguali coefficienti di attrito e superfici di scorrimento non articolate.

Un simile dispositivo di isolamento alla base è stato sviluppato e studiato, numericamente e sperimentalmente da Tsai et al. (2003), Tsai et al. (2005) e Tsai et al. (2006). Anche in questo caso, gli studi si sono limitati a sistemi con superfici di scorrimento caratterizzate da uguali raggi di curvatura e coefficienti di attrito. Tuttavia, il dispositivo sviluppato da Tsai et al. (2003) incorporava una superficie di scorrimento articolata per meglio accomodare le rotazioni differenziali e per meglio distribuire il carico sulla superficie di contatto.

Fenz e Constantinou (2006) ha fornito una descrizione generica del comportamento dei DCFP, tenendo conto della possibilità di impiegare superfici concave con differenti raggi di curvatura e/o due interfacce scorrevoli con diversi coefficienti di attrito. Facendo uso di raggi di curvatura e/o coefficienti di attrito disomogenei, si possono ottenere dispositivi con comportamento forza-spostamento "adattivo" (Figura 6). La risposta forza spostamento del dispositivo DCFP è stata derivata a partire dai principi fondamentali (ovvero equilibrio e compatibilità) tenendo conto dell'altezza del dispositivo e dell'effetto dell'attrito nella parte rotazionale dell'articolazione. Lo studio riporta sia evidenze sperimentali, che la discussione analitica della risposta del dispositivo. Il comportamento generale di un DCFP è rigido-bilineare, e si riduce in rigido-lineare (ovvero il comportamento di un dispositivo FP standard) nel caso di uguali raggi di curvatura e coefficienti di attrito. Nell'ambito della modellazione numerica si suggerisce di rappresentare questo comportamento mediante due singoli modelli di dispositivi FP concavi, connessi in serie con in mezzo una massa che rappresenta la pastiglia di scorrimento articolata. Questo

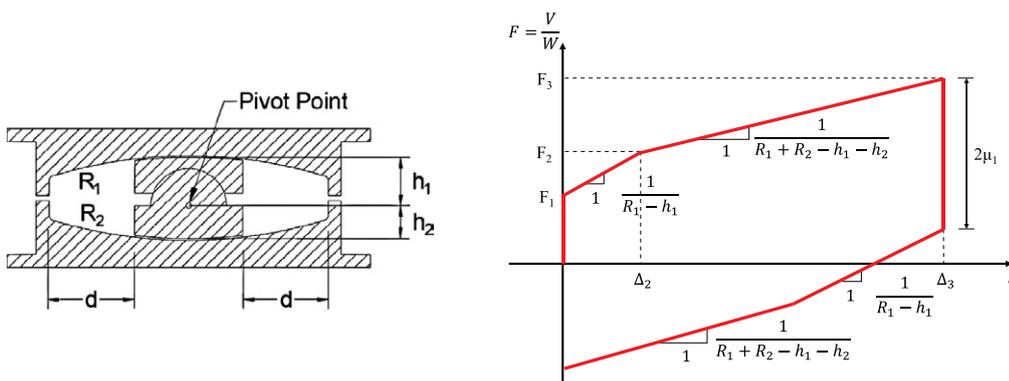


Figura 6
Sezione Friction Pendulum a doppia curvatura (sinistra); Grafico rappresentante mezzo ciclo forza-spostamento in dispositivi DCFP con $\mu_1 \leq \mu_2$ (destra).

approccio di modellazione può essere implementato su quasi tutti i software ad elementi finiti disponibili. Inoltre un elemento 3D completo è disponibile in OpenSees (Dao et al., 2013). È da notare come questo elemento 3D sia stato sviluppato per simulare la risposta di un dispositivo TFP (discusso nella prossima sezione), ma possa essere utilizzato per modellare un DCFP mediante un adeguato settaggio dei parametri. Per una discussione più dettagliata dei sistemi di DCFP si invita il lettore a riferirsi a Fenz e Constantinou (2006).

È da sottolineare che nonostante sia possibile, utilizzando determinate combinazioni di raggi di curvatura e coefficienti di attrito, ottenere sistemi più performanti, il beneficio principale relativo all'uso dei sistemi DCFP rispetto alle loro controparti FP è il risparmio in termini economici che può essere ottenuto grazie alla diminuzione delle loro dimensioni (ridurre le dimensioni del cuscinetto di scorrimento corrisponde infatti a una riduzione del suo costo).

Dal loro primo sviluppo i sistemi DCFP sono stati ampiamente testati sia numericamente che sperimentalmente (ad esempio Barone et al. (2017), Ponzo et al. (2017), Morgan (2007) e Bao (2017)) e sono stati utilizzati come misure di protezione sismica in una serie di progetti nel mondo, inclusi recenti progetti europei (es vedere 6.2).

Un importante differenza tra i dispositivi a superficie di scorrimento singola e doppia sta nel valore di momento flettente interno indotto dai carichi verticali applicati quando i dispositivi sono in configurazione deformata. Nel caso dei DCFP, entrambe le strutture al di sotto e al di sopra del dispositivo dovrebbero essere progettate per essere in grado di assorbire un momento flettente pari al peso trasmesso moltiplicato per metà dello spostamento di progetto.

Nel caso di un appoggio FP standard, l'intero spostamento viene applicato sul lato superiore o inferiore del dispositivo (a seconda della direzione della superficie concava), determinando un momento flettente che si genera solo su un lato del dispositivo. Questa può essere una caratteristica significativa, ad esempio quando è importante evitare l'insorgere di un momento flettente aggiuntivo su una colonna o in fondazione.

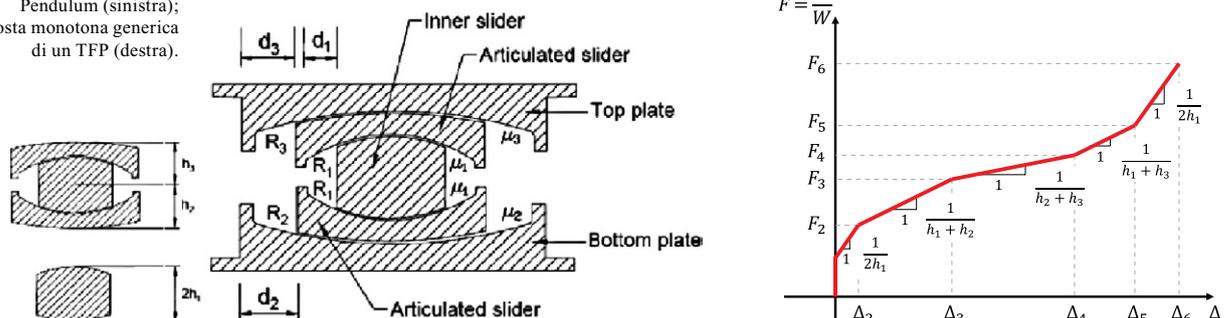
I dispositivi a superficie singola possono anche essere efficaci nei casi in cui è desiderabile consentire una rotazione (che avviene sulla superficie secondaria, con minor raggio di curvatura) senza uno spostamento relativo significativo. Questo potrebbe essere il caso di un ponte a campata singola semplicemente appoggiata, che deve poter ruotare per adattarsi ai carichi da traffico. Chiaramente, la presenza di una cerniera all'interno del cursore di un DCFP consente anche una rotazione relativa. Tuttavia, la presenza di un'articolazione all'interno del cursore aggiunge un grado di libertà al sistema, che può comportare un ritorno apparente alla posizione originale delle superfici superiore e inferiore, mentre in realtà il cursore si trova in una posizione differente da quella originaria. Questa situazione è ovviamente impossibile nel caso di un cursore solido (non articolato), a causa della compatibilità geometrica. Per lo stesso motivo, anche con proprietà nominali identiche sulla superficie di scorrimento inferiore e superiore, una cerniera interna può favorire uno spostamento relativo su una sola superficie. Questo tipo di problemi è ancora più significativo nei dispositivi con un numero maggiore di superfici scorrevoli, come discusso nella prossima sezione.

5.2 Triple Friction Pendulum

La principale limitazione che colpisce i sistemi FP standard è legata all'impossibilità di ottenere prestazioni ottimali per più di un livello di scuotimento del terreno (Fenz e Constantinou, 2008). I ricercatori hanno identificato la risposta a questa restrizione in dispositivi capaci di un "comportamento adattivo". L'espressione "comportamento adattivo" si riferisce a sistemi in cui la rigidità, l'attrito effettivo e le proprietà di smorzamento cambiano come desiderato, in corrispondenza di ampiezze di spostamento laterale controllabili. Il vantaggio principale di questo tipo di risposta è che un determinato sistema di isolamento può essere ottimizzato per più obiettivi prestazionali e/o più livelli di scuotimento del terreno. Va notato che, in alcune situazioni specifiche, questo comportamento può essere ottenuto attraverso i sistemi DCFP. Tuttavia, per migliorare ulteriormente il dispositivo DCFP, è stato introdotto il Triple Friction Pendulum (TFP) (Morgan, 2007).

Come il DCFP, il TFP è un'estensione del dispositivo FP standard. Consiste di quattro superfici scorrevoli sferiche, due piastre scorrevoli e un cursore rigido, come abbozzato in Figura 7.

Figura 7
Sezione di un Triple friction Pendulum (sinistra);
Risposta monotona generica di un TFP (destra).



Il comportamento adattivo del TFP deriva dalle diverse combinazioni di scorrimento che possono verificarsi sulle sue molteplici superfici concave. Il movimento risultante si verifica in un massimo di cinque regimi di scorrimento, che dipendono dalla combinazione delle superfici che subiscono lo scorrimento. La sequenza dei regimi di scorrimento è funzione dei coefficienti di attrito che caratterizzano le varie superfici di scorrimento e del rapporto tra la capacità di spostamento delle superfici e il loro raggio di curvatura. La risposta monotona generica di un TFP è mostrata in Figura 7.

Indagini approfondite sul comportamento dei TFP, inclusi lo sviluppo di un modello analitico adatto a descrivere la loro risposta ciclica e le verifiche sperimentali del loro comportamento, sono state condotte per la prima volta da (Fenz e Constantinou, 2008a; Fenz e Constantinou, 2008b e Morgan, 2007). I dettagli relativi alla costruzione, alle relazioni forza-spostamento e ai relativi parametri di interesse, possono essere trovati nelle pubblicazioni originali.

In generale, i risultati riportati in seguito a queste prime indagini hanno mostrato una superiorità dei dispositivi TFP rispetto ai sistemi FP e DCFP. In particolare, una proprietà notevole del TFP è la sua efficacia nel limitare gli spostamenti del sistema di isolamento in caso di terremoti molto rari, mantenendo al contempo la capacità di controllare gli spostamenti interpiano e le accelerazioni per livelli di scuotimenti bassi e moderati.

Le capacità dimostrate dal TFP, insieme alla relativa semplicità di questo sistema (consistente in un sistema passivo che utilizza una tecnologia affidabile), hanno ulteriormente stimolato l'interesse della comunità scientifica, portando ad ulteriori indagini che sono state condotte principalmente negli Stati Uniti, in Giappone e a Taiwan.

Nuove prove numeriche e sperimentali (compresi i test su tavola vibrante a scala reale, per esempio Ryan et al., 2015) hanno portato a una migliore comprensione del comportamento dell'isolatore TFP e, a sua volta, allo sviluppo di modelli più raffinati per descriverne la risposta dinamica. Fra questi sono inclusi per esempio, il modello cinematico bidirezionale sviluppato da Becker e Mahin (2012) e, più recentemente, la revisione del modello proposta da Sarlis e Constantinou (2016).

È stata inoltre fornita una guida per la modellazione dei dispositivi TFP nel contesto dell'analisi time-history non lineare. A tal fine, Fenz e Constantinou (2008) ha descritto come ottenere la relazione generale di forza-spostamento del TFP mediante l'uso di tre isolatori FP singoli in serie, che a loro volta possono essere modellati utilizzando il modello non-lineare di tipo Bouc-Wen sviluppato per il dispositivo FP standard (Nagarajaiah et al., 1991). Come discusso per il DCFP, mentre questo approccio di modellazione può essere implementato in quasi tutti i software ad elementi finiti disponibili, mentre un elemento 3D autonomo per la loro idealizzazione è al momento disponibile in OpenSees (Dao et al., 2013).

