

==== Università degli Studi di Napoli Federico II ====

Facoltà di Ingegneria



Donato Cancellara

STRATEGIA DELLA LIMITAZIONE DELLA FORZA,
NELLA PROGETTAZIONE DI SISTEMI
D'ISOLAMENTO SISMICO ALLA BASE

*Tesi di Dottorato
XXIII ciclo*

Il Coordinatore
Prof. Ing. Federico M. MAZZOLANI

Il tutor
Prof. Ing. Mario PASQUINO

==== *Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Costruzioni* ====

*“Rigidity was not the right answer,
but flexibility and resilience were.
Why fight an earthquake?
Why not join it and beat it with astuteness?”*

*“La rigidità non era la risposta giusta,
ma lo erano la flessibilità e la resilienza.
Perché lottare contro i terremoti?
Perché non simpatizzare con esso e superarlo in astuzia?”*

*Frank Lloyd Wright
(1867 – 1959)*

INDICE

SOMMARIO	V
CAPITOLO I	
<i>Isolamento sismico alla base, mediante strategia della limitazione della forza</i>	1
1. Introduzione	1
2. Limitazione della forza	4
2.1. Sistema di isolamento P-F	7
2.2. Sistema di isolamento EDF	11
2.3. Sistema di isolamento proposto: HDHSI	17
2.3.1. Soluzione teorica: sistema 1-GDL in presenza di forzante armonica	25
CAPITOLO II	
<i>Modellazione non lineare del sistema d'isolamento ibrido oggetto di studio</i>	33
1. Introduzione	33
2. Modellazione degli isolatori in regime non lineare	33
2.1. Modellazione dell'isolatore LRB	34
2.2. Modellazione dell'isolatore FS	43
2.2.1. Modellazione con coefficiente di attrito indipendente dalla velocità di scorrimento	49
2.2.2. Modellazione con coefficiente di attrito dipendente dalla velocità scorrimento	47
2.3. Modellazione isolatore HDHSI	54

2.3.1. Ciclo isteretico atteso per l'isolatore HDHSI	56
2.3.2. Osservazioni sul carico critico	60

CAPITOLO III

<i>Analisi numerica: sistema ad 1-GDL e struttura intelaiata in c.a. isolata alla base mediante HDHSI</i>	65
1. Introduzione	65
2. Sistema 1-GDL con forzante armonica, analizzato mediante SAP2000	65
3. Smorzamento viscoso equivalente per il sistema HDHSI	74
4. Applicazione ad una struttura intelaiata in c.a.	78
4.1. Azione sismica e normativa di riferimento	78
4.2. Descrizione della struttura	82
4.3. Registrazioni sismiche anomale considerate	91
4.4. Modellazione della struttura isolata e comportamento del sistema HDHSI	99
4.5. Analisi Dinamica Non Lineare adottata: la FNA	102
4.6. Risposta sismica della struttura valutata mediante ADNL	105
4.7. Ottimizzazione del sistema HDHSI	119
4.8. HDHSI vs. LRB	124
4.9. Fale-safe system orizzontale e verticale	132

CAPITOLO IV

<i>Sistemi d'isolamento alla base a confronto</i>	135
1. Introduzione	135
2. Analisi comparativa di differenti sistemi di isolamento: HDRB, LRB,FPS, DCFP, HDHSI	136
2.1. Sistemi di isolamento elastomerici (sistema HDRB e sistema LRB): progettazione e modellazione non lineare	137
2.2. Sistemi di isolamento attritivi (sistema FPS e sistema DCFP)	154
2.2.1. Sistema FPS: descrizione e modellazione non lineare	154
2.2.2. Sistema FPS: progettazione	160
2.2.3. Sistema DCFP: descrizione e modellazione non lineare	165

2.2.4. Sistema DCFP: progettazione	171
2.3. Sistemi di isolamento a confronto	173
3. Sistemi di isolamento in serie: HDHSI vs. EDF	186
<i>CAPITOLO V</i>	
<i>Conclusioni</i>	193
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	197

SOMMARIO

Nel presente lavoro di tesi si analizza la possibilità offerta da un sistema di isolamento sismico alla base, progettato secondo la strategia della limitazione della forza, di conferire un significativo livello di “robustness” alla sovrastruttura isolata. Robustness intesa come riserva, sia in termini di resistenza sia in termini di deformazione, che una struttura può possedere per fronteggiare un’azione eccezionale, conservando la sua funzionalità. Come azione eccezionale si focalizza l’attenzione su possibili eventi sismici decisamente più gravosi, per intensità e/o contenuto in frequenza, rispetto a quelli attesi cui si riferiscono le NTC 2008 secondo la metodologia del Performance Based Design.

Con riferimento alla progettazione di una struttura isolata alla base, secondo la strategia della limitazione della forza, viene proposto un nuovo isolatore sismico ibrido ad alto smorzamento, denominato (High Damping Hybrid Seismic Isolator - HDHSI) ottenuto dall’assemblaggio in serie, di un isolatore elastomerico con nucleo di piombo (Lead Rubber Bearing - LRB) con un isolatore a scorrimento ad alto coefficiente d’attrito (Friction Slider - FS).

Il dispositivo HDHSI si pone in contrapposizione all’isolatore R-FBI (Resilient-Friction Base Isolation) e vuol essere un’ottimizzazione del sistema EDF (Electricité De France). L’utilizzo di un isolatore LRB (a smorzamento controllato) come componente elastomerica per il dispositivo HDHSI, piuttosto che un HDRB (High Damping Rubber Bearing) previsto per il sistema EDF, assicura una più efficace riduzione dello spostamento massimo alla base della sovrastruttura ed offre una più affidabile riproducibilità, per via numerica, del comportamento non lineare dell’isolatore elastomerico, mediante il consolidato e robusto modello isteretico di Bouc-Wen.

Viene presentata la modellazione del dispositivo HDHSI mediante elementi finiti non lineari NLink (NonLinear link) e successivamente vengono eseguite

analisi dinamiche non lineari con riferimento ad un sistema ad 1-GDL in presenza di una forzante armonica, al fine di caratterizzare il comportamento ciclico-isteretico del dispositivo per diversi livelli di deformazione a taglio.

È stata verificata l'affidabilità della modellazione non lineare adottata, analizzando i cicli isteretici dei singoli isolatori disposti in serie che compongono il dispositivo HDHSI, di cui è sperimentalmente noto il loro andamento. Successivamente, è stata analizzata l'affidabilità del ciclo isteretico del dispositivo complessivo, comparando i risultati attesi con quelli ottenuti a valle dell'analisi numerica.

Sono state eseguite analisi dinamiche non lineari su una struttura intelaiata in c.a. isolata alla base mediante i dispositivi proposti, con l'intento di valutarne la risposta strutturale nel dominio del tempo, considerando diversi accelerogrammi naturali come input sismico, evidenziando l'efficacia del sistema di isolamento e la sua non influenza dalle caratteristiche del sisma.

La struttura, progettata e verificata secondo le NTC 2008 (allo SLD; SLV e SLC) presenta una risposta sismica tale da evidenziare l'efficacia del sistema di isolamento anche in presenza di terremoti anomali per intensità, come la registrazione di El Centro - California (componente N00W, 1940) amplificata di 1.5 e 2, nonché l'efficacia in presenza di terremoti anomali per contenuto in frequenza come la registrazione Erzincan - Turchia (componente N90W, 1992) caratterizzata da un elevato contenuto energetico in bassa frequenza tale da poter vanificare i vantaggi dell'isolamento sismico, nel caso di tradizionali ed usuali sistemi di isolamento progettati mediante il "Target Period".

Infine, con riferimento alla medesima struttura e nelle usuali condizioni di progetto allo SLV e SLC, è stata confrontata la risposta sismica del sistema HDHSI con quella dei consolidati sistemi elastomerici HDRB; LRB e dei sistemi attritivi FPC; DCFP.

Si precisa inoltre che il dispositivo proposto, si mostra efficace anche nel fronteggiare eventi sismici, attesi o anomali, caratterizzati oltre che da elevata intensità e da un elevato contenuto energetico in bassa frequenza, anche da azioni di tipo impulsivo ("pulse type"), quali i terremoti affetti da fenomeni di faglia ("near fault motion").

Capitolo I

Isolamento sismico alla base mediante strategia della limitazione della forza

1. Introduzione

L'ormai diffusa e consolidata tecnica dell'isolamento sismico alla base, *Base Isolation System (BIS)*, può essere applicata secondo due differenti strategie:

- l'elongazione del periodo (shift period);
- la limitazione della forza (limitation seismic force).

In entrambi i casi è possibile utilizzare dispositivi che assicurano un'ulteriore dissipazione dell'energia d'ingresso e quindi far ricorso a ciò che in letteratura viene definito *Passive Supplemental Damping (PSD)*.

La strategia dell'isolamento sismico alla base mediante elongazione del periodo, è sicuramente la più diffusa perché applicabile alla stragrande maggioranza dei casi. Consiste nel conferire alla struttura, da proteggere sismicamente, un periodo target (T_{is}) a cui corrisponde un ridotto valore di ordinata spettrale in termini di pseudo-accelerazione. Ciò significa assicurare alla sovrastruttura, un comportamento dinamico tale che il periodo del modo di vibrazione fondamentale, si collochi nella parte bassa dello spettro di risposta di progetto (S_d) e quindi tale che le forze sismiche agenti sulla struttura siano decisamente più contenute rispetto a quelle che si genererebbero se la struttura fosse a base fissa.

La strategia dell'isolamento sismico alla base mediante limitazione della forza, è sicuramente poco diffusa, ma non per questo di scarsa importanza. Il ricorso a tale strategia può essere dettato da tutte quelle circostanze in cui la prima strategia, rischia di rendere inefficacie o addirittura deleterio, l'utilizzo dell'isolamento alla base come tecnica di protezione sismica delle strutture. I casi ai quali ci si riferisce sono caratterizzati da eventi sismici con un elevato contenuto energetico in corrispondenza delle basse frequenze e quindi segnali sismici con periodi delle armoniche dominanti, prossimi agli usuali *periodi target* adottati per le strutture isolate alla base ($2 \div 2.5$ sec).

Tali circostanze sono estremamente insidiose, qualora si verificassero per una struttura isolata alla base progettata mediante strategia dell'elongazione del periodo, in quanto vanificherebbero i vantaggi legati all'isolamento sismico e in particolar modo, i vantaggi di deamplificazione delle accelerazioni ai vari livelli della struttura.

La strategia della limitazione della forza ha intrinsecamente, nella sua metodologia, il vantaggio di rendere la protezione sismica della struttura indipendente dall'evento sismico sia in termini di intensità che in termini di contenuto in frequenze. Il "*prezzo che bisogna pagare*" per raggiungere tale livello di protezione sismica, consiste nel saper fronteggiare, a valle di un evento sismico di alta intensità, spostamenti residui alla base della sovrastruttura, mediante opportuni sistemi di ricentraggio.

Tra i dispositivi previsti per i sistemi di isolamento alla base, progettati mediante elongazione del periodo, i più diffusi ed utilizzati sono sicuramente gli isolatori elastomerici e in particolare gli isolatori *HDRB - High Damping Rubber Bearing*, da soli o in parallelo con isolatori a scorrimento. In tal caso, per fronteggiare eventi sismici anomali per intensità o per contenuto in frequenza, si è tentati a sfruttare l'incrudimento degli isolatori HDRB che si manifesta per elevati valori di deformazione laterale [40]. L'aspetto svantaggio, risiede negli effetti "nascosti" dell'incrudimento, tali da consigliare il progettista, ad evitare che le deformazioni laterali degli isolatori siano tali da attivare il fenomeno dell'incrudimento stesso. Gli spetti svantaggiosi sono essenzialmente due:

-
- la riduzione della capacità portante dei carichi verticali;
 - l'incremento delle accelerazioni di piano della sovrastruttura per un maggiore contributo dei modi di vibrazione superiori al primo.

Da non trascurare è il comportamento fortemente non-lineare degli isolatori HDRB e del loro comportamento ciclico non del tutto stabile, tale da renderne particolarmente insidiosa la loro modellazione in regime non-lineare. In campo scientifico, non è inusuale riscontrare per tali dispositivi, una preferenza per una loro modellazione lineare, tramite modello a viscosità lineare equivalente, che pur semplificata, risulta essere sicuramente più “robusta” di quella non lineare, data la dipendenza da un minor numero di variabili.

Altra tipologia di isolatori elastomerici, è rappresentata dagli isolatori ad alto smorzamento con nucleo di piombo *LRB - Lead Rubber Bearing*, da soli o in parallelo con isolatori a scorrimento. Il vantaggio dei dispositivi *LRB* rispetto agli *HDRB*, risiede nell'aver una maggiore capacità dissipativa e quindi nella possibilità di contrastare in maniera più incisiva, lo spostamento massimo alla base della sovrastruttura. Possiedono inoltre, un comportamento ciclico non-lineare caratterizzato da una forma più stabile con il variare della deformazione a taglio, rispetto agli *HDRB*. Infatti, gli isolatori *HDRB* presentano un comportamento non lineare tale che la forma dei cicli isteretici varia al variare del livello di deformazione a taglio. Gli stessi modelli isteretici di tipo Wen, poiché richiedono di dover settare la forma del ciclo su un determinato ciclo sperimentale, non permettono di simulare la variazione di forma dei cicli isteretici per tutti i livelli di deformazione tagliante. Tale problema non riguarda gli isolatori *LRB*, il cui comportamento meccanico, può essere visto come combinazione, in parallelo, di un elemento elastico lineare rappresentato dall'isolatore elastomerico a basso smorzamento con un elemento elasto-plastico rappresentato dal nucleo in piombo sottoposto ad un regime deformativo di tipo tagliante.

Il comportamento più stabile degli LRB, rende più affidabile e più agevole la riproducibilità per via numerica del comportamento ciclico-isteretico dell'isolatore sismico.

È importante ricordare che la maggiore capacità dissipativa degli *LRB* deve essere utilizzata in modo attento ed oculato, in quanto non sempre vantaggiosa per la sovrastruttura, sia con riferimento alle accelerazioni di piano che con riferimento agli spostamenti di interpiano. Per tale motivo occorre verificare che la riduzione dello spostamento massimo alla base, non sia accompagnato da un incremento decisamente maggiore dei *drift di piano*, con un danneggiamento potenzialmente maggiore anche per il contenuto non strutturale. È importante quindi che la maggiore dissipazione di tali dispositivi sia controllata.

2. Limitazione della forza

Qualora si volesse affrontare il problema della protezione sismica mediante isolamento alla base, svincolandosi dalle “caratteristiche” del segnale sismico atteso per il sito in cui la struttura verrà realizzata, è indispensabile adottare la strategia della *limitazione della forza*. Tale strategia permette di conferire un significativo livello di “robustness” alla sovrastruttura isolata. Robustness intesa come riserva, sia in termini di resistenza sia in termini di deformazione, che una struttura può avere nel fronteggiare un'azione eccezionale, conservando la sua funzionalità. Come azione eccezionale si focalizza l'attenzione su possibili terremoti decisamente più gravosi, per intensità e/o contenuto in frequenza, rispetto a quelli cui fa riferimento la norma secondo la metodologia del Performance Based Design.

La strategia della limitazione della forza consiste nel progettare la struttura isolata alla base, fissando una soglia alla massima forza che si vuole venga trasmessa alla sovrastruttura. Ciò, è reso possibile grazie all'impiego di appositi isolatori caratterizzati da un comportamento rigido-plastico o elastico-perfettamente plastico o comunque non lineare, con l'ultimo ramo del ciclo isteretico, praticamente orizzontale in regime di grandi spostamenti. Nel caso

specifico, il dispositivo HDHSI proposto, ampiamente illustrato successivamente, è caratterizzato da un comportamento non lineare rappresentabile tramite una trilatera in cui l'ultimo ramo presenta incrudimento nullo.

La progettazione secondo la strategia della limitazione della forza, grazie al suo controllo della forza sismica che agisce sulla sovrastruttura, può essere considerata un'applicazione del "capacity design" ad una struttura isolata alla base (Dolce, *et al.*, 2004). È possibile infatti, individuare una gerarchia tra la sovrastruttura e il sistema di isolamento. In particolare, la resistenza della sovrastruttura viene salvaguardata a spese del sistema di isolamento che limitando la forza trasmessa, genera ampi spostamenti orizzontali alla base della sovrastruttura stessa.

Tale strategia ha il vantaggio di poter estendere l'isolamento alla base anche ai casi in cui la strategia dell'elongazione del periodo evidenzia i suoi limiti di applicabilità e in particolare al caso in cui occorre fronteggiare eventi sismici con elevato contenuto energetico in bassa frequenza. È il caso di strutture fondate su terreni soffici "soft soil" o addirittura "alluvium soil" in cui si hanno registrazioni sismiche i cui spettri elastici presentano la maggiore amplificazione delle pseudoaccelerazioni in corrispondenza degli usuali *periodi target* di isolamento ($2 \div 2.5$ sec) così da risultare particolarmente distruttivi per le strutture isolate alla base piuttosto che per le strutture convenzionali a base fissa. In tali casi, i vantaggi legati alla progettazione mediante sistema di isolamento, si potrebbero continuare ad avere solo se si adottassero *periodi target* decisamente maggiori ($4 \div 5$ sec) oppure se si optasse per una progettazione strutturale con isolamento alla base mediante strategia della limitazione della forza.

È utile evidenziare che, anche nei casi in cui il terreno di fondazione non risulta così deformabile come avviene per terreni soffici, può essere comunque richiesto uno specifico livello di "robustness" e quindi una maggiore sicurezza a particolari strutture (es. ospedali, scuole, caserme dei vigili del fuoco, centrali nucleari, etc.) per la loro funzione strategica e/o per il loro contenuto e/o per il loro rischio di incidente rilevante. Maggiore sicurezza intesa come protezione nei riguardi di eventi sismici anomali, la cui probabilità di verificarsi per quanto bassa, non può

essere considerata nulla. Anche in vista di un incremento dei costi di realizzazione, tale progettazione sembra del tutto giustificata nel caso di elevata importanza strategica di una struttura, per la quale sappiamo essere importante preservarne il requisito prestazionale della piena “*funzionalità*” anche dopo un evento sismico estremo ovvero, nel caso di strutture a rischio di incidente rilevante, ridurre drasticamente la probabilità che tale incidente possa verificarsi (nel caso di impianti nucleari, ridurre la cosiddetta “*Core Damage Frequency*” da evento sismico estremo).

Si sottolinea la circostanza secondo la quale, allo stato attuale delle conoscenze, non è possibile fare una previsione deterministica del terremoto circa la sua localizzazione, l’istante in cui si verificherà, la sua esatta intensità, il suo esatto contenuto di frequenza e quindi il suo “*potenziale distruttivo*”. Una soluzione razionale di tale problema, nell’ambito del controllo strutturale passivo, è rappresentata da un approccio progettuale che permetta di conferire una protezione sismica, indipendente dall’intensità e dal contenuto in frequenza dell’evento sismico: progettazione mediante isolamento alla base con la strategia della *limitazione della forza*.

In tale ottica, si colloca il dispositivo HDHSI che sfrutta i vantaggi della dissipazione e del ricentraggio, assicurati dal dispositivo LRB, nonché i vantaggi della dissipazione attrittiva e della barriera di forza, assicurati dal dispositivo a scorrimento *FS - Friction Slider*. In presenza di terremoti d’intensità tale da essere considerati compatibili con quelli di progetto allo SLU, è prevista l’attivazione del solo LRB mentre in presenza di terremoti di intensità maggiore (compresi eventuali sismi anomali che non rientrano tra quelli di progetto allo SLU) è prevista l’attivazione dell’isolatore FS. Il coefficiente d’attrito degli FS andrà scelto in base al valore del limite di forza orizzontale che si vuole venga trasmessa alla sovrastruttura (preferibilmente tra il 10 ed il 20% della forza peso dell’intera sovrastruttura).

Tale dispositivo, e in generale tutti i dispositivi che consentono la progettazione secondo la strategia della limitazione della forza, si mostra altamente efficace nel fronteggiare anche eventi sismici, attesi o anomali,

caratterizzati da elevata intensità con azioni di tipo impulsivo ed elevato contenuto energetico in bassa frequenza, come i terremoti affetti da fenomeni di faglia “near fault motion” (Kelly, *et al.*, 2001).

2.1. Sistema di isolamento P-F

Nell’ambito della strategia progettuale basata sulla limitazione della forza, il sistema di protezione sismica che prevede l’utilizzo esclusivo degli isolatori a scorrimento (FS - Friction Slider), mira alla realizzazione di un piano di isolamento al di sotto della sovrastruttura, interamente costituito da isolatori a scorrimento. Tali isolatori sono degli appoggi a scorrimento multi-direzionali, generalmente con interfaccia in acciaio-PTFE. Tale sistema viene denominato anche Pure-Friction (P-F system) ed è privo di qualunque capacità ricentrante (Mostaghel *et al.*, 1983 & Yang *et al.*, 1990). Si riporta nel seguito, il modello matematico di una struttura isolata alla base mediante il P-F system. Trattasi di un modello a 2-GDL in cui la sovrastruttura viene assimilata ad un corpo rigido.

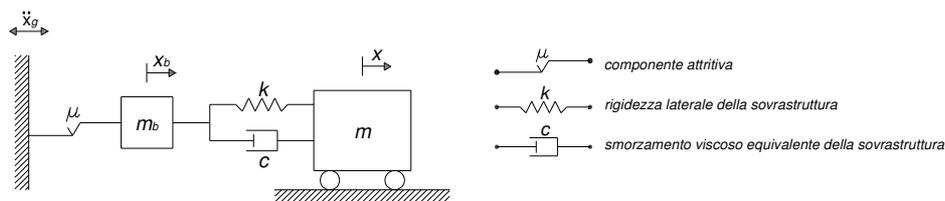


Fig. n.1 – Modello a 2-GDL per la struttura isolata alla base.

dove:

- m : massa della sovrastruttura esclusa la massa che afferrisce al primo impalcato;
- m_b : massa che afferrisce al primo impalcato isolato della sovrastruttura;
- k : rigidezza laterale della sovrastruttura;
- c : smorzamento viscoso equivalente della sovrastruttura;
- μ : coefficiente d'attrito;
- x : spostamento della sovrastruttura;
- x_b : spostamento alla base della sovrastruttura;
- \ddot{x}_g : accelerazione del suolo.

Il sistema Friction Slider sarà tale che la forza d'attrito $F_f(t)$ soddisfi le seguenti relazioni:

- in presenza di scorrimento $\dot{x}_b(t) \neq 0$:

$$F_f(t) = -\text{sgn}(\dot{x}_b(t)) \cdot F_{\max} = -\text{sgn}(\dot{x}_b(t)) \cdot \mu(m + m_b)g$$

la forza d'attrito presenta un modulo pari al massimo valore della forza attritiva e diretta con verso opposto alla velocità di scorrimento;

- in assenza di scorrimento $\dot{x}_b(t) = 0$:

$$|F_f(t)| < F_{\max} = \mu(m + m_b)g$$

la forza d'attrito non presenta un valore facilmente definibili ma, sicuramente inferiore a quello assunto dalla massima forza attritiva.

Per superare la discontinuità esistente nel passaggio tra la fase di scorrimento e la fase di non scorrimento, è possibile ricorrere ad uno dei due possibili metodi numerici: Metodo della molla fittizia “Fictitious Spring Method” (Yang *et al.*, 1990, 2000; Yang e Chen, 1999); Metodo di bilancio “Shear Balance Method” (Meirovitch, 1990).

Si adotta il metodo proposto da Yang *et al.* (1990) in base al quale le equazioni differenziali che governano il moto di una struttura, isolata alla base mediante sistema FS, sono le seguenti:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + \{F\} = -[M]\{I\}\ddot{x}_g$$

↓

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ x_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ F_f \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{x}_g$$

$$\text{con } F_f = \begin{cases} k_f \cdot (x_b - x_{b0}) & \text{in assenza di scorrimento} \\ -\text{sgn}(\dot{x}_b) \cdot \mu(m + m_b)g & \text{in presenza di scorrimento} \end{cases}$$

- F_f : forza d'attrito;
- k_f : rigidezza della molla fittizia;
- x_{bo} : spostamento associato all'allungamento della molla fittizia, nella fase iniziale di non scorrimento;
- g : accelerazione di gravità.

L'attrito che i dispositivi a scorrimento dovranno assicurare, sarà essere tale che per azioni orizzontali di medio-bassa intensità, la struttura si deformerà elasticamente, in seguito all'assenza di spostamenti all'interfaccia tra le superfici di scorrimento degli isolatori. Quando il sisma sarà tale da generare alla base della sovrastruttura, un'accelerazione oltre la quale vogliamo creare una *barriera della forza*, si verificheranno scorrimenti negli isolatori poiché risulterà superata la forza di primo distacco dell'intero sistema di isolamento. In tale ottica, si intuisce che il coefficiente d'attrito (μ) che i dispositivi a scorrimento dovranno assicurare, sarà valutato secondo l'intensità della forza orizzontale che si vuole agisca sulla sovrastruttura. In generale, la forza avrà un'intensità tale da non far nascere nella sovrastruttura delle estese escursioni in campo plastico.

Riportando, a meno del segno, la ben nota relazione che lega la massima forza attritiva (F_{\max}) al carico verticale agente (P), secondo il coefficiente d'attrito (μ):

$$F_{\max} = \mu \cdot P \quad (1)$$

si nota che (F_{\max}) rappresenta la forza raggiunta la quale si attivano gli scorrimenti all'interfaccia degli isolatori (FS) e quindi è possibile scrivere:

$$F_{\max} = M \cdot \ddot{x}_{s,\max} \quad (2)$$

dove (M) è la massa della sovrastruttura, mentre ($\ddot{x}_{s,\max}$) è l'accelerazione del terreno in corrispondenza della quale nascono gli scorrimenti. Rappresenta quindi, la massima accelerazione che può si può registrare alla base della sovrastruttura.

Si indica con (N) il carico verticale agente sul sistema di isolamento e quindi $N = M \cdot g$, dove (g) è l'accelerazione di gravità.

In definitiva possiamo scrivere:

$$\ddot{x}_{s,\max} = \mu \cdot g \quad (3)$$

Da tale relazione si deduce che in fase progettuale, il coefficiente di attrito (μ) , sarà tarato in modo tale che gli scorrimenti nei dispositivi (FS) si attivino per valori di accelerazione al suolo pari a $(\mu \cdot g)$. Ad esempio, se si vuole fissare una "barriera di forza" in corrispondenza di valori di *PGA al suolo* pari a $0.1g$, dovremo adottare isolatori in grado di garantire un coefficiente di attrito $\mu = 10\%$. Ciò permette di assicurare che il massimo taglio alla base della sovrastruttura sarà pari al 10% della sua forza peso: $V_{\max} = F_{\max} = 0.1 \cdot M \cdot g$.

Un sistema di isolamento così concepito, potrà inoltre sfruttare la componente attrittiva degli isolatori per far affidamento su un efficace sistema dissipativo.

Come già accennato in precedenza, l'aspetto delicato riguarda il saper fronteggiare consistenti spostamenti orizzontali nonché, data la mancanza di capacità ricentranti del sistema di isolamento, la presenza di spostamenti orizzontali residui che potrebbero andarsi a sommare agli spostamenti di eventi sismici successivi. È importante considerare tali aspetti, al fine di evitare danneggiamenti agli impianti e quindi avere ripercussioni sulla funzionalità stessa della struttura.

La mancanza del sistema ricentrante è accettata da diverse normative a condizione di far riferimento, nelle verifiche di compatibilità degli spostamenti (per i giunti degli impianti, per i giunti strutturali), a valori di spostamenti orizzontali, del sistema di isolamento, ben maggiori di quelli di progetto e in particolare, secondo l'*ICBO-International Conference of Building Officials* [18], pari a tre volte il valore di progetto. Inoltre, occorrerà prevedere un'adeguata struttura di contrasto che con opportuni *martinetti idraulici*, renda possibile il riposizionamento della struttura nella sua configurazione post-sisma. Tali martinetti idraulici dovranno essere in grado di superare la forza di primo distacco

legata alla reazione orizzontale degli isolatori (*FS*) per la presenza dell'attrito in corrispondenza della loro interfaccia acciaio-PTFE.

2.2. Sistema di isolamento EDF

Un'interessante variante al sistema di isolamento descritto nel paragrafo precedente, basato sempre sulla strategia della limitazione della forza, riguarda i sistemi di isolamento costituiti da *HDRB* e *FS* disposti *in serie* e non in parallelo come invece sono usualmente utilizzati.

Trattasi di un sistema di isolamento alla base, denominato *sistema EDF* (acronimo di una delle due società realizzatrici – Electricité De France) proposto da Gueraud *et al.* (1985), in cui ciascun dispositivo è costituito da un isolatore elastomerico accoppiato in sommità, con un isolatore a scorrimento. Tale dispositivo è stato applicato negli anni '80, per la protezione sismica di strutture estremamente strategiche, quali gli impianti nucleari, per i quali erano e sono richiesti requisiti di sicurezza strutturale sempre più stringenti. In particolare, il sistema EDF è stato utilizzato per isolare sismicamente 4 unità PWR a Cruas, in Francia, utilizzando 3600 dispositivi elastomerici (500x500x65mm) accoppiati con isolatori a scorrimento. Un'altra applicazione è stata a Koeberg, Sud Africa, negli anni 1984-1985, per l'isolamento sismico di 2 PWR, mediante 1800 dispositivi elastomerici (700x700x130mm) accoppiati con isolatori a scorrimento. Già negli anni '80, si poneva il problema di poter fronteggiare scenari eccezionali, non previsti in fase di progetto, quali quelli connessi ad eventi sismici estremi.

- **Cruas, Francia (1983-85), 4 reattori tipo PWR** (reattore ad acqua leggera in pressione)



- **Koeberg, Sud Africa (1984-85), 2 reattori tipo PWR** (reattore ad acqua leggera in pressione)



In definitiva, il dispositivo EDF, è caratterizzato da una componente elastomerica assicurata dall'isolatore *HDRB* e da una componente attrittiva assicurata dall'isolatore *FS*.

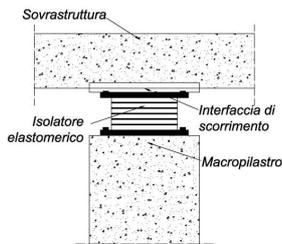


Fig. n.2 – Sistema EDF.

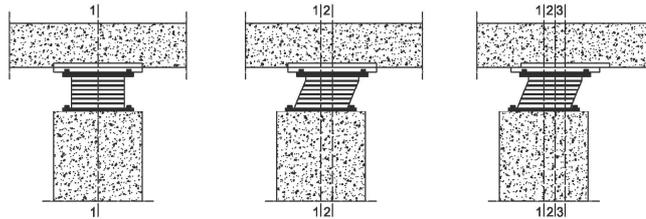


Fig. n.3 – Fasi di funzionamento del sistema EDF.

Si riporta nel seguito il modello matematico di una struttura isolata alla base mediante il sistema EDF. Trattasi di un modello a 2-GDL in cui la sovrastruttura viene assimilata ad un corpo rigido.

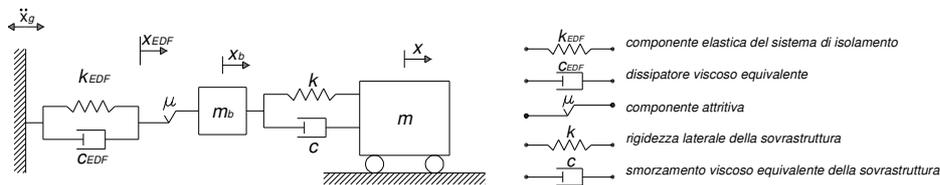


Fig. n.4 – Modello a 2-GDL per la struttura isolata alla base.

dove:

- m : massa della sovrastruttura esclusa la massa che afferisce al primo impalcato;
- k : rigidezza laterale della sovrastruttura;
- C : smorzamento viscoso equivalente della sovrastruttura;
- m_b : massa che afferisce al primo impalcato isolato della sovrastruttura;
- k_{EDF} : rigidezza del sistema di isolamento;
- C_{EDF} : smorzamento del sistema di isolamento;
- μ : coefficiente d'attrito;
- x : spostamento della sovrastruttura;
- x_b : spostamento alla base della sovrastruttura;
- x_{EDF} : spostamento in corrispondenza del dispositivo EDF;
- \ddot{x}_g : accelerazione del suolo.

In presenza di terremoti di intensità medio-bassa, è prevista l'attivazione del solo HDRB mentre in presenza di terremoti di intensità maggiore (compresi eventuali sismi anomali che non rientrano tra quelli di progetto allo SLU) è prevista l'attivazione dell'isolatore FS. Il coefficiente d'attrito andrà scelto secondo il valore del limite di forza orizzontale che si vuole venga trasmessa alla sovrastruttura (preferibilmente tra il 10 ed il 20% della forza peso dell'intera sovrastruttura).

Il vantaggio dell'*EDF system*, rispetto al precedente sistema d'isolamento in cui erano previsti esclusivamente appoggi a scorrimento, risiede nella possibilità di ricentraggio della struttura in presenza di azioni orizzontali che non attivano la forza di primo distacco, cioè per quelle azioni che non determinano scorrimenti all'interfaccia acciaio-PTFE.

Gli isolatori elastomerici hanno la funzione di garantire il ricentraggio per azioni orizzontali di una prefissata intensità, superata la quale si attivano gli isolatori a scorrimento impedendo alla forza orizzontale, trasmessa alla sovrastruttura, di crescere ulteriormente.

Un modo razionale di utilizzare l'*EDF system*, consiste nell'adottare la strategia dell'elongazione del periodo per fronteggiare le accelerazioni di picco al terreno (PGA) previste dalla norma allo SLU. In tale fase, si considera la sola componente elastomerica dei dispositivi, considerando nulli gli scorrimenti. Successivamente, tramite una progettazione con la strategia della limitazione della forza, si considera la sola componente attritiva dei dispositivi *EDF*, calibrando opportunamente il valore del coefficiente d'attrito (μ) per limitare la forza trasmessa alla sovrastruttura. Forza che verrà limitata tramite lo scorrimento dei dispositivi FS.

In tale modo, qualora si verificassero eventi sismici (poco probabili, ma non impossibili) con intensità maggiore rispetto a quella di progetto ovvero con elevato contenuto energetico in bassa frequenza, la struttura continua ad essere sismicamente protetta e continua a presentarsi indenne nella fase post-sisma, con la sola necessità di essere ricentrata e quindi di essere riportata nella posizione pre-sisma.

Per meglio comprendere come tarare il coefficiente d'attrito, occorre fare una distinzione tra la PGA (Peak Ground Acceleration) intesa come la massima accelerazione al suolo e la PSA (Peak Structure Acceleration) quale massima accelerazione per la struttura. Ovviamente si fa riferimento ad accelerazioni in direzione orizzontale.

Nel nostro caso, di struttura isolata alla base, si considera la PSA alla base della sovrastruttura e con riferimento ad essa andrà tarato il coefficiente d'attrito. Infatti, il coefficiente d'attrito (μ) sarà tale che gli scorrimenti si attivino per valori di PSA pari a ($\mu \cdot g$) e quindi tale che il massimo taglio alla base della sovrastruttura sarà pari ad una percentuale della forza peso, pari proprio al valore di (μ).

- Nel caso di sistema di isolamento con soli isolatori (FS), l'aver un coefficiente d'attrito (μ) vuol dire che gli spostamenti si attivano per un'accelerazione alla base della sovrastruttura (PSA) pari a ($\mu \cdot g$) e quindi per un valore che di (PGA), nell'istante dello scorrimento, anch'esso pari a ($\mu \cdot g$);
- nel caso di sistema di isolamento EDF, l'aver un coefficiente d'attrito (μ) vuol dire che gli spostamenti si attivano per accelerazioni alla base della sovrastruttura (PSA) pari a ($\mu \cdot g$) cui corrisponderà una (PGA), nell'istante dello scorrimento, sicuramente maggiore poiché essa rappresenta l'accelerazione registrata prima di essere "filtrata" dagli isolatori elastomerici.

Si riportano due semplici esempi esplicativi per meglio comprendere la fasi preliminari della progettazione di una struttura con sistema d'isolamento FS e con sistema EDF.

► Sistema di isolamento con soli isolatori (FS) con $PSA=0.1g$

Imponendo una $PSA=0.1g$, si dovrà garantire un coefficiente d'attrito $\mu = 10\%$. Per valori di $PSA < 0.1g$, la sovrastruttura si comporta a base fissa in quanto non nascono scorrimenti all'interfaccia acciaio-PTFE. La sovrastruttura avrà periodo fondamentale di vibrazione tale da porsi, con buona probabilità, in corrispondenza del tratto orizzontale di maggiore amplificazione dello spettro elastico ($T_B \leq T \leq T_C$, con $T_B = 0.15 \div 0.20s$ e $T_C = 0.40 \div 0.80$). Ovviamente, il livello prestazionale richiesto sarà il comportamento elastico della sovrastruttura ovvero un suo danneggiamento lieve e controllato (coefficiente di struttura $q_{max}=1.5$). La struttura non avrà bisogno di alcun tipo di ricentraggio, poiché rimane fissa alla propria base.

Per valori di $PSA \geq 0.1g$, la sovrastruttura scorre sugli isolatori (FS) poiché viene raggiunta la forza d'attrito di primo distacco. La sovrastruttura si comporta, con buona approssimazione, da corpo rigido senza subire alcun danno. La struttura avrà bisogno di essere ricentrata per la presenza di spostamenti orizzontali residui che saranno tanto maggiori quanto maggiore sarà l'intensità del sisma.

A nostro avviso conviene non superare il valore di $PSA = 0.1g$ (coefficiente di attrito $\mu = 10\%$), al fine di non rendere particolarmente oneroso il garantire un comportamento elastico della sovrastruttura quando si comporta a base fissa.

► Sistema di isolamento con l'EDF system con $PSA=0.1g$

Imponendo una $PSA=0.1g$, si dovrà garantire un coefficiente d'attrito $\mu = 10\%$. Per valori di $PSA < 0.1g$, la sovrastruttura si comporta a base isolata per la presenza degli HDRB, senza alcuno scorrimento all'interfaccia acciaio-PTFE. Differentemente dal caso precedente, la sovrastruttura avrà un periodo fondamentale di vibrazione tale da porsi nella parte bassa dello spettro elastico ($T_C \leq T \leq T_D$ con $T_C = 0.40 \div 0.80$ e $T_D = 2.50s$) e quindi, sarà più agevole garantire il comportamento elastico della sovrastruttura ovvero un suo

danneggiamento lieve e controllato ($q_{\max}=1.5$). La struttura non avrà bisogno di alcun tipo di ricentraggio, in quanto saranno i dispositivi HDRB a ricentrare la struttura.

Per valori di $PSA \geq 0.1g$, la sovrastruttura scorre sugli isolatori (FS) perché viene raggiunta la forza d'attrito di primo distacco e continua a non subire alcun danno. La struttura avrà bisogno di essere ricentrata per la presenza di spostamenti orizzontali residui che saranno tanto maggiori quanto maggiore sarà l'intensità della registrazione anomala. Nel ricentraggio sarà utile bloccare i dispositivi HDRB, con appositi diagonali di irrigidimento, in modo tale da agevolare il ricentraggio stesso.

2.3. Sistema di isolamento proposto: HDHSI

Secondo la strategia della limitazione della forza, viene proposto un nuovo isolatore sismico ibrido ad alto smorzamento denominato HDHSI (High Damping Hybrid Seismic Isolator) ottenuto dall'assemblaggio in serie, di un isolatore elastomerico con nucleo di piombo (Lead Rubber Bearing - LRB) con un isolatore a scorrimento ad alto coefficiente d'attrito (Friction Slider - FS). Il dispositivo HDHSI si pone in contrapposizione all'isolatore R-FBI (Resilient-Friction Base Isolation) proposto da Mostaghel *et al.* (1987) e vuol essere una ottimizzazione del sistema EDF precedentemente descritto. Nel paragrafo precedente è stato già ampiamente illustrato il sistema EDF, quindi resta da analizzare il motivo per cui si parla di contrapposizione dell'isolatore HDHSI all'isolatore R-FBI. Pur essendo entrambi degli isolatori ibridi, l'R-FBI è caratterizzato da una combinazione in parallelo di un isolatore elastomerico con un isolatore FS, mentre il dispositivo proposto è caratterizzato da una combinazione in serie di un isolatore LRB con un FS. Tali dispositivi nascono per fronteggiare esigenze diverse infatti, il dispositivo R-FBI rappresenta un tentativo di concepire un dispositivo capace di dissipare, ricentrare ed eliminare il problema di dipendenza delle caratteristiche di attrito dell'interfaccia acciaio-teflon, dalla velocità di scorrimento. L'isolatore R-FBI è

costituito da una serie di strati di teflon e lamine d'acciaio, con all'estremità due piastre di acciaio che funzionano da tramite per la struttura. Obiettivo di tale concezione è di scomporre lo spostamento relativo tra le due piastre d'estremità, nella somma di ridotti spostamenti che nascono tra gli strati di acciaio-teflon. In tal modo, la velocità relativa di scorrimento sono modeste e influenzano in modo non significativo il coefficiente d'attrito.