I dispositivi TFP, che sono stati utilizzati per proteggere un certo numero di strutture in tutto il mondo (ad esempio il nuovo ospedale di Mills-Peninsula Health Services, in California), sono stati impiegati con successo anche in Europa. Ciò è particolarmente vero in Turchia, dove sono utilizzati come misure di protezione antisismica per un certo numero di strutture, tra cui l'aeroporto internazionale Sabiha Gokcen (Zekioglu et al., 2009) e diversi edifici ospedalieri (ad esempio l'ospedale di Istanbul Okmeydanı, l'Istanbul Göztepe Hospital, l'ospedale Kartal Lütfi Kırdar, l'Adana Health Complex e l'ospedale Elazığ) (Erdik, 2017).

5.3 Limitazioni delle prestazioni dei dispositivi ad attrito

Vi è un accordo generale sul fatto che l'isolamento sismico consenta di migliorare le prestazioni di strutture sottoposte a diverse tipologie di scuotimento sismico. Questo miglioramento deriva dall'aumento del periodo fondamentale di vibrazione della struttura e dall'aggiunta di una componente di smorzamento al sistema. Di conseguenza, gli isolatori di base contribuiscono a ridurre le forze laterali indotte dal terremoto e trasferite alla sovrastruttura, limitando le accelerazioni e gli spostamenti a vantaggio sia delle componenti strutturali che di quelle non strutturali (con alcune incertezze associate agli effetti dei modi di vibrare superiori; (Calvi, 2014; Calvi e Sullivan, 2014; Calvi e Ruggiero, 2017). In generale, ciò vale per tutti i tipi di isolatori di base, compresi i dispositivi FP, e gli isolatori DCFP e TFP. I molteplici vantaggi dell'isolamento alla base sono stati discussi nelle sezioni precedenti e documentati da molti autori, pertanto non saranno discussi in dettaglio qui. Tuttavia, vengono fornite alcune considerazioni sull'efficacia dei dispositivi ad attrito, con particolare riferimento ai dispositivi multi-superficie e al raggiungimento di obiettivi prestazionali multipli.

I terremoti possono indurre sia accelerazioni orizzontali che verticali. Queste dovrebbero essere trattate separatamente, perché i dispositivi ad attrito forniscono una risposta significativamente diversa in queste due direzioni. A tal fine, nella Sezione 7.1 viene fornita una dettagliata discussione sugli effetti delle accelerazioni verticali.

Le strutture isolate mediante isolatori con comportamento rigido-lineare (come i dispositivi FP e DCFP con determinate proprietà) sono normalmente progettate per ottenere una determinata prestazione, per un determinato livello di domanda sismica. Gli isolatori sono quindi progettati per poter assorbire una certa richiesta di spostamento durante il terremoto di progetto, garantendo che le forze e le accelerazioni trasferite alla sovrastruttura siano compatibili con i valori desiderati. Tuttavia, eventi sismici rari possono indurre richieste orizzontali che superano i valori di progetto. In questo caso, a meno che il sistema di isolamento non sia progettato con una capacità di spostamento sufficiente ad assorbire i maggiori spostamenti indotti, dando la certezza che il danno (e probabilmente il collasso) si verificherà inizialmente nella sovrastruttura, si raggiungerà la rottura degli isolatori. Sfortunatamente, sebbene con alcune eccezioni degne di nota (ad es. Bao, 2017), sono stati condotti pochissimi studi sul comportamento in condizioni estreme e sul collasso dei dispositivi ad attrito. In generale, è stato dimostrato che, per

resistere a livelli di scuotimento molto severi o indotti in prossimità delle rotture, i dispositivi tendono a diventare eccessivamente grandi, rigidi e/o resistenti il che li porta praticamente a non fornire isolamento durante gli eventi sismici più frequenti (Morgan e Mahin, 2010).

Come discusso in precedenza, questa limitazione può essere superata mediante l'impiego di isolatori multi-superficie come i dispositivi TFP. I TFP possono teoricamente essere progettati per obiettivi prestazionali multipli, grazie alla loro capacità di essere progettati per una risposta a più stadi. Ad esempio, un TFP può essere progettato per comportarsi come un FP standard quando sottoposto al terremoto di progetto, e allo stesso tempo presentare una risposta più rigida quando lo spostamento supera il valore di progetto.

A tal fine, diversi ricercatori (per esempio Morgan, 2007; e Morgan e Mahin, 2010) hanno mostrato che per terremoti moderati, i TFP sono paragonabili agli isolatori convenzionali per quanto riguarda parametri come gli spostamenti massimi degli isolatori, comportando al contempo una riduzione delle domande di spostamento interpiano e di accelerazione nella struttura. Questo suggerisce che il TFP potrebbe essere più efficace dei sistemi tradizionali di isolamento per quanto riguarda la protezione degli elementi non strutturali e del contenuto degli edifici. Inoltre, i risultati di questi studi suggeriscono che i dispositivi TFP sono in grado di fornire prestazioni stabili anche in caso di eventi molto rari, come conseguenza della loro risposta adattiva.

Queste osservazioni sono coerenti con lo scopo dei dispositivi multifase la cui risposta incorpora degli stadi finali di irrigidimento principalmente per due motivi: (i) trasferire gradualmente le forze alla sovrastruttura, piuttosto che impartire una forza d'urto e (ii) ritardare l'impatto e diminuire significativamente la velocità quando l'impatto si verifica in corrispondenza del sistema di isolamento (Becker et al., 2017).

Tuttavia, i risultati di uno studio recente (sperimentale e numerico) condotto da Becker et al. (2017) suggeriscono che il progressivo incremento di capacità nella risposta che caratterizza i TFP potrebbe essere meno vantaggioso di quanto ipotizzato inizialmente. Gli autori hanno mostrato come la fase di incrudimento possa effettivamente ridurre le forze di impatto subite dall'isolatore, ma solo quando tale fase è sufficientemente lunga. Al contrario, gli autori hanno osservato che in alcuni casi l'incrudimento nella risposta possa anche essere dannoso comportando il cedimento del dispositivo.

Sebbene gli autori riconoscano che i loro risultati richiedono ulteriori indagini prima che vengano prese decisioni riguardo alla progettazione di questi dispositivi, l'esito della loro ricerca dimostra come ancora esistano lacune nella conoscenza degli isolatori ad attrito multi-stadio.

Indipendentemente da ciò, è chiaro che la capacità di spostamento del sistema di isolamento gioca un ruolo chiave nella definizione di una probabilità di collasso (supponendo che il raggiungimento di questa richiesta di spostamento coincida con il collasso, e questo, come discusso, è una grossolana sottostima), mentre la forza di taglio trasmessa governa il potenziale di danno e di collasso locale della struttura isolata.

È interessante notare che la capacità di spostamento dei dispositivi ad attrito nordamericani sia tipicamente limitata dalla presenza di un anello di contenimento lungo il bordo del dispositivo, mentre, al contrario, in Europa, la norma EN 15129 (2010) non consente l'uso di fermi. Pertanto, gli isolatori europei hanno una capacità di spostamento potenzialmente superiore a quella specificata dal costruttore dato che il cursore ha la possibilità di spostarsi oltre il bordo della superficie di scorrimento. Sebbene non sia ideale, questa può essere una risposta accettabile durante un evento sismico raro, a condizione che il cursore attraversi il bordo della superficie di scorrimento di uno spostamento inferiore al suo raggio.

Ovviamente, il rischio associato all'assenza di un anello di contenimento è che, se sottoposto a una domanda eccessiva, il cursore possa potenzialmente perdere il contatto e cadere dalla superficie di scorrimento, con conseguenze catastrofiche. La presenza di un anello di contenimento impedirebbe che ciò accada, ma contemporaneamente ridurrebbe la capacità di spostamento effettiva del dispositivo, con la possibilità che avvenga un impatto fra il cursore e l'anello, che potrebbe comportare gravi problemi sia per l'isolatore che per la struttura isolata.

Questi aspetti e considerazioni sono particolarmente rilevanti per livelli di scuotimento superiori a quello di progetto e possono influire sulla probabilità effettiva di collasso della struttura isolata.

6. Due casi studio Europei

6.1 Il viadotto Bolu

La prima applicazione rilevante dei sistemi FP in Europa è legata al viadotto anatolico in Turchia (Priestley e Calvi, 2002). La storia di questo lungo viadotto (119 campate) può essere considerata un perfetto esempio di valutazione di problematiche di progettazione e di ricerca di soluzioni ingegnose.

Nella configurazione precedente l'adeguamento, ogni campata consisteva di quattordici travi precomprese a V semplicemente appoggiate su supporti scorrevoli (pot bearings) con una capacità di spostamento di 200 mm. In corrispondenza di ogni pila, una singola unità di dissipazione di energia (EDU), con una capacità di spostamento di 360 mm, collegava l'impalcato alla pila. La diversa capacità di spostamento degli isolatori e delle EDU sembra essere un'incoerenza all'interno della progettazione (Ghasemi et al., 2000). Nel 1999, il terremoto di Duzce (12 novembre 1999) ha colpito il ponte. La fonte del terremoto era una faglia prece-

dentemente sconosciuta che incrociava la linea del viadotto con un angolo di circa 15 gradi. La domanda di spostamento risultante dallo scorrimento lungo la faglia e dalla risposta dinamica del ponte ha superato sia la capacità degli appoggi che delle EDU. Come conseguenza, le EDU sono andate distrutte (Figura 8a) e i dispositivi di scorrimento alla fine delle travi sono stati espulsi. Impatti tra le estremità delle travi adiacenti, i blocchi di supporto delle EDU e i blocchi delle chiavi di taglio trasversali si sono verificati nella maggior parte delle campate, distruggendo molti dei blocchi e provocando danni estesi alle estremità delle travi. Ulteriori danni si sono verificati in seguito alla caduta delle travi dagli appoggi scorrevoli, anche se nessuna campata è collassata.



Figura 8
Viadotto Bolu:
(a) vista di una EDU danneggiata e perdita di appoggio della trave
(b) FP posizionato sul supporto, prima del getto del diaframma trasversale post-teso.

A causa del significativo spostamento lungo la faglia e della rottura dei sistemi di dissipazione dell'energia, sono stati osservati grandi spostamenti orizzontali residui (fino a 1100 mm longitudinalmente e 500 mm trasversalmente) in corrispondenza delle estremità delle campate. In alcuni casi, questi spostamenti erano così grandi che le estremità delle travi rimasero sospese oltre il bordo del pulvino, supportate solo dal collegamento fra campate mediante le azioni di flessione e di catenaria, aiutate dai pannelli frontali. In questi casi, sono stati anche rilevati significativi spostamenti verticali (fino a 300 mm) delle estremità delle travi indotti dal terremoto. L'accorciamento del ponte, indotto dallo scorrimento della faglia è stato ampiamente assorbito in corrispondenza dei giunti di scorrimento, non ancora installati quando il terremoto si è verificato (Ghasemi et al., 2000). All'indomani del terremoto, la sismicità locale è stata rivalutata alla luce dei nuovi dati sismologici. Ciò ha comportato un aumento significativo dell'intensità dell'accelerazione di progetto, rispetto a quella precedentemente in vigore. Pertanto, gli interventi di riparazione post-evento sono stati progettati considerando un'accelerazione di picco del terreno di 0,81 g e hanno incluso i seguenti obiettivi:

- Riposizionamento dell'impalcato sugli appoggi;
- Sollevamento della sovrastruttura di 800 mm;
- Costruzione di nuove travi di diaframma trasversali al di sopra di tutti gli appoggi per rendere continua la sovrastruttura in segmenti di 10 campate;
- Supporto delle travi di diaframma su due isolatori a pendolo per appoggio;
- Sostituzione o riparazione delle campate di collegamento e delle estremità delle travi a V danneggiate;
- Costruzione di speciali travi a diaframma in corrispondenza dei giunti di movimento con chiavi di taglio per contenere il movimento laterale relativo;
- Installazione di dispositivi sismici di blocco attraverso i giunti di scorrimento;
- Ricostruzione delle pareti trasversali delle spalle del ponte;
- Installazione di pile aggiuntive e costruzione di rivestimenti delle fondazioni in corrispondenza di sei pile.

La soluzione ideata è risultata tanto efficace, sia da un punto di vista tecnico che economico, che ha troncato la disputa in corso tra proprietario e compagnia assicurativa sulla distinzione tra riparazione e rinforzo della struttura: l'assicuratore ha accettato di pagare l'intero costo previsto, che era inferiore a quanto precedentemente previsto per la sola riparazione (Priestley e Calvi, 2002). Ciò che è rilevante in questo contesto, è che la soluzione di retrofit finale adottata è stata quella di sostituire i dispositivi pot e l'EDU su ciascuna pila, con coppie di dispositivi FP. I dispositivi FP selezionati avevano capacità di spostamento di 700 o 900 mm e sono stati collocati a supporto di un diaframma trasversale post-teso (Figura 8b). Il codice di riferimento adottato per la progettazione e il test dei dispositivi è stato AASHTO (1999), che, come discusso nella sezione 3.3 (Tabella 2), prescriveva i seguenti test sismici:

Test 3, sismico: tre cicli completi di carico a ciascuno dei seguenti multipli dello spostamento totale del progetto: 1,0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,0 e 1,25, nella sequenza mostrata.

Test 4, sismico: 20 cicli di carico a 1,0 volta lo spostamento di progetto. La prova deve essere avviata in corrispondenza di uno spostamento uguale allo spostamento di offset.

Il requisito iniziale era quindi di eseguire venti cicli completi di carico a 600 mm, iniziando il test da uno spostamento di offset di 300 mm (vale a dire: ciascun ciclo avrebbe dovuto essere eseguito da +300 mm, a +900 mm, a -300 mm, a +300 mm). La velocità media prescritta era di 0,65 m/s, il che significa che una distanza relativa totale di 48 m, avrebbe dovuto essere percorsa in 74 s. Questi requisiti hanno innescato ampie discussioni, poiché era evidente che nessun isolatore Friction Pendulum potesse sopravvivere a tale protocollo di test, senza aspettare tempi di inattività adeguati per il raffreddamento tra i cicli (vedere Sezione 3.3). Vale la pena notare che nessuno scuotimento del terreno “ragionevole” indurrebbe una richiesta di spostamento su un dispositivo di isolamento di base, vicino a quello imposto dai protocolli di test del codice. All’epoca, ciò è stato dimostrato attraverso un’ampia serie di analisi time-history non lineari; in conclusione sono stati raggiunti dei compromessi ragionevoli per lo sviluppo dei test. Più specificamente, è stato adottato un protocollo di prova costituito da strisce di quattro cicli, intervallate da un tempo sufficiente per raffreddare i dispositivi.

6.2 Il Progetto C.A.S.E.

Nei primissimi giorni successivi al terremoto de L’Aquila del 9 aprile 2009, si è deciso di cercare di evitare, o ridurre significativamente, la costruzione di strutture temporanee a favore di edifici altamente tecnologici, da utilizzare per una durata di “vita” standard, eventualmente con una successiva modifica della loro destinazione d’uso.

Pertanto, è stato avviato il Progetto C.A.S.E. (Complessi Antisismici Sostenibili Ecocompatibili) che prevedeva la costruzione di 186 edifici, per un totale di 4449 appartamenti, in grado di ospitare circa 15.000 persone. La componente più critica del progetto era il tempo di realizzazione. Infatti, la selezione di siti adeguati, la loro valutazione, la progettazione e la costruzione degli edifici, ecc. dovevano essere tutti eseguiti in circa sei mesi.

Fu subito evidente che l’unico modo per completare con successo il progetto fosse quello di impiegare tutte le risorse disponibili, impiegando numerosi materiali, tecniche e tecnologie di costruzione diverse. Alla luce di tutto questo, e considerando che tutti gli edifici dovevano essere eretti in zone ad alta sismicità, divenne presto chiaro che il modo più efficace per proteggere queste strutture dagli effetti di terremoti futuri fosse quello di utilizzare l’isolamento alla base. Oltre a garantire elevate prestazioni rispetto all’azione sismica, il passaggio ad una soluzione con isolamento alla base ha avuto il notevole vantaggio di ridurre drasticamente il numero e la rilevanza delle variabili di progettazione (Calvi e Spaziante, 2009).

Sebbene discutere i molti aspetti critici di questo progetto senza precedenti vada al di là dello scopo di questo articolo, è importante sottolineare che, al termine del progetto, il numero totale di isolatori installati era 7328. Questo numero estremamente elevato ha fatto dell’intervento de L’Aquila la più importante esperienza reale di costruzione di edifici isolati alla base.

Le proprietà generali selezionate per i sistemi di isolamento alla base erano le seguenti:

- Capacità di spostamento $\Delta d = 260$ mm;
- Coefficiente di attrito $\mu = 3\%$;
- Raggio di curvatura $R = 4$ m;
- Smorzamento equivalente $\xi_e > 20\%$;
- Capacità di carico verticale $W > 2820$ kN.

Era consentita una tolleranza di $\pm 20\%$ su questi parametri.

Due produttori di isolatori sismici hanno risposto al bando di gara con procedura aperta, dimostrando la capacità di soddisfare tutte le specifiche richieste. Uno di essi ha proposto l’impiego di dispositivi a singola superficie scorrevole con un materiale a basso attrito derivato dalla poliammide, garantendo che tutti i parametri di prestazione richiesti sarebbero stati soddisfatti. L’altro produttore ha proposto l’uso di isolatori a doppia superficie di scorrimento, realizzati con materiali a base di polietilene, assicurando che tutti i parametri di prestazione richiesti sarebbero stati soddisfatti, ad eccezione del coefficiente di attrito, che sarebbe stato approssimativamente pari al 4% piuttosto che al 3%. Questa discrepanza è stata ritenuta accettabile in accordo con il cliente.

Sono state eseguite un gran numero di prove sperimentali relative al sistema di isolamento: 380 dispositivi sono stati sottoposti a vari test dinamici (presso Eucentre), 1105 dispositivi sono stati testati staticamente, sotto vari livelli di carico verticale, presso i siti di produzione (sotto il controllo di laboratori pubblici ufficiali) e 15 edifici reali sono stati testati dinamicamente in sito, utilizzando attuatori installati tra la piastra isolata e la sommità delle colonne (Figura 9). Questo ultimo tipo di prova ha permesso di valutare la risposta di un totale di 600 dispositivi (40 dispositivi per edificio) e ovviamente ha permesso di includere effetti reali come la complessiva risposta dell’edificio e la conseguente redistribuzione dei carichi verticali e delle forze di taglio fra i dispositivi.

Vale la pena notare che il sistema di isolamento è stato progettato senza conoscere le effettive caratteristiche degli edifici, quindi considerando ampie gamme di possibili pesi, rigidzze e periodi fondamentali di vibrazione. Tuttavia, i carichi verticali reali medi su un dispositivo erano compresi tra 500 e 1000 kN, vale a dire nell’intervallo del $\pm 30\%$ del carico verticale massimo ipotizzato. Inoltre, le velocità che un isolatore di base che risponde a un evento sismico può sperimentare possono variare in modo significativo. Ad esempio, un appoggio con un periodo di vibrazione efficace $T = 4$ s, soggetto a cicli completi di carico con spostamento massimo ± 260 mm, ha una velocità media di 260 mm/s, e una velocità massima teorica di 408



Figura 9
Test in situ di un edificio isolato de L'Aquila.

mm/s. Tuttavia, in realtà, il periodo di vibrazione varia continuamente e ogni ciclo di spostamento dipende dalle caratteristiche dello scuotimento del terreno.

Pertanto, durante le prove sperimentali, sono stati considerati diverse velocità e livelli di forza assiale, per tenere conto di tutti gli scenari possibili. La variabilità dei risultati in funzione della pressione di contatto e della velocità è stata in qualche modo sorprendente, mostrando le seguenti caratteristiche principali:

- Il coefficiente di attrito all'inizio del moto era compreso tra il 10% e il 15%.
- Il coefficiente di attrito a bassa velocità (cioè velocità inferiore a 50 mm/s) era circa il 5-6% per la poliammide e l'8-9% per il polietilene, in corrispondenza di una forza verticale intorno a 2000 kN e aumentava all'8-12% e al 14-19%, rispettivamente, con una forza verticale intorno a 500 kN.
- Il coefficiente di attrito ad alta velocità ha mostrato variazioni relativamente basse ($\pm 10-20\%$ rispetto al valore medio) quando la velocità variava tra 100 e 300 mm/s, ma è apparso essere sensibile al carico verticale applicato, con valori attorno al 3% a 2000 kN e al 4,5% a 500 kN per la poliammide e valori pari circa a 5-6% a 3000 kN che sale a 8-10% a 1000 kN e anche vicino al 15% a 500 kN per il polietilene.
- I valori di smorzamento equivalente stimati per l'intervallo effettivo di possibili carichi verticali e di velocità erano nell'intervallo del 15-25% per la poliammide, ma significativamente più elevati di quelli prescritti per il polietilene, con valori osservati compresi tra il 25% e il 45%.

Grafici che mostrano valori approssimati del coefficiente di attrito in funzione del carico verticale e della velocità, sono illustrati in Figura 10. Come discusso, i dispositivi con materiale di scorrimento a base polietilene sono generalmente caratterizzati da un coefficiente di attrito più elevato (e di conseguenza da uno smorzamento equivalente più elevato) e da una variazione più uniforme dell'attrito con la velocità e la pressione di contatto. I dispositivi basati su poliammide presentano una variazione decisamente più elevata del coefficiente di attrito apparente a bassa pressione di contatto e bassa velocità, tipica del fenomeno di stick-slip.

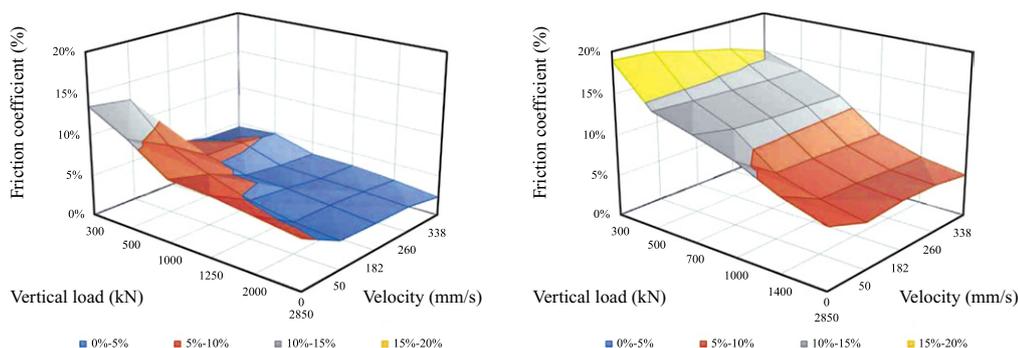


Figura 10
Variazione del coefficiente di attrito in funzione del carico verticale e della velocità nei dispositivi utilizzati a seguito del terremoto de L'Aquila (sinistra Poliammide a destra Polietilene).

In seguito a questi dati, è diventato fondamentale valutare gli effetti di questi fenomeni inaspettati / indesiderati sul livello di danno atteso e, infine, sulla probabilità di collasso, sia dei sistemi di isolamento alla base che degli edifici.

Sono state quindi condotte delle analisi più raffinate degli edifici isolati alla base, includendo nei modelli numerici aspetti che erano stati trascurati durante le fasi preliminari di progettazione. Tutti gli edifici sono stati modellati in base alle loro caratteristiche reali, considerando la loro massa, rigidità e le condizioni locali del suolo, e la loro risposta è stata rivalutata tramite analisi dinamiche non-lineari. L'input per le analisi consisteva in un set di sedici coppie di accelerogrammi compatibili con lo spettro di progetto.

È stata creata una struttura parametrica completa per garantire che tutte le possibili combinazioni di parametri venissero considerate. Le variabili rilevanti includevano:

- Materiali strutturali: calcestruzzo, acciaio e legno;
- Sistemi resistenti laterali: telai flessionali e pareti a taglio;
- Massa: il rapporto tra la massa più grande e la massa più piccola della struttura era uguale a 3;
- Condizioni del suolo.