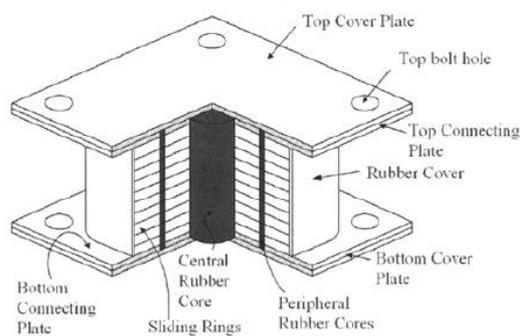


Fig. n.5 – Dispositivo R-FBI.

Si riporta nel seguito il modello matematico di una struttura isolata alla base mediante il sistema R-FBI. Trattasi di un modello a 2-GDL in cui la sovrastruttura viene assimilata ad un corpo rigido.

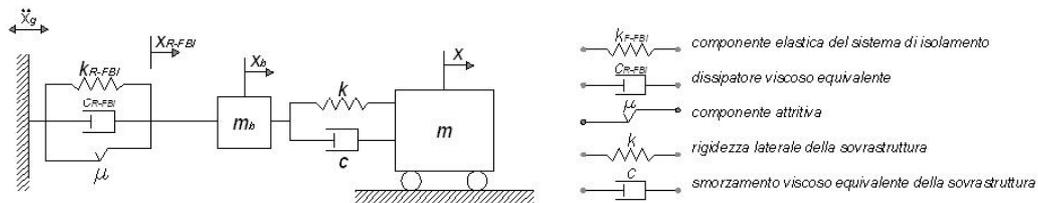


Fig. n.4 – Modello a 2-GDL per la struttura isolata alla base.

dove:

- m : massa della sovrastruttura esclusa la massa che afferisce al primo impalcato;
- k : rigidezza laterale della sovrastruttura;
- c : smorzamento viscoso equivalente della sovrastruttura;
- m_b : massa che afferisce al primo impalcato isolato della sovrastruttura;

-
- k_{R-FBI} : rigidezza del sistema di isolamento;
 - c_{R-FBI} : smorzamento del sistema di isolamento;
 - μ : coefficiente d'attrito;
 - x : spostamento della sovrastruttura;
 - x_b : spostamento alla base della sovrastruttura;
 - x_{R-FBI} : spostamento in corrispondenza del dispositivo R-FBI;
 - \ddot{x}_g : accelerazione del suolo.

Illustrati i dispositivi ibridi EDF e R-FBI, si procede a descrivere il dispositivo HDHSI proposto. Dispositivo che sfrutta i vantaggi della dissipazione e del ricentraggio assicurati dal dispositivo LRB, nonché i vantaggi della dissipazione attrittiva e della barriera di forza assicurati dal dispositivo FS.

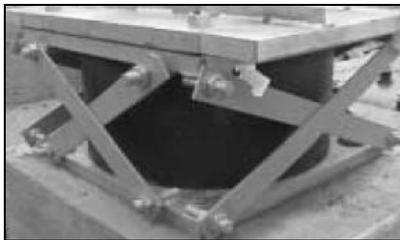
Tale dispositivo è generalmente concepito per soddisfare i seguenti requisiti:

- per effetto del sisma di progetto, relativamente agli stati limite SLV e SLC, è prevista l'attivazione del solo dispositivo LRB, assicurando un livello prestazionale tale da garantire il comportamento elastico della sovrastruttura o al limite un suo danneggiamento lieve e controllato (coefficiente di struttura $q_{\max}=1.5$). La struttura non avrà bisogno di alcun tipo di ricentraggio grazie all'attivazione della sola componente attrittiva del sistema HDHSI;
- in presenza di terremoti di maggiore intensità definiti “*strong earthquakes*” o “*extreme seismic events*” (sismi anomali che non rientrano tra quelli di progetto) è prevista l'attivazione dell'isolatore FS. Il coefficiente d'attrito andrà scelto secondo il valore del limite di forza orizzontale che si vuole venga trasmessa alla sovrastruttura (preferibilmente tra il 10 ed il 20% della forza peso dell'intera sovrastruttura). La struttura, mediante idoneo sistema di contrasto, avrà bisogno di essere ricentrata per la presenza di spostamenti orizzontali residui che saranno tanto maggiori quanto maggiore sarà l'intensità della

registrazione anomala. Nel ricentraggio sarà utile bloccare i dispositivi LRB con appositi diagonali di irrigidimento, in modo tale da agevolare il ricentraggio stesso.



Struttura di contrasto con martinetti idraulici in grado di superare la forza di primo distacco.



Diagonali che impediscono l'attivazione degli LRB per facilitare il ricentraggio della sovrastruttura.

Si precisa che è possibile, in base alle esigenze progettuali, fissare un livello più basso alla *barriera della forza* e quindi prevedere l'attivazione degli isolatori a scorrimento, già in corrispondenza di azioni orizzontali di media intensità e quindi prima di raggiungere lo SLV o SLC. Ciò permette di ridurre la massima forza che si vuole venga trasmessa alla sovrastruttura, ma con un maggiore spostamento residuo, da dover fronteggiare.

Si riporta il modello matematico di una struttura isolata alla base mediante il sistema HDHSI. Trattasi di un modello a 2-GDL in cui la sovrastruttura viene assimilata ad un corpo rigido.

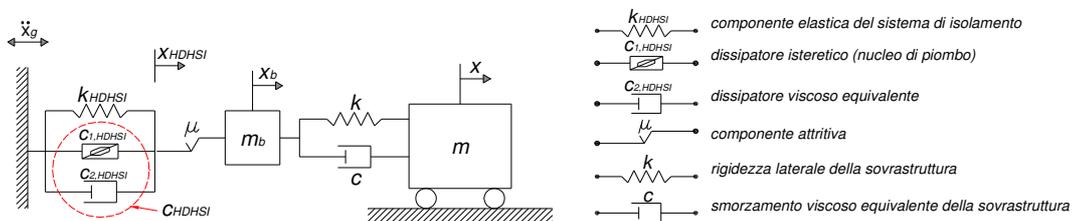


Fig. n.5a – Modello a 2-GDL per la struttura isolata alla base.

dove:

- m : massa della sovrastruttura esclusa la massa che afferrisce al primo impalcato;
- k : rigidità laterale della sovrastruttura;
- C : smorzamento viscoso equivalente della sovrastruttura;
- m_b : massa che afferrisce al primo impalcato isolato della sovrastruttura;
- k_{HDHSI} : rigidità del sistema di isolamento;
- C_{HDHSI} : smorzamento del sistema di isolamento (dissipazione della componente elastomerica + dissipazione isteretica del nucleo di piombo);
- μ : coefficiente d'attrito;
- x : spostamento della sovrastruttura;
- x_b : spostamento alla base della sovrastruttura;
- x_{HDHSI} : spostamento in corrispondenza del dispositivo HDHSI;
- \ddot{x}_g : accelerazione del suolo.

Con riferimento al modello matematico riportato in Fig. n.5a, è possibile esplicitare il sistema di equazioni differenziali che governa il moto del sistema. Ovviamente, occorrerà distinguere le due principali fasi di funzionamento del sistema HDHSI: assenza di scorrimento e presenza di scorrimento.

- In assenza di scorrimento:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}\ddot{x}_g$$

↓

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_{HDHSI} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c & 0 \\ -c & c & 0 \\ 0 & 0 & c_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_b \\ \dot{x}_{HDHSI} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k & 0 \\ -k & k+k_f & -k_f \\ 0 & -k_f & k_f+k_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ x_b \\ x_{HDHSI} \end{Bmatrix} =$$

$$= - \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m_b\ddot{x}_b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c & 0 \\ -c & c & 0 \\ 0 & 0 & c_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_b \\ \dot{x}_{HDHSI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k & 0 \\ -k & k+k_f & -k_f \\ 0 & -k_f & k_f+k_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_b \\ x_{HDHSI} \end{bmatrix} =$$

$$= - \begin{bmatrix} -m\ddot{x}_g \\ -m_b\ddot{x}_g \\ 0 \end{bmatrix}$$

- In presenza di scorrimento:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + \{F_f\} = -[M]\{I\}\ddot{x}_g$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_{HDHSI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c & 0 \\ -c & c & 0 \\ 0 & 0 & c_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_b \\ \dot{x}_{HDHSI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k & 0 \\ -k & k & 0 \\ 0 & 0 & k_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_b \\ x_{HDHSI} \end{bmatrix} +$$

$$- \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{x}_{HDHSI}) \begin{bmatrix} 0 \\ \mu(m+m_b)g \\ \mu(m+m_b)g \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m_b\ddot{x}_b \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c & 0 \\ -c & c & 0 \\ 0 & 0 & c_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_b \\ \dot{x}_{HDHSI} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k & 0 \\ -k & k & 0 \\ 0 & 0 & k_{HDHSI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_b \\ x_{HDHSI} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -m\ddot{x}_g \\ -m_b\ddot{x}_g + [\mu(m+m_b)g] \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{x}_{HDHSI}) \\ [\mu(m+m_b)g] \operatorname{sgn}(\dot{x}_b - \dot{x}_{HDHSI}) \end{bmatrix}$$

dove:

- F_f : forza d'attrito con un modulo pari al massimo valore della forza attritiva $[\mu(m + m_b)g]$ e diretta con verso opposto alla velocità di scorrimento $(\dot{x}_b - \dot{x}_{HDHSI})$;
- k_f : rigidezza della molla fittizia;
- g : accelerazione di gravità;

Nel caso in cui ci riferissimo ad una struttura a più g.d.l., come una struttura intelaiata, le equazioni che governano il moto del sistema MDOF isolato alla base mediante HDHSIs, sono le seguenti:

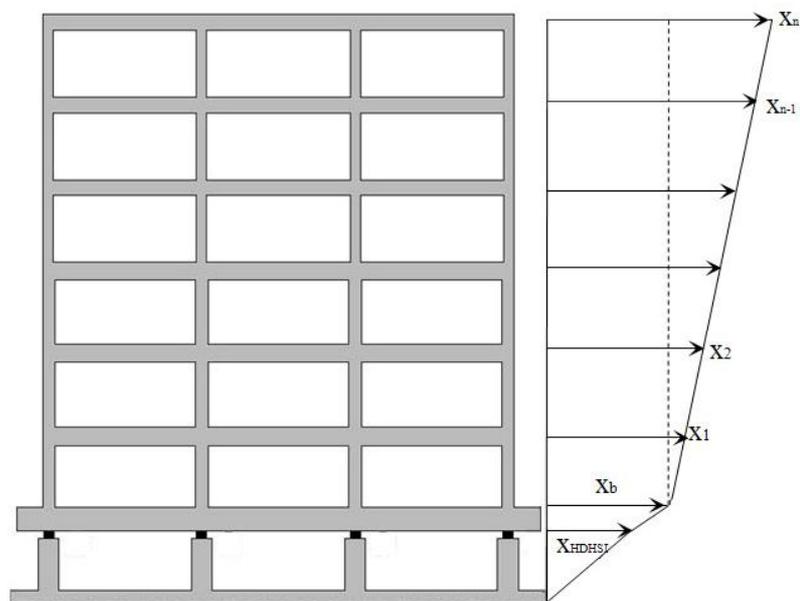


Fig. n.5b – Sistema MDOF isolato alla base mediante HDHSIs.

- In assenza di scorrimento: $(\dot{x}_b - \dot{x}_{HDHSI}) = 0$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{HDHSI} \\ \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \cdot \\ \ddot{x}_{n-1} \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{HDHSI} & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & -c_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & -c_n & c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{HDHSI} \\ \dot{x}_b \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \cdot \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \\
 + \begin{bmatrix} k_{HDHSI} + k_f & -k_f & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ -k_f & k_f + k_1 & -k_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{HDHSI} \\ x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

- In presenza di scorrimento: $(\dot{x}_b - \dot{x}_{HDHSI}) \neq 0$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{HDHSI} \\ \ddot{x}_b \\ \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \cdot \\ \ddot{x}_{n-1} \\ \ddot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{HDHSI} & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & -c_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & -c_n & c_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{HDHSI} \\ \dot{x}_b \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \cdot \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \\
 + \begin{bmatrix} k_{HDHSI} & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & -k_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{HDHSI} \\ x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu \left(m_b + \sum_{i=1}^n m_i \right) g \\ \mu \left(m_b + \sum_{i=1}^n m_i \right) g \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{sgn}(\dot{x}_b - \dot{x}_{HDHSI}) =$$

$$= - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g$$

2.3.1. Soluzione teorica: sistema ad 1-GDL in presenza di forzante armonica

Si propone un'approfondita risoluzione teorica del problema dinamico, focalizzando l'attenzione sul solo dispositivo HDHSI applicato ad una massa (m), di cui si vuole studiare il comportamento. Per tale motivo, si considera un sistema ad 1-GDL, come riportato nella figura seguente, in presenza di una forzante armonica $f(t) = f_0 \sin(\bar{\omega}t)$.

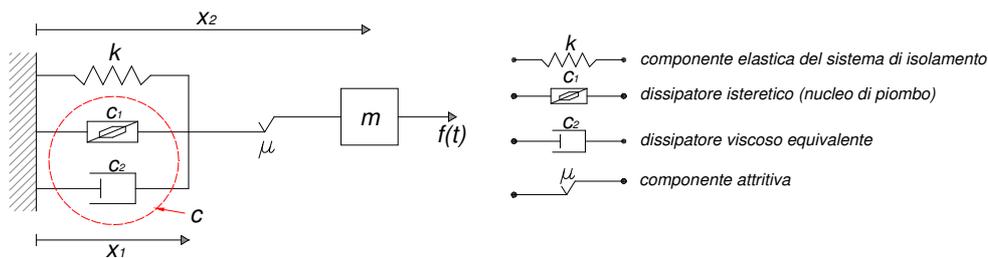


Fig. n.6 – Sistema HDHSI: Modello ad 1-GDL..

Il comportamento del dispositivo HDHSI, può essere analizzato facendo un distinguo tra due possibili condizioni:

1. isolatore a scorrimento non attivo: $\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t) = 0$
2. isolatore a scorrimento attivo: $\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t) \neq 0$

Il modello analitico si basa su due equazioni differenziali del secondo ordine. La prima è la classica equazione di un oscillatore semplice in presenza di smorzamento e con forzante sinusoidale:

$$m\ddot{x}_1(t) + c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = f_0 \sin(\bar{\omega}t) \quad (4)$$

La seconda equazione differenziale si ricava osservando che, per l'equilibrio a traslazione orizzontale, la componente dissipativa “ $c\dot{x}_1(t)$ ” sommata alla componente elastica “ $kx_1(t)$ ”, deve uguagliare la componente attrittiva “ μmg ” diretta con verso opposto alla velocità di scorrimento $(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t))$. Pertanto, è possibile scrivere la seguente equazione:

$$c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) - \text{sgn}(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) \cdot \mu mg = 0 \quad (5)$$

quindi l'equazione differenziale del II ordine in termini di x_2 :

$$m\ddot{x}_2(t) + \text{sgn}(\dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)) \cdot \mu mg = f_0 \sin(\bar{\omega}t) \quad (6)$$

Per poter analizzare il comportamento del dispositivo HDHSI occorre seguire le sue principali fasi di funzionamento e per ciascuna di esse, esplicitare le funzioni $x_1(t)$ e $x_2(t)$.

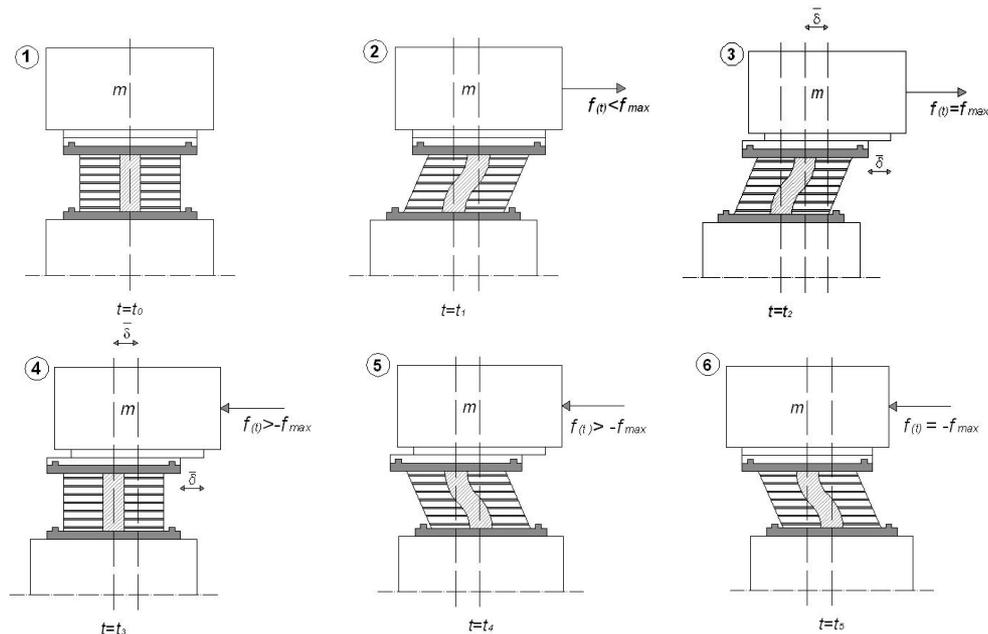


Fig. n.7 – Sistema HDHSI nelle diverse fasi di funzionamento.

Esplicitando le diverse fasi di funzionamento, si osserva che nell'istante $t = t_0$ l'isolatore HDHSI si trova nella configurazione iniziale indeformata. Successivamente, la forza armonica inizia a crescere e l'isolatore LRB si deforma fino ad arrivare all'istante $t = t_1$ in configurazione di massima deformazione, senza che si attivi l'isolatore a scorrimento ($f(t)$ è minore della forza di primo distacco). Nell'istante successivo, viene raggiunta la forza di primo distacco e si attiva l'isolatore a scorrimento, fino a raggiungere l'istante $t = t_2$ in cui, l'isolatore a scorrimento presenta il massimo spostamento.

La forza armonica inizia a decrescere finché il suo valore si annulla in corrispondenza dell'istante $t = t_3$, configurazione in cui l'isolatore LRB ritorna in condizioni indeformate. La forza armonica riprende a crescere, ma con verso opposto alle fasi precedenti, finché all'istante $t = t_4$ si raggiunge la massima deformazione nell'isolatore LRB, un'istante prima che la forza $f(t)$ eguagli la forza di primo distacco. Nell'istante successivo, viene raggiunta la forza di primo distacco e si attiva l'isolatore a scorrimento, finché all'istante $t = t_5$ lo scorrimento annulla lo spostamento generato precedentemente, per effetto della forza $f(t)$ agente in verso opposto.

FASE I ($t_0 \leq t \leq t_1$)

Isolatore a scorrimento non attivo $\rightarrow \dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t) = 0$ con $x_1(t) = x_2(t)$

$$x_1(t) = e^{-v\omega t} [A_1 \sin(\Omega t) + B_1 \cos(\Omega t)] + x_{st} N \sin(\bar{\omega} t - \varphi) \quad (7)$$

dove:

- $v = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$; $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$; $\Omega = \omega \cdot \sqrt{1 - v^2}$; $x_{st} = \frac{f_0}{k}$
- $N = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2v\beta)}}$; $\varphi = \arctg\left(\frac{2v\beta}{1 - \beta^2}\right)$; $\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega}$

- le costanti d'integrazione A_1 e B_1 , sono funzione delle condizioni iniziali:

$$x(t = t_0) = x_0; \quad \dot{x}(t = t_0) = \dot{x}_0$$

$$\dot{x}_1(t) = e^{-v\omega t} [(-v\omega A_1 - B_1\Omega) \sin(\Omega t) + (A_1\Omega - v\omega B_1) \cos(\Omega t)] + \bar{\omega} x_{st} N \cos(\bar{\omega} t - \varphi) \quad (8)$$

$$\ddot{x}_1(t) = e^{-v\omega t} [(v^2\omega^2 B_1 - 2v\omega\Omega A_1 - \Omega^2 B_1) \cos(\Omega t) + (v^2\omega^2 A_1 + 2v\omega\Omega B_1 - \Omega^2 A_1) \sin(\Omega t) - \bar{\omega}^2 x_{st} N \sin(\bar{\omega} t - \varphi)] \quad (9)$$

FASE 2 ($t_1 \leq t \leq t_2$)

Isolatore a scorrimento attivo $\rightarrow \dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t) \neq 0$

$$c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = \mu mg \rightarrow x_1(t) = \frac{\mu mg}{k} + C_1 \cdot e^{-\frac{k}{c}t} \quad (10)$$

la costante d'integrazione C_1 viene calcolata tramite la (7) imponendo

$$x_1(t) = x_1(t_1).$$

Si procede a calcolare $x_2(t)$ tramite l'esplicitazione dell'equazione (6):

$$m\ddot{x}_2(t) + \mu mg = f_0 \sin(\bar{\omega} t) \quad (11)$$

$$\ddot{x}_2(t) = \frac{f_0}{m} \sin(\bar{\omega} t) - \mu g \quad (12)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{f_0}{\bar{\omega} m} \cos(\bar{\omega} t) - \mu g t + C_2 \quad (13)$$

$$x_2(t) = -\frac{f_0}{\bar{\omega}^2 m} \sin(\bar{\omega} t) - \frac{\mu g}{2} t^2 + C_2 t + C_3 \quad (14)$$

le costanti d'integrazione C_2 e C_3 , vengono calcolate imponendo rispettivamente, le seguenti condizioni ai limiti:

- uguaglianza dello spostamento $x_2(t_1)$ della *FASE 1* con lo spostamento $x_2(t_1)$ della *FASE 2*;
- uguaglianza della velocità $\dot{x}_2(t_1)$ della *FASE 1* con la velocità $\dot{x}_2(t_1)$ della *FASE 2*.

FASE 3 ($t_2 \leq t \leq t_4$)

Isolatore a scorrimento non attivo $\rightarrow \dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t) = 0$ con $x_2(t) - x_1(t) = \bar{\delta}$

$$x_1(t) = e^{-v\omega t} [A_2 \sin(\Omega t) + B_2 \cos(\Omega t)] + x_{st} N \sin(\bar{\omega} t - \varphi) \quad (15)$$

le costanti d'integrazione A_2 e B_2 vengono calcolate imponendo rispettivamente, le seguenti condizioni ai limiti:

- uguaglianza dello spostamento $x_1(t_2)$ della *FASE 2* con lo spostamento $x_1(t_2)$ della *FASE 3*;
- uguaglianza della velocità $\dot{x}_1(t_2)$ della *FASE 2* con la velocità $\dot{x}_1(t_2)$ della *FASE 3*.

Si procede a calcolare $x_2(t)$:

$$x_2(t) = x_1(t) + \bar{\delta} \quad (16)$$

$$\dot{x}_2(t) = \dot{x}_1(t) = e^{-v\omega t} [(-v\omega A_2 - B_2 \Omega) \sin(\Omega t) + (A_2 \Omega - v\omega B_2) \cos(\Omega t)] + \bar{\omega} x_{st} N \cos(\bar{\omega} t - \varphi) \quad (17)$$

$$\ddot{x}_2(t) = \ddot{x}_1(t) = e^{-v\omega t} [(v^2 \omega^2 B_2 - 2v\omega \Omega A_2 - \Omega^2 B_2) \cos(\Omega t) + (v^2 \omega^2 A_2 + 2v\omega \Omega B_2 - \Omega^2 A_2) \sin(\Omega t)] - \bar{\omega}^2 x_{st} N \sin(\bar{\omega} t - \varphi) \quad (18)$$

FASE 4 ($t_4 \leq t \leq t_5$)

Isolatore a scorrimento attivo $\rightarrow \dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t) \neq 0$

$$c\dot{x}_1(t) + kx_1(t) = -\mu mg \rightarrow x_1(t) = \frac{\mu mg}{k} + D_1 \cdot e^{-\frac{k}{c}t} \quad (19)$$

la costante d'integrazione D_1 viene calcolata imponendo la seguente condizione al contorno:

- uguaglianza dello spostamento $x_1(t_4)$ della FASE 3 con lo spostamento $x_1(t_4)$ della FASE 4.

Si procede a calcolare $x_2(t)$ tramite l'esplicitazione dell'equazione (6):

$$m\ddot{x}_2(t) - \mu mg = f_0 \sin(\bar{\omega}t) \quad (20)$$

$$\ddot{x}_2(t) = \frac{f_0}{m} \sin(\bar{\omega}t) + \mu g \quad (21)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{f_0}{\bar{\omega}m} \cos(\bar{\omega}t) + \mu g t + D_2 \quad (22)$$

$$x_2(t) = -\frac{f_0}{\bar{\omega}^2 m} \sin(\bar{\omega}t) + \frac{\mu g}{2} t^2 + D_2 t + D_3 \quad (23)$$

le costanti d'integrazione D_2 e D_3 , vengono calcolate imponendo rispettivamente, le seguenti condizioni ai limiti:

- uguaglianza dello spostamento $x_2(t_4)$ della FASE 3 con lo spostamento $x_2(t_4)$ della FASE 4;
- uguaglianza della velocità $\dot{x}_2(t_4)$ della FASE 3 con la velocità $\dot{x}_2(t_4)$ della FASE 4.

Illustrata la risoluzione teorica del modello matematico, nelle sue principali fasi di funzionamento, si procede, nel capitolo successivo, ad illustrare la modellazione del dispositivo, mediante elementi finiti in regime non lineare.

Capitolo II

Modellazione non lineare del sistema d'isolamento ibrido oggetto di studio

1. Introduzione

Gli isolatori elastomerici siano essi ad alto smorzamento con o senza nucleo dissipativo di piombo, mostrano un comportamento marcatamente non lineare, tale da rendere non sempre corretto un approccio lineare con relativa scelta dei parametri di rigidezza e dello smorzamento equivalente.

Il modello non lineare, ha l'indubbio vantaggio di poter simulare il comportamento ciclico-isteretico dell'isolatore, ma i parametri che lo caratterizzano non sono sempre di agevole determinazione e/o implementazione.

Il dispositivo proposto, non può prescindere da una modellazione in regime non lineare e quindi occorre studiarne il comportamento meccanico al fine di poter adottare una corretta e realistica modellazione numerica.

2. Modellazione degli isolatori in regime non lineare

La riproduzione per via numerica del comportamento ciclico degli isolatori necessita di un attento studio circa la modellazione in regime non lineare da

adottare. Si affronterà inizialmente la modellazione dell'isolatore LRB, successivamente quella dell'isolatore FS, per poter affrontare la modellazione del dispositivo HDHSI derivante dal funzionamento in serie dei due precedenti isolatori.

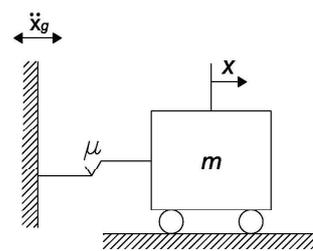
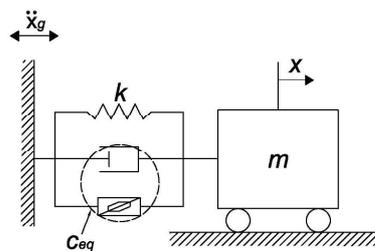
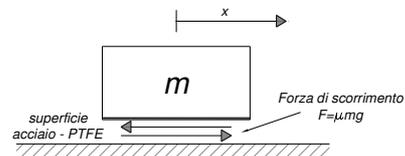
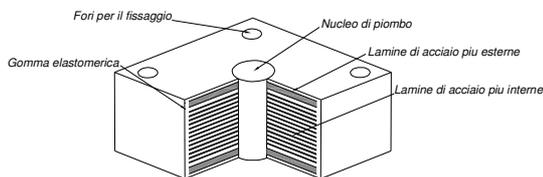
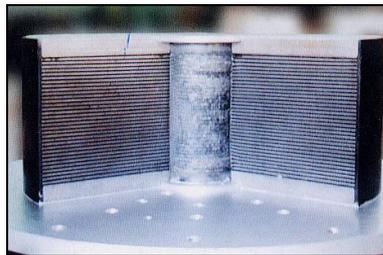


Fig. n.8 - Isolatore elastomerico con nucleo di piombo (LRB) - Modello matematico.

Fig. n.9 - Isolatore a scorrimento (FS) - Modello matematico.

2.1. Modellazione dell'isolatore LRB

Gli isolatori elastomerici con nucleo di piombo presentano un comportamento marcatamente non lineare così come gli isolatori elastomerici ad alto smorzamento (HDRB), anche se in maniera sostanzialmente differente. Gli unici isolatori elastomerici ad avere un comportamento non lineare trascurabile e quindi approssimabile con un legame forza-spostamento a rigidità costante, sono gli

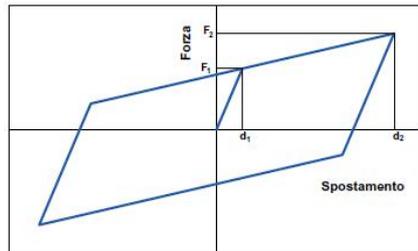
isolatori elastomerici in gomma naturale (RB) o più in generale gli isolatori elastomerici a basso smorzamento.

In generale, per un isolatore HDRB, il comportamento è caratterizzato dalla dipendenza da svariate variabili che ne rendono difficile la riproducibilità per via numerica della risposta ciclica isteretica. I principali aspetti di tale comportamento ciclico isteretico, possono essere riassunti di seguito:

1. variazione del valore di rigidità e di smorzamento al variare del livello di deformazione a taglio;
2. variazione della forma ciclica per i diversi livelli di deformazione tagliante;
3. dipendenza dalla storia di carico (strain history) cioè dipendenza dalla velocità con cui il ciclo isteretico viene compiuto (nonlinear strain-rate dependence);
4. incrudimento in regime di grandi deformazioni;
5. comportamento dipendente dalle escursioni della temperatura;
6. accoppiamento del comportamento ciclico isteretico nelle due direzioni preferenziali (multiaxial o bidirectional elasto-plastic model);
7. effetto di softening nei cicli successivi al primo (effetto di Mullins detto anche scragging).

Gli aspetti appena elencati, riguardano anche l'isolatore LRB, ma alcuni di essi sono poco significativi, tanto da poterli considerare trascurabili. Ciò, rende decisamente meno complesso il comportamento ciclico di un isolatore LRB che presenta una maggiore stabilità e quindi una più affidabile riproducibilità per via numerica del suo comportamento non lineare.

Si ritiene comunque che per un isolatore LRB, una modellazione elastico-lineare equivalente sia fortemente approssimata, poco rispondente al suo reale comportamento e quindi una caratterizzazione non lineare è inevitabile. Per riprodurre il comportamento ciclico-isteretico è possibile ricorrere ad un legame forza-spostamento bilineare come riportato in figura.



F_1 : forza al limite elastico

F_2 : forza massima per lo spostamento
corrispondente allo SLV

d_1 : spostamento al limite elastico

d_2 : spostamento corrispondente allo SLV

Fig. n.10 – Legame forza-spostamento bilineare per LRB.

Per caratterizzare tale ciclo, occorrono i valori $(F_1; d_1; F_2; d_2)$ che vengono tabellati per ciascun isolatore, dalla casa costruttrice. Nel presente lavoro, si farà riferimento a dispositivi prodotti dalla “FIP industriale”.

Si sottolinea che in caso di deformazioni lente, come quelle indotte da variazioni termiche, il legame costitutivo dell’isolatore, pur continuando a rimanere bilineare, presenta parametri $(F_1; d_1; F_2; d_2)$ differenti rispetto a quelli corrispondenti a deformazioni veloci come quelle indotte dal sisma.

L’isolatore LRB che costituisce la parte elastomerica del dispositivo HDHSI, differentemente dall’isolatore elastomerico HDRB (v. Fig. n.11) che invece costituisce la parte elastomerica del dispositivo EDF, come già accennato in precedenza, presenta un comportamento ciclico isteretico decisamente più stabile. Infatti, presenta una forma del ciclo, caratterizzata da valori della rigidezza elastica (K_e) e della rigidezza post-snervamento (K_p) , che non subiscono apprezzabili variazioni con il variare del livello di deformazione a taglio. Ciò permette di caratterizzare la forma del ciclico isteretico, indipendentemente dal valore di deformazione a taglio (γ) e quindi senza la necessità di aggiornare le rigidezze $(K_e; K_p)$ per ogni variazione di (γ) .

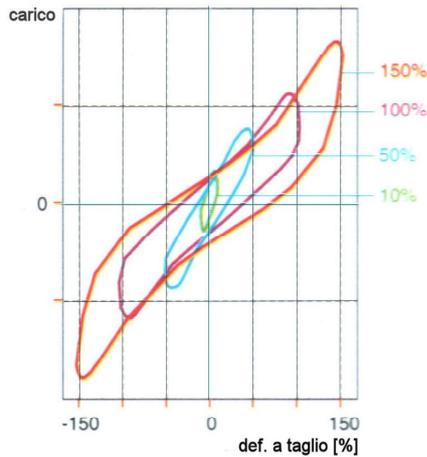


Fig. n.11 – Ciclo isteretico di un generico HDRB sottoposto a prove dinamiche ad ampiezza crescente.

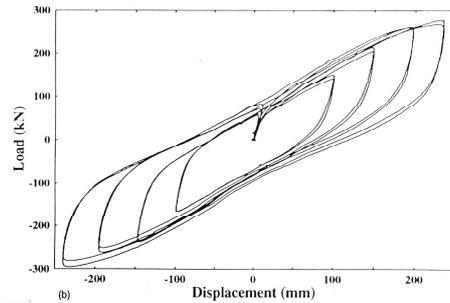


Fig. n.12a – Ciclo isteretico di un generico LRB sottoposto a prove dinamiche ad ampiezza crescente.

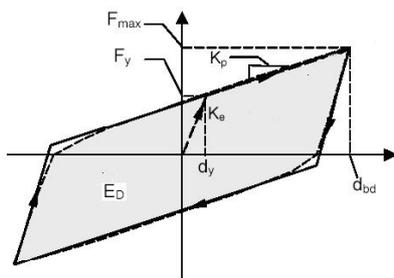


Fig. n.12b – Ciclo isteretico dell'isolatore LRB bilinearizzato.

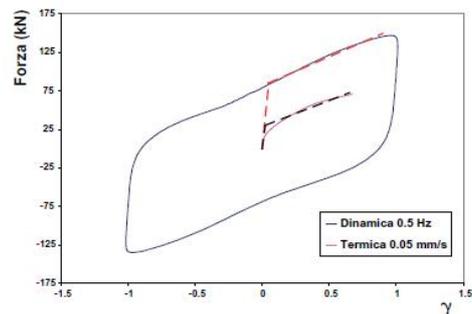


Fig. n.12c – Differente comportamento dell'isolatore LRB (azioni lente; azioni veloci).

Inoltre, per un isolatore LRB è possibile ritenere trascurabile la dipendenza del comportamento ciclico isteretico dalla velocità con cui tale ciclo viene compiuto. In altre parole, è possibile ritenere trascurabile la “strain-rate dependence”, diversamente dall'isolatore HDRB. Come si può osservare dalle immagini seguenti, per le usuali frequenze sismiche, il comportamento ciclico di un LRB, a parità di deformazione massima imposta, non subisce significative differenze, così da evitare di chiamare in causa modelli reologici a comportamento elastico-viscoplastico. Tali differenze sono invece significative per un HDRB e anche per

un LRB, in quest'ultimo caso, limitatamente alla presenza di azioni con frequenze molto basse come ad esempio 0.05 Hz, che non riguardano azioni sismiche bensì azioni di altra natura come le azioni termiche.

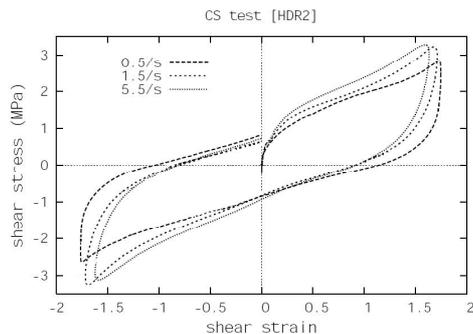


Fig. n.13a – Ciclo isteretico di un generico HDRB sottoposto a differenti strain history.

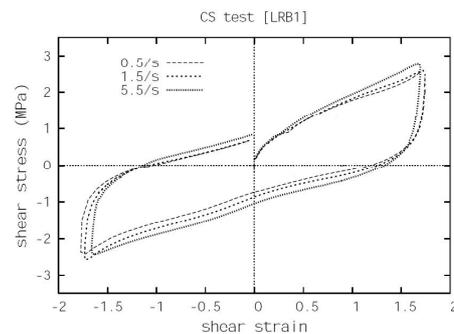


Fig. n.13b – Ciclo isteretico di un generico LRB sottoposto a differenti strain history.

L'aspetto legato all'influenza dalla temperatura è trascurabile per un LRB e l'effetto dell'incrudimento, in regime di grandi deformazioni, viene anch'esso trascurato poiché si eviterà di spingere l'isolatore a livelli di deformazione tagliante eccessivamente elevati dal momento che ciò comporterebbe, inevitabilmente, una drastica riduzione della capacità portante verticale inseguito ad una diminuzione dell'area d'improta dell'isolatore.

La modellazione dell'effetto di softening per i cicli successivi al primo (effetto di Mullins), imputabile al riscaldamento del nucleo di piombo, è tuttora oggetto di ricerca tanto per gli isolatori LRB quanto per gli isolatori HDRB che pur avendo un fenomeno analogo (detto scragging), è però imputabile alla variazione di struttura molecolare della gomma elastomerica durante i primi cicli isteretici.

Infine, l'accoppiamento del comportamento ciclico isteretico nelle due direzione preferenziali, è importante considerarlo poiché la struttura, pur avendo un comportamento dinamico regolare, è sottoposta ad entrambe le componenti dell'azione sismica.

Alla luce delle considerazioni fatte, partendo dalla modellazione bilineare precedentemente descritta, è possibile migliorare la riproducibilità per via numerica del comportamento ciclico-isteretico, tramite un modello isteretico

proposto da Wen [1]. In tale modello, si assume che la forza reagente F sia pari alla somma di due aliquote, una lineare elastica ed una isteretica proporzionali all'entità delle deformazioni:

$$F = \alpha \frac{F_y}{\gamma_y} \gamma + (1 - \alpha) F_y Z \quad (24)$$

- γ : deformazione a taglio;
- F_y : valore di snervamento della forza agente;
- γ_y : deformazione in corrispondenza di F_y ;
- $\alpha = K_p / K_e$: rapporto tra la rigidezza post-snervamento e la rigidezza elastica;
- Z : parametro isteretico adimensionale che controlla la forma del ciclo.

Il codice di calcolo adottato (SAP2000 v.10.0.7), consente l'implementazione di tale modello matematico, tramite l'elemento finito non lineare "NLlink" del tipo "Plastic Wen". Per ciascun g.d.l. è possibile definire un elemento plastico monoassiale indipendente, il cui comportamento meccanico è dato dalla seguente relazione analitica del tutto equivalente alla (24):

$$f = \text{ratio} \cdot k \cdot d + (1 - \text{ratio}) \cdot \text{yield} \cdot z \quad (25)$$

in cui:

- f : forza che nasce nel link;
- d : valore della deformazione;
- yield : forza di snervamento;
- k : valore della rigidezza nella fase elastica;
- ratio : rapporto tra la rigidezza post-snervamento e la rigidezza elastica. Individua quindi la pendenza del ramo plastico, tramite il suo prodotto con la rigidezza elastica;
- z : variabile isteretica interna con $|z| \leq 1$ e con $|z| = 1$ superficie di snervamento.

Il valore iniziale di z è pari a zero, ed evolve in accordo con la seguente relazione differenziale:

$$\dot{z} = \frac{k}{yield} \begin{cases} \dot{d}(1 - |z|^{\exp}) \\ \dot{d} \end{cases} \Leftrightarrow \dot{d} \cdot z > 0 \quad \dot{d} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (26)$$

dove:

- $\dot{d} = \frac{\partial d}{\partial t}$;
- $\exp \geq 1$ permette di raccordare il ramo elastico con il ramo post-snervamento del ciclo isteretico.

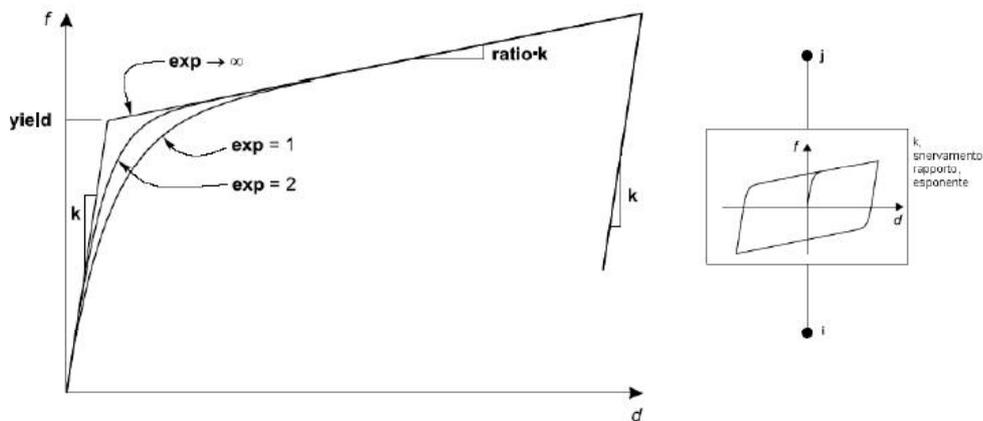


Fig. n.14 - Parametri caratterizzanti l'elemento non lineare "Plastic Wen".

La modellazione proposta è possibile adottarla nel caso di analisi 2D in cui non c'è l'esigenza di considerare l'interazione del comportamento ciclico isteretico nelle due direzioni preferenziali.

Se si considerano strutture 3D e l'input sismico viene assegnato contemporaneamente secondo le due direzioni piane preferenziali "Bi-Directional Ground Motions", occorre che la modellazione dell'isolatore non avvenga più, come nel caso di strutture 2D, tramite un elemento plastico monoassiale, bensì tramite un elemento plastico biassiale in grado di accoppiare le proprietà

isteretiche delle due deformazione a taglio e le proprietà lineari per le quattro restanti deformazioni. Tale modello si basa sul comportamento isteretico proposto da Park, Wen ed Ang [4] successivamente applicato, per le analisi non lineari di strutture 3D isolate alla base, da Nagarajaiah, Reinhorn e Constantinou [10].

Il codice di calcolo adottato (SAP2000 v.10.0.7), consente l'implementazione di tale modello matematico, tramite l'elemento finito non lineare "NLlink" del tipo "Rubber Isolator". Le relazioni forza-deformazione che tengono conto dell'accoppiamento delle deformazioni non lineari a taglio, sono le seguenti:

$$f_{u2} = ratio_2 \cdot k_2 \cdot d_{u2} + (1 - ratio_2) \cdot yield_2 \cdot z_2 \quad (27)$$

$$f_{u3} = ratio_3 \cdot k_3 \cdot d_{u3} + (1 - ratio_3) \cdot yield_3 \cdot z_3 \quad (28)$$

dove:

- d_{u2} : deformazioni a taglio nel piano 1-2;
- d_{u3} : deformazioni a taglio nel piano 1-3;
- f_{u2} : forza di taglio nel piano 1-2;
- f_{u3} : forza di taglio nel piano 1-3;
- k_2 ; k_3 : costanti elastiche nella fase elastica;
- $yield_2$; $yield_3$: forze di snervamento;
- $ratio_2$; $ratio_3$: rapporti tra la rigidezza post-snervamento e la rigidezza elastica. Individuano quindi la pendenza del ramo plastico, tramite il loro prodotto con la rigidezza elastica corrispondente;
- z_2 ; z_3 : variabili isteretiche interne.

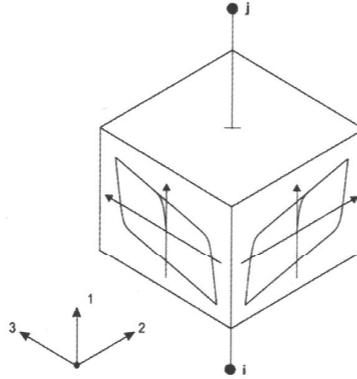


Fig. n.15 – Elemento NLink “Rubber Isolator”.

Le variabili isteretiche interne presentano valori che soddisfano la relazione seguente:

$$\sqrt{z_2^2 + z_3^2} \leq 1 \quad \text{con} \quad \sqrt{z_2^2 + z_3^2} = 1 \text{ superficie di snervamento}$$

Il valore iniziale di tali variabili è zero, successivamente assumono valori maggiori di zero, in accordo con il seguente sistema di equazioni differenziali:

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a_2 \cdot z_2^2 & -a_3 \cdot z_2 \cdot z_3 \\ -a_2 \cdot z_2 \cdot z_3 & 1 - a_3 \cdot z_3^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{yield_2} \dot{d}_{u2} \\ \frac{k_3}{yield_3} \dot{d}_{u3} \end{Bmatrix}$$

dove:

$$a_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } \dot{d}_{u2} \cdot z_2 > 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad a_3 = \begin{cases} 1 & \text{se } \dot{d}_{u3} \cdot z_3 > 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

I parametri richiesti dal SAP2000 per caratterizzare l'elemento NLink “Rubber Isolator”, secondo le direzioni 1; 2 e 3 sono i seguenti:

dir. 1

effective stiffness

rigidezza in direzione verticale

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione verticale

dir. 2; dir. 3**effective stiffness**

rigidezza equivalente, in direzione orizzontale. Rappresenta la rigidezza secante corrispondente ad una deformazione tagliante del 100%

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione orizzontale

stiffness

rigidezza nella fase elastica, in direzione orizzontale. Corrisponde alla rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico

yield strenght

forza di snervamento

post yield stiffness ratio

rapporto tra il valore della rigidezza post- snervamento e il valore di rigidezza elastica

yielding exponent

coefficiente esponenziale che determina il raccordo tra il ramo elastico e il ramo plastico del ciclo isteretico

2.2. Modellazione dell'isolatore FS

L'isolatore a scorrimento che si considera, è un dispositivo multidirezionale, costituito da due dischi di diametro diverso che scorrono l'uno sull'altro, realizzati con materiali che sviluppano un prefissato attrito tra le superfici a contatto. Le superfici di scorrimento più utilizzate e ampiamente sperimentate, sono di acciaio e PTFE (Teflon). In tale caso il coefficiente di attrito dinamico è compreso tra il 5% ed il 20% e si riduce in maniera significativa fino a valori di circa 1-2% in caso di lubrificazione delle superfici.

Il coefficiente di attrito dinamico, come evidenziano svariate sperimentazioni, è funzione della pressione di contatto, della velocità di scorrimento e della temperatura dell'ambiente in cui il dispositivo è inserito. Inoltre, a causa del deterioramento delle superfici di scorrimento, anche il numero di cicli e più in particolare la distanza percorsa dalle superfici, influenza in maniera non trascurabile il coefficiente di attrito dinamico.

Nelle figure seguenti si riportano due grafici in cui si mostra come tali parametri incidono sul valore del coefficiente di attrito dinamico.

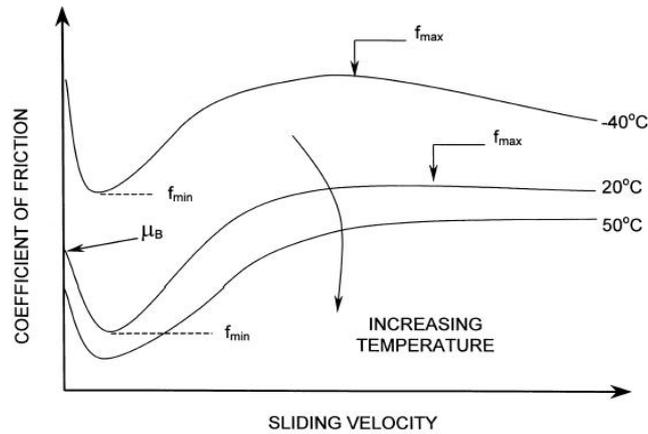


Fig. n.16 – Dipendenza del coefficiente di attrito dalla velocità di scorrimento e dalla temperatura (Constantinou et al., 1990).

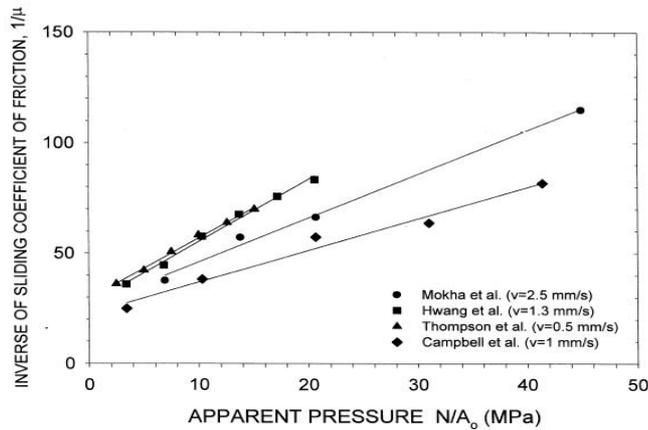


Fig. n.17 – Dipendenza del coefficiente di attrito dal carico applicato e dalla velocità di scorrimento.

In sintesi si può affermare che il coefficiente di attrito dinamico:

- presenta un andamento molto variabile rispetto alla velocità di scorrimento tale che per velocità molto basse risulta rapidamente decrescente e successivamente, per velocità maggiori, cresce fino a divenire praticamente costante nell'intervallo di velocità che tipicamente si raggiunge in condizioni sismiche (200-800 mm/s);

-
- si riduce quasi linearmente al crescere della pressione di contatto tra le superfici;
 - diminuisce al crescere della temperatura;
 - risulta essere fortemente influenzato dallo stato di lubrificazione delle superfici a contatto e in particolare, si possono avere differenze che arrivano a circa un ordine di grandezza.

L'estrema variabilità del coefficiente di attrito degli isolatori a scorrimento comporta che nella pratica, per la non agevole modellazione, si rinuncia a sfruttare la dissipazione di energia per attrito. Generalmente, si ricorre all'utilizzo di Fiction Slider lubrificati con la sola funzione di resistere ai carichi verticali e lasciando liberi, alla luce dei ridottissimi valori del coefficiente di attrito, gli spostamenti orizzontali.

Nel caso oggetto di studio, la componente attritiva verrà considerata perché sarà volutamente non trascurabile in quanto indispensabile per contenere il valore degli spostamenti orizzontali che nascono all'interfaccia di scorrimento, inseguito all'azione sismica. Nel caso oggetto di studio si rinuncia ad utilizzare il PTFE come materiale attritivo, poiché si considera un particolare materiale ad attrito controllato, denominato XLIDE®, utilizzato per gli isolatori AlgaPend dell'Algasism. Tale materiale presenta le seguenti caratteristiche:

- un coefficiente d'attrito controllato cioè un valore effettivo che corrisponde a quello specificato entro una ristretta fascia di tolleranza;
- non è influenzato in maniera significativa dalla temperatura;
- presenta una notevole resistenza all'usura ed alle elevate temperature;
- presenta una resistenza caratteristica a compressione elevata, circa doppia rispetto a quella raggiungibile con il PTFE.

I modelli matematici disponibili, per riprodurre il comportamento ciclico del Fiction Slider, sono essenzialmente due:

- modello con coefficiente di attrito costante, indipendente dalla velocità di scorrimento;

- modello con coefficiente di attrito variabile, dipendente dalla velocità di scorrimento.

2.2.1. Modellazione con coefficiente di attrito indipendente dalla velocità di scorrimento

Il modello con coefficiente di attrito “ μ ” costante, indipendente dalla velocità di scorrimento “ \dot{d}_b ”, nasce dalla definizione della forza di attrito secondo la classica teoria di Coulomb, in base alla quale la massima forza di attrito F_{\max} è espressa dalla seguente relazione:

$$F_{\max} = -\text{sgn}(\dot{d}_b) \cdot \mu \cdot P_{Sd} \quad (29)$$

dove:

- F_{\max} è la forza di attrito;
- μ è il coefficiente di attrito dinamico;
- P_{Sd} è la componente perpendicolare alla superficie di scorrimento della risultante delle forze agenti sull'isolatore;
- d_b è lo spostamento che nasce all'interfaccia acciaio-PTFE.

Con riferimento a tale modellazione, sottoponendo il dispositivo ad un ciclo di carico-scarico e indicando con d_{bd} lo spostamento massimo dell'isolatore, si ottiene il seguente ciclo isteretico.

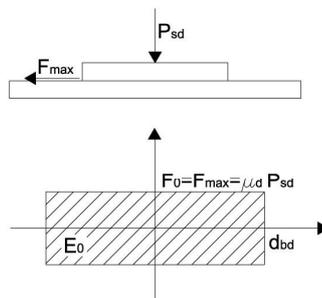


Fig. n.18 – Ciclo isteretico di un isolatore a scorrimento.

Il ciclo descritto dall'isolatore, risulta caratterizzato da un andamento regolare con una forma più o meno allungata a seconda della forza di distacco F_{max} e dello spostamento massimo d_{bd} . Si riportano i risultati ottenuti da un'analisi numerica, relativamente alla risposta di un sistema 1-GDL in presenza di un isolatore a scorrimento con coefficiente d'attrito costante ($\mu = 0.1$), eccitato mediante un accelerogramma generato.

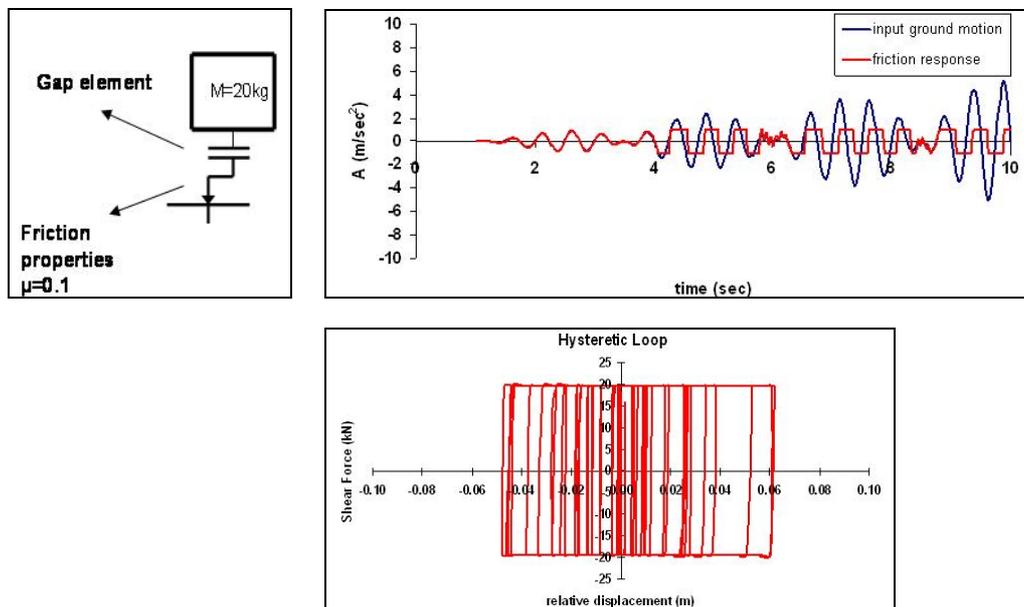


Fig. n.19 – Risposta di un sistema 1-GDL ($\mu = \text{cost}$).

2.2.2 Modellazione con coefficiente di attrito dipendente dalla velocità di scorrimento

La modellazione di seguito illustrata, rappresenta un approfondimento del modello descritto nel paragrafo precedente, in quanto considera la dipendenza del coefficiente di attrito “ μ ” da una delle principali variabili, rappresentata dalla velocità di scorrimento “ \dot{d}_b ”. Dal punto di vista analitico la relazione attritiva resta identica alla (29) mentre ciò che cambia è il valore del coefficiente μ che

non viene considerato costante bensì variabile secondo la relazione fornita da Mokha, Constantinou, Reinhorn [6]:

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min})e^{-r|\dot{d}_b|} \quad (30)$$

dove:

- f_{\max} rappresenta il coefficiente d'attrito in corrispondenza delle alte velocità di scorrimento;
- f_{\min} rappresenta il coefficiente d'attrito in corrispondenza delle basse velocità di scorrimento;
- \dot{d}_b rappresenta la velocità di scorrimento;
- r definito inverso della velocità di scorrimento caratteristica. Assume valore costante ed ha il compito di controllare la variazione del coefficiente d'attrito e quindi il passaggio da f_{\min} ad f_{\max} . Viene valutata sperimentalmente ed assume valori generalmente non superiori a 100 s/m.

La relazione (30) consente un'ottima interpolazione dei risultati ottenuti sperimentalmente, come si evince dalla figura seguente.

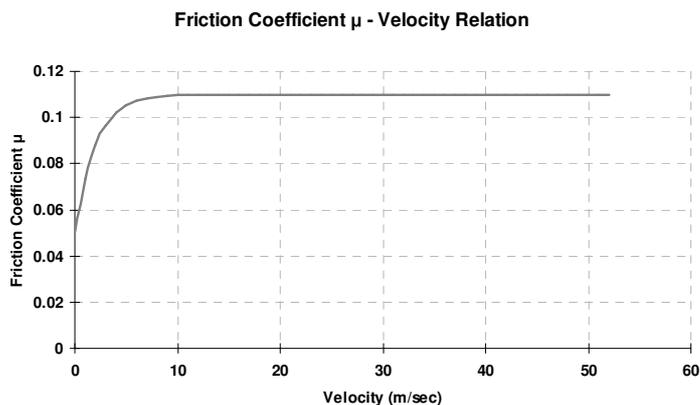


Fig. n.20 – Legge analitica del coefficiente di attrito.

$$(f_{\max} = 0,11; f_{\min} = 0,05)$$

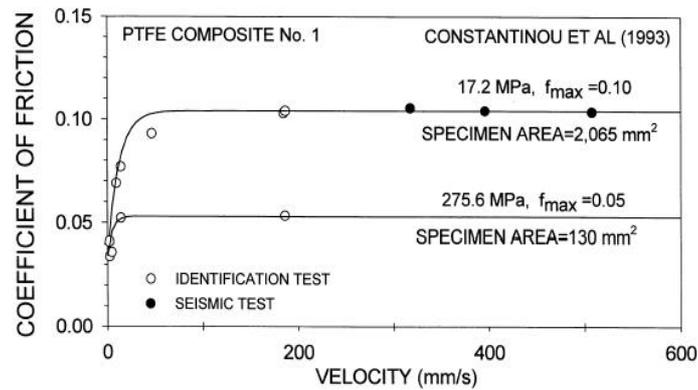


Fig. n.21 – Correlazione tra prove sperimentali e legge analitica.

Si osserva come la relazione (30) sia poco rappresentativa per basse velocità, in quanto non tiene conto della forte riduzione del coefficiente d'attrito. Tuttavia, ricordando che in caso di azioni sismiche, le velocità che si raggiungono ricadono nell'intervallo 200÷800 mm/s, si può affermare che la relazione analitica proposta da Mokha *et al.* (1987) risulta essere, ai nostri fini, particolarmente realistica.

La dipendenza del coefficiente di attrito μ dalla velocità di scorrimento v , comporta che il ciclo descritto dall'isolatore, rispetto al modello precedente, risulta caratterizzato da un andamento non più marcatamente regolare; tuttavia, come accade per il modello precedente, ha una forma più o meno allungata a seconda della forza di distacco F_{max} e dello spostamento massimo $d_{b,max}$.

Si riportano i risultati ottenuti da un'analisi numerica, relativamente alla risposta di un sistema 1-GDL in presenza di un isolatore a scorrimento con coefficiente d'attrito variabile secondo la relazione (30) con $\mu_{min} = 0.05$ e $\mu_{max} = 0.1$, eccitato mediante un accelerogramma generato.

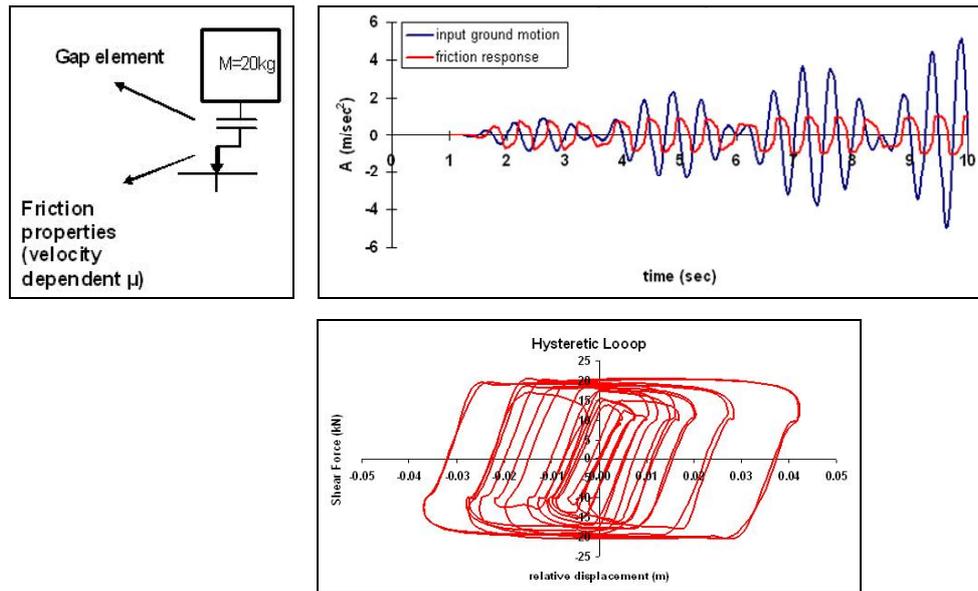


Fig. n.22 – Risposta di un sistema 1-GDL ($\mu = \text{variabile}$).

La relazione analitica (30) è stata implementata con il codice di calcolo SAP2000 v.10.0.7, tramite il quale la modellazione dell'isolatore FS avviene mediante elementi finiti a comportamento non lineare “NLink” del tipo “Friction Pendulum isolator”.

Trattasi di un “NLink” a comportamento biassiale che consente di modellare un isolatore Friction Slider in regime 3D, accoppiando le proprietà di attrito definite per le due deformazioni a taglio soggette alle ipotesi di scorrimento. Tali deformazioni a taglio, avvengono per lo slittamento secondo due superfici che possono essere caratterizzate da un raggio di curvatura nullo, se trattasi di superficie di scorrimento piane, o da un raggio di curvatura diverso da zero, se una delle due superfici è concava. Consente inoltre, di definire un vincolo unilaterale in direzione verticale, prevedendo un “Gap assiale” al fine di rappresentare, in tale direzione, l'incapacità di resistere a trazione del dispositivo.

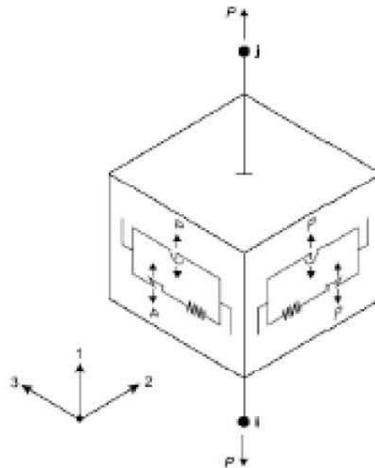


Fig. n.23 – Modello dell'elemento NLink "Fiction Pendulum isolator".

du_1 : deformazione assiale secondo la direzione 1;

du_2 : deformazione a taglio nel piano 1-2;

du_3 : deformazione a taglio nel piano 2-3;

fu_1 : forza assiale in direzione 1;

fu_2 : forza di taglio nel piano 1-2;

fu_3 : forza di taglio nel piano 2-3;

P : carico assiale in direzione 1.

Il comportamento ciclo isteretico dell'isolatore si basa su quanto proposto da Park, Wen ed Ang [4] nonché da Nagarajaiah, Reinhorn e Constantinou [10]; la discontinuità presente nel passaggio tra la fase di scorrimento e la fase di non scorrimento è affrontata con il metodo proposto da Yang [9]; la variabilità del coefficiente d'attrito è in accordo con la legge proposta da Mokha, Constantinou, Reinhorn [6]; infine l'effetto pendolo è in linea con quanto proposto da Zayas, Low, Mahin [5].

L'effetto dell'attrito e l'effetto pendolo (nel caso generale in cui il raggio di curvatura non è nullo), sono direttamente proporzionali al carico assiale P agente

sull'isolatore. In particolare, la forza assiale P è fornita, in virtù della presenza del "Gap assiale" in *direzione 1*, dalla seguente relazione:

$$P = f_{u1} = \begin{cases} k1 \cdot d_{u1} & \text{per } d_{u1} < 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

in cui $k1$ è la rigidezza in direzione 1, con valore necessariamente positivo affinché l'isolatore possa generare azioni di taglio.

L'effetto dell'attrito e l'effetto pendolo, sono forniti dalle seguenti relazioni che rappresentano le forze che nascono nelle direzioni 2 e 3, duali ai gradi di libertà a taglio nelle medesime direzioni:

$$\begin{aligned} f_{u2} &= f_{u2f} + f_{u2p} \\ f_{u3} &= f_{u3f} + f_{u3p} \end{aligned}$$

dove si è indicato con il pedice "f" la componente legata all'effetto dell'attrito e con il pedice "p" la componente legata all'effetto pendolo.

La relazione Forza-Deformazione relativa all'attrito è fornita da:

$$\begin{aligned} f_{u2f} &= -P \cdot \mu_2 \cdot z_2 \\ f_{u3f} &= -P \cdot \mu_3 \cdot z_3 \end{aligned}$$

dove μ_2 e μ_3 sono i coefficienti di attrito e $z_2; z_3$ sono le variabili isteretiche interne.

I coefficienti di attrito hanno una dipendenza dalla velocità di scorrimento secondo le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} \mu_2 &= fast_2 - (fast_2 - slow_2)e^{-rv} \\ \mu_3 &= fast_3 - (fast_3 - slow_3)e^{-rv} \end{aligned}$$

in cui $slow_2; slow_3$ sono i coefficienti di attrito a bassa velocità e $fast_2; fast_3$ sono i coefficienti di attrito ad alta velocità. Si può osservare la perfetta corrispondenza di tali relazioni con quanto suggerito dalla relazione (30).

La velocità relativa di slittamento v è fornita dall'espressione seguente:

$$v = \sqrt{\dot{d}_{u2}^2 + \dot{d}_{u3}^2}$$

Il parametro r dipende dall'inverso della velocità ed è pari a:

$$r = \frac{r_2 \cdot \dot{d}_{u2}^2 + r_3 \cdot \dot{d}_{u3}^2}{v^2}$$

con $r_2; r_3$ inversi delle velocità caratteristiche di scorrimento nelle medesime direzioni.

Le variabili isteretiche interne presentano valori che soddisfano quanto segue:

$$\sqrt{z_2^2 + z_3^3} \leq 1 \quad \text{con} \quad \sqrt{z_2^2 + z_3^3} = 1 \quad \text{superficie di snervamento}$$

Il valore iniziale di tali variabili è zero, successivamente assumono valori maggiori di zero, in accordo con il seguente sistema di equazioni differenziali:

$$\begin{Bmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - a_2 \cdot z_2^2 & -a_3 \cdot z_2 \cdot z_3 \\ -a_2 \cdot z_2 \cdot z_3 & 1 - a_3 \cdot z_3^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{P \cdot \mu_2} \dot{d}_{u2} \\ \frac{k_3}{P \cdot \mu_3} \dot{d}_{u3} \end{Bmatrix}$$

dove:

- k_e e k_3 sono le rigidezze a taglio dell'isolatore in assenza di scorrimento secondo il modello del "Fictitious Spring Method";
- $a_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } \dot{d}_{u2} \cdot z_2 > 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$
- $a_3 = \begin{cases} 1 & \text{se } \dot{d}_{u3} \cdot z_3 > 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$

La relazione Forza-Deformazione associata all'effetto pendolo è fornita da:

$$f_{u2p} = -P \frac{d_{u2}}{radius_2}; \quad f_{u3p} = -P \frac{d_{u3}}{radius_3}$$

in cui $radius_2; radius_3$ sono i raggi di curvatura in direzione 2 e 3 rispettivamente. Nel caso in esame tali valori e le relative azioni di taglio assumono valore nullo, trattandosi di isolatori con superfici di scorrimento piane.

I parametri richiesti dal SAP2000 per caratterizzare l'elemento NLink in esame, secondo le direzioni 1; 2; 3, sono i seguenti:

dir. 1

stiffness

rigidezza in direzione verticale

gap

valore dell'apertura relativa al vincolo unilaterale

dir. 2; dir.3

stiffness

rigidezza nella fase elastica, in direzione orizzontale. Corrisponde alla rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico

friction coefficient, Slow: valore del coefficiente d'attrito MIN

friction coefficient, Fast: valore del coefficiente d'attrito MAX

rate parameter: coefficiente dipendente dall'inverso della velocità di scorrimento

radius of sliding surface: raggio della superficie di scorrimento

Si vuole sottolineare che i valori dei parametri caratteristici, ad eccezione di “*friction coefficient, Fast*” e di “*radius of sliding surface*” che sono forniti dalla casa costruttrice dei dispositivi, derivano dalla sperimentazione e/o da quanto suggerito in letteratura.

2.3. Modellazione isolatore HDHSI

Come già accennato, l'isolatore HDHSI è un dispositivo costituito da un isolatore elastomerico con nucleo di piombo con in sommità un isolatore a

scorrimento ad esso reso solidale. Tale dispositivo può essere visto come l'unione di un isolatore LRB e di un isolatore FS disposti in serie.

Per la modellazione è stato adottato il codice di calcolo SAP2000 v.10.0.7, tramite il quale sono stati definiti e successivamente assemblati, due elementi a comportamento non lineare:

- elemento finito non lineare NLink “Rubber Isolator” per descrivere il comportamento isteretico dell'isolatore LRB;
- elemento finito non lineare NLink “Friction Pendulum isolator” per descrivere il comportamento dell'isolatore FS.

La definizione di tali elementi finiti, in regime non lineare, è avvenuta secondo quanto illustrato nei paragrafi precedenti. I due elementi non lineari, sono stati definiti ed assemblati in modo tale che il nodo superiore dell'elemento NLink “Rubber Isolator” sia coincidente con il nodo inferiore dell'elemento NLink “Friction Pendulum isolator”. Ovvero, detti “i” e “j” i nodi estremi di un generico NLink, occorre imporre che il nodo “i” dell'elemento NLink “Rubber Isolator” abbia un grado di vincolo di tipo incastro, mentre il nodo “j” deve coincidere con il nodo “i” dell'elemento NLink “Friction Pendulum isolator” ed infine, il nodo “j” di quest'ultimo, dovrà vincolare la sovrastante massa da isolare e quindi il corrispondente nodo della sovrastruttura.

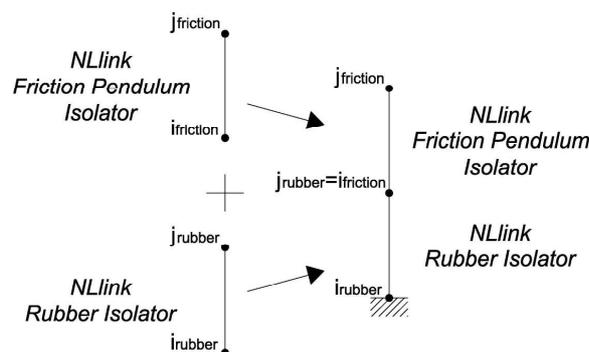


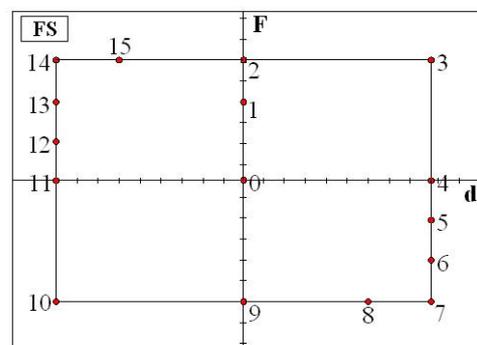
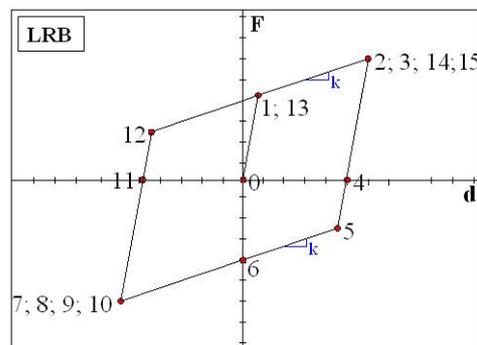
Fig. n.24 – Assemblaggio degli NLink (nodi i e j).

2.3.1. Ciclo isteretico atteso per l'isolatore HDHSI

Si riporta il ciclo isteretico atteso per il dispositivo HDHSI a partire dai cicli isteretici dei singoli dispositivi LRB e FS che lo compongono.

Indicando con $(F_1; x_1)$ le coordinate forza-spostamento di un generico punto del ciclo isteretico dell'isolatore LRB, mentre con $(F_2; x_2)$ le coordinate forza-spostamento di un generico punto del ciclo isteretico dell'isolatore FS, è possibile tracciare il ciclo del dispositivo HDHSI, nel rispetto delle relazioni valide per l'accoppiamento in serie di due elementi:

$$F_1 = F_2 = F_{tot}; \quad x_1 + x_2 = x_{tot}$$



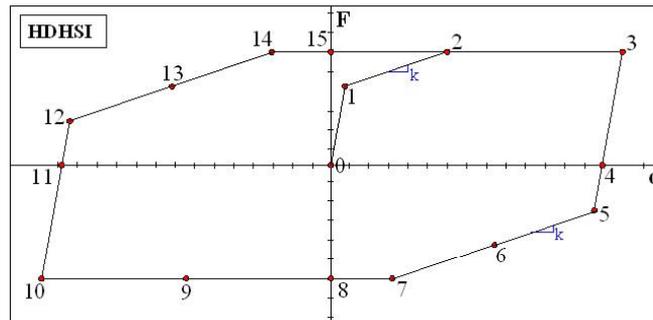
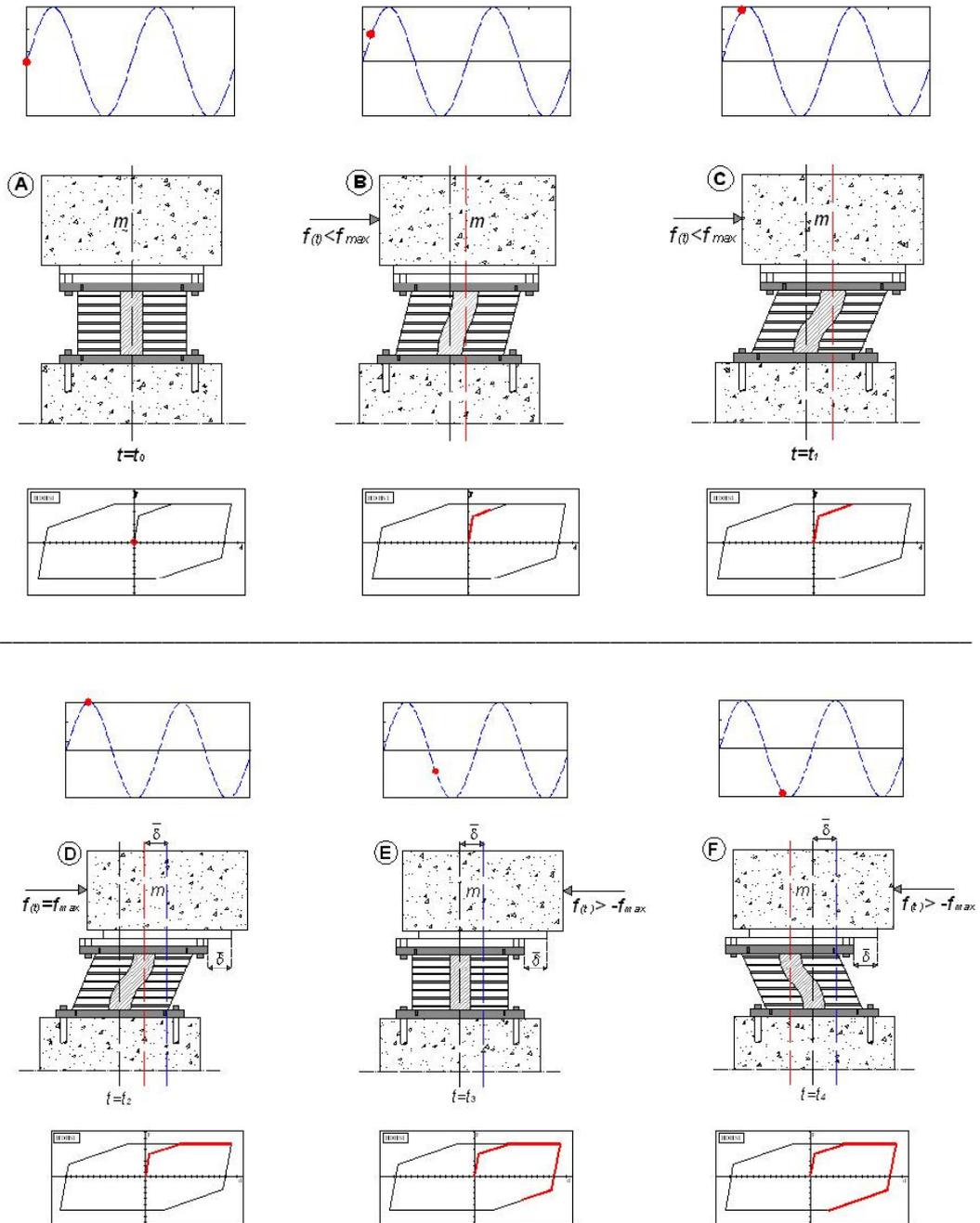


Fig. n.25a – Ciclo isteretico del dispositivo HDHSI; LRB e FS.

Dalla Fig. n.25a, si osserva la numerazione dei punti (forza-spostamento) caratteristici del ciclo isteretico. Con la numerazione adottata, è possibile seguire la deformazione dell'isolatore HDHSI e, con riferimento al medesimo istante di deformazione, quella degli isolatori LRB e FS che lo compongono.

Si ripropone la sequenza dei fotogrammi riportati in *Fig. n.7 Cap. I*, ampliata con alcuni fotogrammi intermedi, evidenziando il ramo del ciclo isteretico percorso per raggiungere l'istante in corrispondenza del quale è riportato il fotogramma stesso nonché l'intensità della forzante armonica durante la sua storia di carico.