I risultati delle analisi hanno indicato che la richiesta di spostamento sugli isolatori era sempre sostanzialmente inferiore allo spostamento di progetto (260 mm), con valori massimi nell'ordine di 190 mm.

Nonostante i coefficienti di attrito che caratterizzano i dispositivi di isolamento fossero decisamente più alti di quanto previsto (sia statici che dinamici), le analisi hanno mostrato come la resistenza degli edifici fosse comunque adeguata. La maggior parte dei rapporti capacità-domanda osservati per gli edifici variava tra 1,0 e 1,6, con il valore più alto registrato pari a 2,3. Tuttavia, questo risultato è stato in parte attribuito alla resistenza reale degli edifici, generalmente superiore al valore minimo di progetto prescritto. Anche gli spostamenti di interpiano risultanti sono variati, generalmente tra lo 0,1% e lo 0,2%, con valori di picco mai superiori allo 0,4%. I valori tipici del taglio di base sono risultati fortemente dipendenti dal periodo di vibrazione degli edifici, con valori compresi tra il 10% e il 25% del peso dell'edificio per periodi compresi tra 0,1 e 0,3 s.

I test in-situ discussi in precedenza, hanno fornito risultati sostanzialmente in linea con le evidenze numeriche. Il sistema di test ha permesso l'applicazione di un mezzo ciclo di carico, a spostamento massimo e velocità pari circa a 250 mm/s (velocità di progetto).

I risultati dei test hanno evidenziato un intervallo molto uniforme di periodi di vibrazione degli edifici, con un periodo medio di 0,21 s (con una deviazione standard $\sigma = 0,05$ s) considerando la risposta in entrambe le direzioni. Dato che le masse degli edifici variavano fra loro di un fattore fino a 3, era evidente che gli edifici con massa maggiore erano caratterizzati da una maggiore rigidità. L'accelerazione registrata alla base durante i test non ha mai superato 0,09 g, mentre le accelerazioni massime registrate ai piani dell'edificio sono state approssimativamente uguali a 0,16 g.

Benché questi risultati non abbiano avuto conseguenze pratiche per il progetto, hanno sollevato una serie di spunti interessanti:

- La dipendenza del coefficiente di attrito dalla pressione di contatto e dalla velocità dovrebbe essere ulteriormente studiata e possibilmente ridotta, sviluppando nuovi materiali. In questo contesto, gli effetti relativi alla variazione di temperatura dovrebbero essere considerati e pienamente compresi.
- I valori corretti del coefficiente di attrito dovrebbero essere utilizzati nella verifica della risposta globale, considerando intervalli appropriati di variazione della pressione di contatto e della velocità, insieme agli effetti stick-slip.
- I valori limite superiore e inferiore del coefficiente di attrito devono essere sempre adottati per stimare la richiesta di spostamento massima, ma in particolare il taglio alla base dell'edificio e le richieste di spostamento interpiano.
- Modelli numerici raffinati di ciascun dispositivo, che includano la variazione locale dell'attrito nelle diverse posizioni lungo l'interfaccia scorrevole, i momenti interni di flessione e torsione e la rotazione, potrebbero fornire una maggiore conoscenza della reale risposta globale.
- I test sui materiali e le prove di qualificazione e accettazione dei dispositivi di isolamento dovrebbero essere eseguiti considerando l'ampia variazione della pressione di contatto e della velocità, per caratterizzare l'intera potenziale risposta.

Molte di queste considerazioni non sembrano essere state pienamente adottate, nella ricerca e nella pratica, circa sette anni dopo.

7. Problematiche aperte e sviluppi attuali

7.1 Risposta alle azioni verticali

Azioni verticali possono insorgere nelle strutture durante gli eventi sismici, come conseguenza delle azioni di ribaltamento derivanti dalle forze laterali indotte dal terremoto, e dalle componenti di accelerazione verticale che caratterizzano lo scuotimento sismico. L'importanza delle azioni verticali nella risposta delle strutture isolate alla base con sistemi ad attrito è stata studiata, direttamente e indirettamente, da vari autori (ad es. Zayas et al., 1987; Calvi et al., 2004; Constantinou et al., 1993; Mosqueda et al., 2004; Fenz e Constantinou, 2008; Morgan e Mahin, 2011; Ryan et al., 2012 e Ryan et al., 2016). Sebbene risultati piuttosto contrastanti emergano dai dati disponibili in letteratura, la tendenza generale può essere riassunta come segue: benché gli isolatori scorrevoli siano eccellenti strumenti per proteggere gli edifici dagli effetti delle componenti orizzontali dello

scuotimento sismico, la presenza di azioni verticali può compromettere la funzionalità, riducendo la loro efficacia e compromettendone le prestazioni.

A tal fine, le azioni verticali dovute agli effetti di ribaltamento e quelle indotte dalla presenza di componenti verticali del moto sismico sono in qualche modo fenomeni distinti e devono essere discussi separatamente.

Gli effetti di ribaltamento sono di solito un problema nelle strutture snelle, con ampi rapporti altezza-larghezza e negli edifici che hanno isolatori al di sotto di colonne controventate o di pareti rigide (Roussis e Constantinou, 2006), così come in certi tipi di ponti con grandi rapporti tra l'altezza del centro di massa e la distanza in pianta tra i dispositivi (Calvi et al., 2004). Nelle strutture con queste caratteristiche, l'azione di ribaltamento indotta dalle forze laterali può essere significativa, con conseguenti importanti variazioni delle pressioni verticali di contatto (illustrate in Figura 11) e, in alcuni casi estremi, con il sollevamento degli isolatori.

In precedenza è stato discusso come la risposta degli isolatori alla base ad attrito, come i dispositivi FP, sia fortemente dipendente dal carico verticale agente sul dispositivo e dal coefficiente di attrito che caratterizza il contatto tra il cuscinetto e la superficie di scorrimento. I dispositivi FP si comportano in modo sostanzialmente rigido fino a quando la forza di taglio agente risulta inferiore al carico verticale sul dispositivo, moltiplicato per il coefficiente di attrito statico. All'attivazione, la resistenza al taglio del dispositivo aumenta proporzionalmente allo spostamento laterale e al rapporto tra il carico verticale agente e il raggio di curvatura della superficie di scorrimento.

In questo contesto, le azioni di ribaltamento, che possono aumentare o diminuire il carico verticale iniziale sul dispositivo, influenzano inevitabilmente il suo comportamento. In particolare, la variazione del carico verticale (e a sua volta della pressione di contatto verticale) può influire significativamente sulla forza di attivazione del dispositivo, sulla sua rigidità post-attivazione e sulle proprietà di attrito del dispositivo.

In tal senso, risultati sperimentali relativi a oltre 1000 test eseguiti su isolatori ad attrito, tra cui dispositivi FP singoli e doppi, hanno mostrato come carichi verticali inferiori (cioè pressioni di contatto inferiori) risultino in coefficienti di attrito più elevati e più "instabili". Al contrario, carichi verticali più elevati (cioè pressioni di contatto più elevate) tendono a produrre coerentemente valori di coefficiente di attrito più bassi (Barone et al., 2017). Questo è mostrato in Figure 4 e 10, dove gli andamenti evidenziano come valori stabili del coefficiente di attrito possano essere ottenuti solo quando la pressione di contatto sui dispositivi è superiore a circa 50 MPa.

Tutto ciò può comportare una serie di effetti indesiderati, tra i quali:

- Dispositivi che lavorano in parallelo, sottoposti a carichi verticali diversi, presentano un comportamento diverso, risultando in una risposta non uniforme e magari meno controllabile del sistema di isolamento alla base
- A causa dell'alta variabilità del valore del coefficiente di attrito a basse pressioni di contatto, dispositivi sottoposti a identici, ma bassi valori di carico verticale possono mostrare un comportamento analogo a quello descritto nel punto precedente
- Dispositivi soggetti a carichi verticali significativamente più elevati tendono a fornire una resistenza laterale superiore rispetto ad altri. Questo potrebbe causare concentrazioni di sollecitazioni e danneggiamenti locali. Inoltre, alcuni elementi strutturali protetti potrebbero essere soggetti a importanti incrementi della domanda e nella struttura potrebbero insorgere effetti torsionali
- Dispositivi soggetti a pressioni di contatto verticali eccessive (ad esempio molto più elevate dei valori di progetto) potrebbero subire malfunzionamenti o guasti
- Potrebbe verificarsi una perdita di contatto tra i cuscinetti e la superficie di scorrimento (ovvero un sollevamento) in dispositivi sottoposti a carichi verticali "di trazione" eccessivi. Questo potrebbe avere una serie di implicazioni che saranno discusse in maggior dettaglio nella prossima sezione.

Le problematiche associate alle componenti verticali di accelerazione di un terremoto sono normalmente più rilevanti nelle zone epicentrali, ma possono essere presenti anche in altri tipi di eventi. Sebbene spesso considerate secondarie, le componenti di scuotimento verticale possono essere caratterizzate da valori PGA molto elevati e causare danni estesi al costruito.

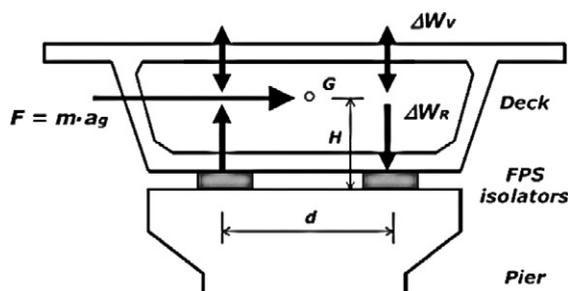


Figura 11
Ribaltamento indotto dalla variazione di forza assiale in dispositivi utilizzati su ponti (Calvi et al., 2004).

Ad esempio, la PGA verticale registrata durante il terremoto di Christchurch di M_w 6.2 nel 2011 ha raggiunto valori fino a 2,2 g (Kaiser et al., 2011).

I risultati emersi da alcuni degli studi sperimentali disponibili e eseguiti su strutture a scala ridotta, isolate alla base con dispositivi a superficie sferica singola e multipla, sembrano suggerire che lo scuotimento verticale abbia un'influenza minima sulla risposta orizzontale e sulle prestazioni dei dispositivi ad attrito (ad esempio Morgan e Mahin, 2010 e Fenz e Constantinou, 2008). Tuttavia, questo risulta in contrasto con i risultati ottenuti in recenti programmi di prove sperimentali eseguiti su edifici isolati a scala reale, condotti presso la tavola vibrante di E-Defense in Giappone (Ryan et al. 2012; Ryan et al., 2016; Lew e Hudson, 1999). Più in particolare, uno dei principali risultati di questi studi è stato identificare l'influenza significativa dello scuotimento verticale sulla prestazione complessiva degli edifici e l'amplificazione delle accelerazioni orizzontali registrate ai vari livelli dell'edificio come conseguenza dello scuotimento multidirezionale.

Si è osservato come le accelerazioni verticali siano particolarmente dannose per gli elementi non strutturali che non sembrano beneficiare in modo significativo della presenza del sistema di isolamento alla base. Inoltre, gli esiti dei programmi sperimentali hanno suggerito che il moto verticale trasmesso ai vari livelli dell'edificio e, di conseguenza, agli elementi non strutturali e al contenuto sia relativamente insensibile alle condizioni di base. Ciò significa che le strutture isolate alla base con dispositivi ad attrito e i sistemi a base fissa hanno una risposta analoga agli scuotimenti verticali.

Questo risultato è coerente con le conclusioni emerse dall'analisi delle accelerazioni verticali registrate, a vari livelli di edifici isolati alla base, durante eventi sismici reali, come il terremoto di Northridge del 1994. Ad esempio, dopo aver esaminato diversi edifici strumentati, Lew e Hudson (1999) concluse che le accelerazioni verticali trasmesse dal suolo ai piani superiori non erano influenzate dalla presenza del sistema di isolamento e che le strutture si comportavano essenzialmente come sistemi a base fissa.

Questi risultati possono essere attribuiti all'elevata rigidità verticale che caratterizza i dispositivi ad attrito, che implica un periodo di vibrazione verticale del sistema isolato intorno a 0,03 s (Warn e Ryan, 2012). È evidente che i sistemi con queste caratteristiche forniscono solo un isolamento orizzontale, mentre si comportano come fissi rispetto agli scuotimenti verticali.