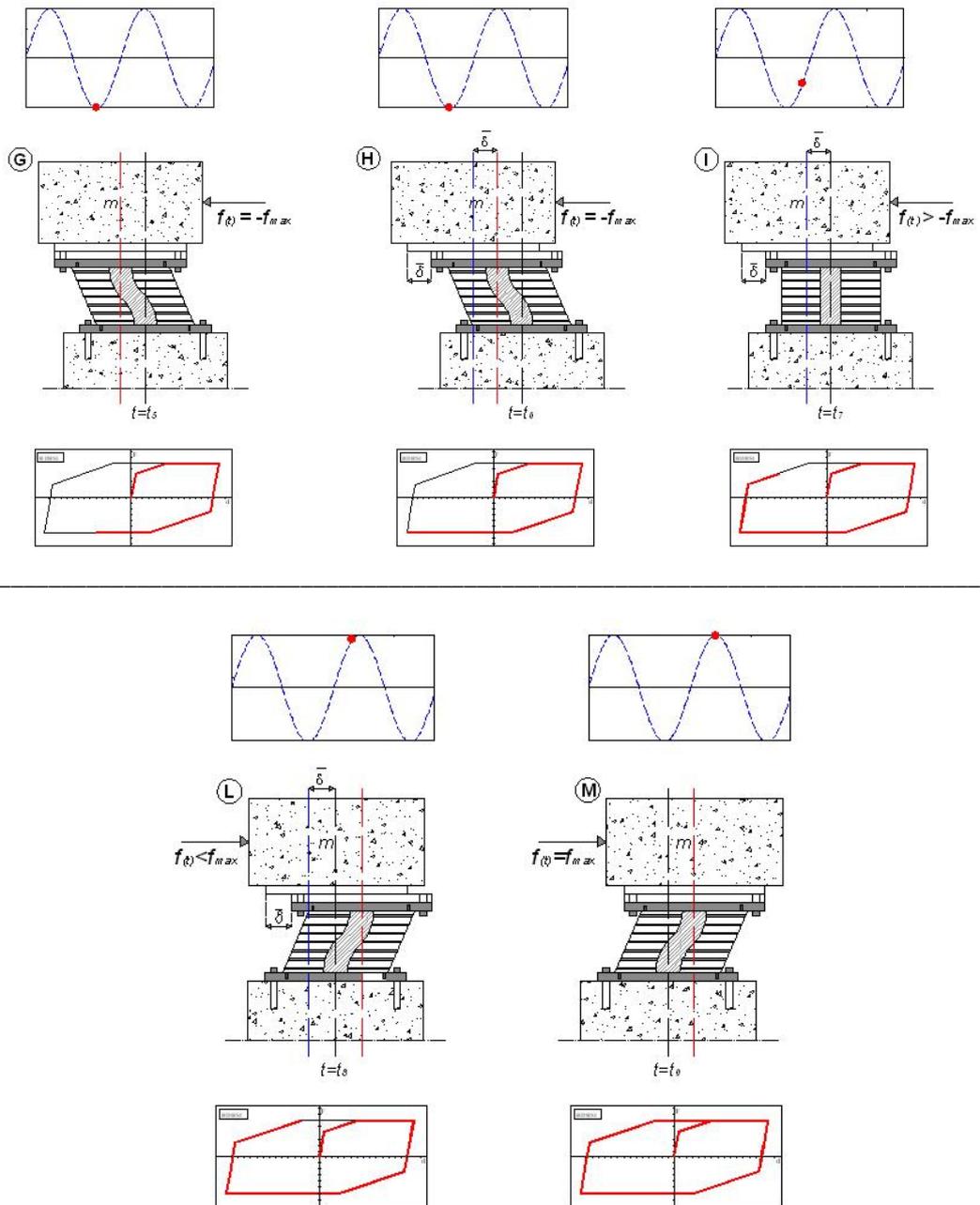


Fig. n.25b – Comportamento ciclico isteretico del dispositivo HDHSI.

2.3.2. Osservazioni sul carico critico

Per il dispositivo HDHSI, come per qualunque dispositivo elastomerico, è importante affrontare il problema dell'instabilità e quindi esprimersi sul valore del carico verticale limite (P_{cr}) in corrispondenza di una prefissata deformazione a taglio (γ), al fine di potersi adeguatamente cautelare.

Il problema del carico critico è stato ampiamente studiato per l'isolatore HDRB, per il quale sono presenti in letteratura, consolidate relazioni per la valutazione di (P_{cr}) trascurando e considerando lo spostamento orizzontale applicato (Kelly *et al.*, 1999). Si parla di spostamento orizzontale applicato, in quanto esso incide sul valore del carico critico poiché tanto più esso cresce, tanto più si riduce l'area d'impronta effettiva (A_r) con la conseguente riduzione della capacità portante verticale dell'isolatore. Si ricorda che per area d'impronta effettiva di un isolatore, si intende l'area d'intersezione ottenuta dalla sovrapposizione della superficie superiore ed inferiore dell'isolatore in corrispondenza di un'assegnata deformazione a taglio (γ).

Per gli isolatori LRB, differentemente dagli HDRB, non vi sono relazioni in forma chiusa per la valutazione del (P_{cr}), ma le case costruttrici forniscono direttamente, per ciascuno di essi, un preciso valore del carico, valutato per via sperimentale e in condizioni estreme di funzionamento cioè in corrispondenza del loro massimo spostamento orizzontale (δ_{max}) consentito in condizioni di SLC.

La valutazione sperimentale del carico critico è avvenuta incrementando il carico assiale fino all'annullamento della rigidità a taglio dopo aver assegnato una prefissata deformazione tagliante all'isolatore.

Per l'isolatore HDHSI in questione, in assenza di risultati sperimentali, differentemente dagli LRB, si è deciso di sfruttare il valore sperimentale di (P_{cr}) relativo all'LRB che lo compone, per esprimersi sul suo valore del carico verticale che è consigliabile non superare.

Si riporta una schematizzazione dell'isolatore LRB in condizioni estreme di funzionamento e quindi in presenza di una deformazione (γ) tale che lo

spostamento orizzontale, indicato con δ_{max} , sia pari a quello consentito in condizioni di SLC. Si riporta lo schema di calcolo esemplificativo con le relative azioni assiali e reazioni in termini di momento flettente, valutate in regime di non linearità geometrica. Si riporta anche l'area d'impronta effettiva che sappiamo essere vincolante per il valore del carico verticale critico.

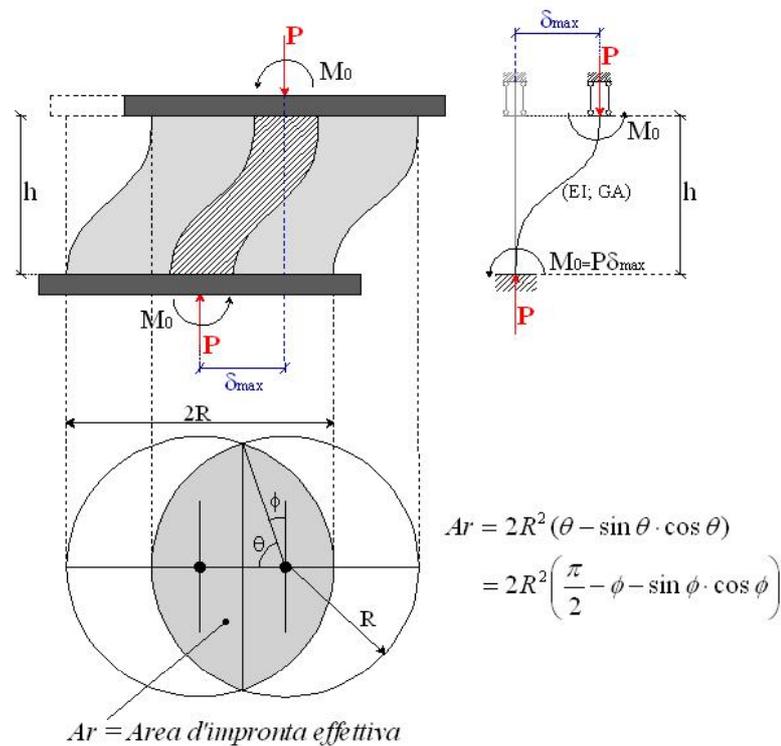


Fig. n.26 – Schematizzazione dell'isolatore LRB.

Si procede ad analizzare l'isolatore HDHSI composto dal medesimo LRB visto in precedenza e da un isolatore a scorrimento FS posizionato in sommità. Si trascura inizialmente la reazione attrittiva dell'isolatore FS e si impone che la somma dello spostamento dell'LRB, indicato con (δ_1) , con lo spostamento dell'isolatore a scorrimento, indicato con (δ_2) , non superi il valore δ_{max} . In

definitiva, occorre verificare che sia soddisfatta la seguente relazione:
 $\delta_1 + \delta_2 \leq \delta_{\max}$.

Considerando il caso in cui $\delta_1 + \delta_2 = \delta_{\max}$, si ottiene un isolatore LRB nelle medesime condizioni di sollecitazione viste in precedenza e in particolare soggetto al medesimo momento ribaltante, ma con un'area d'impronta (A_r) maggiore e quindi con una capacità portante verticale (P_{cr}) superiore rispetto al caso in cui ci fosse stato il solo LRB.

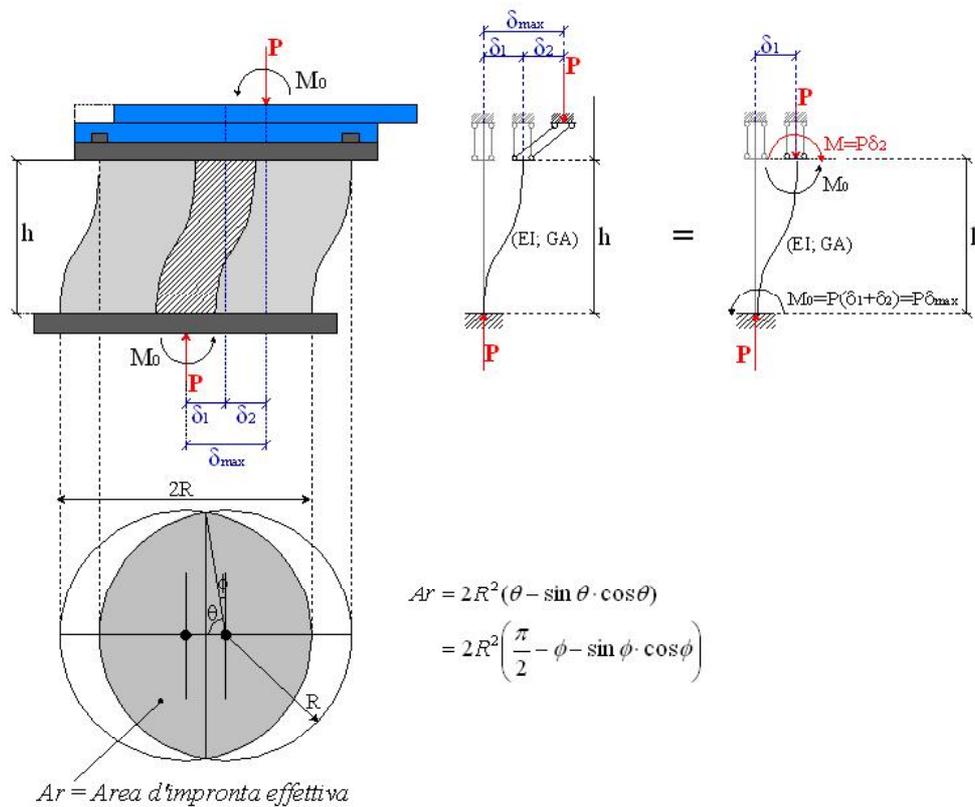


Fig. n.27 – Schematizzazione dell'isolatore HDHSI, in assenza della reazione attritiva.

Si adotta la seguente simbologia:

δ_{\max} : spostamento orizzontale massimo consentito dall'isolatore LRB in condizioni di SLC;

δ_1 : spostamento orizzontale per effetto della deformazione a taglio dell'isolatore LRB;

δ_2 : spostamento orizzontale per effetto dello scorrimento del dispositivo FS;

$(\delta_1 + \delta_2)$: spostamento orizzontale complessivo del dispositivo HDHSI.

Qualora si considera anche la reazione attritiva, essendo un'azione stabilizzante per l'isolatore, si osserva una riduzione del valore associato al momento ribaltante. A parità di spostamento complessivo $\delta_1 + \delta_2 = \delta_{\max}$, il momento sollecitante alla base dell'isolatore è minore del valore $M_0 = P\delta_{\max}$.

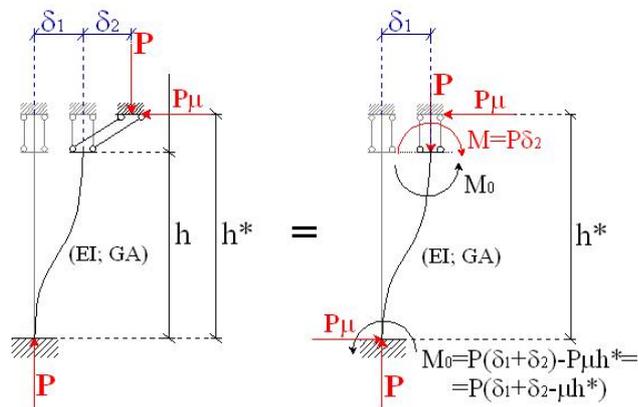
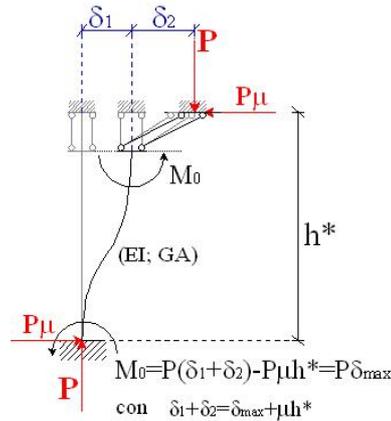


Fig. n.28 – Schematizzazione dell'isolatore HDHSI, in presenza della reazione attritiva.

Ciò consente di affermare che, le condizioni di funzionamento in cui il momento ribaltante è pari a $M_0 = P\delta_{\max}$, possono essere raggiunte con uno spostamento orizzontale $(\delta_1 + \delta_2)$ maggiore di δ_{\max} :

$$\delta_1 + \delta_2 = \delta_{\max} + \mu h^*$$



si può ritenere che (μh^*) determina un incremento dello spostamento massimo (δ_{\max}) del 10 ÷ 20% .

Quanto illustrato permette di asserire, con ampio margine di sicurezza, che come carico critico per l'isolatore HDHSI, può essere considerato il valore di (P_{cr}) dell'isolatore LRB che lo compone, a patto che siano soddisfatte le seguenti relazioni di compatibilità in termini di spostamento:

$$\begin{cases} \delta_1 \leq \delta_{\max} \\ \delta_1 + \delta_2 \leq \delta_{\max} + \mu \cdot h^* \end{cases}$$

Tale modo di procedere permette di adottare, per l'isolatore HDHSI, un valore di (P_{cr}) conservativo e allo stesso tempo di ovviare alla mancanza di dati sperimentali che sono comunque previsti in sviluppi futuri, mediante un'attività sperimentale sugli isolatori proposti.

Capitolo III

Analisi numerica: sistema ad 1-GDL e struttura in c.a. isolata alla base mediante sistema HDHSI

1. Introduzione

Illustrato l'isolatore HDHSI con riferimento alle caratteristiche di funzionamento, al comportamento meccanico e alla modellazione numerica; si procede all'applicazione su una semplice struttura SDOF, per poi passare ad analizzare la risposta di una struttura MDOF e in particolare di una struttura intelaiata in c.a. in presenza del sistema HDHSI.

La struttura in c.a., progettata e verificata secondo il DM 2008, viene analizzata sottoponendola ad azioni sismiche anomale per intensità e/o contenuto in frequenza, in modo tale da evidenziare i vantaggi offerti dal sistema HDHSI circa la sua capacità di svincolarsi dalle caratteristiche del segnale sismico.

2. Sistema ad 1-GDL con forzante armonica, analizzato mediante SAP2000

Viene analizzato un sistema ad 1-GDL isolato alla base mediante un isolatore HDHSI la cui modellazione ed analisi, in regime non lineare, è stata eseguita con

il programma di calcolo SAP2000 v.10.0.7, in linea con quanto esposto nei paragrafi precedenti.

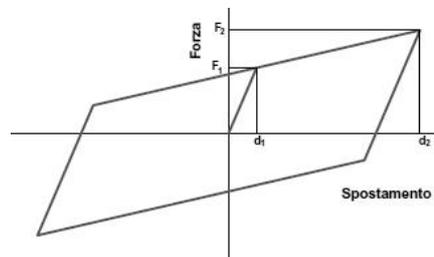
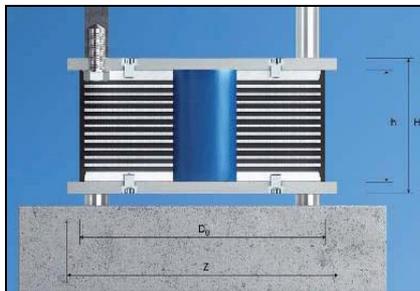
Si valuta la risposta dinamica in presenza di un'eccitazione armonica, al fine di poter esprimere un giudizio sull'affidabilità della modellazione adottata, confrontando i risultati ottenuti con quelli attesi, riferendosi in modo specifico al ciclo isteretico dell'isolatore.

I parametri caratterizzanti il sistema ad 1-GDL sono stati ricavati a valle di un processo di taratura, rivolto ad ottenere un sistema che fosse rappresentativo delle usuali strutture isolate alla base che sappiamo essere caratterizzate da un periodo principale di vibrazione compreso tra $2 \div 2.5$ sec. A valle dell'operazione di calibrazione, è stata fissata la massa del sistema ad 1-GDL pari a 200 ton ed è stato adottato un isolatore LRB (componente elastomerica del dispositivo HDHSI) con rigidità equivalente (K_{eq}) pari a 1490 kN/m. Tali valori garantiscono un periodo del sistema ad 1 g.d.l., oggetto di studio, pari a:

$$T = 2\pi\sqrt{M/K} = 2.30 \text{ sec}$$

Il dispositivo LRB adottato, è l'isolatore della serie S650/150-140 prodotto dalla FIP industriale. Tale isolatore presenta una rigidità equivalente (K_{eq}) pari a 1490 kN/m, uno spostamento massimo di 300 mm, uno smorzamento (ξ) del 26% ed una capacità portante verticale (V), in corrispondenza dello spostamento massimo, pari a 2290 kN.

Nella tabella successiva sono riassunte le caratteristiche meccanico-geometriche dell'isolatore LRB adottato.



	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
			per d ₂ ^{SLV} = 250 mm										
LRB-S 650/150-140	2290	6070	1.49	26	373	172	12	1479	650	150	272	332	700
V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLV})												
F_{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio												
K_e	Rigidezza orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})												
ξ_e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})												
F₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})												
F₁	Forza al limite elastico												
d₁	Spostamento al limite elastico												
K_v	Rigidezza verticale												
D_g	Diametro elastomero												
t_e	Spessore totale gomma												
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio												
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio												
Z	Lato piastre di ancoraggio												

Fig. n.29 –Isolatore LRB adottato, della “FIP Industriale”.

Alla luce di quanto illustrato in § 2.1. Cap. II, si riportano i parametri richiesti dal SAP2000 per caratterizzare l’isolatore LRB in questione, tramite l’elemento NLink “Rubber Isolator”. In particolare, si elencano i valori assegnati per caratterizzare il comportamento secondo le direzioni 1; 2; 3.

dir. 1

effective stiffness

rigidezza in direzione verticale = valore elevato tanto da poter ritenere fisso il g.d.l. in tale direzione

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione verticale = 0

dir. 2; dir. 3

effective stiffness

rigidezza secante corrispondente ad una deformazione tagliante del 100% = 1.49 kN/mm

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione orizzontale = 0.26

stiffness

rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico = F₁/d₁ = 14.33 kN/mm

yield strenght

forza di snervamento = 172 kN

post yield stiffness ratio

rapporto tra il valore della rigidezza post- snervamento e il valore di rigidezza elastica = 0.072

yielding exponent

coefficiente di raccordo tra il ramo elastico e il ramo plastico del ciclo isteretico = 20

Per quel che concerne l'isolatore a scorrimento (componente attritiva del dispositivo HDHSI), è stato adottato un isolatore caratterizzato da un coefficiente d'attrito variabile con la velocità di scorrimento, con μ_{\min} pari all'1% e con μ_{\max} pari al 10%.

La modellazione di tale isolatore a scorrimento, tramite il codice di calcolo SAP2000, è stata eseguita in accordo a quanto illustrato nel § 2.2. *Cap. II*, tramite l'elemento a comportamento non lineare NLink "Friction Pendulum Isolator". Nello specifico, per la caratterizzazione dell'elemento NLink, si sono adottati i seguenti valori per i parametri caratteristici:

dir. 1

stiffness

rigidezza in direzione verticale = 10^8 kN/m

gap

valore dell'apertura relativa al vincolo unilaterale = 0

dir. 2; dir.3

stiffness

rigidezza nella fase elastica, in direzione orizzontale. Corrisponde alla rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico = 10^8 kN/m

friction coefficient, Slow: valore del coefficiente d'attrito MIN = 0,01

friction coefficient, Fast: valore del coefficiente d'attrito MAX = 0,10

rate parameter: coefficiente dipendente dall'inverso della velocità di scorrimento = 45 s/m

radius of sliding surface: raggio della superficie di scorrimento = 0 (superficie di scorrimento piana)

Si vuole sottolineare che i valori dei parametri caratteristici, ad eccezione di "*friction coefficient, fast*" e di "*radius of sliding surface*" che sono forniti dalla casa costruttrice dei dispositivi, derivano da risultati sperimentali e/o da quanto suggerito in letteratura.

Il sistema ad 1-GDL così definito, è stato eccitato dinamicamente, assegnando una forzante armonica caratterizzata da una legge sinusoidale (ponendoci in condizione di massima amplificazione) di periodo 2.3sec ovvero frequenza 0.435Hz, ed ampiezza pari a $1.3 m/s^2$.

Di seguito si riportano i risultati restituiti dalle analisi dinamiche non lineari, quali le time history in termini di spostamento e di forze risultanti, relative al dispositivo LRB e all'isolatore a scorrimento FS.

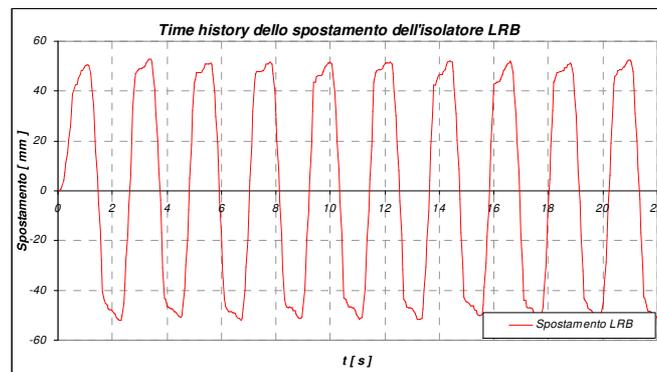


Fig. n.30 – Time history - spostamento dell'isolatore LRB.

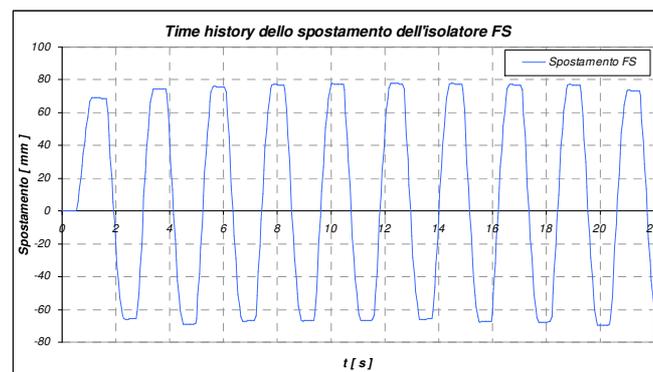


Fig. n.31 – Time history - spostamento dell'isolatore FS.

In base a quanto illustrato nei paragrafi precedenti circa il comportamento dei dispositivi in serie, è possibile affermare che la time history dello spostamento totale, relativa al dispositivo innovativo HDHSI, è fornita (istante per istante) dalla somma degli spostamenti dei singoli isolatori che lo compongono.

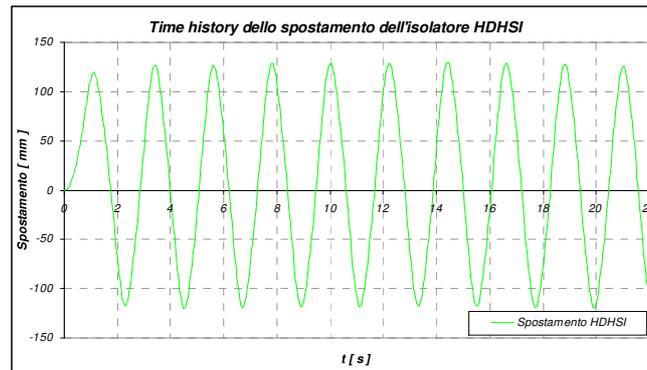


Fig. n.32 – Time history - spostamento dell'isolatore HDHSI.

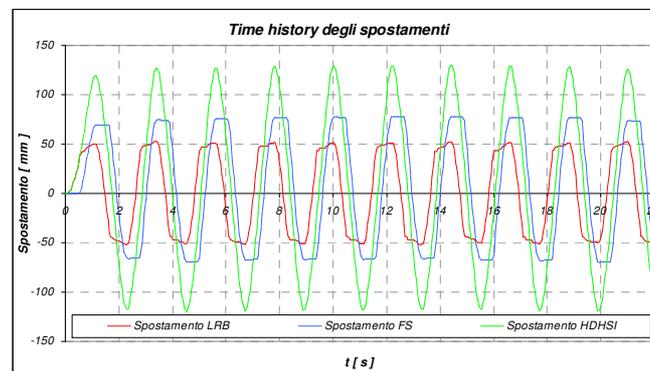


Fig. n.33 – Time history - spostamento dell'isolatore LRB, FS e HDHSI.

Prima di procedere al commento delle time history in termini di forza, si osserva che la risposta sismica ottenuta con SAP2000 per il sistema ad 1-GDL isolato mediante dispositivo HDHSI, è stata determinata a valle di un processo iterativo rivolto a settare i parametri caratterizzanti il criterio di convergenza adottato, al fine di soddisfare la verifica di congruenza tra la forza che sollecita l'isolatore FS e la forza che sollecita l'isolatore LRB. Infatti, data la composizione in serie del dispositivo HDHSI, tali forze devono necessariamente essere identiche istante per istante, altrimenti i risultati derivanti dalle analisi, risulterebbero per nulla realistici.

La procedura iterativa prevede di assumere un set iniziale di parametri di convergenza e successivamente di eseguire l'analisi numerica. A valle di questa,

si opera una verifica sullo scarto tra la forza che sollecita l'isolatore FS e la forza che sollecita l'isolatore LRB. Se tale scarto è minore di un valore assunto inizialmente come tolleranza, allora il set di parametri adottato è corretto, altrimenti si procede con un nuovo tentativo, assumendo un set di parametri più vincolante in termini di congruenza, pagando ciò con un maggior onere computazionale.

Tale processo iterativo, pur sembrando molto laborioso e penalizzante, viene affrontato in maniera molto rapida ed agevole quando l'input sismico non è così gravoso da attivare in modo significativo gli isolatori a scorrimento. Quando l'azione sismica diviene significativa, determinando scorrimenti consistenti, è necessario fissare un set di parametri meno vincolante e quindi imporre una maggiore tolleranza, per non incorrere in un eccessivo onere computazionale.

Nel caso oggetto di studio è sembrato ragionevole fissare il limite di tolleranza pari al 10% del massimo valore di forza che sollecita l'isolatore HDHSI.

Di seguito si riportano le time history dei singoli isolatori che compongono il sistema HDHSI nonché il confronto tra la forza che sollecita l'isolatore FS e la forza che sollecita l'isolatore LRB. Successivamente si riporta la time history dello scarto tra le due forze.

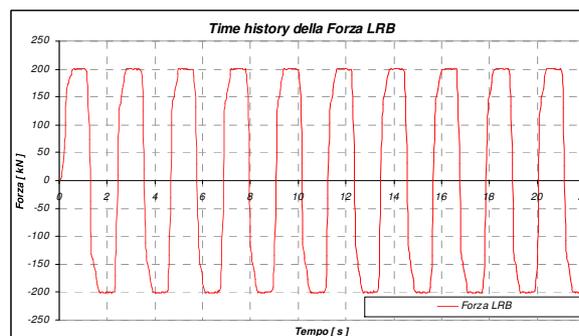


Fig. n.34 – Time history della forza assorbita dall'isolatore LRB.

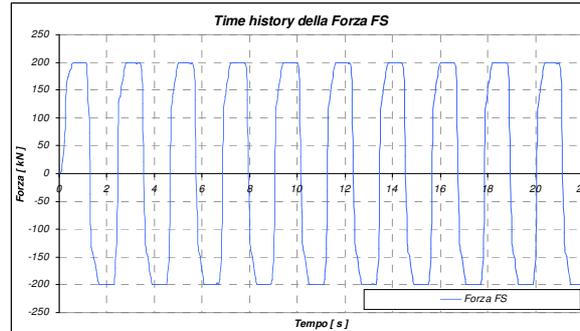


Fig. n.35 – Time history della forza assorbita dall'isolatore FS.

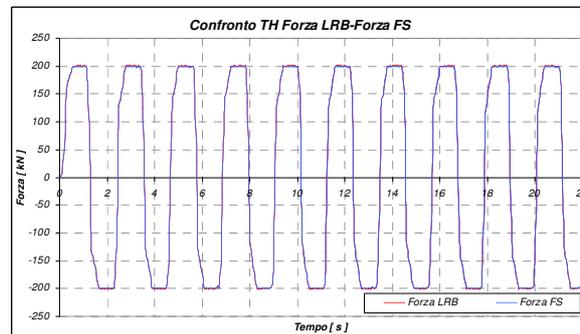


Fig. n.36 – Confronto delle time history delle forze assorbita dall'isolatore LRB e dall'isolatore FS.

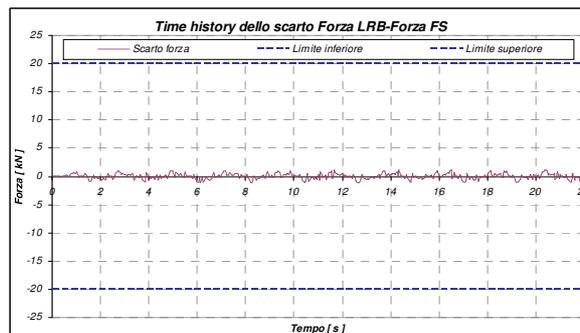


Fig. n.37 – Time history dello scarto tra la forze assorbita dall'isolatore LRB e la forza assorbita dall'isolatore FS.

Al fine di constatare l'affidabilità della modellazione adottata, si riportano i cicli isteretici dei singoli isolatori che compongono il dispositivo HDHSI nonché

il ciclo isteretico complessivo, in modo tale da constatare la perfetta sovrapposibilità con il ciclo atteso, tracciato nel paragrafo precedente (v. Fig. n.25a).

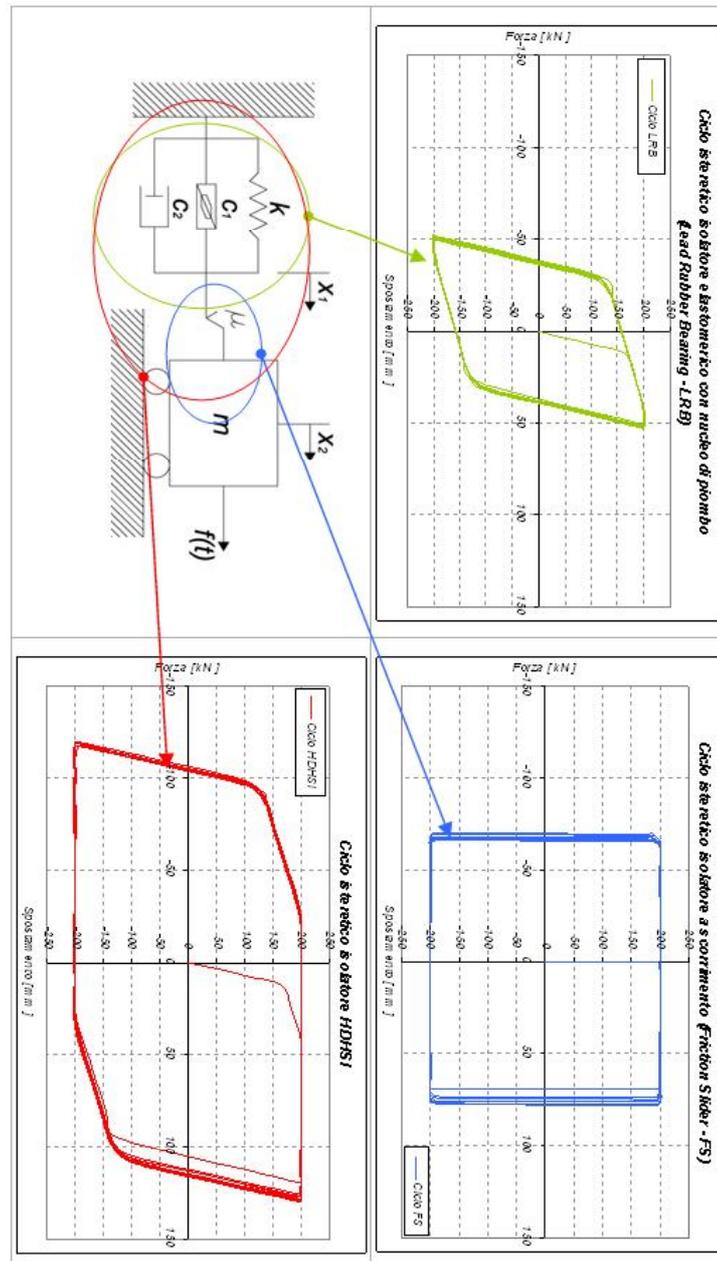


Fig. n.38 – Cicli isteretici LRB, FS e HDHSL.

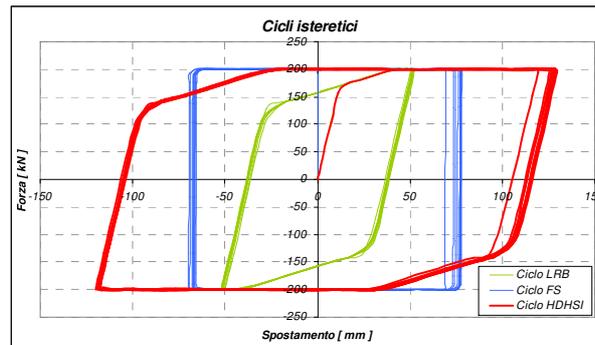


Fig. n.39a – Sovrapposizione cicli isteretici LRB, FS e HDHSI.

Si può osservare che il ciclo isteretico del dispositivo HDHSI, ottenuto tramite codice di calcolo, sia perfettamente coincidente con quello atteso (v. Fig. n.25a). È possibile quindi sottolineare, con maggiore enfasi, la notevole affidabilità della modellazione non lineare adottata.

3. Smorzamento viscoso equivalente per il sistema HDHSI

Generalmente, la massa “ m ” e la rigidezza “ k ” di un sistema SDOF, sono facilmente determinabili, mentre la valutazione del coefficiente di smorzamento “ c ” è in genere di non semplice valutazione poiché i meccanismi, alla base delle dissipazioni di energia, non sono di agevole comprensione.

Per tale motivo, si ricorre spesso allo smorzamento viscoso lineare che rende la forma dell’equazione differenziale che governa il moto della struttura, di facile scrittura. In particolare, per un sistema 1-GDL soggetto ad una forzante armonica $f(t) = f_0 \sin(\bar{\omega}t)$, l’energia media dissipata (E_d) è fornita da (Clough and Penzien 1993):

$$E_d = 2\pi\xi m \omega \bar{\omega} d_{\max}^2$$

dove:

- ω è la frequenza naturale non smorzata;
- ξ è il rapporto tra lo smorzamento e il suo valore critico;

- d_{\max} è l'ampiezza dello spostamento.

Si osserva che per un prefissato valore dello spostamento, l'energia dissipata dipende dalla frequenza di eccitazione mentre le prove sperimentali evidenziano che l'energia dissipata per ciclo, è sostanzialmente indipendente dalla frequenza (De Luca *et al.*, 2000).

Si ricorda che se il sistema si comporta effettivamente con smorzamento viscoso lineare, la forma del diagramma forza applicata-spostamento risulta essere un'ellisse. Invece, se lo smorzamento è di tipo viscoso non-lineare, la forma del diagramma non sarà ellittica e la risposta sarà un'armonica distorta, anche se il carico applicato è puramente armonico.

È possibile comunque calcolare l'energia dissipata per singolo ciclo isteretico attraverso l'area sottesa dal diagramma forza-spostamento, per risalire quindi al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente in corrispondenza del valore dello spostamento che consente di dissipare la stessa energia per ciclo del caso sperimentale. A tale scopo, il coefficiente di smorzamento equivalente viene associato ad un diagramma forza-spostamento ellittico che sottende la stessa area E_d del diagramma non ellittico. Ponendosi in condizione di risonanza ($\omega = \bar{\omega}$), imponendo l'uguaglianza delle energie e assumendo $\xi = \xi_{eq}$, si può scrivere:

$$\xi_{eq} = \frac{E_d}{2\pi m \omega^2 d_{\max}^2} = \frac{E_d}{2\pi k d_{\max}^2} = \frac{E_d}{4\pi E_s}$$

dove:

$$E_s = \frac{k d_{\max}^2}{2} \text{ è l'energia elastica dissipata}$$

In conclusione, assumere uno smorzamento viscoso equivalente permette di ottenere un'espressione semplice dell'equazione del moto, grazie alle semplificazioni connesse all'ipotesi di linearità. Inoltre, in molte applicazioni, il modello fornisce una risposta sufficientemente approssimata e, per queste ragioni, ampiamente usato nelle analisi delle strutture isolate alla base. Bisogna dire però, che i risultati sperimentali non mostrano in genere tale forma di smorzamento

poiché i materiali elastomerici (in particolare con l'aggiunta di un nucleo di piombo) non sono puramente viscosi, ma presentano dissipazioni di energia di tipo isteretico che generalmente non dipendono dalla frequenza.

Il principale problema presentato dai modelli a smorzamento viscoso equivalente è rappresentato dalla dipendenza della dissipazione di energia per ciclo, dalla frequenza del carico applicato. Ciò, è in contrasto con la gran parte dell'evidenza sperimentale, qualora si considerano frequenze che interessano l'usuale campo di applicazione degli isolatori. Per rimuovere tale dipendenza, lo smorzamento può essere modellato attraverso la cosiddetta forma isteretica anziché attraverso lo smorzamento viscoso. I modelli matematici che soddisfano la condizione sopra elencata sono i modelli isteretici dove si definisce una forza di smorzamento, il cui gradiente è in fase con la velocità ed è proporzionale alla variazione degli spostamenti. In tal caso, l'energia dissipata è fornita dall'area sottesa dal ciclo isteretico che sappiamo essere indipendente dalla velocità con la quale il ciclo viene compiuto. Bisogna notare inoltre che, nel campo di applicazione dei dispositivi di isolamento, questa ipotesi è abbastanza vicina al comportamento effettivo (De Luca *et al.*, 2000).

Ribadendo che lo smorzamento viscoso equivalente permette di ottenere un'espressione semplice dell'equazione del moto nonché una risposta dinamica sufficientemente approssimata, si procede alla sua valutazione con riferimento all'isolatore HDHSI.

Partendo dal comportamento ciclico forza-spostamento, viene ricavato ξ_{eq} calcolando l'area elastica (A_{el}) e l'area plastica (A_{pl}):

$$A_{el} = \frac{F_{max} \cdot d_{max}}{2}; \quad A_{pl} = \sum_i \left[\frac{(F_i + F_{i+1})}{2} \cdot (d_i - d_{i-1}) \right]$$

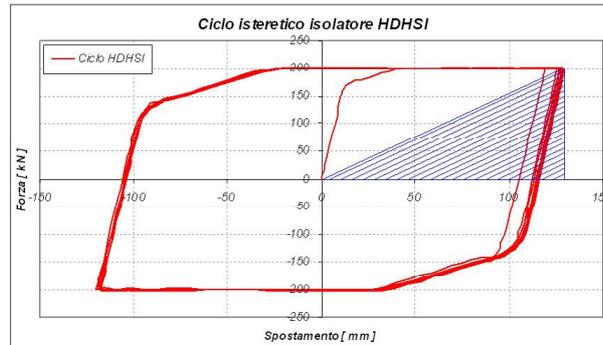


Fig. n.39b – Area elastica del comportamento ciclico.

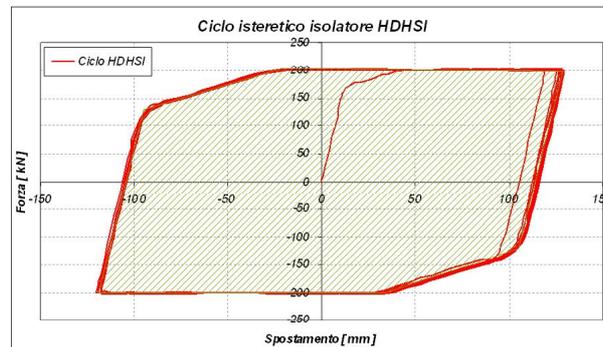


Fig. n.39c – Area plastica del comportamento ciclico.

$$A_{el} = \frac{F_{max} \cdot d_{max}}{2} = 13000J$$

$$A_{pl} = \sum_i \left[\frac{(F_i + F_{i+1})}{2} \cdot (d_i - d_{i-1}) \right] = 82824J$$

$$\xi_{eq} = \frac{E_d}{4\pi E_s} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{A_{pl}}{A_{el}} = 50\%$$

Il valore così ottenuto rappresenta uno smorzamento decisamente elevato e come tale deve essere controllato affinché non determini un eccessivo incremento degli spostamenti d'interpiano inseguito all'aumento delle accelerazioni associate ai modi di vibrazione superiori che potrebbero avere un contributo non trascurabile.

4. Applicazione ad una struttura intelaiata in c.a.

Si analizza un edificio di tipo residenziale di 6 piani, avente una struttura intelaiata in c.a. a pianta simmetrica, con telai identici e con impalcati che si possono ritenere infinitamente rigidi nel proprio piano (v. § 4.2. *Cp. III*). Fissando una direzione orizzontale del moto del suolo (direzione d'indagine), si analizza un singolo telaio piano secondo la medesima direzione, così da consentire una più agevole lettura dei risultati. Tale telaio viene assunto come struttura di riferimento ed è possibile considerarlo rappresentativo del comportamento dinamico dell'intera struttura nella direzione d'esame. Infatti, la massa sismica che afferrisce a ciascun telaio, in corrispondenza dei singoli impalcati, sarà necessariamente identica per tutti i telai che compongono la struttura in esame (pari ad $\frac{1}{4}$ di quella relativa all'intero edificio). Si precisa che nel calcolo delle masse sono state considerate anche le tamponature distribuite con regolarità sia in pianta che in elevazione. I carichi gravitazionali considerati per il singolo telaio, sono valutati in base alla propria area di influenza.

4.1. Azione sismica e normativa di riferimento

La normativa di riferimento è stata il DM 2008 in base al quale è utile evidenziare che le svariate verifiche di sicurezza da eseguire sulle costruzioni isolate sono indubbiamente più complesse rispetto a quelle che andrebbero eseguite su una costruzione tradizionale. Nel caso degli edifici con isolamento sismico è utile individuare 6 diversi componenti:

- la sovrastruttura;
- la sottostruttura;
- le parti non strutturali (tamponature, tramezzature e impianti solidali con la struttura);
- i dispositivi del sistema d'isolamento;
- le connessioni strutturali e non tra la parte di struttura isolata ed il terreno o altre parti non isolate;

- le connessioni di condutture di fluidi pericolosi tra la parte di struttura isolata ed il terreno o altre parti non isolate.

Per ciascuno di tali componenti è prevista una verifica rispetto ad uno specifico stato limite di cui si riporta una sintesi nella seguente tabella.

Sovrastruttura	SLV	Verifica della capacità resistente con riduzione delle sollecitazioni per la sovrastruttura tramite un coefficiente di riduzione di 1.5.
Sottostruttura	SLV	Verifica della capacità resistente adottando un coefficiente q unitario.
Parti non strutturali	SLD	Verifica dello spostamento interpiano massimo che dovrà risultare non superiore a 2/3 del limite posto per costruzioni usuali.
	SLO	Verifica dello spostamento interpiano massimo che dovrà risultare non superiore a 2/3 del limite imposto per SLD (limitatamente per le costruzioni di III e IV classe).
Connessioni strutturali e non tra la sovrastruttura isolata ed il terreno o altre parti non isolate	SLD	Verifica della capacità di spostamento del componente (limitatamente per le costruzioni di I, II e III classe).
	SLV	Verifica della capacità di spostamento del componente (limitatamente per le costruzioni di IV classe).
Connessioni delle condutture del gas e impianti pericolosi in costruzioni di ogni classe	SLC	Verifica della capacità di spostamento.
Dispositivi d'isolamento	SLC	Verifica della piena efficienza di comportamento. Nel caso di sistema a comportamento non lineare, allo spostamento ottenuto allo SLC, occorre aggiungere il maggiore tra lo spostamento residuo allo SLD e il 50% dello spostamento corrispondente all'annullamento

		della forza, seguendo il ramo di scarico a partire dal punto di massimo spostamento raggiunto allo SLD.
--	--	---

Tab. n.1 – SL per i diversi componenti di una struttura isolata alla base.

Per ciascuno stato limite occorre considerare i relativi spettri di risposta, da utilizzare direttamente come input sismico nel caso di *analisi dinamica con spettro di risposta* ovvero da utilizzare per la verifica di coerenza del set di accelerogrammi, nel caso di *analisi dinamica non lineare* o *analisi dinamica lineare con integrazione al passo*.

L'edificio oggetto di studio è localizzato in un sito individuato da valori di longitudine e latitudine pari a 12.912 e 46.334 rispettivamente. È fondato su suolo di tipo B ed appartiene ad una categoria topografica T1. La struttura è di classe II ($C_U = 1.0$) ed è caratterizzata da una vita nominale $V_N \geq 50$ anni cui corrisponde un periodo di riferimento $V_R = V_N \cdot C_U$ pari a 50 anni.

Gli stati limite, in linea con quanto esposto in Tab. n.1, sono i seguenti:

- Stato Limite di Operatività (SLO);
- Stato Limite di Danno (SLD);
- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV);
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC).

Per ciascuno di tali stati limite, la norma indica la probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} e in particolare tale probabilità risulta essere pari all'81% per lo SLO, al 63% per lo SLD, al 10% per lo SLV ed al 5% per lo SLC. Nota la probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} ed il periodo di riferimento per l'azione sismica V_R , è possibile determinare il periodo di ritorno T_R per ciascuno SL, tramite la relazione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

Nel caso oggetto di studio, si ottiene che il periodo di ritorno T_R è pari a 30 anni per lo SLO, a 50 anni per lo SLD, a 475 anni per lo SLV ed a 975 anni per lo SLC.

Oltre a tali SL, è stato considerato anche un quinto SL, rappresentativo di un'azione sismica decisamente più gravosa. È stato considerato un ulteriore SL di prevenzione del Collasso (indicato nel presente lavoro con la sigla SLC 2475) caratterizzato da una probabilità di superamento, nel periodo di riferimento P_{V_R} , pari al 2% ovvero da un periodo di ritorno di 2475 anni.

Nella tabella successiva si riportano, per il caso oggetto di studio, e per gli SL considerati i valori dei parametri che definiscono l'azione sismica di progetto.

[/]	[%]	[anni]	[g/10]	[/]	[s]
Stato Limite	Pvr	Tr	ag	F0	Tc
SLO	81%	30	0,650	2,50	0,24
SLD	63%	50	0,886	2,45	0,26
SLV	10%	475	2,507	2,41	0,33
SLC	5%	975	3,393	2,41	0,35
SLC 2475	2%	2475	4,841	2,41	0,38

Tab. n.2 – Parametri che definiscono l'azione sismica di progetto per i diversi SL.

A partire dai valori dei parametri indicati in tabella, si sono definiti gli spettri di risposta elastici in termini di accelerazioni e di spostamento per i cinque SL.

Si fa presente che tali spettri, secondo quanto indicato dalle NTC 2008, sono stati ridotti per tutto il campo di periodi $T \geq 0,8T_{is}$, assumendo come coefficiente riduttivo η il valore corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del sistema di isolamento ξ_{eq} .

Tale valore, nella fase preliminare di progettazione che si affiderà ad un'analisi dinamica con spettro di risposta, è stato assunto cautelativamente pari al 20% anche se la presenza degli isolatori LRB assicurerebbe un valore maggiore. Tuttavia, tale approssimazione interessa la sola fase preliminare di progettazione, perché nella fase successiva di analisi e verifica rigorosa, tramite analisi dinamiche non lineari, sarà possibile considerare l'effettivo valore dello smorzamento grazie alla riproducibilità, per via numerica, del reale ciclo isteretico del dispositivo.

Di seguito si riportano gli spettri di risposta elastici dapprima in termini di accelerazioni e successivamente in termini di spostamento per i cinque SL.

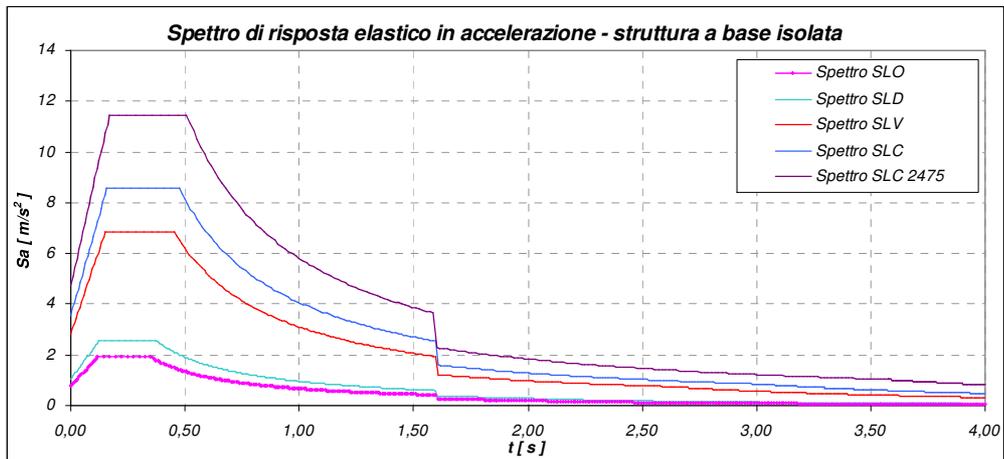


Fig. n.44 - Spettro di risposta elastico in termini di accelerazioni per i cinque SL.

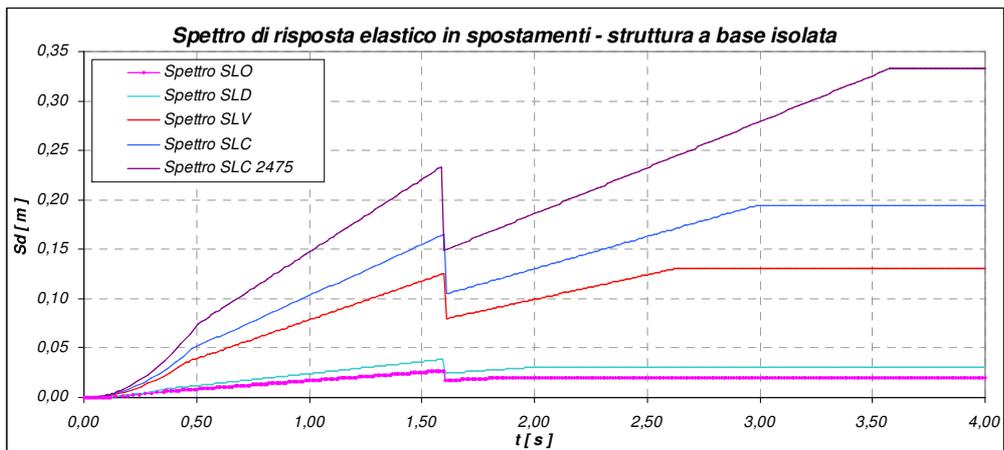


Fig. n.45 - Spettro di risposta elastico in termini di spostamenti per i cinque SL.

4.2. Descrizione della struttura

La struttura in c.a. analizzata, è caratterizzata da una pianta doppiamente simmetrica (v. Fig. n.45) con telai identici (v. Fig. n.46) in entrambe le direzioni. I

telai in c.a. presentano tre campate interamente sviluppate lungo i sei livelli e sono geometricamente simmetrici nonché simmetricamente caricati. Per i primi tre livelli, i pilastri e le travi hanno sezione 40x50cm e 40x70cm rispettivamente, mentre per i restanti tre livelli hanno sezione 40x40cm e 40x60cm rispettivamente. Tutte le altezze interpiano sono pari a 3.20m, la trave di base della sovrastruttura ha una sezione 40x90cm e la luce di ogni campata è di 6.00m. I materiali utilizzati sono: C20/25 per il calcestruzzo e B450C per l'acciaio.

Si riportano, nelle figure seguenti, un impalcato tipo della struttura intelaiata in c.a. ed il telaio oggetto di studio.

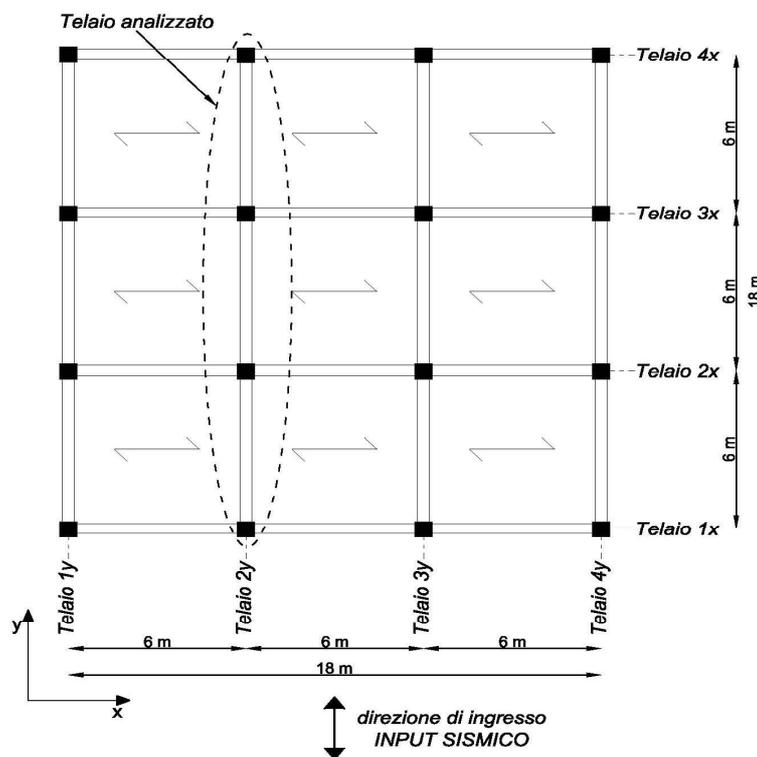


Fig. n.46 - Pianta del piano tipo della struttura intelaiata in c.a.

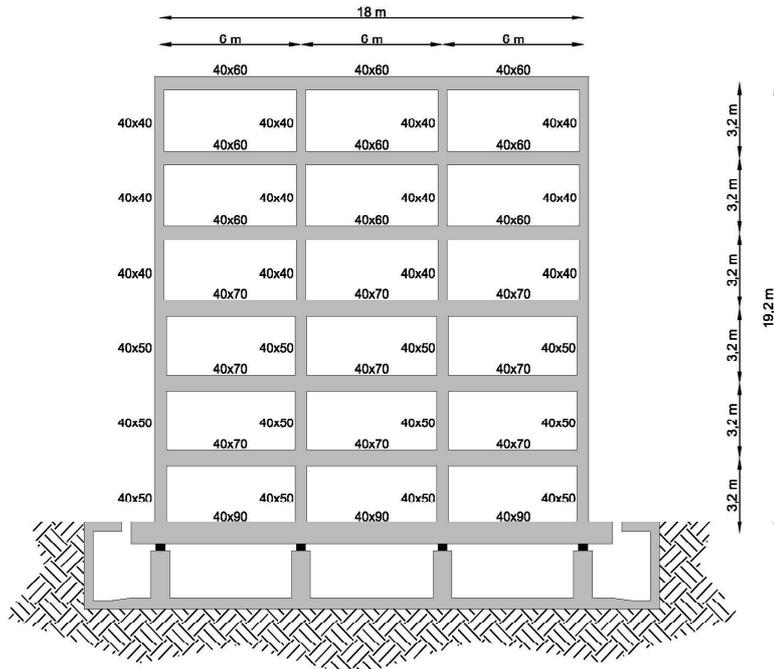


Fig. n.47 - Telaio oggetto di studio.

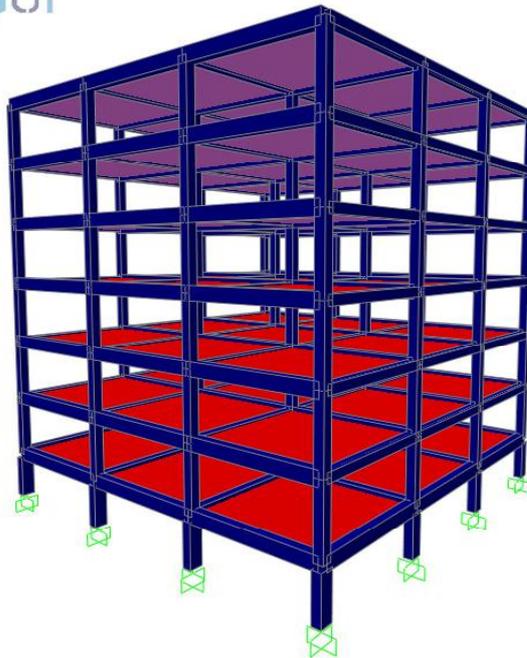


Fig. n.48a – Modello 3D con sottostruttura (SAP2000).



Fig. n.48b – Modello 2D con sottostruttura (SAP2000).



Fig. n.48c – Modello 2D senza sottostruttura (SAP2000).

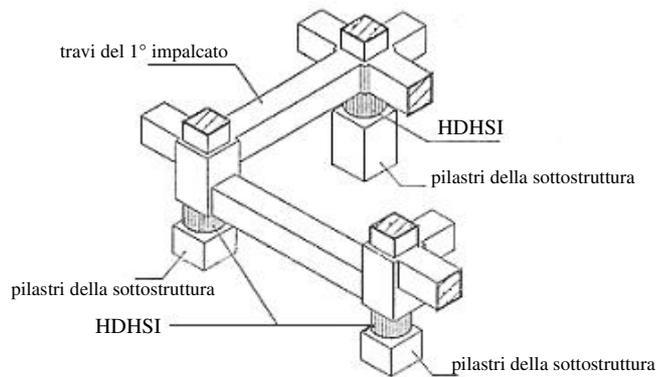


Fig. n.48d – Interfaccia del sistema d'isolamento.

A valle dell'analisi dei carichi, sono state determinate le masse afferenti a ciascun livello del telaio, i cui valori sono riportati nella tabella seguente.

[/]	[ton]
Livello	Massa tot
0	81.79
1	81.79
2	81.79
3	81.14
4	79.8
5	79.8
6	79.8
totale	565.91

Tab. n.3 – Masse afferenti a ciascun livello.

Con riferimento alla condizione di carico per azioni sismiche $G_k + 0,3Q_k$, sono stati valutati gli scarichi dei pilastri agenti su ciascun isolatore HDHSI ed i carichi gravanti su ciascuna trave. Per ciascuno degli isolatori HDHSI laterali, si avrà uno scarico di 934 kN mentre per ciascuno degli HDHSI interni si avrà uno scarico di 1841 kN. Si riportano nella tabella seguente, i carichi a metro lineare relativamente alle travi:

Travi portasoiaio		Travi non portasoiaio	
[/]	[kN/m]	[/]	[kN/m]
Livello	Gk+0,3Qk	Livello	Gk+0,3Qk
0	45,6	0	15,1
1	43,6	1	13,1
2	43,6	2	13,1
3	43,6	3	13,1
4	42,6	4	12,1
5	42,6	5	12,1
6	42,6	6	12,1

Tab. n.4 – Carichi a metro lineare gravanti sulle travi.

Dall'analisi dei carichi si passa al dimensionamento del sistema di isolamento. Inizialmente si dimensiona la sola componente elastomerica del sistema e successivamente si considera anche la componente attritiva. Per il dimensionamento della sola componente elastomerica, viene fissato il periodo target per struttura a base isolata T_{IS} che si vuole garantire. Il periodo target T_{IS} dovrà essere 2-3 volte il periodo della struttura a base fissa T_{BF} . Successivamente,

assimilando il comportamento della struttura a quella di un sistema ad 1-GDL e conoscendo, dall'analisi dei carichi, la massa totale M_{tot} della sovrastruttura, si determina la rigidezza totale del sistema di isolamento k_{tot} con la nota relazione $T = 2\pi\sqrt{M_{tot}/k_{tot}}$. La rigidezza di ciascun isolatore LRB sarà $k_i = k_{tot}/4$. Dal catalogo della casa produttrice, si sceglie l'isolatore elastomerico che più si avvicina al valore di rigidezza calcolato, nel rispetto della compatibilità sia in termini di carico limite verticale sia in termini di spostamento massimo atteso.

Per il dimensionamento della componente attritiva invece, si procede secondo la strategia della limitazione della forza. Viene fissato il massimo valore della forza orizzontale che il sistema di isolamento trasferirà alla sovrastruttura, tramite la scelta di un idoneo coefficiente di attrito μ delle superfici di scorrimento dell'isolatore FS. In genere, si fissa un valore della massima forza orizzontale trasmessa, pari al 10÷20% del peso totale della sovrastruttura al fine di non rendere particolarmente oneroso il garantire un comportamento elastico della sovrastruttura quando gli isolatori a scorrimento non sono attivi. Nel caso in esame si adotta un coefficiente d'attrito dinamico $\mu = 0.1$.

Si precisa inoltre, che la massima forza trasmessa alla sovrastruttura dovrà essere tale da garantire una sufficiente escursione in campo plastico al maggior numero possibile di isolatori LRB e quindi evitare che un numero considerevole di isolatori elastomerici restino in campo elastico senza quindi evidenziare le loro capacità dissipative. Se ciò dovesse accadere, occorre adottare altri isolatori elastomerici al fine di non avere un sistema di isolamento sovradimensionato in cui sono sottoutilizzate le capacità dissipative.

Nel caso oggetto di studio, a valle dell'operazione di dimensionamento, si è pervenuti ad un isolatore HDHSI costituito da un isolatore a scorrimento con coefficiente di attrito μ pari al 10% e da un isolatore LRB 650/150-140 capace di raggiungere uno spostamento orizzontale massimo allo SLC di 300 mm e le cui caratteristiche meccanico-geometriche sono indicate nella tabella seguente.

	V	F _{zd}	K _e	ξ _e	F ₂	F ₁	d ₁	K _v	D _g	t _e	h	H	Z
	kN	kN	kN/mm	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm
LRB-S 650/150-140	2290	6070	1.49	26	373	172	12	1479	650	150	272	332	700
V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento d ₂ ^{SLC})												
F _{zd}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio												
K _e	Rigidità orizzontale equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})												
ξ _e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento d ₂ ^{SLV})												
F ₂	Forza massima (allo spostamento d ₂ ^{SLV})												
F ₁	Forza al limite elastico												
d ₁	Spostamento al limite elastico												
K _v	Rigidità verticale												
D _g	Diametro elastomero												
t _e	Spessore totale gomma												
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio												
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio												
Z	Lato piastre di ancoraggio												

Tab. n.5 – Caratteristiche meccanico-geometriche dell'isolatore LRB 650/150-140.

Dimensionato il sistema di isolamento, viene eseguita un'analisi modale ottenendo un periodo proprio del telaio a base isolata $T_{BI,HDHSI}$ pari a 2.00 sec e quindi pari a circa 3 volte il periodo proprio del medesimo telaio a base fissa T_{BF} che invece risulta essere di 0.75 sec.

Struttura a base fissa

Modo	Periodo	Mx	ΣMx
1	0,751	79,03%	79,03%
2	0,270	13,29%	92,32%
3	0,154	3,53%	95,85%
4	0,107	2,35%	98,20%
5	0,087	1,00%	99,21%
6	0,068	0,80%	100,00%

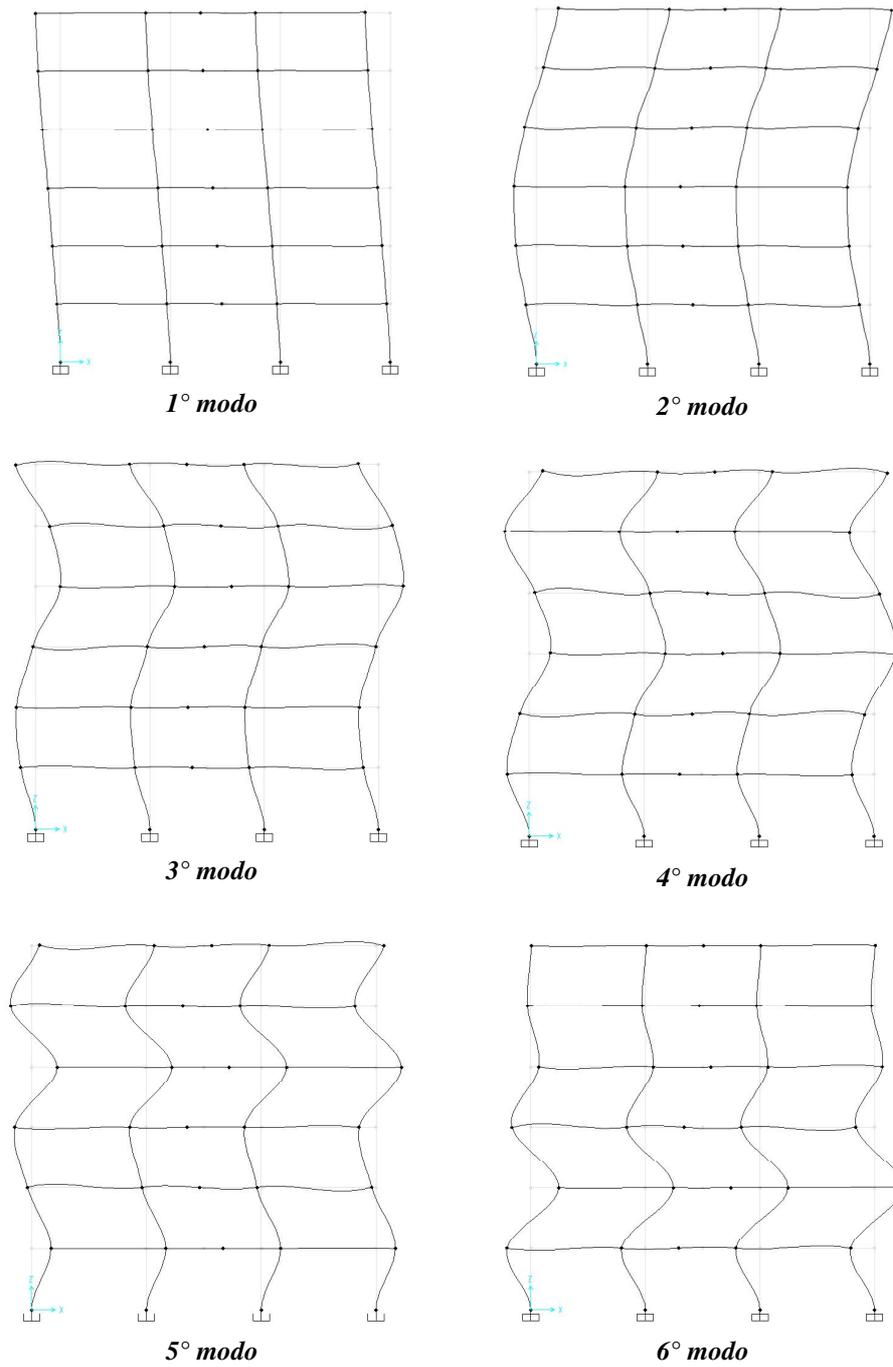


Fig. n.49 – Modi di vibrazione struttura a base fissa.

Struttura a base isolata con HDHSI

[/]	[s]	[/]	[/]
Modo	Periodo	Mx	ΣMx
1	2,057	99,44%	99,44%
2	0,477	0,52%	99,96%
3	0,232	0,03%	100,00%

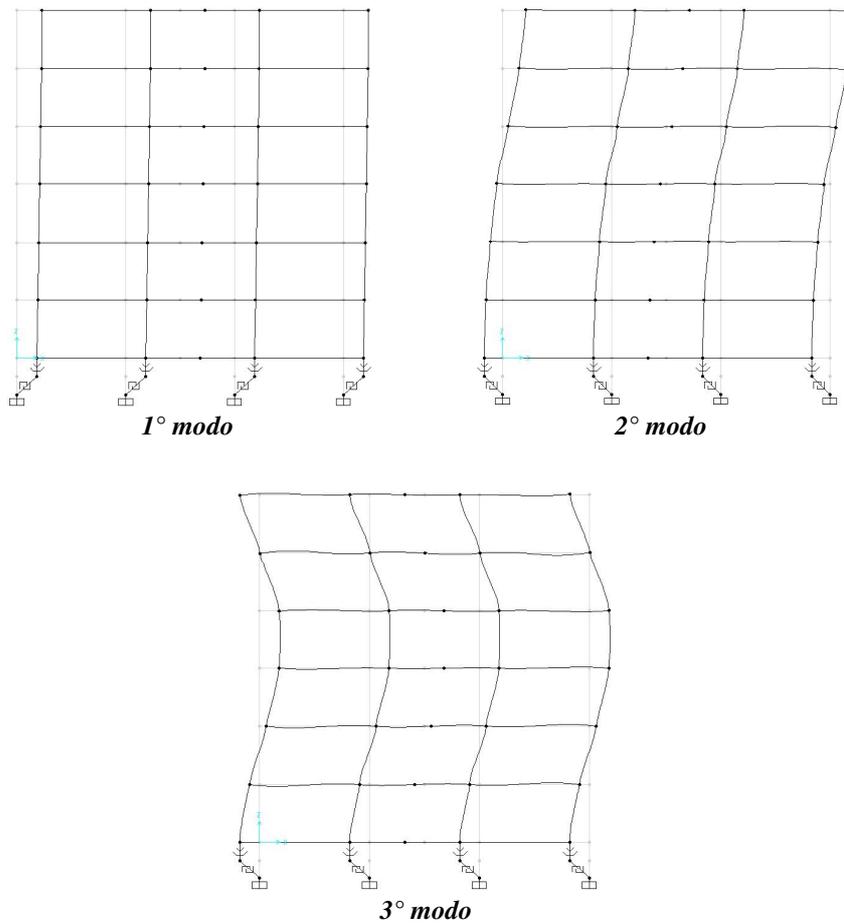


Fig. n.50 – Modi di vibrazione struttura a base isolata

Si precisa che l'isolatore LRB, adottato nel sistema HDHSI, presenta un valore del carico limite verticale pari a 2290 kN in corrispondenza di uno spostamento orizzontale di 300 mm. Ciò consente di affermare che la verifica nei riguardi dell'instabilità, per l'isolatore HDHSI adottato, è sicuramente soddisfatta se lo

spostamento massimo, restituito dall'analisi, risulterà inferiore a 300 mm. Infatti, alla luce di quanto illustrato nel § 2.3.2. *Cap. II*, dato che lo scarico massimo dei pilastri è pari a circa 1900 kN (minore di 2290 kN) e lo spostamento massimo del dispositivo HDHSI risulti non maggiore di 300 mm, non si hanno problemi di instabilità per gli isolatori.

4.3. Registrazioni sismiche anomale considerate

La struttura è stata progettata e verificata nel rispetto dei diversi stati limite previsti dalle NTC 2008. Con il presente lavoro si vuole evidenziare l'efficacia del sistema di isolamento HDHSI nell'assicurare, alla struttura, un significativo livello di protezione sismica anche nei riguardi di sismi anomali per intensità e soprattutto per contenuto in frequenza. Tale sistema di isolamento permette di assicurare alla struttura un livello di "robustness" che i soli isolatori elastomerici non saprebbero e non potrebbero garantire.

La risposta sismica è stata studiata considerando gli eventi sismici di El Centro - California (componente N00W, 1940) ed Erzincan - Turchia (componente N90W, 1992).

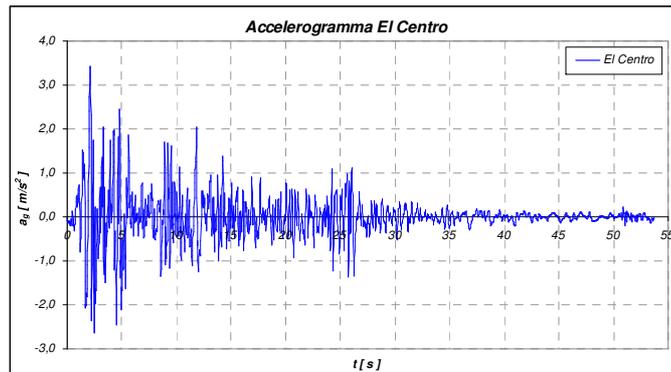


Fig. n.51 - El Centro (componente N00W, 1940).

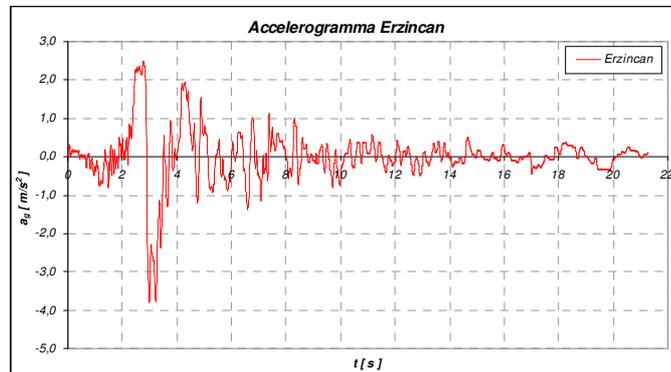


Fig. n.52 - Erzincan (componente N90W, 1992).

Con riferimento al sisma di El Centro, sono stati applicati fattori di amplificazione $\alpha=1.5$ e 2.0 al fine di considerare eventi particolarmente anomali per intensità. Per quel che concerne il sisma di Erzincan, è stata considerata l'azione sismica senza alcun fattore di amplificazione al fine di focalizzare l'attenzione sulla sola anomalia legata all'elevato contenuto energetico in bassa frequenza. Infatti, il sisma di Erzincan è caratterizzato, in termini spettrali, da elevate pseudo-accelerazioni per basse frequenze e quindi con un andamento che presenta notevoli ordinate spettrali, in termini di pseudo-accelerazioni, in corrispondenza di alti periodi (periodi che usualmente caratterizzano le strutture isolate alla base).

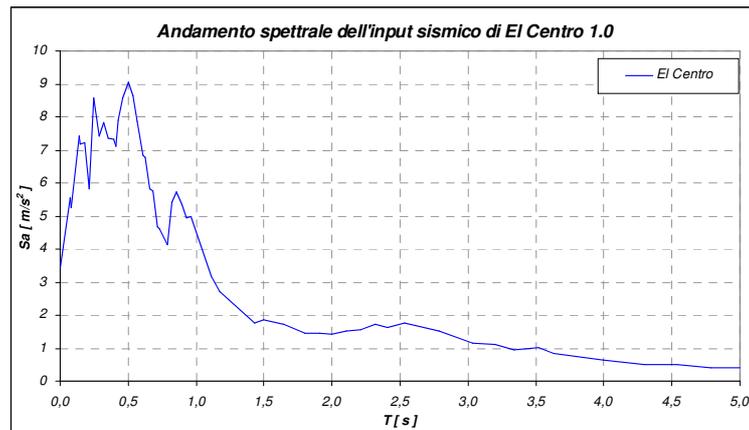


Fig. n.53 – Spettro elastico in termini di pseudo-accelerazioni - El Centro (componente N00W, 1940).

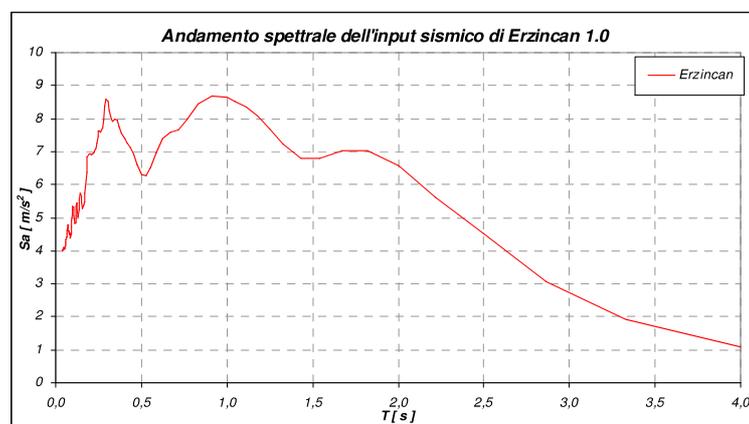


Fig. n.54 - Spettro elastico in termini di pseudo-accelerazioni - Erzincan (componente N90W, 1992).

Per una migliore comprensione circa il contenuto energetico dei segnali sismici adottati, è stata eseguita un'analisi di Fourier per ciascun segnale, tramite un algoritmo che implementa la trasformata discreta di Fourier. È stata utilizzata la Trasformata Rapida di Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) nella versione in cui il numero di punti, nel dominio originale e in quello trasformato, sia una potenza intera di 2.

A valle dell'analisi, per ciascun segnale sismico, è stato tracciato in scala logaritmica, lo spettro di risposta nel dominio delle frequenze, applicando lo

spostamento di Nyquist prima di eseguire la FFT. Successivamente, è stata valutata la Densità Spettale dell'Energia (Power Spectral Density - PSD) cioè l'energia del segnale associata ad ogni frequenza. La PSD riveste una particolare importanza, perché rappresenta lo spettro di energia del segnale nel dominio delle frequenze. Al fine di ottenere dei risultati quantitativi in termini di energia, è stato applicato il teorema di Parseval che consente di normalizzare la PSD. Tale teorema, in forma discreta, è fornito dalla seguente espressione:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |f_n(t)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |F_n(\omega)|^2$$

dove:

- N è il numero di punti nell'insieme di dati che nel caso in esame è una potenza intera di 2;
- $F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$ è la trasformata diretta di Fourier (trasformata di Fourier nella forma analitica) e rappresenta lo spettro nel dominio della pulsazione (ω) che sappiamo essere legata alla frequenza (f) mediante la relazione $\omega = 2\pi f$;
- $f(t)$ è il segnale nel dominio originale (il tempo t , nel caso in esame).