7.2 Sollevamento

I tradizionali dispositivi ad attrito non offrono resistenza alle forze di trazione e sono quindi liberi di sollevarsi. Il sollevamento del dispositivo può verificarsi in determinate condizioni che comprendono la presenza di accelerazioni verticali elevate e/o un'azione di ribaltamento significativa. Ciò può produrre effetti negativi per gli isolatori o per le prestazioni della struttura protetta, che possono manifestarsi, fra i molti altri, sotto forma di danni agli isolatori causati da forze di compressione eccessivamente grandi derivanti dall'impatto successivo al sollevamento o di amplificazioni della domanda sugli elementi strutturali. Gli autori non sono a conoscenza di rotture di isolatori ad attrito, causate da fenomeni di sollevamento durante terremoti reali, che siano state documentate. Sebbene non ampiamente, le problematiche legate al sollevamento sono state studiate e osservate sperimentalmente, tramite test su tavola vibrante, negli Stati Uniti e in Giappone.

Ad esempio, il sollevamento in dispositivi a pendolo multi-superficie è stato osservato sperimentalmente da Tsai CS et al. (2005), durante un test tri-direzionale in condizioni estreme su tavola vibrante. In questo test, gli autori hanno registrato un picco di sollevamento di 17 mm, in corrispondenza del quale era ben visibile una separazione tra la superficie concava superiore e il materiale di scorrimento. È interessante notare come il sistema di isolamento non abbia mostrato alcun segno di malfunzionamento successivamente al sollevamento, comportandosi come previsto per il resto del programma di test, senza la necessità di alcuna riparazione.

Conclusioni analoghe sono state tratte da Morgan e Mahin (2011), che ha osservato sollevamenti di breve durata ($<0,25$ s) in dispositivi Triple Friction Pendulum durante una serie di test armonici condotti su provini di edifici snelli. Coerentemente con i risultati di Fenz e Constantinou (2008) e Morgan e Mahin (2011) ha riferito che il comportamento ciclico di un TFP non sembra peggiorare o variare in modo significativo dopo il sollevamento. Infatti, l'assemblaggio del cursore è apparso intatto e l'isteresi dell'isolatore non è stata influenzata dal sollevamento, a parte per una riduzione localizzata del taglio orizzontale dovuta all'interazione tra il taglio e il carico assiale supportato per via dell'attrito.

Il sollevamento simultaneo di 9 Triple Friction Pendulum è stato osservato da Ryan et al. (2016), durante il test in scala reale di un edificio in acciaio di cinque piani isolato, eseguito sulla tavola vibrante dell'E-Defense. Il sollevamento degli appoggi e il conseguente rimbalzo dell'intero edificio sulla tavola vibrante, è stato indotto da un significativo impulso di accelerazione verticale con $PGA = 1,3$ g. La principale conseguenza di questo intenso scuotimento verticale è stata l'insorgere di una serie di picchi di accelerazione ad alta frequenza che hanno notevolmente amplificato l'accelerazione della tavola nelle colonne di tutti i piani (fino a un fattore 7 nelle colonne del piano superiore). Tuttavia, questo scuotimento ad alta frequenza non è stato trasmesso ai solai e non sembra aver causato danni agli elementi strutturali o al contenuto dell'edificio. Le accelerazioni verticali e il sollevamento dei dispositivi sono stati adeguatamente assorbiti dalla struttura e dal sistema di isolamento, senza conseguenze degne di nota. Nel complesso, le evidenze sperimentali raccolte finora sembrano suggerire che il sollevamento degli isolatori ad attrito durante un terremoto possa non rappresentare un problema significativo. Tuttavia, tale dichiarazione va fatta con cautela, a causa delle informazioni molto limitate disponibili sull'argomento. In particolare perché, i sollevamenti documentati in letteratura sono

stati caratterizzati da durate molto brevi (frazioni di secondo) e da piccole ampiezze di separazione. Inoltre, il sollevamento era essenzialmente verticale, con i dispositivi che non subivano movimenti laterali mentre le parti non erano in contatto. In queste particolari circostanze, il sollevamento sembra non avere alcun effetto negativo sulla prestazione generale dell'isolatore.

Tuttavia, in circostanze più estreme, il sollevamento potrebbe avere conseguenze più gravi. Ad esempio, il sollevamento potrebbe essere catastrofico, nel caso in cui la distanza di separazione fra le parti del dispositivo superi l'altezza dell'anello di contenimento (se presente) e/o in situazioni in cui la parte superiore e inferiore dei dispositivi abbiano perso il contatto durante una fase di movimento laterale relativo (Fenz e Constantinou, 2008). Anche se questo ed altri comportamenti non sono mai stati osservati, e le strutture sismicamente isolate sono attualmente progettate in modo tale che il sollevamento dei dispositivi a scorrimento sia largamente evitato (ad es. verificando tramite analisi dinamiche non lineari che nessun dispositivo sperimenti carichi di trazione durante un evento sismico di progetto multidirezionale o mediante l'uso di dispositivi con capacità di resistenza a trazione, come discusso nella prossima sezione), la possibilità di gravi problematiche dovute al sollevamento dovrebbe essere analizzata all'interno di studi futuri.

7.3 Capacità di assorbimento della trazione

In risposta alle problematiche discusse nelle sezioni precedenti, diversi autori hanno esplorato la possibilità di sviluppare dispositivi per l'isolamento alla base dotati di una certa capacità di assorbimento della trazione e sono stati proposti numerosi meccanismi per la limitazione del sollevamento.

In questa sezione viene fornita una breve rassegna dei sistemi di prevenzione dal sollevamento implementati o proposti per l'uso con appoggi a scorrimento. Per una discussione più approfondita sull'argomento, il lettore può fare riferimento al lavoro di Roussis (2009).

Il primo meccanismo di limitazione dal sollevamento che potrebbe essere teoricamente implementato in parallelo a diversi tipi di dispositivi scorrevoli, è stato sviluppato da Sumitomo Construction (1990) in Giappone. Questo sistema è costituito da due bracci in acciaio, ortogonali, collegati rispettivamente alla soletta di base della sovrastruttura e alla fondazione della struttura. Questi bracci, normalmente non in contatto tra loro, si incastrano nel caso in cui la struttura subisca un sollevamento superiore a una tolleranza predefinita. Anche se l'impatto di questo meccanismo sul comportamento del sistema di isolamento non è stato studiato in dettaglio (Roussis, 2009), questa tecnologia è stata utilizzata nell'edificio Excel 10 Minami Koshigaya a Koshigaya City. Nagarajaiah et al. (1992) hanno condotto uno studio sperimentale per valutare la possibilità di usare un sistema di isolamento a scorrimento con dispositivi di limitazione del sollevamento in edifici di media altezza soggetti al sollevamento dei pilastri. Il sistema di isolamento consisteva in appoggi scorrevoli piani in Teflon che agivano in parallelo a una serie di unità a molla elicoidale, destinate a fornire forze di centraggio (Constantinou et al., 1991). Il meccanismo di limitazione del sollevamento era fornito da profili in acciaio a L, imbullonati alla parte superiore e estesi al di sotto della parte inferiore del cursore su due lati, come mostrato in Figura 12a.

I risultati dei test su tavola vibrante e delle analisi numeriche eseguite hanno dimostrato l'efficacia di questo sistema nel resistere alle forze di trazione, prevenendo il sollevamento del dispositivo. Questo concetto è stato successivamente esteso a dispositivi scorrevoli con superficie curva, ed è stato impiegato come misura di protezione sismica in strutture reali (ad esempio, nella struttura di ingresso di San Francisco all'Oakland Bay Bridge, Figura 12b).

Tuttavia, questo approccio è stato concepito, implementato e verificato solo per uno scuotimento unidirezionale. L'estensione a scenari multidirezionali di questo meccanismo è complessa e di conseguenza il suo campo di applicazione è piuttosto limitato. Logiadis et al. (1996) ha proposto di risolvere i problemi di sollevamento degli isolatori combinando i dispositivi di isolamen-

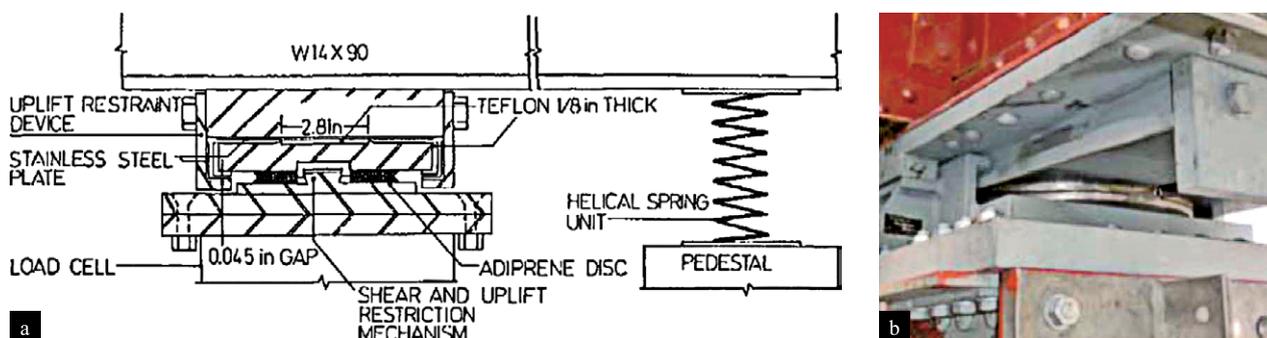


Figura 12

(a) Sezione di appoggi scorrevoli piani in Teflon con meccanismo di limitazione del sollevamento e unità a molla elicoidale (adattato da Nagarajaiah et al., 1992); (b) Foto di un dispositivo FP unidirezionale con meccanismo di limitazione al sollevamento installato sulla struttura di ingresso di San Francisco all'Oakland Bay Bridge (adattato da Roussis, 2009).

to sismico comuni con coppie di cavi verticali pretensionati, situati sui lati del dispositivo (Figura 13). Questa tecnica è stata inizialmente proposta per essere utilizzata con appoggi elastomerici, ma teoricamente può essere adottata con tutti i tipi di sistemi di isolamento, inclusi i dispositivi a scorrimento, essendo esterna al meccanismo del sistema di isolamento.

L'idea alla base degli "isolatori sismici precompressi" è piuttosto semplice: i cavi pretensionati sono utilizzati per fornire sufficiente forza aggiuntiva di compressione sui dispositivi, così da evitare lo sviluppo di forze di trazione al loro interno o il loro sollevamento. Tuttavia, sebbene sia teoricamente efficace e prevedibile nel comportamento, questo sistema ha implicazioni pratiche complesse e, in alcuni casi, può avere un impatto sulle prestazioni del sistema di isolamento (Roussis 2009).

Più recentemente, Roussis e Constantinou (2006) ha introdotto un innovativo dispositivo scorrevole a sollevamento impedito, denominato XY-FP. Concettualmente e in assenza di eccitazioni verticali, questo sistema funziona come un FP tradizionale. Tuttavia, a differenza di un FP, XY-FP è costituito da due binari di scorrimento concavi ortogonali separati, collegati tra loro da un meccanismo che può scorrere lungo entrambe le guide (Figura 14). Grazie a questa configurazione, questo isolatore è in grado di fornire una risposta bidirezionale disaccoppiata, consentendo al contempo lo sviluppo di forze di trazione nel dispositivo, impedendone così il sollevamento.

L'efficacia di questo sistema è stata dimostrata, sia sperimentalmente che numericamente, da Roussis e Constantinou (2006), Roussis (2009) e Roussis e Constantinou (2006). In seguito, XY-FP è stato utilizzato in applicazioni reali ed è stato implementato con successo in diverse occasioni. Alcuni esempi di applicazione includono il Los Angeles Emergency Operations Center (LA EOC) in California e il Linked Hybrid Complex a Pechino in Cina (Roussis, 2009).

7.4 Spostamento residuo

Nei moderni contesti normativi di progettazione e verifica basati sulle prestazioni, lo spostamento residuo post-terremoto è riconosciuto come uno dei parametri chiave nella risposta strutturale. Pertanto, un efficace sistema di isolamento alla base dovrebbe essere dotato di alcune capacità di ripristino così da poter ritornare alla sua configurazione iniziale a seguito di un evento sismico. Spostamenti permanenti nel sistema di isolamento di base sono indesiderabili per una serie di ragioni: in primo luogo, gli isolatori di base deformati possono assorbire richieste di spostamento inferiori e potrebbero non essere in grado di sopportare

Figura 13
Configurazione indeformata e deformata di dispositivi elastomerici precompressi (adattata da Logiadis et al., 1996).

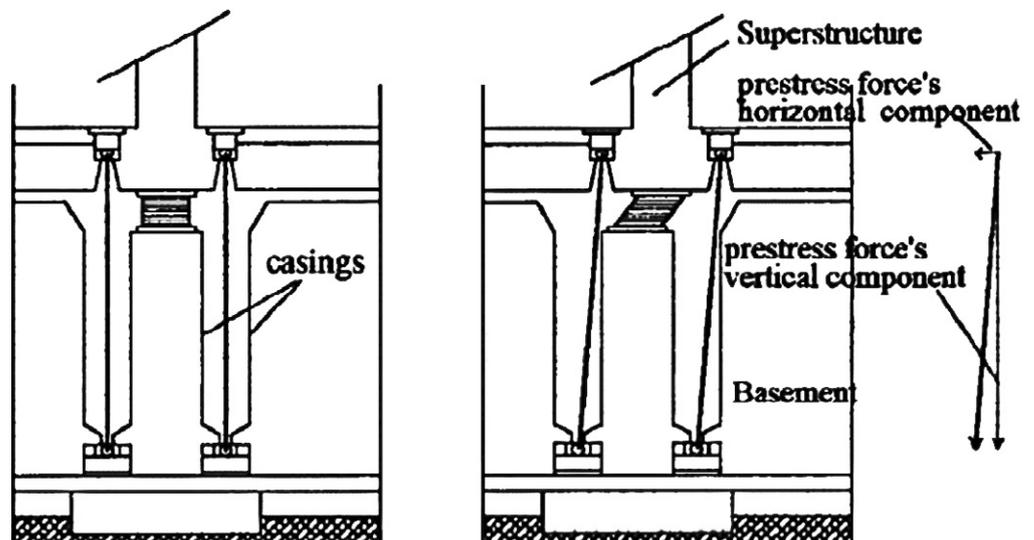
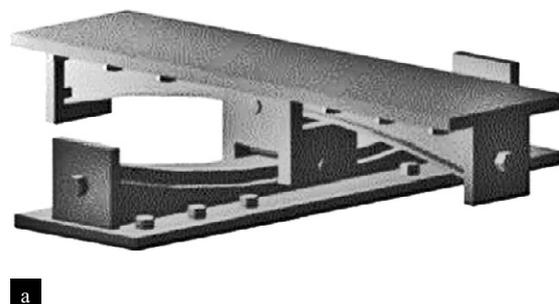


Figura 14
(a) Visuale 3D del dispositivo scorrevole a sollevamento impedito XY-FP (adattato da Roussis, 2009); (b) Installazione del dispositivo XY-FP in LA EOC in California (adattato da Roussis, 2009).



scosse di assestamento e, più in generale, eventi futuri; in secondo luogo, spostamenti residui eccessivi possono influire sulla operatività della struttura e possono compromettere la funzionalità degli elementi che attraversano il piano di isolamento (ad esempio gli elementi di protezione antincendio, i giunti dei sistemi primari di tubazioni, ecc.). Chiaramente, le strutture isolate alla base dovrebbero essere progettate e studiate nel dettaglio per adattarsi agli spostamenti permanenti previsti.

La comprensione e la capacità di controllare gli spostamenti residui nei sistemi di isolamento alla base sono particolarmente importanti per le strutture situate vicino a faglie, dove è comune registrare scuotimenti caratterizzati dalla presenza di singoli cicli a grande ampiezza (Baker, 2007). È stato dimostrato che i terremoti in prossimità della faglia possono indurre significativi spostamenti residui in sistemi di isolamento con capacità di ripristino inadeguate (Katsaras et al., 2008 e Ismail et al., 2014). Considerazioni sullo spostamento residuo sono fondamentali anche per i dispositivi a scorrimento piani, che non hanno alcuna capacità di ripristino e che possono tendere a “migrare” lungo una distanza sempre più grande quanto più dura lo scuotimento (o quante più sollecitazioni li colpiscono). Questo è infatti evidente se si fa riferimento al cursore piano di Coulomb, in cui il comportamento è identico in ogni punto all’interno del suo campo, senza che vi sia alcuna preferenza nel tornare alla sua posizione di partenza. Così, gli spostamenti di un dispositivo a scorrimento piatto possono essere equiparati a quelli di una passeggiata casuale, o di un movimento browniano, in cui lo spostamento atteso aumenta monotonicamente in funzione del tempo trascorso. Sebbene non ci siano chiare indicazioni su come dovrebbe essere stimato lo spostamento residuo post-evento in un sistema di isolamento alla base, i codici di progettazione sismica moderni includono raccomandazioni volte a garantire che un dispositivo di isolamento selezionato possieda capacità di ripristino adeguate.

Ad esempio, per gli isolatori a scorrimento, il California Building Code del 2001, le specifiche AASHTO Guide 1999 per la progettazione dei sistemi di isolamento sismico e l’International Building Code (2006), cercano di raggiungere adeguate capacità ricentrate dei sistemi di isolamento alla base introducendo limiti sulla rigidità minima post-attivazione (o post scorrimento)(K_p) che un sistema dovrebbe possedere e/o limitando il periodo effettivo di vibrazione del sistema, calcolato proporzionalmente alla rigidità post attivazione dell’appoggio (es.: $T_e = 2\pi\sqrt{M/K_p}$, M è la massa della struttura), al di sotto di valori predeterminati.

Allo stesso tempo, l’IBC 2006 richiede che il requisito di capacità di ricentraggio non possa essere ritenuto soddisfatto se il sistema di isolamento non è in grado di rimanere stabile se sottoposto al carico verticale completo e a spostamenti orizzontali fino a 3,0 volte lo spostamento di progetto.

D’altra parte, l’Eurocodice 8, EN1998-2 impone per ponti isolati sismicamente (CEN, 2005) limiti che coinvolgono sia la forza laterale che lo spostamento laterale del sistema di isolamento, dettando in modo efficace limiti più stringenti sul suo comportamento isteretico.

Va notato che, sebbene le attuali raccomandazioni dei codici normativi relative allo spostamento residuo nei sistemi di isolamento alla base rappresentino un buon punto di partenza, esse non sono necessariamente basate su solidi fondamenti teorici, ma piuttosto sull’esperienza e su evidenze sperimentali limitate (Cardone et al., 2015). Inoltre, un esame approfondito della letteratura disponibile su questo argomento indica che la capacità di ricentraggio degli appoggi ad attrito ha ricevuto scarsa attenzione e rappresenta tuttora un importante campo di ricerca aperto (Cardone et al., 2015).

Esempi di studi sperimentali disponibili riguardo il tema dello spostamento residuo degli isolatori ad attrito sono quelli condotti da Ponzo et al. (2017), Quaglini et al. (2014) e Fenz e Constantinou (2008). Il risultato principale di queste campagne sperimentali è stato evidenziare che i dispositivi ad attrito con un rapporto fra spostamento massimo e “spostamento residuo statico” (d_{max}/d_{rm}) maggiore di 0,5, possiedono buone capacità di ricentraggio.

Questo risultato è coerente con le evidenze di indagini numeriche condotte da numerosi autori (ad es. Cardone et al. (2015), Katsaras et al. (2008), Dicleli e Buddaram (2006) e Berton et al. (2006)). In particolare, i risultati di alcuni degli studi numerici disponibili sui sistemi di isolamento alla base (es. Katsaras et al., 2008) hanno mostrato come il parametro principale che influenza la capacità di ripristino dei sistemi di isolamento con comportamento bilineare sia effettivamente il rapporto tra il valore assoluto dello spostamento di picco (d_{max}) e il massimo spostamento statico residuo (d_{rm} , lo spostamento residuo corrispondente al raggiungimento dell’equilibrio statico quando il sistema viene scaricato in condizioni quasi-statiche dal suo spostamento di picco). Entrambi questi parametri dipendono dalla forma del comportamento isteretico del sistema di isolamento. Inoltre, è stato dimostrato che la capacità di ricentraggio dei sistemi di isolamento dipende fortemente dalle caratteristiche del terremoto. Tuttavia, le analisi statistiche effettuate finora sembrano confermare che i sistemi di isolamento bilineari con $d_{max}/d_{rm} > 0,5$ mostrino spostamenti residui trascurabili.

Ciò nonostante, vi sono almeno due aspetti importanti relativi agli spostamenti residui nei sistemi di isolamento alla base, che ancora devono essere analizzati e che possono essere riassunti come segue:

1. Come dovrebbe apparire la risposta isteretica di un dispositivo di isolamento alla base “ottimale”?
2. Come si può stimare con precisione il massimo spostamento residuo di un isolatore, in funzione della richiesta sismica e dei parametri di progetto?

Non esiste una risposta semplice a nessuna di queste domande. Nell’affrontare la prima domanda, si dovrebbe tenere presente che le due proprietà chiave di un sistema di isolamento alla base, ovvero la dissipazione di energia e la capacità di ricentrag-

gio, sono due funzioni antitetiche. Aumentare le proprietà di ricentraggio riduce inevitabilmente le capacità di assorbimento di energia e viceversa. Pertanto, ottenere le migliori prestazioni rispetto a un parametro di interesse (ad esempio uno spostamento residuo trascurabile) può risultare in una prestazione complessiva del sistema inaccettabile (ad esempio in forze laterali e/o accelerazioni troppo elevate all'interno dal sistema). Inoltre, numerosi vincoli pratici possono entrare in gioco. Ad esempio, per ottenere uno spostamento residuo trascurabile in un sistema a scorrimento, è preferibile fabbricare dispositivi con piccolo raggio di curvatura. Tuttavia, l'uso di un piccolo raggio di curvatura può provocare oscillazioni verticali inaccettabili della struttura isolata, che possono essere ridotte solo introducendo sistemi con un raggio di curvatura maggiore (il che, a sua volta, comporterebbe spostamenti residui più grandi).

Affrontare la seconda domanda è, in una certa misura, più importante e rappresenta la vera priorità dal punto di vista della ricerca. Essere in grado di controllare lo spostamento residuo di un qualsiasi isolatore a scorrimento consentirebbe ai progettisti di convergere verso le soluzioni desiderate, con il pieno controllo del risultato. L'attenzione potrebbe essere finalmente spostata dal tentativo di minimizzare (o eliminare) a tutti i costi lo spostamento residuo negli isolatori, a progettare consapevolmente per un suo valore ritenuto accettabile, realizzando tutti i dettagli costruttivi necessari per accogliere e assorbire in modo efficiente gli spostamenti residui post-evento previsti.

8. Conclusioni

In questo articolo di rassegna scientifica si è presentata una panoramica sullo stato dell'arte degli isolatori basati su attrito, con particolare attenzione ai sistemi che hanno trovato la loro strada in applicazioni europee. Nel passare attraverso l'evoluzione e lo sviluppo di questi sistemi, sono stati anche considerati i contributi scientifici di maggior rilievo sviluppati negli Stati Uniti e globalmente.

È evidente che numerosi sistemi di isolamento sono in una fase di sviluppo tale per cui possono essere utilizzati per proteggere efficacemente edifici e altre strutture dagli effetti di terremoti di grande intensità. Ad esempio, sistemi come i dispositivi FP e DCFP hanno trovato relativamente ampie applicazioni sia in Europa che a livello mondiale. Anche i sistemi TFP sono stati utilizzati in numerosi progetti a livello internazionale. Tuttavia, è anche evidente che una serie di aspetti che caratterizzano il comportamento degli isolatori basati su attrito devono essere ulteriormente studiati, meglio compresi ed eventualmente migliorati. Sebbene siano state condotte ricerche approfondite per ridurre i fenomeni indesiderati di stick-slip e per determinare le relazioni tra parametri come il coefficiente di attrito, la velocità e la pressione verticale di contatto, esistono ancora incertezze. In questo contesto, le verifiche sperimentali delle proprietà dei dispositivi svolgono un ruolo fondamentale, pertanto, è importante definire chiaramente protocolli di prova affidabili da adottare.