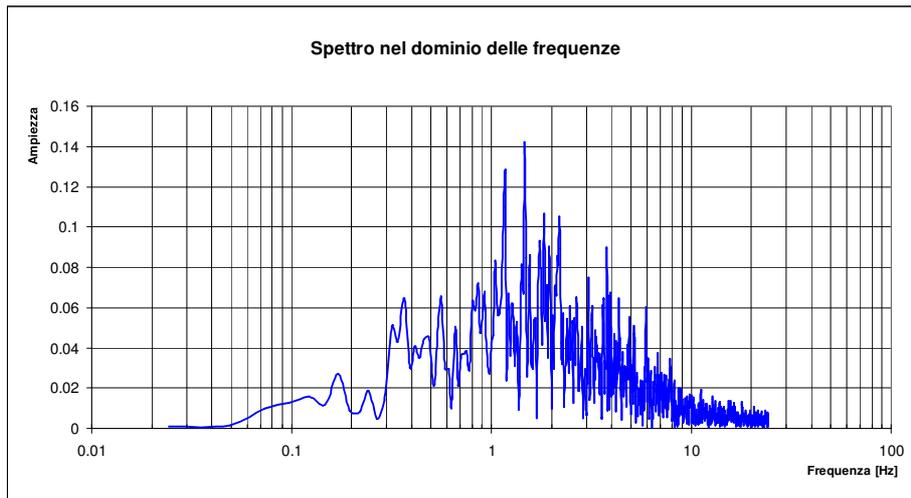
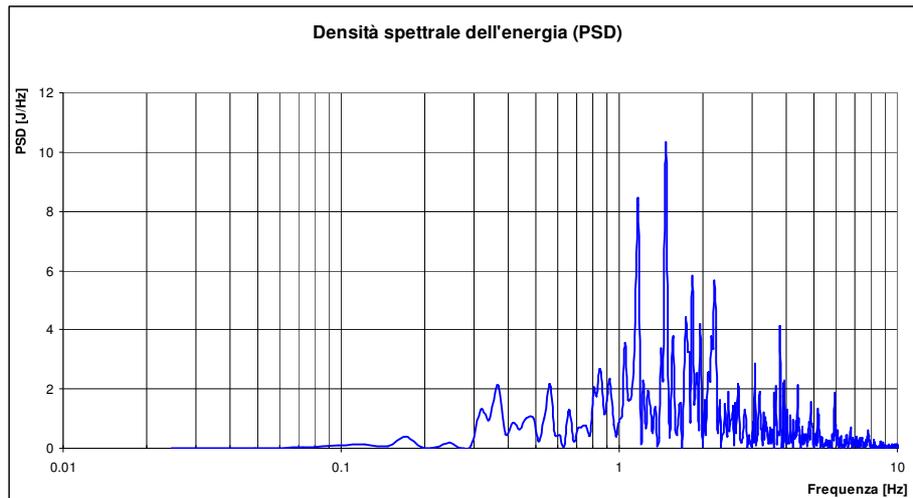


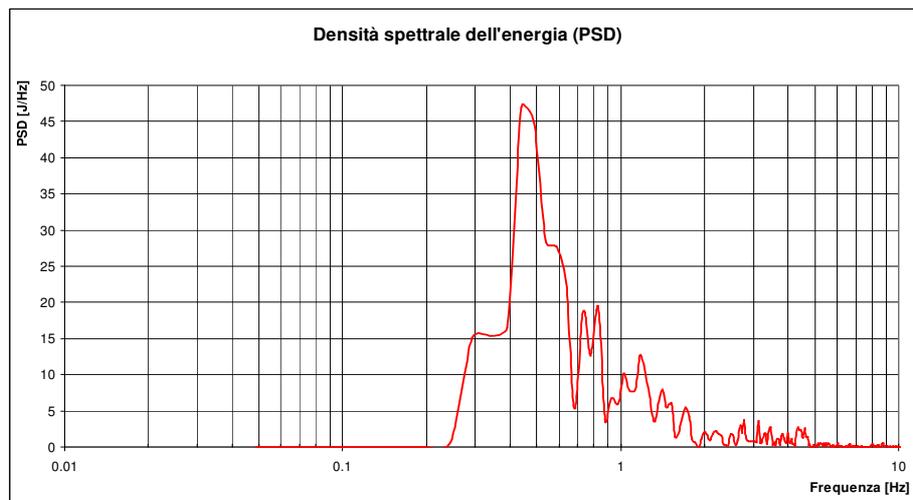
Fig. n.55 – Spettro nel dominio delle frequenze - El Centro (componente N00W, 1940).



Fig. n.56 - Spettro nel dominio delle frequenze - Erzincan (componente N90W, 1992).



*Fig. n.57 – Spettro di energia nel dominio delle frequenza -
El Centro (componente N00W, 1940).*



*Fig. n.58 - Spettro di energia nel dominio delle frequenza -
Erzincan (componente N90W, 1992).*

Si può osservare che il segnale di El Centro presenta il massimo contenuto energetico in corrispondenza di una frequenza di circa 1.5 Hz e quindi per periodi di circa 0.7 sec (periodi caratterizzanti una usuale struttura intelaiata in c.a. a base fissa); mentre il segnale di Erzincan presenta il massimo contenuto energetico in

corrispondenza di una frequenza di circa 0.45 Hz e quindi per periodi di circa 2.2 sec (periodi caratterizzanti una usuale struttura intelaiata in c.a. a base isolata).

Al fine di valutare quantitativamente l'anomalia delle registrazioni considerate, si riportano gli incrementi percentuali, in corrispondenza di T_{IS} , delle pseudo-accelerazione relative agli spettri elastici di progetto per lo Stato Limite Ultimo (SLV; SLC; SLC 2475) rispetto alle pseudo-accelerazioni relative agli spettri degli input sismici anomali considerati.

EL CENTRO $\alpha=1.5$	
Stato Limite	Incremento percentuale
SLV	55%
SLC	21%
SLC 2475	-16%

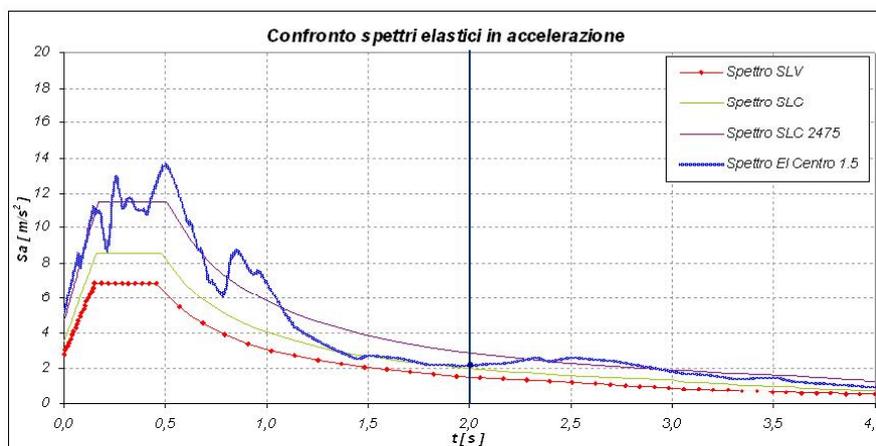


Fig. n.59 – Spettri elastici di progetto e spettro sisma anomalo (El Centro $\alpha = 1.5$).

EL CENTRO $\alpha=2.0$	
Stato Limite	Incremento percentuale
SLV	106%
SLC	61%
SLC 2475	12%

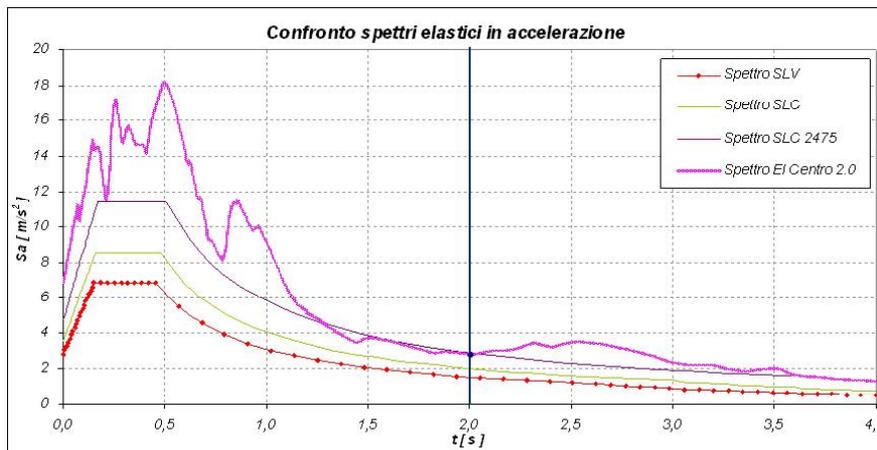


Fig. n.60 – Spettri elastici di progetto e spettro sisma anomalo (El Centro $\alpha=2.0$).

ERZINCAN $\alpha=1.0$	
Stato Limite	Incremento percentuale
SLV	310%
SLC	220%
SLC 2475	122%

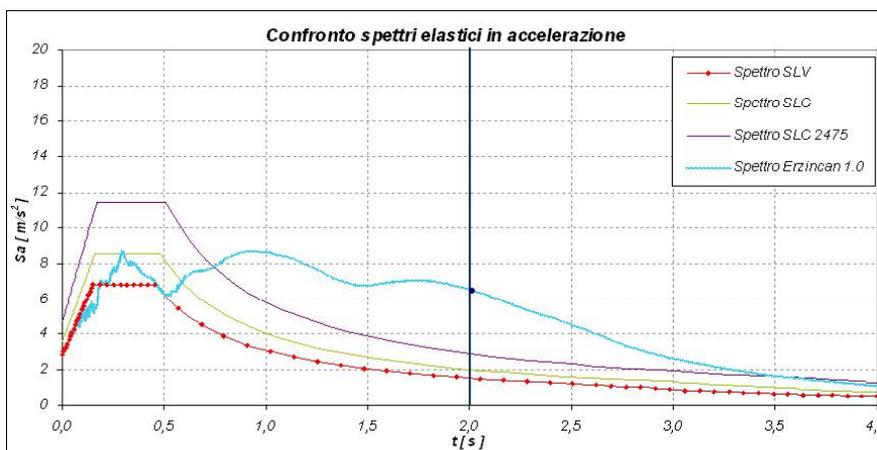


Fig. n.61 – Spettri elastici di progetto e spettro sisma anomalo (Erzincan $\alpha=1.0$).

Si precisa che l'input sismico El Centro non amplificato ($\alpha=1.0$) presenta, in corrispondenza del periodo d'interesse, un'ordinata spettrale in termini di pseudo-accelerazioni, prossima a quella prevista dalla norma per lo SLV; mentre El Centro amplificato di $\alpha=1.25$, presenta un'ordinata spettrale prossima a quella di progetto per lo SLC.

Amplificando l'input sismico di El Centro con un coefficiente $\alpha=1.5$, si ottiene un'ordinata spettrale in termini di pseudo-accelerazioni, che ricade tra quelle attese per lo SLC e lo SLC 2475; mentre con El Centro amplificato di $\alpha=2.0$, si ottiene un'ordinata spettrale maggiore rispetto a quella attesa per lo SLC 2475.

L'input sismico Erzincan non amplificato ($\alpha=1.0$) presenta, alla luce del suo andamento spettrale anomalo, delle ordinate spettrali marcatamente maggiori rispetto a quelle previste per i tre SLU. In particolare, si vuole sottolineare che tale azione sismica determina un'ordinata spettrale, in termini di pseudo-accelerazioni, più di due volte maggiore rispetto a quella attesa per lo SLC 2475.

4.4. Modellazione della struttura isolata e comportamento del sistema HDHSI

La struttura in c.a. analizzata, è stata modellata in campo elastico lineare per quanto concerne la sovrastruttura, adottando degli elementi frame per le travi e per i pilastri.

Nel caso in cui è stata considerata anche la sottostruttura, si è adottata una modellazione con elementi frame a comportamento elastico lineare per tutti i macropilastri.

Per quanto riguarda il sistema di isolamento, è stata adottata la modellazione ampiamente descritta nel § 2.3. *Cap. III*, derivante dall'assemblaggio in serie di elementi finiti non lineari NLink, i cui parametri sono stati settati in modo tale da assicurare una corretta riproducibilità del comportamento ciclico-isteretico.

Merita un approfondimento, lo smorzamento adottato durante l'analisi dinamiche non lineare (NLDA). Si può affermare che per le strutture isolate alla

base, la dissipazione di energia attribuita al sistema d'isolamento, rappresenta l'aliquota preponderante dell'intera energia dissipata dal sistema strutturale. Pertanto, lo smorzamento viscoso equivalente attribuibile alla sovrastruttura, deve essere limitato a valori minimi in modo tale da rendere realistica la ridottissima dissipazione che avviene nella sovrastruttura, dato che il suo comportamento è quasi interamente in regime elastico-lineare. Per la matrice di smorzamento $[B]$ dell'intero sistema strutturale, si assume (nell'ipotesi di Rayleigh) una matrice proporzionale alle matrici delle masse $[M]$ e delle rigidezze $[K]$, tramite i coefficienti di proporzionalità α e β .

$$[B] = \alpha \cdot [M] + \beta \cdot [K]; \quad \alpha = \frac{2\omega_i\omega_j \cdot (\xi_j\omega_i - \xi_i\omega_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2}; \quad \beta = \frac{2 \cdot (\xi_j\omega_j - \xi_i\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2}$$

Il coefficiente di smorzamento viscoso, dovendo essere particolarmente limitato, è stato assunto pari al 2% di quello critico, mentre i modi di vibrazione (i) e (j) sono stati scelti in maniera tale che lo smorzamento modale assuma valori prossimi al 2% per i modi principali della struttura, ad eccezione dei primi tre modi di vibrare (per l'analisi 3D) o semplicemente per il primo modo di vibrare (per l'analisi 2D), i cui spostamenti interessano principalmente il sistema di isolamento e quindi lo smorzamento è dettato dall'isteresi del modello elastoplastico degli isolatori. Pertanto, nella NLDA, lo smorzamento del sistema di isolamento è insito nella modellazione non lineare degli isolatori elastomerici e quindi attribuibile al comportamento ciclico-isteretico degli isolatori stessi. Lo smorzamento viscoso della sovrastruttura, nell'ipotesi di Rayleigh, è tale che tutti i modi della struttura hanno un valore prossimo o uguale a 0.02, ad eccezione dei primi tre modi vibrare (per l'analisi 3D) o semplicemente per il primo modo (per l'analisi 2D) per i quali è stato assegnato un "modal damping" pari a zero. Per tali modi di vibrazione, gli spostamenti interessano prevalentemente il sistema di isolamento e quindi la dissipazione avviene da parte degli isolatori e ciò sicuramente imputabile al comportamento praticamente rigido della sovrastruttura.

Prima di illustrare i risultati ottenuti dalle diverse analisi non lineari eseguite, si vuole illustrare sinteticamente il comportamento del sistema di isolamento HDHSI nelle sue diverse fasi. In particolare, così come è stato già fatto per il singolo isolatore per il quale sono state visualizzate le diverse fasi di funzionamento, anche per l'intero sistema applicato alla struttura oggetto di studio, si vogliono evidenziare le fasi principali caratterizzanti il comportamento sismico:

- **Fase 1:** *assenza di azioni orizzontali (fase iniziale);*
- **Fase 2:** *attivazione dei soli isolatori elastomeri LRB;*
- **Fase 3:** *attivazione degli isolatori a scorrimento laterali, con relativa limitazione della forza orizzontale. In tale fase gli isolatori LRB laterali hanno raggiunto la loro massima domanda di spostamento, mentre gli isolatori LRB interni continuano a deformarsi perché presentano una domanda di spostamento maggiore;*
- **Fase 4:** *raggiungimento della massima domanda di spostamento anche per gli isolatori LRB interni e attivazione dei corrispettivi isolatori a scorrimento.*

La non contemporanea attivazione di tutti gli isolatori a scorrimento, pur essendo identici tra loro, è dovuta al differente carico verticale gravante sugli isolatori interni rispetto a quelli esterni e quindi al diverso valore della forza di primo distacco.

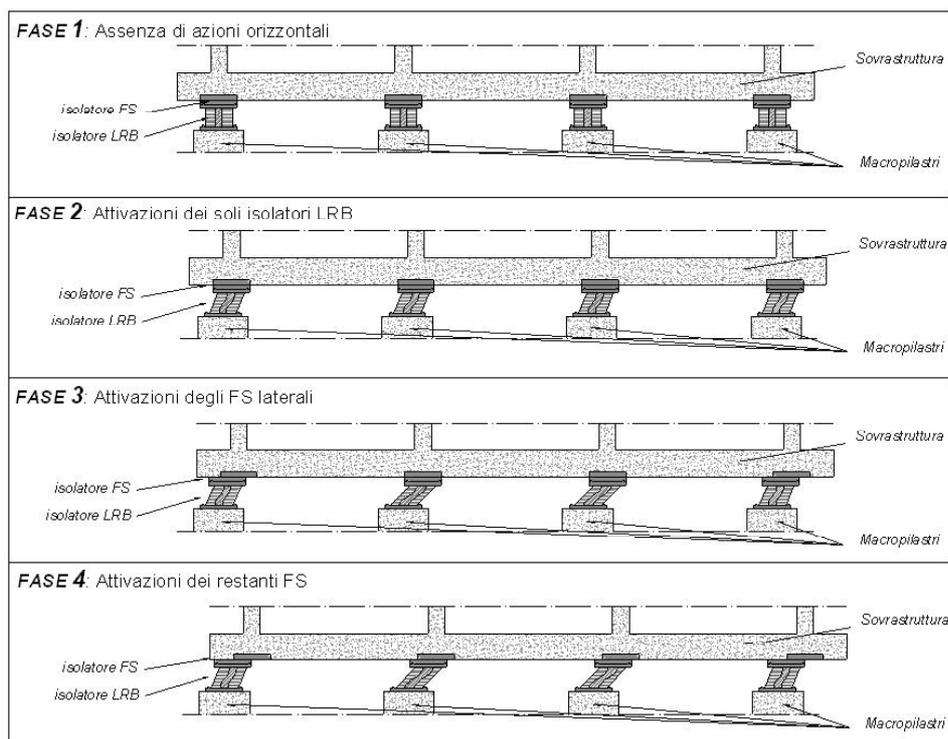


Fig. n.62 - Fasi di funzionamento del sistema d'isolamento HDHSI.

4.5. Analisi Dinamica Non Lineare adottata: la FNA

La struttura oggetto di studio, verrà sottoposta ad un'analisi dinamica non lineare dopo aver definito ed assegnato le non linearità meccaniche del sistema di isolamento e dopo aver assegnato gli accelerogrammi come input sismico. Si utilizza un modello a non linearità concentrata e in particolare si definiscono degli elementi finiti a comportamento non lineare (NLlink) per la modellazione dei dispositivi del sistema di isolamento. In una modellazione così concepita, gli effetti inelastici del sistema isolato, sono applicati in punti discreti del modello, quindi è possibile eseguire l'analisi dinamica non lineare tramite la FNA (Fast Nonlinear Analysis) piuttosto che tramite i metodi di integrazione diretta espliciti o impliciti del tipo Newmark; Wilson Theta; Hilbert-Hughes-Taylor; Chung-Hulbert.

La FNA ha il vantaggio di separare i g.d.l. a comportamento lineare, dai g.d.l. a comportamento non lineare. Utilizzando la FNA si adatterà sempre un metodo di integrazione al passo come quelli della famiglia Newmark, ma con il vantaggio di sottoporre ad una procedura iterativa ed incrementale (ad ogni passo di integrazione) soltanto la risposta degli elementi non lineari, mentre la matrice di rigidezza e la matrice di smorzamento viscoso, caratterizzate da un risposta di tipo lineare, restano inalterate durante l'intera analisi. Tale modo di procedere consente di estendere i vantaggi del disaccoppiamento modale, utilizzato nei metodi lineari, anche ai metodi di analisi non lineari mediante l'uso di vettori Ritz dipendenti dal carico.

Il metodo adottato, si basa sulla separazione delle reazioni, in termini di forze, esercitate dagli elementi non lineari, dalle reazioni elastiche della restante parte della struttura.

Al generico passo d'integrazione (Δt), il sistema di equazioni differenziali che governa il moto della struttura è il seguente:

$$[M]\{\ddot{q}\}(t) + [B]\{\dot{q}\}(t) + [K_l]\{q\}(t) + \{F_{nl}\}(t) = \{F\}(t) \quad (31)$$

$[M]$	matrice delle masse;
$[B]$	matrice di smorzamento proporzionale;
$[K_l]$	matrice di rigidezza dei solo elementi lineari, esclusi quindi i <i>Non Linear Links (NLlinks)</i> ;
$\{F_{nl}\}(t)$	vettore delle forze duali ai g.d.l. degli elementi non lineari;
$\{F\}(t)$	vettore delle forze applicate;
$\{\ddot{q}\}(t); \{\dot{q}\}(t); \{q\}(t)$	vettori nodali di accelerazione, velocità e spostamento rispetto al suolo.

È possibile sommare alla matrice di rigidezza degli elementi lineari $[K_l]$, la matrice $[K_{e,nl}]$ che contiene le rigidezze elastiche degli elementi finiti non lineari:

$$[M]\{\ddot{q}\}(t) + [B]\{\dot{q}\}(t) + ([K_l] + [K_{e,nl}])\{q\}(t) + \{F_{nl}\}(t) =$$

$$= \{F\}(t) + [K_{e,nl}]\{q\}(t) \quad (32)$$

In maniera sintetica si può scrivere:

$$[M]\{\ddot{q}\}(t) + [B]\{\dot{q}\}(t) + [\overline{K}]\{q\}(t) = \{\overline{F}\}(t) \quad (33)$$

$$[\overline{K}] = ([K_l] + [K_{e,nl}])$$

matrice di rigidità elastica globale;

$$\{\overline{F}\}(t) = \{F\}(t) - \{F_{nl}\}(t) + [K_{e,nl}]\{q\}(t)$$

vettore dei carichi esterni che include anche la risposta di tutti gli elementi non lineari.

La risoluzione della (33), tramite disaccoppiamento delle equazioni del moto, è subordinata all'esecuzione dell'analisi modale. Tale analisi viene svolta con l'algoritmo di Ritz che prevede la determinazione di un gruppo di autovettori ortonormali che raccolti nella matrice $[\chi]$ devono soddisfare le seguenti condizioni di ortogonalità:

$$[\chi]^T [M] [\chi] = [I]; \quad [\chi]^T [\overline{K}] [\chi] = [\Omega]^2 \quad (34)$$

dove $[\Omega]$ è la matrice diagonale degli autovalori del sistema.

Inoltre, la risposta della struttura può essere espressa in termini di coordinate modali $\{p\}$ tramite le seguenti relazioni:

$$\{\ddot{q}\} = [\chi]\{\ddot{p}\}; \quad \{\dot{q}\} = [\chi]\{\dot{p}\}; \quad \{q\} = [\chi]\{p\} \quad (35)$$

Sostituendo le precedenti trasformazioni matriciali nel sistema (33) e premoltiplicando ciascun termine per $[\chi]^T$, si ottiene il seguente sistema di equazioni differenziali disaccoppiate:

$$\{\ddot{p}\}(t) + [\Lambda]\{\dot{p}\}(t) + [\Omega]^2 \{p\}(t) = [\chi]^T \{\overline{F}\}(t) \quad (36)$$

esplicitando il vettore $\{\overline{F}\}(t)$ si può scrivere:

$$\{\ddot{p}\}(t) + [\Lambda]\{\dot{p}\}(t) + [\Omega]^2\{p\}(t) = [\chi]^T (\{F\}(t) - \{F_{nl}\}(t) + [K_{e,nl}]\{q\}(t)) \quad (37)$$

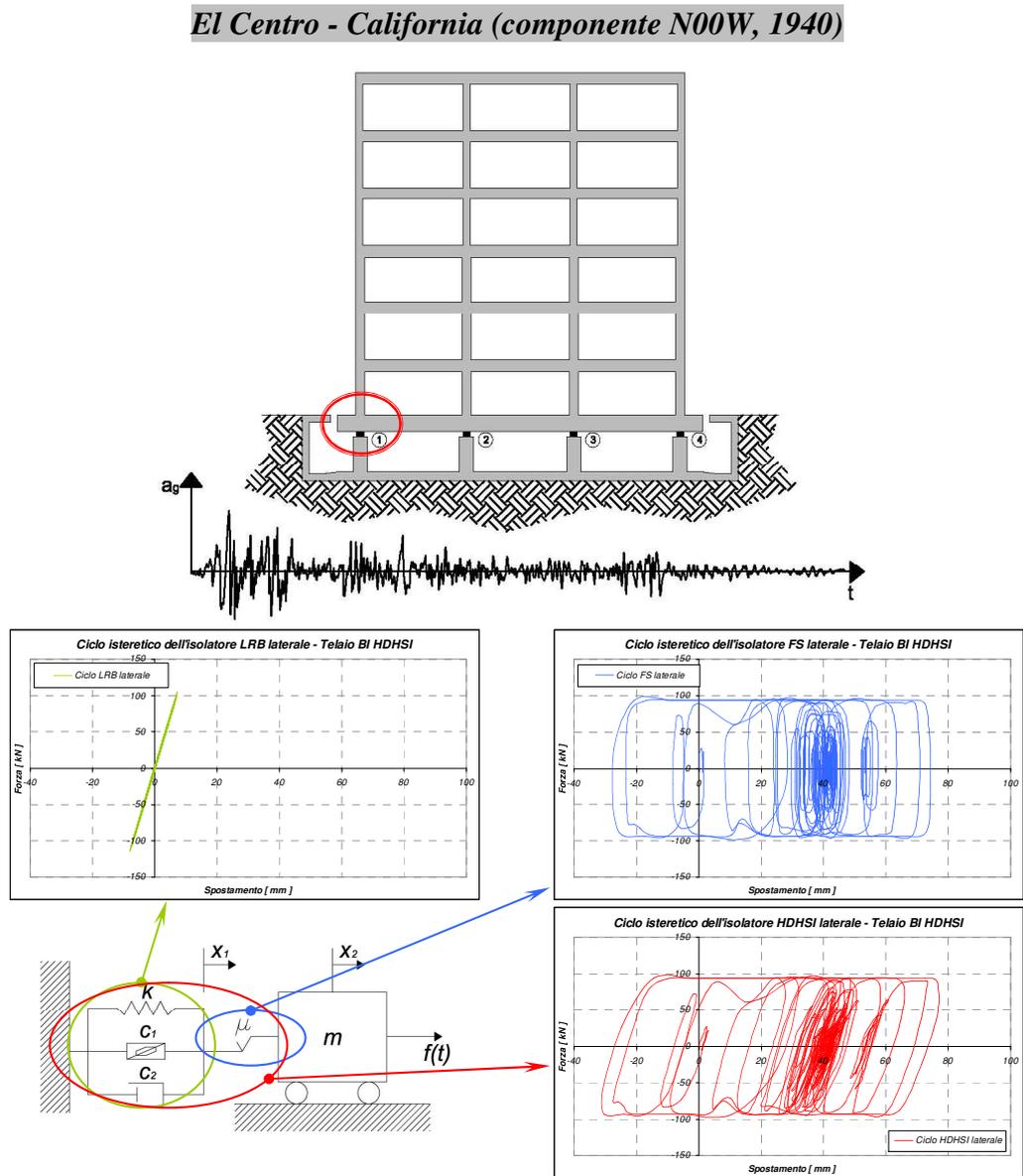
La risoluzione del sistema (37) sfrutta la medesima tecnica applicata all'analisi modale, aggiornando ad ogni passo di integrazione Δt , soltanto i termini contenuti in $\{F_{nl}\}(t)$ funzione delle componenti di deformazione degli elementi non lineari e mantenendo inalterate tutte le matrici del sistema.

4.6. Risposta sismica della struttura mediante FNA

Illustrata la modellazione dell'intera struttura isolata alla base; definiti e illustrati gli input sismici anomali considerati; illustrata la procedura di analisi non lineare adottata; si valutata la risposta sismica mediante Analisi Dinamiche Non Lineari adottando la Fast Nonlinear Analysis (FNA).

Sono riportati i cicli isteretici, per un isolatore HDHSI esterno ed interno con i relativi cicli dei dispositivi (LRB e FS) che lo compongono. Infine, si riportano le time history del taglio trasmesso dal sistema di isolamento alla sovrastruttura e dello spostamento alla base della sovrastruttura. Tali diagrammi sono stati ricavati per ciascuno dei 4 input sismici considerati: El Centro ($\alpha=1.0$); El Centro ($\alpha=1.5$); El Centro ($\alpha=2.0$); Erzincan ($\alpha=1.0$).

Per ovvi motivi di sintesi, si riportano i cicli e le time history per le sole registrazioni El Centro ($\alpha=1.0$) ed Erzincan ($\alpha=1.0$).



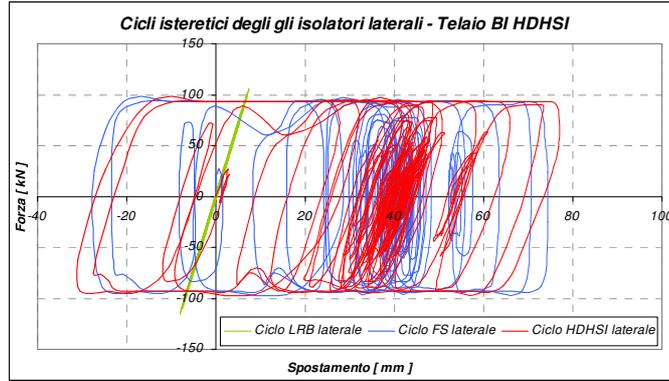
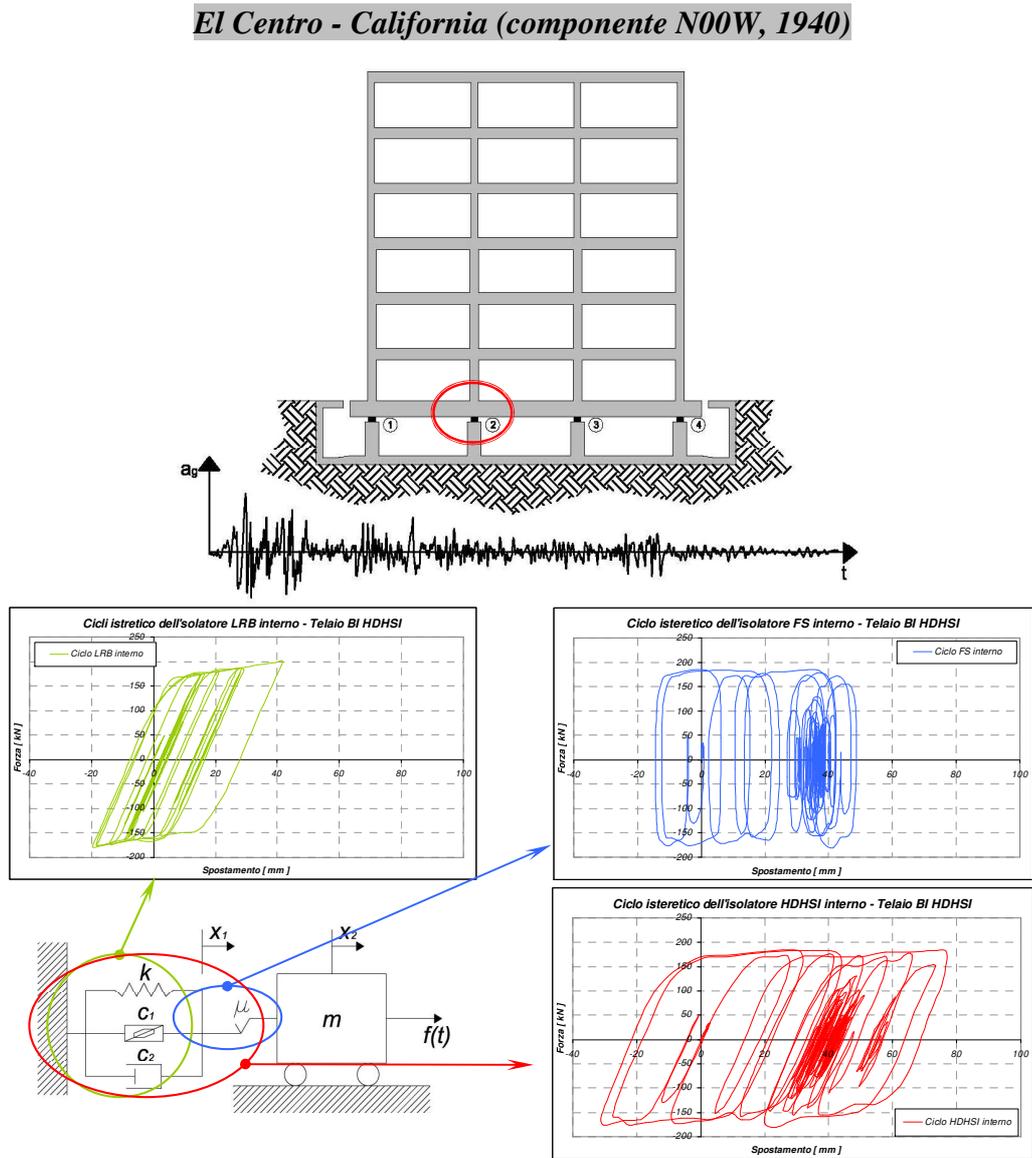


Fig. n.64 – Sovrapposizione cicli isteretici LRB, FS e HDHSI – dispositivo ESTERNO.



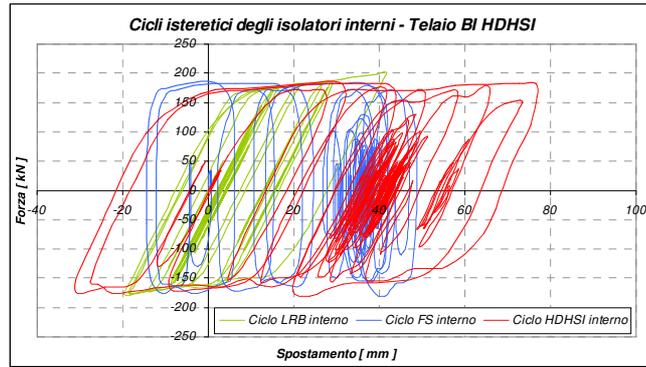
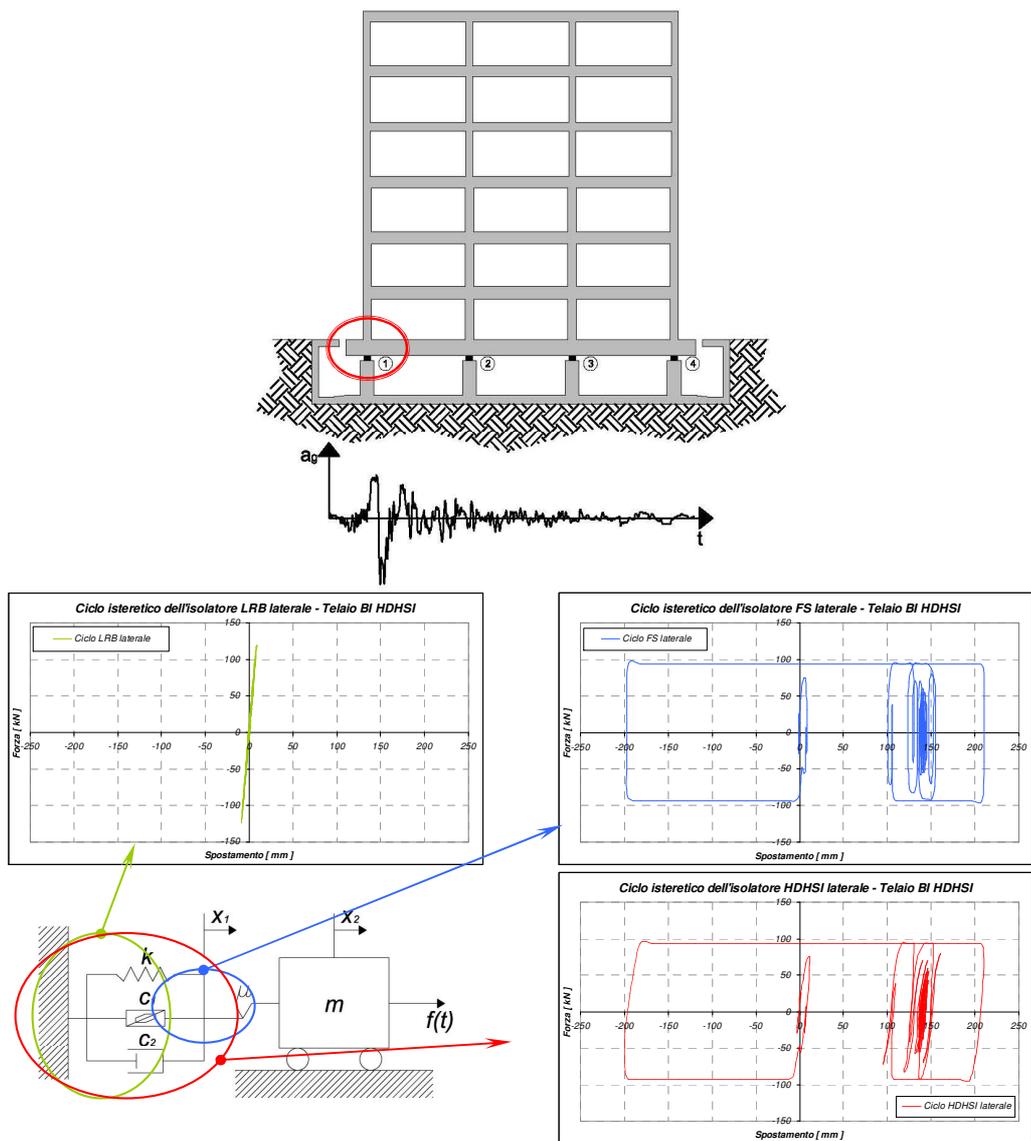


Fig. n.66 – Sovrapposizione cicli isteretici LRB, FS e HDHSI – dispositivo INTERNO.

Erzincan - Turchia (componente N90W, 1992)**Fig. n.67 – Cicli isteretici LRB, FS e HDHSI – dispositivo ESTERNO.**

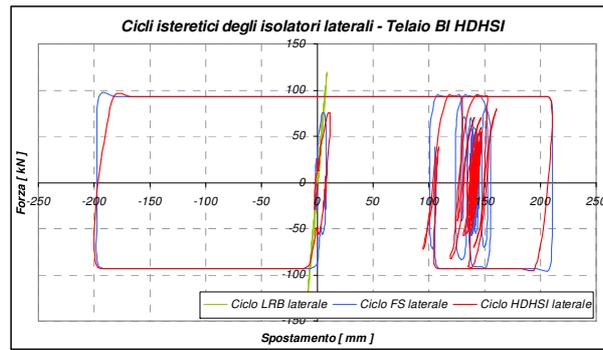


Fig. n.68 – Sovrapposizione cicli isteretici LRB, FS e HDHSI – dispositivo *ESTERNO*.

Erzincan - Turchia (componente N90W, 1992)

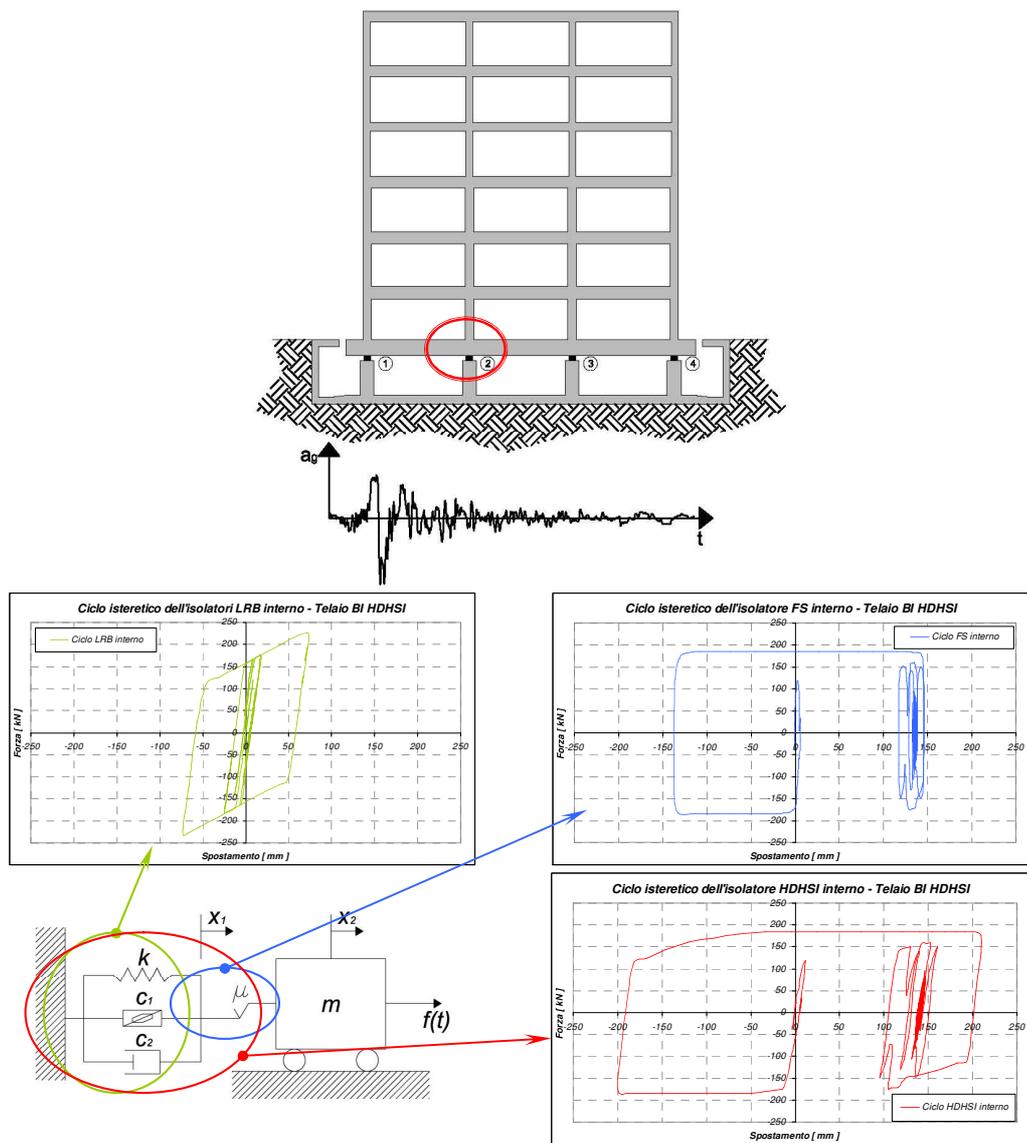


Fig. n.69 – Cicli isteretici LRB, FS e HDHSI – dispositivo INTERNO.

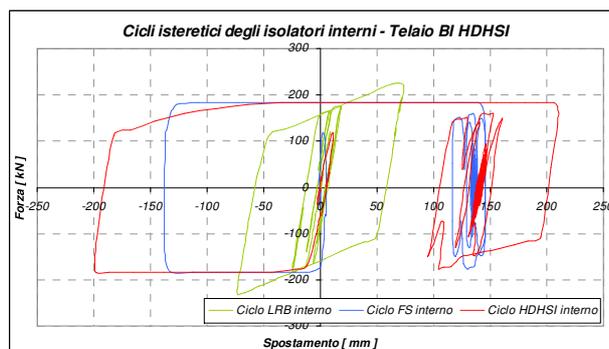


Fig. n.70 – Sovrapposizione cicli isteretici LRB, FS e HDHSI – dispositivo INTERNO.

Dall'osservazione dei cicli isteretici emerge che, per entrambi gli input sismici (tale aspetto si manifesta per i quattro eventi sismici considerati nello studio), il comportamento dell'isolatore LRB esterno è differente dal comportamento dell'isolatore LRB interno. Infatti, mentre l'isolatore LRB esterno è caratterizzato da un comportamento elastico, per l'isolatore LRB interno la forza al limite elastico viene più volte superata. Questo diverso comportamento è legato al differente valore di forza orizzontale, che risulta indipendente dall'azione sismica considerata, ma dipendente dal valore di carico verticale gravante sul dispositivo HDHSI e quindi sull'isolatore LRB. Tale carico è responsabile del diverso valore della forza di primo distacco dell'isolatore FS e quindi della massima forza trasmessa all'isolatore LRB. Si può osservare che in seguito ai differenti scarichi dei pilastri, sull'isolatore LRB esterno agisce una forza orizzontale massima di circa 95 kN, mentre sull'isolatore LRB interno agisce una forza orizzontale massima di circa 185 kN. Poiché l'isolatore LRB utilizzato (LRB-S 650/150-140), presenta una forza al limite elastico pari a 172 kN, si intuisce che l'isolatore LRB esterno rimane in campo elastico, mentre l'isolatore LRB interno presenta più volte escursioni in campo plastico.

Per ottimizzare il comportamento degli isolatori elastomerici in modo tale da generare, anche per quelli esterni, escursioni in campo plastico, è possibile adottare degli LRB caratterizzati da una forza al limite elastico ($F_1 = F_y$) minore

della forza di primo distacco che per tali isolatori è pari a circa 95 kN. Ovviamente, occorrerà reiterare l'intero iter progettuale del sistema di isolamento poiché tali isolatori avranno anche valori di rigidezza orizzontale differenti rispetto a quelli iniziali. Tuttavia, tale ottimizzazione di cui si parlerà in modo approfondito in seguito, non è stata eseguita poiché riferendoci agli LRB disponibili dalla "Fip Industriale", non è stato possibile reperire isolatori caratterizzati da una forza al limite elastico ($F_1 = F_y$) minore di 95 kN. Per tale motivo sono stati adottati i medesimi isolatori LRB sia per i pilastri interni che per i pilastri esterni, ottenendo comunque un'ottima dissipazione per il dispositivo complessivo HDHSI sia esso esterno sia esso interno, come si può osservare in Fig. n.73 e 76.

Per quel che concerne i cicli isteretici degli isolatori a scorrimento, anche per essi, si nota un differente comportamento tra isolatore esterno ed isolatore interno. In particolare, per l'isolatore FS esterno, dato il più ridotto valore di carico verticale gravante su di esso, si ha una forza orizzontale di primo distacco minore ed uno spostamento orizzontale maggiore rispetto all'isolatore FS interno. Ciò, determina un ciclo isteretico dell'isolatore a scorrimento esterno, più schiacciato ed allungato rispetto a quello registrato per l'isolatore a scorrimento interno.

Infine, osservando i cicli isteretici dei dispositivi HDHSI, emerge la perfetta rispondenza tra i cicli attesi e quelli ottenuti con il codice di calcolo SAP2000, ad ulteriore riprova della buona affidabilità della modellazione adottata. Si nota inoltre che il ciclo isteretico dell'isolatore HDHSI esterno, presenta una forma più schiacciata rispetto a quello relativo all'isolatore HDHSI interno, ma entrambi presentano lo stesso spostamento orizzontale massimo, come è giusto attendersi.

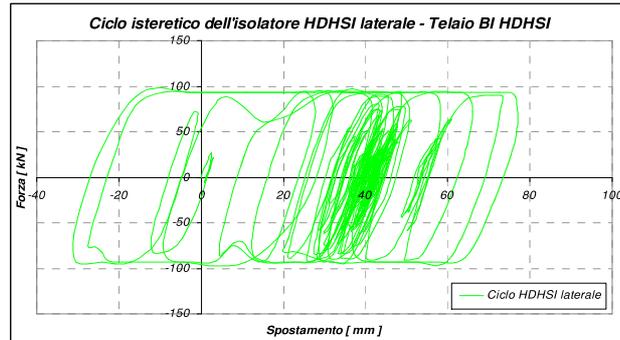


Fig. n.71 – Ciclo isteretico dell'isolatore HDHSI esterno
Input sismico El Centro $\alpha = 1.0$

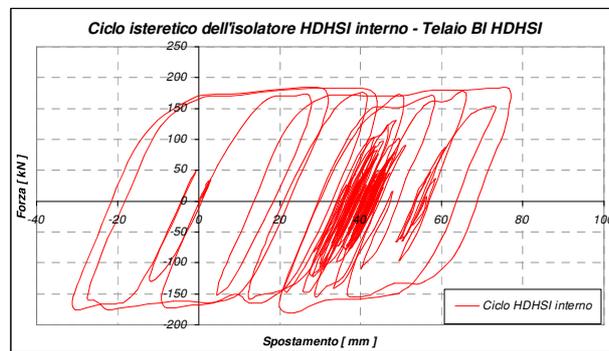


Fig. n.72 – Ciclo isteretico dell'isolatore HDHSI interno
Input sismico El Centro $\alpha = 1.0$

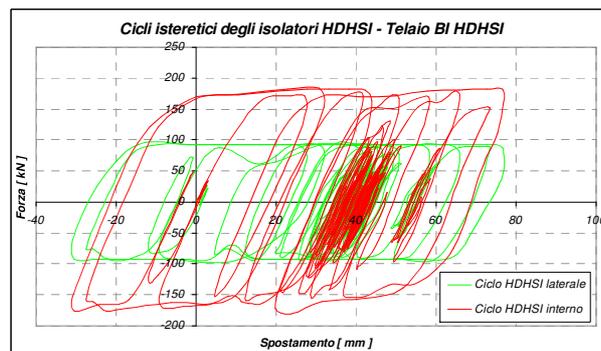


Fig. n.73 – Confronto dei cicli isteretici degli isolatori HDHSI esterno ed interno
Input sismico El Centro $\alpha = 1.0$

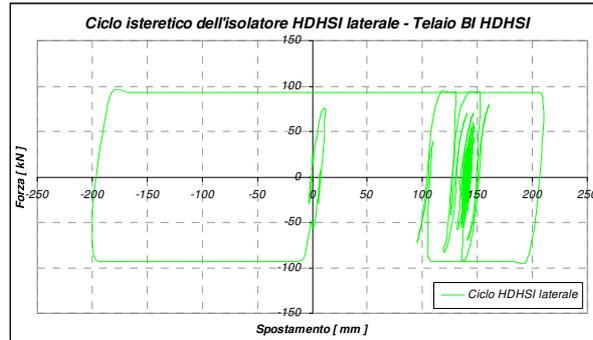


Fig. n.74 – Ciclo isteretico dell'isolatore HDHSI esterno
Input sismico Erzincan $\alpha = 1.0$

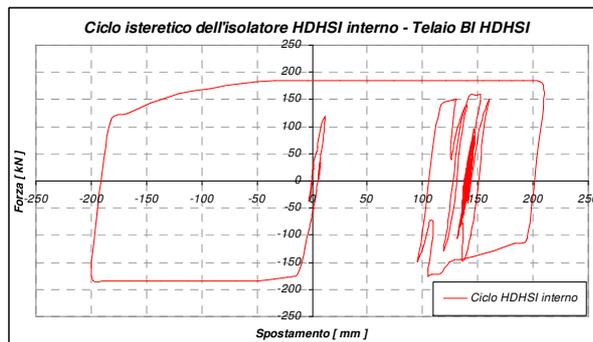


Fig. n.75 – Ciclo isteretico dell'isolatore HDHSI interno
Input sismico Erzincan $\alpha = 1.0$

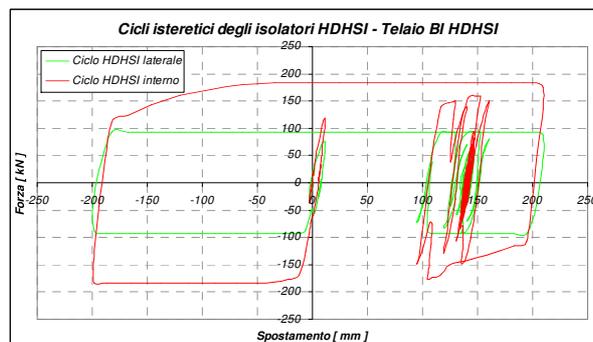


Fig. n.76 – Confronto dei cicli isteretici degli isolatori HDHSI esterno ed interno
Input sismico Erzincan $\alpha = 1.0$

Si riportano nel seguito i risultati in termini di time history:

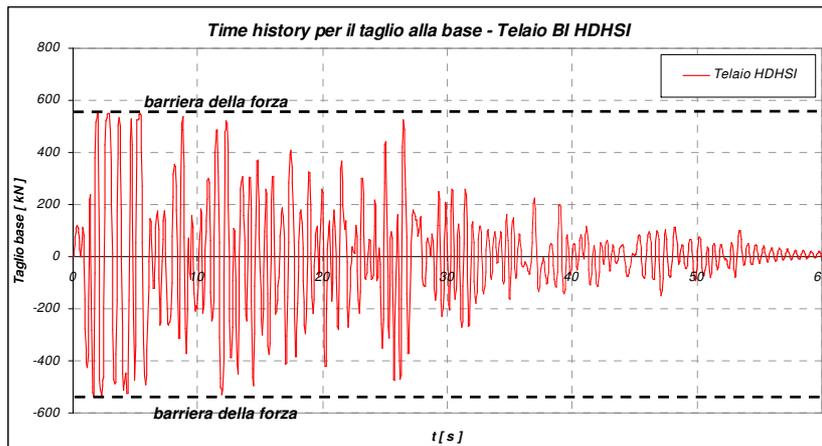


Fig. n.77 - Time history del taglio alla base
(El Centro $\alpha = 1.0$)

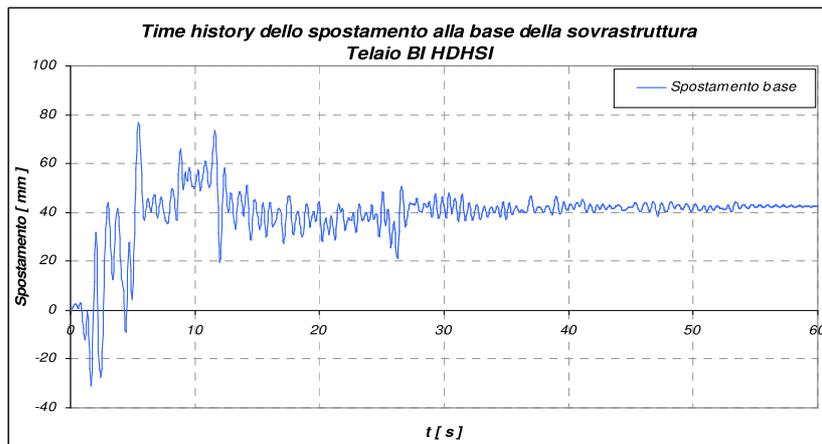


Fig. n.78 - Time history dello spostamento alla base
(El Centro $\alpha = 1.0$)

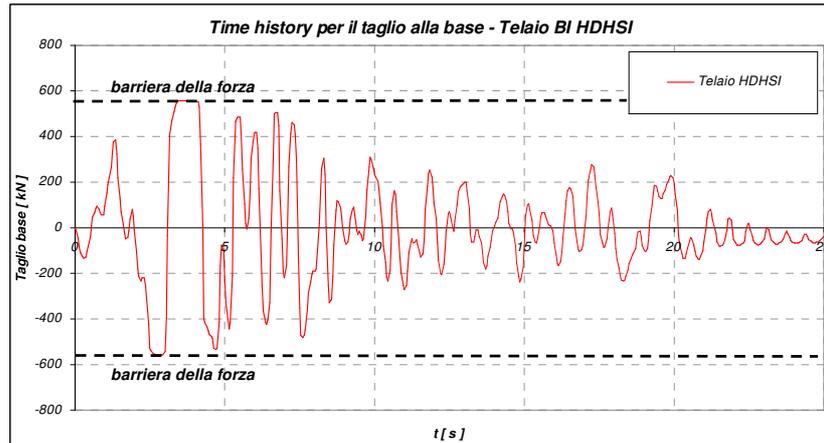


Fig. n.79 - Time history del taglio alla base
(Erzincan $\alpha = 1.0$)

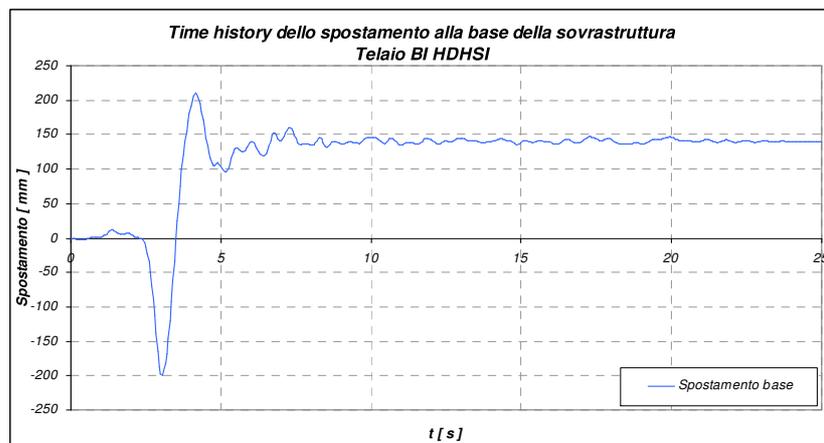


Fig. n.80 - Time history dello spostamento alla base
(Erzincan $\alpha = 1.0$)

Le time history del taglio alla base relative alla sovrastruttura, evidenziano in maniera chiara l'efficacia della tecnica di isolamento alla base tramite la strategia della limitazione della forza. Infatti, per tutti gli input sismici considerati nello studio, il massimo valore del taglio trasferito alla sovrastruttura, è pari a 555 kN ovvero il 10% del peso totale della sovrastruttura:

$$P_{tot} = M_{tot} \cdot g = 565.91 \text{ ton} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 5551 \text{ kN}$$

Quanto detto, si manifesta in maniera marcata per l'input sismico Erzincan, data la sua forma spettrale particolarmente anomala caratterizzata da elevate ordinate spettrali per alti periodi.

Infine, osservando le time history relative allo spostamento alla base della sovrastruttura, si nota che per i diversi input sismici considerati nello studio, gli spostamenti orizzontali massimi del dispositivo HDHSI sono largamente minori del valore massimo ammissibile di 300 mm, rendendo quindi soddisfatta la verifica a carico critico secondo quanto illustrato nel § 2.3.2. *Cap. II*.

Osservazione:

- Il sistema HDHSI, poiché utilizza isolatori a scorrimento ad alto coefficiente di attrito, rende necessario il dover soffermarsi sul problema delle reazioni orizzontali che nascono negli isolatori FS. Infatti, le reazioni orizzontali possono stravolgere il comportamento dinamico della struttura anche se questa, in fase progettuale, è stata regolarizzata con opportuna calibrazione delle rigidità degli isolatori elastomerici. Le reazioni orizzontali degli FS renderebbero problematica la regolarizzazione del comportamento dinamico, per quelle strutture irregolari in pianta, mentre nei casi di strutture simmetriche sia per la geometria che per i carichi gravitazionali, come la struttura oggetto di studio, la nascita di reazioni orizzontali da parte degli isolatori FS, non modifica la regolarità del comportamento dinamico.

4.7. Ottimizzazione del sistema HDHSI

Osservando la risposta sismica della struttura oggetto di studio, si osserva che la parte elastomerica dei dispositivi HDHSI esterni, non giunge in campo plastico. Ciò è stato spigato in precedenza, osservando che per tali dispositivi si ha un carico verticale, rappresentato dallo scarico al piede del pilastro, di 934 kN e poiché l'isolatore a scorrimento che fa parte di tale dispositivo, ha un coefficiente

d'attrito del 10%, la barriera di forza dettata dalla forza di primo distacco è di 93.4 kN. Tale forza risulta minore della forza di snervamento ($F_y = 172$ kN) relativa all'isolatore LRB, facente parte del dispositivo HDHSI, e quindi l'LRB in esame rimarrà in campo elastico.

Diverso comportamento è stato osservato per i dispositivi HDHSI interni, per i quali il carico verticale è di 1841 kN e poiché l'isolatore a scorrimento che fa parte di tale dispositivo, ha un coefficiente d'attrito del 10%, la barriera di forza dettata dalla forza di primo distacco è di 184.1 kN. Tale forza risulta maggiore della forza di snervamento ($F_y = 172$ kN) relativa all'isolatore LRB, facente parte del dispositivo HDHSI, e quindi l'LRB presenterà escursioni in campo plastico.

Volendo ottimizzare il comportamento del sistema di isolamento, in modo che anche gli LRB esterni possano manifestare escursioni in campo plastico, abbiamo due soluzioni: intervenire sulla *componente elastomerica* adottando un LRB con forza di snervamento minore di 93.4 kN (nel rispetto della compatibilità in termini di spostamento max e carico verticale max) oppure intervenire sulla *componente attritiva* adottando un coefficiente d'attrito superiore del 10% tale da incrementare la forza di primo distacco e quindi tale da poter imprimere maggiori deformazioni taglienti all'isolatore LRB, sempre nel rispetto della compatibilità in termini di spostamento max e carico verticale max.

La prima soluzione non è possibile prenderla in considerazione perché la minore forza di snervamento tra tutti i dispositivi LRB, che la "Fip Industriale" prevede da catalogo, è di 106 kN.

La seconda soluzione invece, è praticabile adottando per gli isolatori esterni un coefficiente d'attrito del 20%. Pertanto, gli isolatori esterni, pur presentando un carico verticale pari alla metà del carico presente sugli isolatori interni, possono assicurare la medesima forza di primo distacco, poiché il coefficiente d'attrito non è più del 10% bensì un valore doppio. In conclusione, anche per gli isolatori esterni, la forza di primo distacco sarà di 184.1 kN. Tale forza risulta maggiore della forza di snervamento ($F_y = 172$ kN) e quindi l'isolatore LRB, facente parte del dispositivo HDHSI, presenterà escursioni in campo plastico.

La soluzione proposta comporterà cicli isteretici identici per il dispositivo HDHSI interno ed esterno. Tale soluzione garantisce una maggiore dissipazione del sistema di isolamento, in seguito ad un più ampio ciclo isteretico degli isolatori esterni rispetto al caso in cui il coefficiente d'attrito era del 10%. Si registra anche un minore spostamento massimo alla base della sovrastruttura con un lieve incremento dei drift di piano per il maggior valore dello smorzamento. Si registra inoltre, un maggior valore del taglio massimo alla base della sovrastruttura, in seguito all'incremento della forza di primo distacco per gli isolatori esterni, passando da un $V_{\max} = 555$ kN ad un valore maggiore di circa 1/3 e in particolare pari a $V_{\max} = 742$ kN.

Vengono visualizzate le diverse fasi di funzionamento del sistema HDHSI considerandolo applicato alla struttura oggetto di studio, evidenziando le fasi principali caratterizzanti il comportamento sismico:

- **Fase 1:** assenza di azioni orizzontali (fase iniziale);
- **Fase 2:** attivazione dei soli isolatori elastomerici LRB;
- **Fase 3:** attivazione di tutti gli isolatori a scorrimento FS.

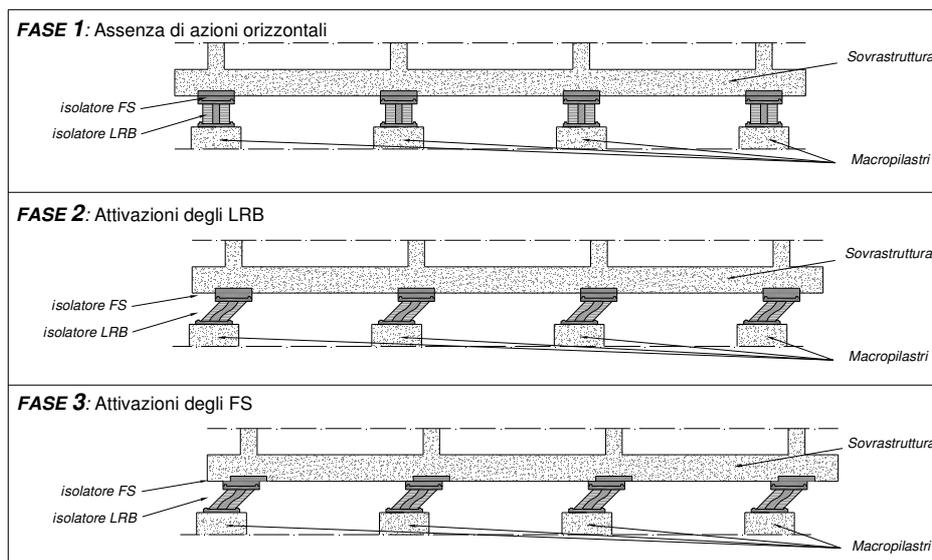


Fig. n.81 - Fasi di funzionamento del sistema d'isolamento HDHSI.

Si osserva l'assenza della fase intermedia, presente per il sistema privo di ottimizzazione (v. Fig. n.62), in cui vi era l'attivazione iniziale dei soli FS laterali e successivamente anche degli FS interni. In questo caso, gli isolatori a scorrimento presentano la medesima forza di primo distacco e quindi si attiveranno nel medesimo istante.

Si riportano successivamente i cicli isteretici dei dispositivi per le due registrazioni considerate evidenziando che non ci sono differenze tra dispositivi interni ed esterni.

Sistema di isolamento HDHSI con coefficiente d'attrito al 10% per i dispositivi interni ed al 20% per i dispositivi esterni

El Centro - California (componente N00W, 1940)

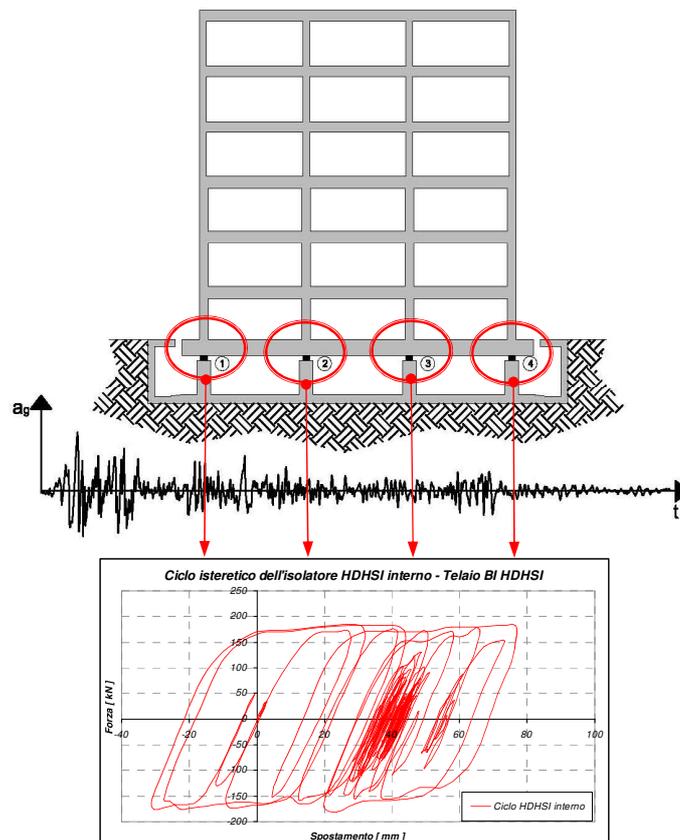


Fig. n.82 – Ciclo isteretico HDHSI.

Sistema di isolamento HDHSI con coefficiente d'attrito al 10% per i dispositivi interni ed al 20% per i dispositivi esterni

Erzincan - Turchia (componente N90W, 1992)

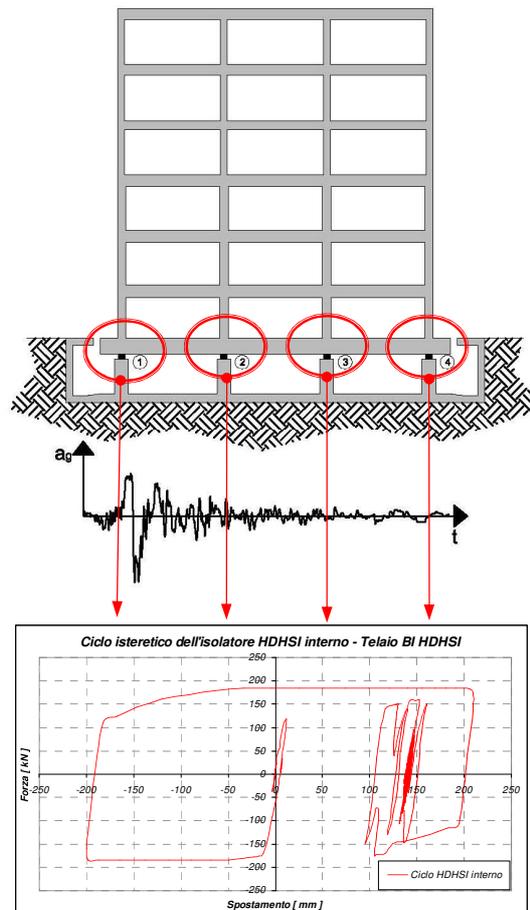


Fig. n.83 – Ciclo isteretico HDHSI.

Come già precisato, il “prezzo che bisogna pagare” adottando tale ottimizzazione, risiede nell’incremento del taglio alla base della sovrastruttura di circa 1/3 rispetto al dimensionamento precedente, oltre ad un incremento dei drift di piano per il maggiore valore dello smorzamento. Per questo motivo si è preferito, nel presequo del lavoro, di non considerare il sistema ottimizzato e

quindi condurre le analisi sismiche considerando il sistema di isolamento HDHSI con coefficiente d'attrito al 10% per tutti i dispositivi.

4.8. HDHSI vs. LRB

Valutata la risposta sismica del telaio isolato alla base mediante i dispositivi HDHSI (LRB+FS con coeff. d'attrito al 10%); considerati gli input sismici El Centro ($\alpha=1.0$), El Centro ($\alpha=1.5$), El Centro ($\alpha=2.0$) ed Erzincan ($\alpha=1.0$); si procede a confrontare tale risposta con quella relativa alla medesima struttura isolata alla base mediante un sistema di isolamento differente. Tale sistema prevede l'utilizzo dei medesimi LRB utilizzati per il sistema HDHSI. Trattasi pertanto di LRB 650/150-140 dalla FIP industriale, le cui caratteristiche meccanico-geometriche sono già state illustrate in Tab. n.5. Tale confronto vuole evidenziare l'importanza della strategia della limitazione della forza, assicurata dal meccanismo di scorrimento, rispetto al caso in cui il sistema d'isolamento presenta la sola componente elastomerica.

I periodi $T_{BI,HDHSI}$ e $T_{BI,LRB}$ sono praticamente coincidenti, tuttavia, essi presentano una piccola differenza legata al fatto che gli isolatori FS conferiscono, al telaio isolato con HDHSI, un ridottissimo incremento di rigidezza orizzontale per cui il periodo risulta leggermente minore.

Si riportano time history del taglio alla base nel caso di sistema HDHSI e nel caso di sistema con LRB, per le sole registrazioni El Centro ($\alpha=1.0$) ed Erzincan ($\alpha=1.0$), per ovvi motivi di sintesi. Successivamente, tramite grafici a colonna, si presenterà una sintesi completa dei risultati derivanti dalle analisi dinamiche non lineari eseguite per i 4 input sismici considerati.

- Time history del taglio alla base – input sismico **El Centro** ($\alpha = 1.0$)

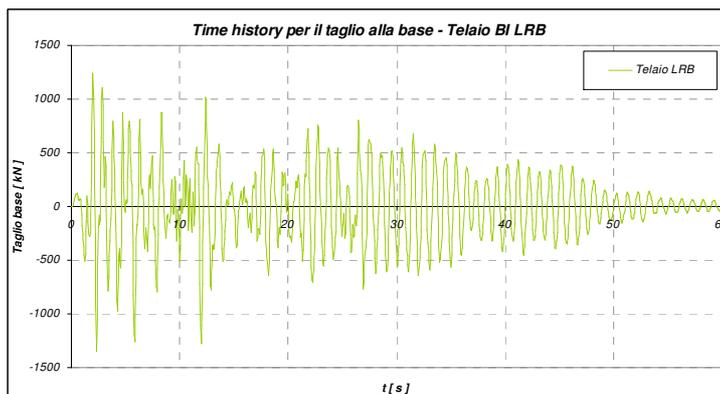


Fig. n.84 – Time history del taglio alla base, relativa al telaio isolato mediante LRB.

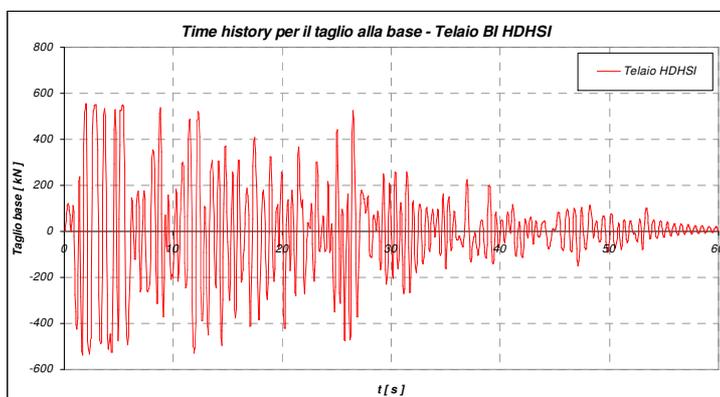


Fig. n.85 – Time history del taglio alla base, relativa al telaio isolato mediante HDHSI.

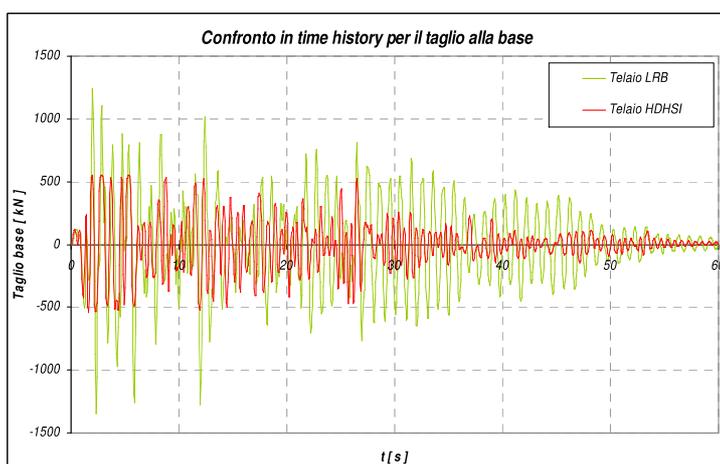


Fig. n.86 Confronto delle time history del taglio alla base, relative al telaio isolato mediante LRB e del medesimo telaio isolato con HDHSI.

- Time history del taglio alla base – input sismico **Erzincan** ($\alpha = 1.0$)

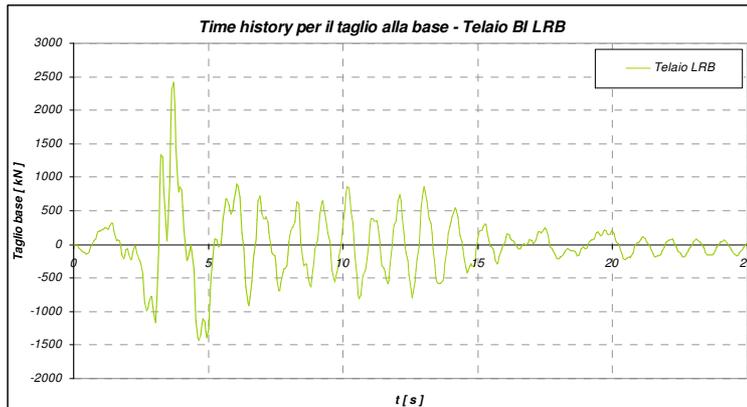


Fig. n.87 – Time history del taglio alla base, relativa al telaio isolato mediante LRB.

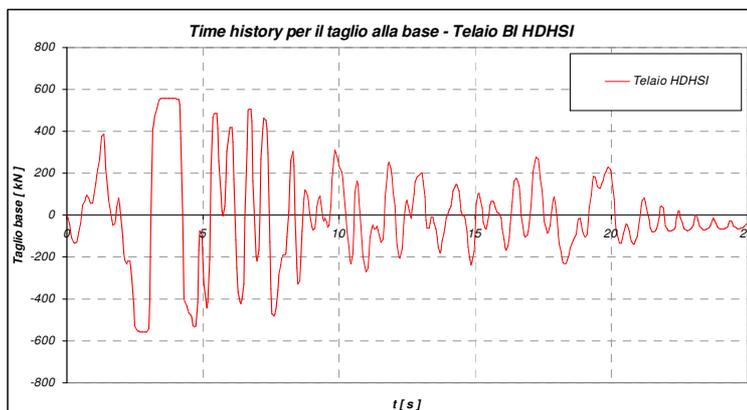


Fig. n.88 – Time history del taglio alla base, relativa al telaio isolato mediante HDHSI.

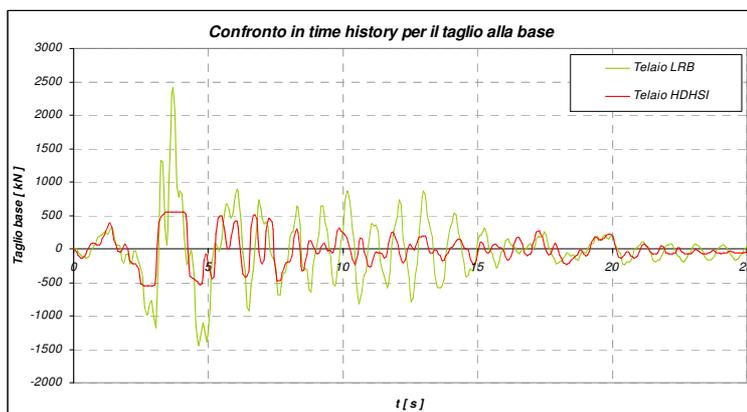


Fig. n.89 Confronto delle time history del taglio alla base, relative al telaio isolato mediante LRB e del medesimo telaio isolato con HDHSI.

Come accennato, si sintetizzano i risultati ottenuti, tramite grafici a colonna, in cui si confrontano i massimi valori di taglio alla base, i massimi valori di spostamento alla base e i valori di spostamento residuo per le due tipologie di sistema di isolamento studiate e per i quattro input sismici considerati.

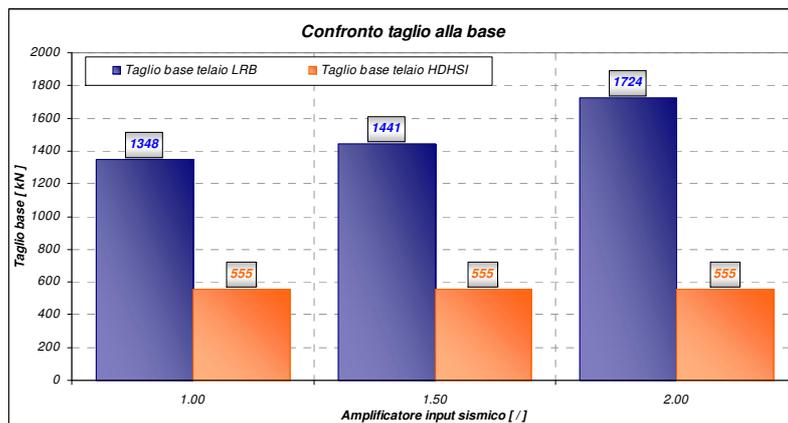


Fig. n.90 - Confronto del taglio massimo alla base della sovrastruttura (HDHSI vs. LRB) - Input sismico El Centro

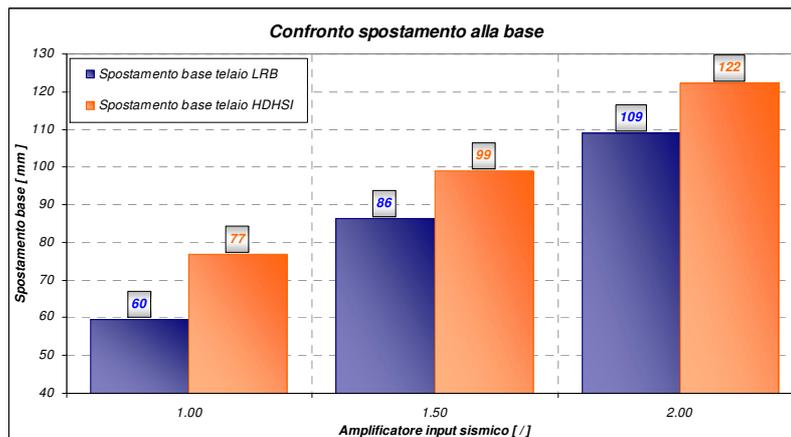


Fig. n.91 - Confronto dello spostamento massimo alla base della sovrastruttura (HDHSI vs. LRB) - Input sismico El Centro

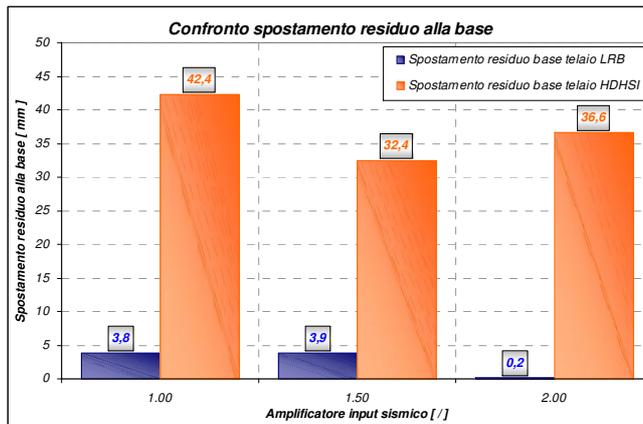


Fig. n.92 - Confronto dello spostamento residuo alla base della sovrastruttura (HDHSI vs. LRB)
Input sismico El Centro

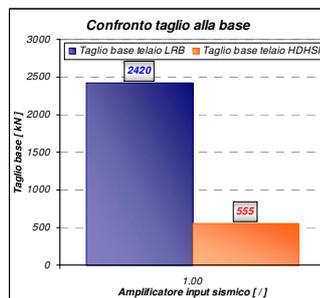


Fig. n.93 - Confronto del taglio massimo alla base della sovrastruttura (HDHSI vs. LRB)
Input sismico Erzincan

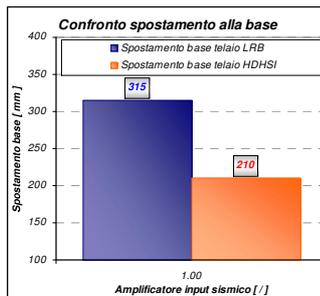


Fig. n.94 - Confronto spostamento massimo alla base della sovrastruttura (HDHSI vs LRB)
Input sismico Erzincan

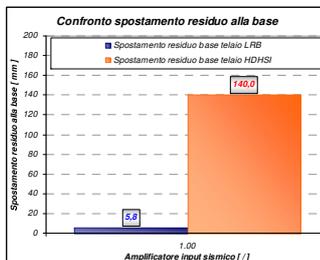


Fig. n.95 - Confronto dello spostamento residuo alla base della sovrastruttura (HDHSI vs. LRB)
Input sismico Erzincan

I diagrammi relativi al massimo taglio alla base della sovrastruttura evidenziano quanto di seguito riportato: la struttura isolata con HDHSI, fornisce

un valore massimo sempre più ridotto rispetto alla soluzione con soli isolatori LRB. Inoltre, tale valore è indipendente dall'azione sismica considerata e può essere assunto come valore di progetto per dimensionare il sistema di isolamento.