Dal punto di vista della modellazione numerica e dell'analisi dei dispositivi di isolamento e delle strutture isolate alla base sono stati fatti progressi impressionanti. Modelli tridimensionali in grado di tenere conto di aspetti complessi del comportamento degli isolatori di base, come la dipendenza dell'attrito dalla pressione di contatto e dalla velocità, sono ora disponibili e possono essere utilizzati per lo sviluppo di analisi dinamiche non lineari. Non è chiaro se siano necessari modelli più raffinati, capaci ad esempio di tenere conto di effetti "locali", come i movimenti rotatori e incontrollati, o se i più semplici "macro-modelli" siano sufficientemente accurati.

La risposta degli isolatori ad attrito alle azioni verticali rappresenta un'importante area di ricerca. Gli isolatori ad attrito non sono concepiti per offrire protezione contro le accelerazioni verticali, che infatti possono influire negativamente sulle loro prestazioni (alterando la pressione verticale di contatto e, di conseguenza, il comportamento del dispositivo) e, in alcuni casi estremi, comportare il sollevamento e in ultimo il collasso dei dispositivi. Inoltre, le componenti verticali dell'accelerazione del terreno vengono raramente considerate per condurre l'analisi di strutture isolate alla base e c'è un'evidente mancanza di indicazioni riguardo questo argomento. Recenti evidenze sperimentali hanno sottolineato l'importanza di includere le componenti verticali nelle analisi, dato che le azioni verticali possono influire negativamente non solo sulle prestazioni del sistema di isolamento, ma anche su quelle degli elementi strutturali e non strutturali.

Gli attuali metodi di progettazione disponibili per i sistemi di isolamento (ad esempio i metodi Displacement Based Design) forniscono generalmente previsioni accurate della risposta di strutture isolate alla base, in particolare per quanto riguarda gli spostamenti di picco previsti. Tuttavia, studi numerici hanno dimostrato che le previsioni del taglio alla base, nonché delle forze laterali e delle accelerazioni lungo l'altezza di un edificio, sono spesso meno affidabili. Questa minore affidabilità è stata spesso attribuita agli effetti dei modi superiori di vibrazione e ad alcune delle ipotesi di modellazione adottate per condurre le analisi numeriche (ad esempio il modello di smorzamento viscoso adottato per la struttura). In ogni caso, questo rimane un problema aperto che deve essere adeguatamente affrontato. In particolare, dal punto di vista della progettazione, è necessario definire dei fattori di sicurezza appropriati e delle domande di duttilità e dei livelli di spostamento inter piano accettabili. Dovrebbero essere anche sviluppati approcci migliori per stimare gli spostamenti residui attesi, insieme a criteri per valutare la loro importanza rispetto al raggiungimento di un livello di prestazione desiderato.

Recentemente, diversi ricercatori hanno lavorato per rispondere alla necessità di sviluppare dispositivi di isolamento alla base in grado di raggiungere obiettivi prestazionali multipli, a diversi livelli di intensità del terremoto. Questo ha portato allo

sviluppo di dispositivi multi-superficie, come DCFP e TP, che sono capaci di un comportamento adattivo e possono essere potenzialmente ottimizzati per diverse intensità del terremoto. Rimangono tuttavia numerose domande e lo sviluppo di sistemi capaci di comportamenti adattivi, e più in generale di dispositivi con prestazioni migliori, rimane una delle priorità della ricerca ed è attualmente oggetto di numerosi progetti di ricerca in corso.

Bibliografia

- AASHTO (2014) - Guide specifications for seismic isolation design. 2nd ed. Washington DC: American Association State and Highway Transportation Officials.
- AASHTO (1999) - Guide specifications for seismic isolation design. 4th ed. Washington DC: American Association State and Highway Transportation Officials.
- Al-Hussaini T.M., Zayas V.A., Constantinou M.C. (1994) - Seismic isolation of multi-story frame structures using spherical sliding isolation systems Buffalo, NY: University at Buffalo; (Report No. NCEER-94-0007).
- Baker J.W. (2007) - Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bull Seismol Soc Am*; 97(5):1486-501.
- Bao Y., Becker T.C. (2017) - Hamaguchi H. Failure of double friction pendulum bearings under pulse-type motions. *Earthq Eng Struct Dyn*; 46: 715-32.
- Barone S., Calvi G.M., Pavese A. (2017) - Experimental dynamic response of spherical frictionbased isolation devices. *J Earthq Eng*. <http://dx.doi.org/10.1080/13632469.2017.1387201>.
- Barucci C. (1990) - La casa antisismica (The antiseismic house). Gangemi, Rome (In Italian).
- Bechtold J. (1907) - Earthquake proof building. US patent 845046A; Feb. 26.
- Becker T.C., Bao Y., Mahin S.A. (2017) - Extreme behavior in a triple friction pendulum isolated frame. *Earthq Eng Struct Dyn*. <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.2924>.
- Becker T.C., Mahin S.A. (2012) - Experimental and analytical study of the bidirectional behavior of the triple friction pendulum isolator. *Earthq Eng Struct Dyn*; 41(3): 355-73.
- Berton S., Infanti S., Castellano M.G., Hikosaka H. (2006) - Self-centring capacity of seismic isolation systems. *Struct Control Health Monit*; 14(6):895-914.
- Buckle I.B., Mayes R.M. (1990) - Seismic isolation: history, application, and performance - a world view. *Earthq Spectra*; 6:161-201.
- Calvi G.M., Ceresa P., Bolognini D., Casarotti C., Auricchio F. (2004) - Effects of axial force variation in the seismic response of bridges isolated with friction pendulum systems. *J Earthq Eng*; 8(S1):187-224.
- Calvi G.M., Spaziante V. (2009) - Reconstruction between temporary and definitive: the CASE project. *Progettazione Sismica*. 03/English; p. 221-50.
- Calvi P.M., Moratti M., Calvi G.M. (2016) - Seismic isolation devices based on sliding between surfaces with variable friction coefficient. *Earthq Spectra*; 32(4):2291-315.
- Calvi P.M., Ruggiero D.M. (2017) - Earthquake-induced floor accelerations in base isolated structures. In: *Proceedings of the 16th world conference on earthquake engineering, 16WCEE 2017*. Santiago Chile; January 9th to 13th 2017.
- Calvi P.M., Ruggiero D.M. (2016) - Numerical modelling of variable friction sliding base isolators. *Bull Earthq Eng*; 14(2):549-68.
- Calvi P.M., Sullivan T.J. (2014) - Estimating floor spectra in multiple degree of freedom structures. *Earthq Struct*; 7(1):17-38.
- Calvi P.M., Timsina S. (2017) - Numerical study of the seismic behaviour of variable friction base isolation systems. In: *Proceedings of the 39th IABSE symposium - engineering the future*. Vancouver, Canada; September 21st to 23rd 2017.
- Calvi P.M. (2014) - Relative displacement floor spectra for seismic design of non structural elements. *J Earthq Eng*; 18(7):1037-59.
- Cardone D., Gesualdi G., Brancato P. (2015) - Restoring capability of friction pendulum seismic isolation systems. *Bull Earthq Eng*; 13(8):2449-80.
- Cardone D., Gesualdi G. (2017) - Influence of residual displacements on the design displacement of spherical friction-based isolation systems. *Soil Dyn Earthq Eng*; 100:492-503.
- CBSC (2001) - California building code. Sacramento, CA: California Buildings Standards Commission.
- CEN (2005) - Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance - Part 2: bridges. EN1998-2. Bruxelles, Belgium: European Committee for Standardization.
- Christopoulos C., Filiatrault A. (2009) - Principles of passive supplemental damping and seismic isolation. IUSS Press, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.
- Constantinou M.C., Mokha A.S., Reinhorn A.M. (1991) - Study of sliding bearing and helicalsteel- spring isolation system. *ASCE J Struct Eng* 1991;117(4):1257-75.
- Constantinou M.C., Tsopelas P., Kim Y.S., Okamoto S. (1993) - NCEER-Taisei corporation research program on sliding seismic isolation systems for bridges: experimental and analytical study of a friction pendulum system (FPS) Buffalo, NY: SUNY; (Technical Report NCEER-93-0020).
- Constantinou M.C., Whittaker A.S., Kalpakidis Y., Fenz D.M., Warn G.P. (2007) - Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading. Report MCEER-07- 0012. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.
- Danusso A. (1909) - Le costruzioni antisismiche (The seismic resistant constructions, in Italian). Il monitore Tecnico, (journal on engineering, architecture, mechanics, electronics, railways, agronomy, cadastre and industrial arts - official body of the association of former students of the Politecnico di Milano); 10 August 1909.
- Dao N.D., Ryan K.L., Sato E., Sasaki T. (2013) - Predicting the displacement of triple pendulum™ bearings in a full-scale shaking experiment using a three-dimensional element. *Earthq Eng Struct Dyn*; 42(11):1677-95.
- Dicleli M., Buddaram S. (2006) - Effect of isolator and ground motion characteristics on the performance of seismic-isolated bridges. *Earthq Eng Struct Dyn* 2006; 35(2):223-50.
- Erdik M.O. (2017) - State of the art on application, R&D and design rules for seismic isolation and energy dissipation for buildings, bridges and viaducts, cultural heritage and chemical plants in Turkey. In: *Proceedings of the NZSEE conference*.
- European Standard EN 15129:2010 for anti-seismic devices, European Committee for Standardization; November 2010.
- Fenz D.M., Constantinou M.C. (2006) - Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing. *Earthq Eng Struct Dyn* 2006;35:1403-24.

- Fenz D.M., Constantinou M.C. (2008) - Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: theory. *Earthq Eng Struct Dyn* 2008a;37(2): 163-183.
- Fenz D.M., Constantinou M.C. (2008) - Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: experimental verification. *Earthq Eng Struct Dyn* 2008b; 37(2):185-205.
- Fenz D.M., Constantinou M.C. (2008) - Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthq Spectra* 2008c; 24(4):1011-28.
- Fenz D.M., Constantinou M.C. (2008) - Development, implementation, and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings Buffalo, NY: SUNY; 2008d. (Technical Report MCEER-08-0018).
- Ghasemi H., Cooper J.D., Imbsen R., Piskin H., Inal F., Tiras A. (2000) - November 1999 Duzce earthquake: post-earthquake investigation of the structures on the TEM. Federal highway administration. Technical report. 26 pages. Publication No. FHWA-RD-00-146; 2000.
- Hyakuda T., Saito K., Matsushita T., Tanaka N., Yoneki S., Yasuda M., Miyazaki M., Suzuki A., Sawada T. (2001) - The structural design and earthquake observation of a seismic isolation building using friction pendulum system. In: Proceedings, 7th international seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibrations of structures. Assisi, Italy; 2001.
- IBC (2006) - International building code. Falls Church: International Code Council; 2006.
- Ismail M, Rodellar J, Pozo F. (2014) - An isolation device for near-fault ground motions. *Struct Control Health Monit* 2014;21(3):249-68.
- Kaiser A., Holden C., Beavan J., Beetham D., Benites R., Celentano A., et al. (2011) - The Mw 6.2 Christchurch earthquake of February 2011: preliminary report. *NZ J Geol Geophys* 2011;55(1):67-90.
- Katsaras C.P., Panagiotakos T.B., Koliass B. (2008) - Restoring capability of bilinear hysteretic seismic isolation systems. *Earthq Eng Struct Dyn* 2008;37(4):557-75.
- Kelly J.M., Chalhoub M.S. (1990) - Earthquake simulator testing of a combined sliding bearing and rubber bearing isolation system Berkeley, CA, USA: University of California; 1990. (Report No. UCB/EERC-87/04).
- Kelly J.M. (1986) - Aseismic base isolation: review and bibliography. *Soil Dyn Earthq Eng* 1986;5:202-16.
- Kumar M., Whittaker A.S., Constantinou M.C. (2015) - Characterizing friction in sliding isolation bearings. *Earthq Eng Struct Dyn* 2015;44:1409-25.
- Kunde M.C., Jangid R.S. (2003) - Seismic behavior of isolated bridges: a state-of-the-art review. *Electron J Struct Eng* 2003;3:140-70.
- Lee D., Constantinou C. (2016) - Quintuple friction pendulum isolator: behavior, modeling, and validation. *Earthq Spectra* 2016;32(3):1607-26.
- Lew M., Hudson M.B. (1999) - The effects of vertical ground motion on base-isolated building systems. *Earthq Spectra* 1999;15(2):371-5.
- Logiadis I., Zilch K., Meskouris K. (1996) - Prestressed bearings in the seismic isolation of structures. Paper no. 1895, 11th WCEE. Acapulco, Mexico; 1996.
- Lomiento G., Bonessio N., Benzoni G. (2013) - Friction model for sliding bearings under seismic excitation. *J Earthq Eng* 2013;17:1162-91.
- Mokha A., Constantinou M.C., Reinhorn A.M. (1990) - Teflon bearings in base isolation I: testing. *J Struct Eng (ASCE)* 1990;116:438-544.
- Morgan T.A., Mahin S.A. (2010) - Achieving reliable seismic performance enhancement using multi-stage friction pendulum isolators. *Earthq Eng Struct Dyn* 2010;39(13):1443-61.
- Morgan T.A., Mahin S.A. (2011) - The use of base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives Berkeley, CA: PEER, University of California; 2011. (Report No. 2011/06).
- Morgan T.A. (2007) - The use of innovative base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives (Ph.D. dissertation). Berkeley: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California; 2007.
- Mosqueda G., Whittaker A.S., Fenves G.L., Mahin S.A. (2004) - Experimental and analytical studies of the friction pendulum system for the seismic protection of simple bridges Berkeley, Berkeley, CA: University of California; 2004. (Report No. UCB/EERC-2004-01).
- Murnal P., Sinha R. (2002) - Earthquake resistant design of structures using the variable frequency pendulum isolator. *J Struct Eng* 2002;128(7):870-80.
- Nagarajaiah S., Reinhorn A.M., Constantinou M.C. (1992) - Experimental study of sliding isolated structures with uplift restraint. *ASCE J Struct Eng* 1992;118(6):1666-82.
- Nagarajaiah S., Reinhorn A.M., Constantinou M.C. (1991) - Nonlinear dynamic analysis of 3-Dbase-isolated structures. *J Struct Eng* 1991;117:2035-54.
- Panchal V.R., Jangid R.S. (2009) - Seismic response of structures with variable friction pendulum system. *J Earthq Eng* 2009;13(193-216):2009.
- Ponzo F.C., Di Cesare A., Leccese G., Nigro D. (2017) - Shake table testing on restoring capability of double concave friction pendulum seismic isolation systems. *Earthq Eng Struct Dyn* 2017. <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.2907>.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. (2007) - Displacement based seismic design of structures. Pavia: IUSS Press; 2007.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M. (2002) - Strategies for repair and seismic upgrading of Bolu Viaduct 1, Turkey. *J Earthq Eng* 2002;6(S1):157-84.
- Quaglioni V., Bocciarelli M., Gandelli E., Dubini P. (2014) - Numerical assessment of frictional heating in sliding bearings for seismic isolation. *J Earthq Eng* 2014;18:1198-216.
- Quaglioni V., Gandelli E., Dubini P., Limongelli M.P. (2017) - Total displacement of curved surface sliders under nonseismic and seismic actions: a parametric study. *Struct Control Health Monit* 2017. <http://dx.doi.org/10.1002/stc.2031>.
- Quaglioni V., Gandelli E., Dubini P., Vazzana G., Farina G. (2014) - Re-centring capability of friction pendulum system: experimental investigation. In: Proceedings of the 2nd European conference on earthquake engineering and seismology. Istanbul, TK; 2014.
- Quaglioni V., Gandelli E., Dubini P. (2017) - Experimental investigation of the re-centring capability of curved surface sliders. *Struct Control Health Monit* 2017;24(2):e1870.
- Roussis P.C., Constantinou M.C. (2006) - Uplift-restraining friction pendulum seismic isolation system. *Earthq Eng Struct Dyn* 2006a;35(5):577-593.
- Roussis P.C., Constantinou M.C. (2006) - Experimental and analytical studies of structures seismically isolated with an uplift restraining friction pendulum system. *Earthq Eng Struct Dyn* 2006b;35(5):595-611.
- Roussis P.C. (2009) - Study on the effect of uplift-restraint on the seismic response of base-isolated structures. *ASCE J. Struct. Eng* 135. 2009. p. 1462-71.
- Ryan K.L., Dao N.D., Sato E., Sasaki T., Okazaki T. (2012) - Aspects of isolation device behavior observed from full-scale testing of an isolated building at E-defense. In: Proceedings of the 20th analysis and computation specialty track, ASCE structures congress. Chicago, IL; 2012.
- Ryan K.L., Soroushian S., Maragakis E.M., Sato E., Sasaki T., Okazaki T. (2016) - Seismic simulation of an integrated ceiling-partition wall-piping system at E-defense. I: three-dimensional structural response and base isolation. *ASCE J. Struct. Eng* 2016; 142:04015130.
- Ryan K.L., Soroushian S., Maragakis E.M., Sato E., Sasaki T., Okazaki T. (2015) - Seismic simulation of an integrated ceiling-partition wall-piping system at E-defense, I: three-dimensional structural response and base isolation. *J Struct Eng* 2015;142(2):0401530.

- Sarlis A.A., Constantinou M.C. (2016) - A model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters. *Earthq Eng Struct Dyn* 2016;45:1837-53.
- Shorthred J.S., Seible F., Benzoni G. (2002) - Simulation issues with a real-time full-scale seismic testing system. *J Earthq Eng* 2002;6(S1):185-201.
- Soong T.T., Constantinou M.C. (1994) - Passive and active structural vibration control in civilengineering. New York, NY, USA: Springer-Verlag; 1994. p. 1994.
- Sumitomo Construction (1990) - Base-isolated buildings by sumitomo construction. Tokyo, Japan: Internal Report, Sumitomo Construction Co. Ltd.; 1990.
- Symans M.D., Cofer W.F., Fridley K.J. (2003) - Base isolation and supplemental damping systems for seismic protection of wood structures: literature review. *Earthq Spectra* 2003; 18:549-72.
- Taylor A.W., Lin A.N., Martin J.W. (1992) - Performance of elastomers in isolation bearings: a literature review. *Earthq Spectra* 1992;8:279-303.
- Touaillon J. Improvement in buildings. US patent 99973; Feb. 15, 1870.
- Tsai C.S., Chen W.S., Chiang T.C., Chen B.J. (2015) - Component and shaking table tests for fullscale simulation of an integrated ceiling-partition wall-piping system at E-defense, I: three-dimensional structural response and base isolation. *J Struct Eng* 2015;142(2):0401530.
- Tsai C.S., Chiang T.C., Chen B.J. (2005) - Experimental evaluation piecewise exact solution for predicting seismic responses of spherical sliding type isolated structures. *Earthq Eng Struct Dyn* 2005;34(9):1027-46.
- Tsai C.S., Chiang T.C., Chen B.J. (2003) - Shaking table tests of a full scale steel structure isolated with MFPS. In: Chen J.C. (Ed.), Proceedings of the 2003 ASME pressure vessels and piping conference, seismic engineering. Cleveland, Ohio, U.S.A. 466; 20-24 July, 2003. p. 41-7.
- Tsai C.S., Lin Y.C., Su H.C. (2010) - Characterization and modeling of multiple friction pendulum isolation system with numerous sliding interfaces. *Earthq Eng Struct Dyn* 2010;39:1463-91.
- Warn G.P., Ryan K.L. (2012) - A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs. *Buildings* 2012;2:300-25.
- Zayas V., Low S., Mahin S. (1987) - The FPS earthquake resistant system. Experimental report UC Berkeley; 1987. (Report No. UCB/EERC-87/01).
- Zayas V. (1987) - Earthquake protective column support. US patent 4644714; Feb. 24, 1987.
- Zayas V.A., Low S., Mahin S. (1990) - A simple pendulum technique for achieving seismic isolation. *Earthq Spectra* 1990;6(2):317-33.
- Zayas V.A., Low S., Mokha A.S. (2001) - Imbsen R.A. Seismic isolation of Benicia-Martinez bridge. In: Proceedings of ASCE structures congress; 2001. (published on line. [http://dx.doi.org/10.1061/40558\(2001\)121](http://dx.doi.org/10.1061/40558(2001)121)).
- Zekioglu A, Darama H, Erkus B. (2009) - Performance-based seismic design of a large seismically isolated structure. Los Angeles, California: Istanbul Sabiha Gökçen International Airport Terminal Building, Arup North America Ltd; 2009.

Gli Autori

Paolo Martino Calvi

Laureatosi presso il Dipartimento di Meccanica Strutturale dell'Università di Pavia nel 2010, ha ottenuto un Dottorato di Ricerca al Department of Civil Engineering dell'Università di Toronto (Canada) discutendo una tesi su "A Theory for the Shear Behaviour of Cracks Providing a Basis for the Assessment of Cracked Reinforced Concrete Structures" (Relatori: Prof. Michael P. Collins and Evan C. Bentz). Dal 2015 è Assistant Professor presso il Department of Civil and Environmental Engineering della University of Washington (Seattle, USA), dove insegna corsi di meccanica, dinamica strutturale e ingegneria sismica e dove svolge attività di ricerca numerica e sperimentale su temi legati al comportamento sismico di vari tipi strutture, e allo sviluppo di dispositivi di protezione nei confronti di carichi estremi indotti da eventi di varia natura.

Giulia Fagà

Giulia Fagà è direttore del Dipartimento Formazione presso la Fondazione Eucentre, redattore della rivista *Progettazione Sismica*, segretario del consiglio di disciplina territoriale e docente ITS. Laureata in Ingegneria Edile Architettura presso l'Università degli Studi di Pavia (2012) nel 2013 inizia a collaborare con la Fondazione Eucentre nell'ambito delle strutture temporanee post-emergenza; collabora al progetto PRISMA (Piattaforma cloud Interoperabili per SMART-government), partecipa ai sopralluoghi speditivi svolti da Eucentre durante la crisi sismica del Centro Italia (2016), nel 2017 diventa redattore della rivista *Progettazione Sismica*, edita da Eucentre, incentrata sui temi della ricerca e della progettazione sismica e dal 2018 è a capo del Dipartimento Formazione della Fondazione Eucentre. Nel 2016 pubblica, insieme a Roberto Nascimbene, il volume "Residenze temporanee, dalle tende del paleolitico alle stampanti 3D".

Gian Michele Calvi

Gian Michele Calvi è professore allo IUSS di Pavia e Adjunct Professor alla North Carolina State University.

Ha ottenuto un Master of Science alla University of California, Berkeley, un PhD al Politecnico di Milano e un Dottorato Honoris Causa alla Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

È stato il fondatore della Fondazione Eucentre e della ROSE School, è stato un membro del Consiglio di amministrazione della Fondazione GEM ed è attualmente uno dei Direttori della International Association of Earthquake Engineering.

È autore di centinaia di pubblicazioni, tra cui due volumi di fama internazionale: *Seismic design and retrofit of bridges* (con M.J.N. Priestley and F. Seible, 1996) e *Displacement-Based Seismic Design of Structures* (con M.J.N. Priestley and M.J. Kowalsky, 2007).

È stato progettista consulente o collaudatore di centinaia di progetti strutturali, tra i quali il ponte strallato Rion-Antirion (2883 m, in Grecia), il viadotto di Bolu (119 campate, in Turchia) ed il sistema abitativo realizzato a l'Aquila dopo il terremoto del 2009, con 185 edifici isolate con oltre 7.000 apparecchi, completati in circa sei mesi.

È Editore associato del *Journal of Earthquake Engineering* (Taylor and Francis), è stato relatore invitato in decine di conferenze, tra le quali due World e quattro European Conferences on Earthquake Engineering.

Ha sempre lavorato al fine di innovare la progettazione sismica, concentrandosi inizialmente sulle strutture in muratura, successivamente sui ponti, sulla progettazione basata sugli spostamenti e dagli anni novanta sull'isolamento sismico.