La differenza tra i valori del taglio alla base, diviene molto marcata laddove si considerano eventi sismici anomali per intensità e/o contenuto in frequenza. Infatti, per l'input di El Centro ($\alpha=2.0$) il massimo taglio alla base, relativo al sistema di isolamento HDHSI, è circa $\frac{1}{2}$ rispetto al sistema con isolatori LRB; mentre, per l'input sismico di Erzincan ($\alpha=1.0$) il massimo taglio alla base, relativo al sistema HDHSI, diviene circa $\frac{1}{4}$ rispetto al sistema con isolatori LRB.

Per quel che concerne gli spostamenti massimi alla base, si osserva che per gli input sismici di El Centro ($\alpha=1.0$); El Centro ($\alpha=1.5$) ed El Centro ($\alpha=2.0$), i due sistemi di isolamento non presentano notevoli differenze anche se la soluzione con isolatori HDHSI fornisce valori leggermente maggiori. Al contrario, se si considera l'evento sismico di Erzincan ($\alpha=1.0$), il sistema di isolamento con isolatori HDHSI presenta spostamenti alla base minori rispetto alla soluzione con soli LRB. Tuttavia, l'aspetto più interessante ed utile da evidenziare è il seguente: in presenza dell'evento sismico di Erzincan, il sistema con isolatori LRB giunge al collasso dato che si registra una domanda di spostamento ($\delta_{DOMANDA} = 315$ mm) maggiore della capacità ($\delta_{CAPACITA'} = 300$ mm) mentre il sistema con dispositivi HDHSI presenta un'ampia riserva di spostamento nel pieno rispetto della verifica a carico critico secondo quanto illustrato nel § 2.3.2. *Cap. II.*

Relativamente agli spostamenti residui alla base della sovrastruttura, risulta che il sistema di isolamento HDHSI presenta dei valori non trascurabili in seguito all'attivazione degli isolatori FS. Infatti, gli isolatori a scorrimento non hanno alcuna capacità ricentrante, differentemente dagli isolatori LRB e quindi, per effetto di azioni sismiche anomale, si registrano significativi spostamenti residui. Come già esposto nel § 2.1. *Cap. I*, la mancanza di capacità ricentrante per un sistema di isolamento, è ormai accettata da diverse normative a condizione di far riferimento, nelle verifiche di compatibilità (per i giunti degli impianti, per i giunti strutturali), a valori di spostamenti orizzontali del sistema di isolamento, ben

maggiori di quelli di progetto. Inoltre, sarà necessario prevedere una adeguata struttura di contrasto che con opportuni *martinetti idraulici*, renda possibile il riposizionamento della struttura nella sua configurazione pre-sisma.

Al fine di rendere più completo ed esaustivo il confronto tra i due sistemi di isolamento studiati, si introduce un indice prestazionale in termini di taglio alla base.

Tale indice prestazionale, chiamato **Base Shear Index (BSI)**, è il rapporto percentuale tra il massimo taglio alla base per il telaio isolato ed il massimo taglio alla base valutato sulla struttura a base fissa; per cui si ha:

$$BSI = \frac{V_{LRB}}{V_{BF}}$$

[rapporto % tra il massimo taglio alla base per il telaio isolato con LRB ed il massimo taglio alla base valutato sulla struttura a base fissa]

$$BSI = \frac{V_{HDHSI}}{V_{BF}}$$

[rapporto % tra il massimo taglio alla base per il telaio isolato con HDHSI ed il massimo taglio alla base valutato sulla struttura a base fissa]

[/]	BSI	
	LRB	HDHSI
α		
1.00	42,7	17,6
1.50	30,4	11,7
2.00	27,3	8,8

Tab. n.7 –Indici prestazionale (HDHSI vs. LRB)
Input sismico El Centro

[/]	BSI	
	LRB	HDHSI
α		
1.00	61,6	14,1

Tab. n.8 –Indici prestazionale (HDHSI vs LRB)
Input sismico Erzincan

Per una lettura più immediata dei risultati, il confronto viene riportato tramite grafici a colonne:

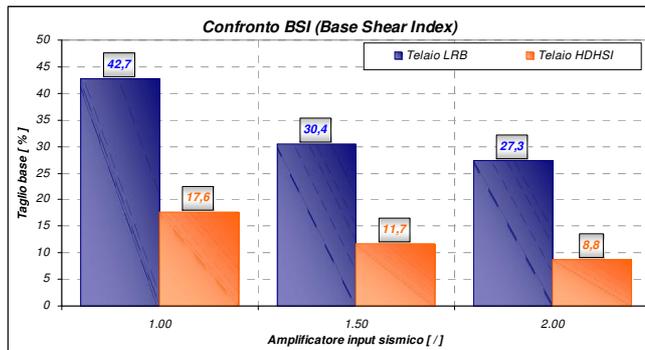


Fig. n.96
Indice prestazionale BSI (HDHSI vs. LRB)
Input sismico El Centro

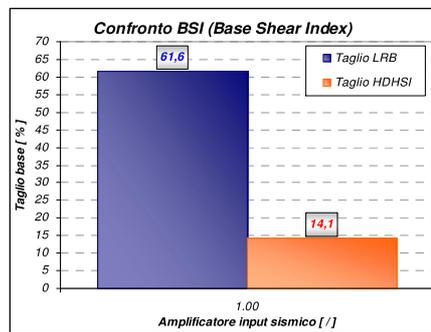


Fig. n.97
Indice prestazionale BSI (HDHSI vs. LRB)
Input sismico Erzincan

Dai grafici relativi al taglio alla base, emerge che entrambe le soluzioni di isolamento, determinano una drastica riduzione del massimo taglio trasmesso alla sovrastruttura, rispetto al caso in cui il telaio è a base fissa. Tuttavia, il sistema di isolamento con HDHSI comporta una riduzione molto più marcata, con valori di taglio massimo alla base della sovrastruttura, tra l'8.8% ed il 17.6% rispetto al taglio massimo per il telaio a base fissa.

Ulteriore aspetto riguarda la dissipazione che nel caso di sistema LRB, è interamente affidata agli isolatori elastomerici, mentre nel caso di sistema HDHSI, è affidata in parte agli isolatori LRB ed in parte agli isolatori attritivi FS.

Nel primo caso, gli isolatori LRB presentano una maggiore domanda di spostamento rispetto al secondo caso in cui la barriera di forza, esercitata dagli FS, impedisce la deformazione a taglio degli LRB oltre una certa soglia.

4.9. Fail-safe system orizzontale e verticale

Alla luce delle analisi eseguite, si intuisce che il sistema HDHSI proposto, si pone in linea con il nuovo approccio progettuale denominato “*safety by design*” che consiste nell’affrontare la progettazione di una struttura nell’ottica di eliminare il verificarsi di eventi accidentali invece di tener conto, nella progettazione, dei loro effetti. Oppure, come nel caso di un evento sismico, improntare una progettazione in modo tale da ridurre gli effetti connessi all’evento nonché la probabilità di verificarsi dell’evento stesso.

Oltre a quanto già esposto finora, un ulteriore livello di sicurezza occorre assicurarlo anche nel caso in cui lo spostamento orizzontale alla base della sovrastruttura, raggiunga lo spostamento massimo consentito dagli isolatori HDHSI. Si prevede pertanto, un *fail-safe system orizzontale*, costituito da respingenti di adeguata rigidezza e dissipazione, che entrano in contatto con ritegni fissi in calcestruzzo quando risulta essere esaurito lo spostamento massimo consentito agli isolatori. Tali ritegni fissi sono rappresentati dalla struttura di contrasto (perimetralmente alla base della sovrastruttura) che sappiamo doverla comunque prevedere in fase progettuale, per il ricentraggio nel caso di attivazione della componente a scorrimento degli HDHSI. I respingenti possono essere del tipo cilindro-pistone, come i dispositivi siliconici fluido-viscosi, intrinsecamente dotati di capacità ricentranti oppure respingenti emisferici in gomma ed acciaio.



Fig. n.98 - Respingenti del tipo cilindro-pistone della Caribul®



Fig. n.99 - Respingenti del tipo cilindro-pistone della Jarret®



Fig. n.100 - Respingenti emisferici della Caribul®

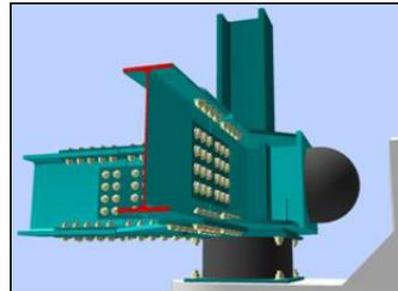


Fig. n.101 - Respingenti emisferici previsti per il sistema di isolamento del centro commerciale in Nicosia - Cipro [28]

La risposta della struttura isolata durante l’impatto con la struttura di contrasto, mediante idonei respingenti, è un argomento che rientra tra gli approfondimenti futuri, previsti in una fase successiva. In letteratura sono comunque presenti, pochi ma significativi studi sulla risposta sismica di strutture a base isolata durante l’impatto con strutture adiacenti, come in [27] in cui si evidenzia che il sistema EDF (quindi anche il sistema HDHSI) qualora sia correttamente progettato, presenta una risposta poco sensibile al fenomeno dell’impatto se confrontata con i sistemi tradizionali HDRB, LRB, FPS.

Oltre al *fale-safe system* orizzontale, si ritiene utile prevedere anche un *fale-safe system verticale*, costituito da appoggi adiacenti agli isolatori, in grado di fronteggiare i carichi verticali della sovrastruttura nel caso in cui venissero danneggiati gli isolatori stessi. Infatti, nel caso di incendio, la componente elastomerica dell’isolatore HDHSI, qualora non fosse sufficientemente protetta, si surriscalderebbe, facendo ridurre rapidamente e drasticamente la capacità portante dell’isolatore. In tal caso, il *fale-safe system* intervine grazie agli appoggi addizionali che in caso di completa o parziale distruzione degli isolatori, consentono di trasferire il carico verticale alla sottostruttura.



Fig. n.102 - *Fale-safe system verticale previsto per il San Francisco Emergency Management Center.*

Capitolo IV

Sistemi d'isolamento alla base a confronto

1. Introduzione

Analizzato il comportamento del sistema HDHSI; valutata la risposta di una struttura intelaiata in c.a. isolata alla base mediante il medesimo sistema; evidenziati i suoi vantaggi nel conferire robustezza alla struttura in presenza di eventi sismici estremi; si procede al confronto del sistema HDHSI con altri sistemi d'isolamento al fine di apprezzare analogie e differenze, in presenza di azioni sismiche di progetto, quali quelle previste dalla normativa (NTC 2008) per i differenti Stati Limite.

Il confronto serve ad evidenziare che il sistema proposto, oltre a proteggere la struttura nei riguardi di eventi sismici anomali, non previsti in fase progettuale, garantisce nei riguardi delle azioni sismiche di progetto, un livello prestazionale paragonabile a quello dei più diffusi sistemi d'isolamento alla base.

I sistemi d'isolamento alla base considerati sono quelli basati su isolatori elastomerici nonché quelli basati su isolatori attritivi con capacità ricentranti.

2. Analisi comparativa di differenti sistemi di isolamento: HDRB, LRB, FPS, DCFP, HDHSI

Confrontato il comportamento del sistema HDHSI con il sistema LRB, nei riguardi di eventi sismici anomali ed evidenziati i vantaggi del sistema proposto sia nei riguardi del taglio massimo trasmesso alla sovrastruttura che nei riguardi della verifica del dispositivo per eventi eccezionali, si procede ad analizzare le prestazioni del medesimo sistema HDHSI nei riguardi di eventi sismici di progetto, confrontando le prestazioni con 4 differenti sistemi costituiti rispettivamente da isolatori HDRB (High Damping Rubber Bearing), da isolatori LRB (Lead Rubber Bearing), da isolatori FPS (Friction Pendulum System) e da isolatori DCFP (Double Concave Friction Pendulum). Giova ribadire che l'obiettivo del confronto consiste nell'evidenziare che per le usuali azioni sismiche di progetto, il sistema proposto presenta livelli prestazionali analoghi a quelli raggiungibili con gli ormai consolidati sistemi di isolamento precedentemente menzionati.

La struttura analizzata è la stessa descritta nel *Cap. III*. Tale struttura è stata progettata e verificata prevedendo i sistemi di isolamento citati e fissando per ciascuno di essi il medesimo Target Period di circa 2.00 sec, al fine di renderne più realistico il confronto per il quale sono state considerate azioni sismiche di progetto, quali le registrazioni sismiche compatibili con lo spettro di risposta elastico allo SLV e allo SLC. In particolare, è stata considerata la registrazione di El Centro non scalata quale registrazione compatibile con lo spettro elastico allo SLV e la registrazione di El Centro amplificata di 1.25 quale registrazione compatibile con lo spettro elastico allo SLC.

Il confronto ha interessato anche la medesima struttura considerata a base fissa di cui è stato illustrato il comportamento dinamico nel *Cap. III*.

Vengono riportate le time history in termini di taglio alla base della sovrastruttura per i differenti sistemi di isolamento e le stesse vengono confrontate con l'analoga time history della struttura a base fissa. Successivamente, si riporta una sovrapposizione delle diverse time history del taglio alla base, dello

spostamento alla base e dei drift di piano, per i diversi sistemi di isolamento, al fine di rendere più immediato il confronto.

2.1. Sistemi di isolamento elastomerici (sistema HDRB e sistema LRB): progettazione e modellazione non lineare

La strategia adottata per la progettazione del sistema di isolamento è quella dell'elongazione del periodo. È stato fissato un periodo di riferimento (Target Period) della struttura a base isolata T_{BI} ed uno smorzamento viscoso equivalente per il sistema di isolamento, cercando di raggiungere un giusto compromesso tra il voler ridurre in maniera significativa l'accelerazione spettrale sulla struttura e il voler contenere gli spostamenti alla base della sovrastruttura entro limiti accettabili (25-30 cm).

L'esperienza suggerisce di adottare, al fine di avere benefici consistenti in termini di disaccoppiamento tra il moto del terreno e quello della struttura, un valore del periodo fondamentale della struttura a base isolata T_{BI} variabile tra 3 e 5 volte quello della struttura a base fissa T_{BF} . Successivamente, in funzione del periodo T_{BI} si ricavano le caratteristiche di rigidità del sistema di isolamento nel suo insieme e quelle del singolo dispositivo. Infatti, dopo aver assimilato la struttura ad un oscillatore semplice, semplificazione che è possibile se il periodo della struttura isolata T_{BI} è maggiore di almeno 3 volte il periodo della struttura a base fissa T_{BF} , si procede a valutare la rigidità complessiva del sistema di isolamento K_s con la seguente relazione:

$$K_s = \left(\frac{2\pi}{T_{BI}} \right)^2 \cdot M$$

dove:

T_{BI} è il periodo della struttura isolata;

M è la massa complessiva al di sopra del piano di isolamento.

Dopo aver determinato la rigidezza complessiva (K_s) è possibile valutare la rigidezza del singolo isolatore che compone il sistema, tramite due metodi:

- *procedura rigorosa*
- *procedura semplificata*

La *procedura rigorosa* nasce dall'esigenza di minimizzare, al limite annullare, l'eccentricità tra la proiezione del centro di massa della sovrastruttura sul piano d'isolamento ed il centro di rigidezza del sistema di isolamento. Secondo tale approccio si attribuisce a ciascun isolatore una rigidezza equivalente (rigidezza secante) proporzionale al peso (massa) direttamente gravante su di esso:

$$k_{s,i} = \frac{m_i}{M} \cdot K_s$$

dove:

- $k_{s,i}$ è la rigidezza dell'i-esimo isolatore;
- m_i è la massa gravante sull'i-esimo isolatore, ottenuta come sforzo normale nel pilastro (per carichi verticali in condizioni sismiche) diviso per l'accelerazione di gravità g ;
- $M = \sum m_i$ è la massa totale dell'edificio;
- $K_s = \sum k_{s,i}$ è la rigidezza totale del sistema di isolamento.

Tale procedura presenta due inconvenienti:

- salvo casi di simmetria, si avrebbe un numero di tipologie di dispositivi pari al numero dei pilastri. In realtà, questo limite potrebbe essere superato uniformando le rigidezze al fine di utilizzare al più 2-3 differenti tipologie di isolatori a patto di avere, al termine di questa procedura, dei modi di vibrazione della struttura isolata il più possibile disaccoppiabili cioè tali che si possa parlare di modi di vibrazione puri;
- in genere i pilastri centrali sono quelli maggiormente caricati, mentre i perimetrali sono i meno caricati, questo fa sì che gli isolatori interni sono

più rigidi, mentre quelli perimetrali sono meno rigidi, ottenendo quindi una ridotta rigidezza torsionale del sistema di isolamento non sempre accettabile e da valutare caso per caso.

La *procedura semplificata*, adottata nel caso oggetto di studio, prevede due possibili applicazioni tra loro del tutto equivalenti. La prima consente di determinare il numero di isolatori, una volta nota la rigidezza dell'isolatore che si vuole utilizzare, tramite la relazione:

$$n_{isolatori} = \frac{K_s}{k_{s,i}}$$

dove:

- $n_{isolatori}$ è il numero di isolatori da disporre nel sistema di isolamento;
- K_s è la rigidezza complessiva del sistema di isolamento;
- $k_{s,i}$ è la rigidezza dell'i-esimo isolatore.

La seconda strategia invece, consente di determinare la rigidezza dell'isolatore, una volta noto il numero di dispositivi da adottare, tramite la relazione:

$$k_{s,i} = \frac{K_s}{n_{isolatori}}$$

dove:

- $k_{s,i}$ è la rigidezza dell'i-esimo isolatore;
- K_s è la rigidezza complessiva del sistema di isolamento;
- $n_{isolatori}$ è il numero di isolatori da disporre nel sistema di isolamento.

Nel caso oggetto di studio, per ciascun sistema di isolamento analizzato, è stato fissato un periodo target T_{BI} pari a 2.0 sec, ovvero identico a quello della struttura isolata tramite il sistema di isolamento HDHSI. Si è operato in tal modo, al fine di rendere significativo il confronto tra le risposte sismiche per i diversi sistemi di isolamento analizzati.

Fissato il periodo della struttura a base isolata T_{BI} e il valore del suo coefficiente di smorzamento, il dimensionamento del sistema HDRB (o LRB) viene condotto assimilando il comportamento della struttura a quello di un oscillatore elementare, calcolando così i valori approssimativi dei parametri fondamentali di progetto: lo spostamento del sistema d'isolamento, lo spostamento di progetto dei singoli isolatori, l'accelerazione agente alla base della sovrastruttura.

Si precisa che lo spostamento di progetto viene valutato sulla base dello spettro elastico di progetto allo SLC, adottando lo smorzamento del sistema di isolamento (10% nel caso di sistema HDRB e 26% nel caso di sistema LRB) ed amplificandolo cautelativamente del 25%. Tale amplificazione è necessaria, per tener conto che gli spostamenti degli isolatori periferici risentono degli effetti torsionali legati all'eccentricità accidentale e della contemporaneità delle due componenti orizzontali del sisma.

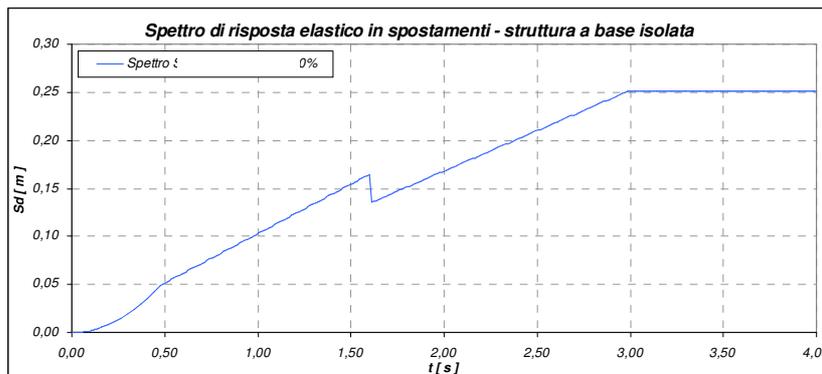


Fig. n.102 - Spettro di risposta in termini di spostamento allo SLC per uno valore di smorzamento pari al 10% Fig.

Lo spostamento per $T=2\text{sec}$ è pari a 168mm che moltiplicato per 1.25 fornisce uno spostamento di progetto pari a 210mm.

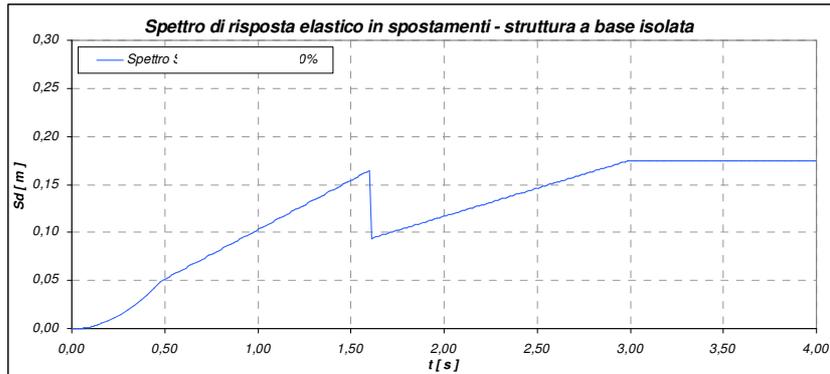


Fig. n.103 - Spettro di risposta in termini di spostamento allo SLC per un valore di smorzamento pari al 26%

Lo spostamento per $T=2\text{sec}$ è pari a 117mm che moltiplicato per 1.25 fornisce uno spostamento di progetto pari a 146mm.

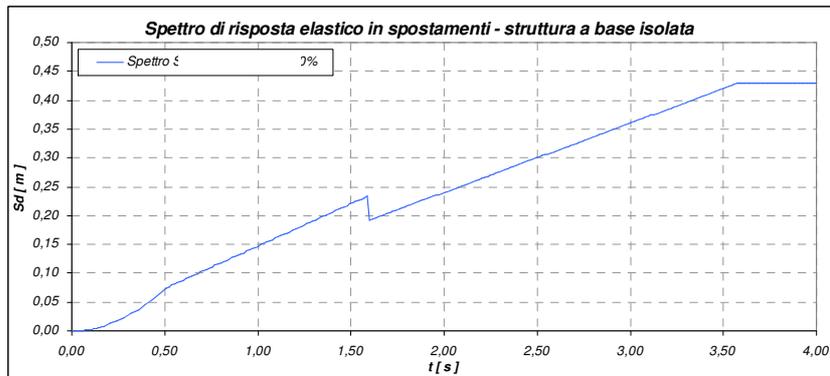


Fig. n.104 - Spettro di risposta in termini di spostamento allo SLC 2475 per un valore di smorzamento pari al 10%

Lo spostamento per $T=2\text{sec}$ è pari a 240mm che moltiplicato per 1.25 fornisce uno spostamento di progetto pari a 300mm.

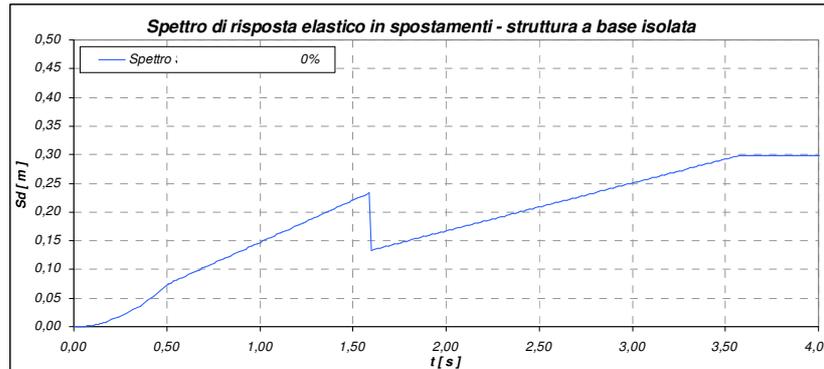


Fig. n.105 - Spettro di risposta in termini di spostamento allo SLC 2475 per un valore di smorzamento pari al 26%

Lo spostamento per $T=2\text{sec}$ è pari a 167mm che moltiplicato per 1.25 fornisce uno spostamento di progetto pari a 209mm.

La scelta dell'isolatore avviene considerando le sue caratteristiche in termini di rigidità laterale, il suo smorzamento viscoso equivalente, la sua capacità di spostamento e la sua capacità portante verticale.

Nel caso oggetto di studio si ha:

$$K_s = \left(\frac{2\pi}{T_{BI}} \right)^2 \cdot M = \left(\frac{2\pi}{2,0} \right)^2 \cdot 564,53 = 5571,71 \text{ kN/m}$$

$$k_{s,i} = \frac{K_s}{n_{isolatori}} = \frac{5571,71}{4} = 1392,93 \text{ kN/m} \approx 1,39 \text{ N/mm}$$

Valutata la rigidità orizzontale che deve essere assicurata dal singolo isolatore e determinata la domanda di spostamento, si perviene alla scelta dell'isolatore compatibile con quanto precedentemente illustrato. Per il sistema HDRB è stato scelto l'isolatore HDN-D600 B650 Z480 dell'AlgaSism, mentre per il sistema LRB è stato scelto l'isolatore LRB-S 650/150-140 della FIP Industriale.

Adottando tali isolatori, si perviene per il sistema HDRB ad un periodo $T_{BI}=2.08 \text{ sec}$, mentre per il sistema LRB ad un periodo $T_{BI}=2.05 \text{ sec}$.

Si riporta, per completezza, la lettura degli spostamenti nel piano ADRS. Data la sostanziale coincidenza tra i due periodi $T=2.05\text{sec}$ e $T=2.08\text{sec}$, i valori di spostamento sono praticamente identici in ciascuno dei due casi e quindi si riporta solamente il caso in cui $T=2.05\text{sec}$.

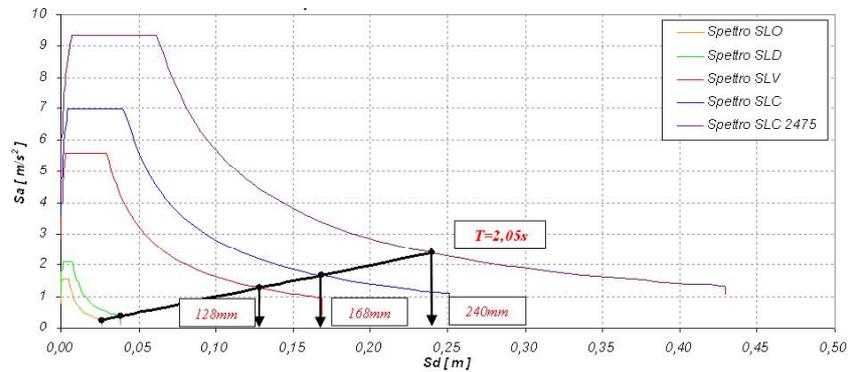


Fig. n.106 - Spettri di risposta nel piano ADRS per uno valore di smorzamento pari al 10% - $T=2.05\text{ sec}$

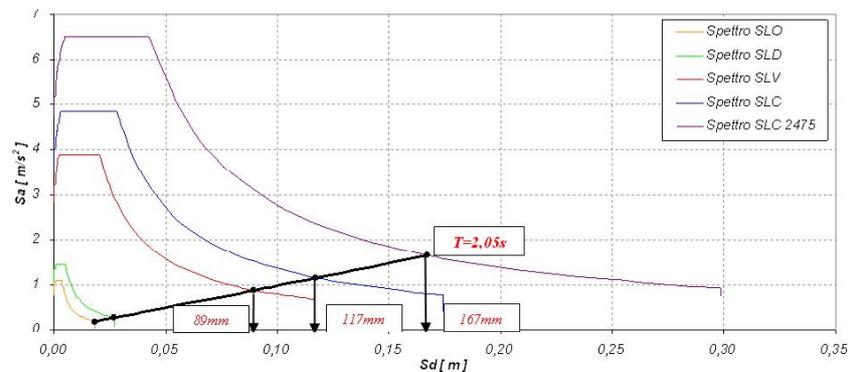


Fig. n.107 - Spettri di risposta nel piano ADRS per uno valore di smorzamento pari al 26% - $T=2.05\text{ sec}$

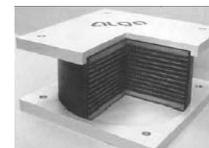
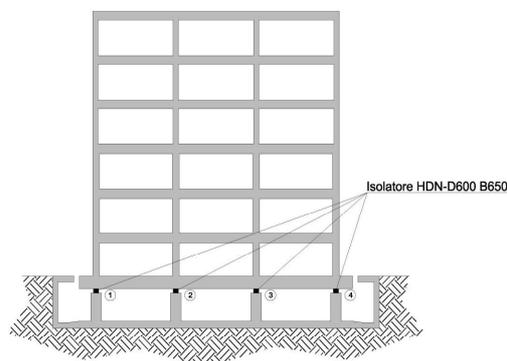
Si procede ad illustrare il sistema HDRB ed il sistema LRB, con le relative modellazioni non lineari adottate per gli isolatori elastomerici.

Analogamente si illustreranno, nei paragrafi successivi, i sistemi attritivi FPS e DCFP.

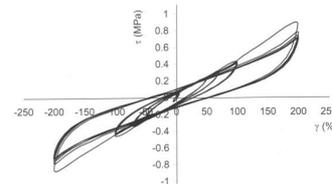
Descritte le modellazioni in regime non lineare, si procederà ad illustrare la risposta sismica per ciascun sistema, in termini di time history del taglio alla base, dello spostamento alla base e dei drift di piano.

Sistema HDRB ($T_{BI} = 2.08$ sec)

- Descrizione del sistema d'isolamento



Isolatore HDRB



Ciclo isteretico di un generico HDRB

D 600 B 650 Z 480

Geometrical DATA		HDN $\xi = 10\%$ - $G = 0,8$ MPa				
t_e	H	S_{max}	V_{max}	V_{sism}	K_r	K_v
156	306	320	5600	2850	1,45	1627

t_e	Spessore elastomero
H	Altezza totale isolatore
D	Diametro elastomero
B	Dimensione d'ingombro dell'isolatore (nelle due direzioni)
Z	Interasse degli ancoraggi (nelle due direzioni)
S_{max}	Spostamento di progetto
V_{max}	Carico verticale massimo allo SLU cor spostamento nullo
V_{sism}	Carico verticale in condizione sismica
K_r	Rigidezza orizzontale
K_v	Rigidezza verticale dinamica
ξ	Smorzamento viscoso della gomma

- Descrizione della modellazione non lineare dell'isolatore

Come è ben noto, le mescole elastomeriche ad alto smorzamento sono caratterizzate da una sensibile variazione del modulo elastico G al variare della deformazione di taglio, in particolare per bassi livelli di deformazioni ($\gamma < 10\%$) il

modulo di taglio risulta piuttosto elevato, anche 5-10 volte maggiore di quello relativo a livelli di deformazione nelle condizioni sismiche di progetto ($\gamma=100\div 150\%$). Ciò consente di ottenere un elevato valore di rigidezza orizzontale degli isolatori e di evitare quindi spostamenti eccessivi, in presenza di eccitazioni dinamiche di bassa intensità come il vento. All'aumentare della deformazione, quando γ assume valori che vanno oltre il $100\div 150\%$, il modulo di taglio riprende a crescere, determinando un significativo incrudimento nel ciclo carico-deformazione dell'isolatore.

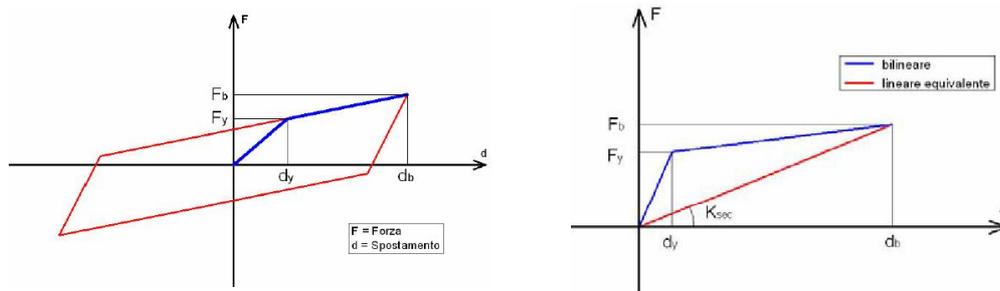
Le prove cicliche a spostamento imposto crescente sui dispositivi in elastomero armato, consentono di descrivere il caratteristico comportamento ciclico isteretico.

Si può osservare che il legame costitutivo è fortemente non lineare e la rigidezza laterale (pendenza del singolo ciclo) diminuisce al crescere dello scorrimento.

Le NTC 2008 offrono la possibilità di modellare il sistema di isolamento, in relazione alle sue caratteristiche meccaniche, con un modello visco-elastico lineare oppure con un legame costitutivo non lineare.

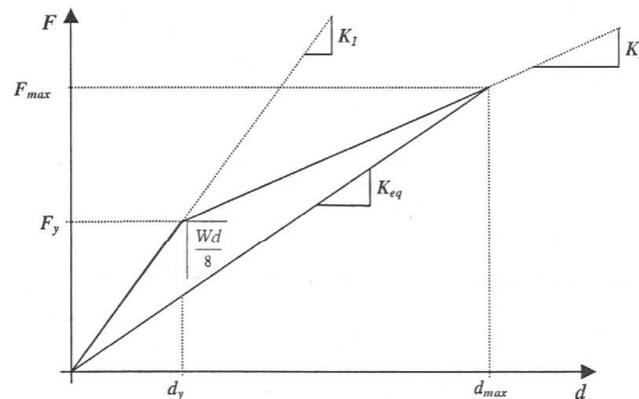
Nel caso in cui non si può o non si vuole semplificare il comportamento del sistema di isolamento con un modello elastico-lineare equivalente, occorre che il legame costitutivo dei singoli dispositivi debba riprodurne adeguatamente il loro comportamento nel campo di deformazioni (γ) e nel campo delle velocità che si verificano durante l'azione sismica, anche in relazione alla corretta rappresentazione dell'energia dissipata nei cicli di isteresi (W_d). In tal caso, occorre adottare una modellazione non lineare del sistema di isolamento che dovrebbe avere il vantaggio di rispecchiare in modo coerente il comportamento degli isolatori.

Il comportamento non lineare dell'isolatore elastomerico, può essere riprodotto numericamente, adottando un semplice modello bi-lineare.



Tale curva è perfettamente nota se si conosce il carico di snervamento F_y ed il corrispondente spostamento d_y , nonché i valori limite F_b e d_b .

Analizzato qualitativamente il diagramma bi-lineare, si procede ad un'analisi più dettagliata dei parametri che ne caratterizzano il comportamento.



$$K_1 = \frac{F_1}{d_1} = \frac{F_y}{d_y} : \text{rigidezza elastica del primo ramo};$$

$$K_2 = \frac{F_2}{d_2} = \frac{F_{\max}}{d_{\max}} : \text{rigidezza post-elastica del secondo ramo};$$

$W_d = A$: energia dissipata da un dispositivo di isolamento in un ciclo completo di carico;

$d_y = d_1$: spostamento corrispondente al limite elastico;

$F_y = F_1$: forza corrispondente al limite elastico;

K_e : rigidezza equivalente detta anche rigidezza secante (K_{sec}).

Si ricorda l'espressione dello smorzamento viscoso equivalente $\xi_e = W_d / (4\pi \cdot E)$, dove E (energia elastica) è pari a:

$$E = \frac{1}{2} \cdot F_{\max} \cdot d_{\max} = \frac{1}{2} \cdot K_e \cdot d_{\max}^2$$

quindi:

$$\xi_e = \frac{W_d}{4\pi \cdot E} = \frac{W_d}{2\pi \cdot F_{\max} \cdot d_{\max}} = \frac{W_d}{2\pi \cdot K_e \cdot d_{\max}^2}$$

Ponendo la rigidezza $K_1 = 2 \cdot K_{eq}$, sulla base di osservazioni sperimentali, si determinano K_2 e d_y dalle seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \xi_e = \frac{W_d}{2\pi \cdot K_e \cdot d_{\max}^2} = \frac{W_d}{\pi \cdot K_1 \cdot d_{\max}^2} \\ F_{\max} = K_1 \cdot d_y + K_2 \cdot (d_{\max} - d_y) \end{cases}$$

essendo:

$$W_d = 8 \cdot \left[\frac{1}{2} K_1 \cdot d_y^2 + K_1 \cdot d_y \cdot (d_{\max} - d_y) + \frac{1}{2} K_2 (d_{\max} - d_y)^2 - \frac{1}{2} K_{eq} \cdot d_{\max}^2 \right]$$

e ricavando K_2 dalla seconda equazione del sistema e sostituendola nella prima equazione, si ottiene:

$$\begin{cases} d_y = \frac{\xi \cdot \pi \cdot K_1 \cdot d_{\max}^2 - 4 \cdot F_{\max} \cdot d_{\max} + 2 \cdot K_1 \cdot d_{\max}^2}{4 \cdot (K_1 \cdot d_{\max} - F_{\max})} \\ K_2 = \frac{F_{\max} - K_1 \cdot d_y}{(d_{\max} - d_y)} \end{cases}$$

dove: $F_{\max} = k_{eq} \cdot d_{\max}$

Noti i valori di d_{\max} , k_{eq} dal catalogo della casa produttrice dell'isolatore; calcolati i valori di F_{\max} , d_y e K_2 ; è possibile costruire il ciclo bi-lineare rappresentativo del comportamento meccanico dell'isolatore.

Partendo dalla modellazione bi-lineare, è possibile migliorarla, garantendo una più accurata riproducibilità del comportamento ciclico isteretico dell'isolatore, tramite il modello isteretico proposto da Wen [1]. Come già illustrato nel *Cap. II*, tale modello considera la forza reagente F pari alla somma di due aliquote, una lineare elastica ed una isteretica:

$$F = \alpha \frac{F_y}{\gamma_y} \gamma + (1 - \alpha) F_y Z$$

γ : deformazione a taglio;

$\alpha = \frac{k_2}{k}$: rapporto tra la rigidità post-snervamento e la rigidità elastica;

F_y : valore di snervamento della forza agente;

γ_y : deformazione in corrispondenza di F_y ;

Z : parametro isteretico adimensionale tale che

$$\frac{dZ}{d\gamma} \gamma_y = \left\{ A - |Z|^\eta \left[\beta + \text{sign} \left(Z \frac{d\gamma}{dt} \right) \xi \right] \right\}$$

$A; \beta; \xi; \eta$: coefficienti adimensionali che controllano la forma del ciclo isteretico.

- il *coefficiente* A controlla la pendenza del primo ramo che è pari a $(A \cdot k)$, mentre la pendenza iniziale dei rami di scarico e di ricarica è governata, oltre che da A , da β e ξ . Se il rapporto ξ / β è < 1 , la pendenza è $< k$; se ξ / β è > 1 , la pendenza è $> k$;
- il *coefficiente* ξ ha segno opposto a Z in fase di scarico e concorde in fase di carico;

- il coefficiente η fornisce il raccordo fra il tratto elastico a quello post-elastico. Se η è molto grande, il tratto in fase di carico tende a quello elasto-plastico. Il coefficiente η influenza anche l'area del ciclo di isteresi poiché per grandi deformazioni l'area si restringe quando η decresce; mentre per piccole deformazioni il comportamento è opposto e l'influenza di η sull'area racchiusa dal ciclo diventa più sensibile.

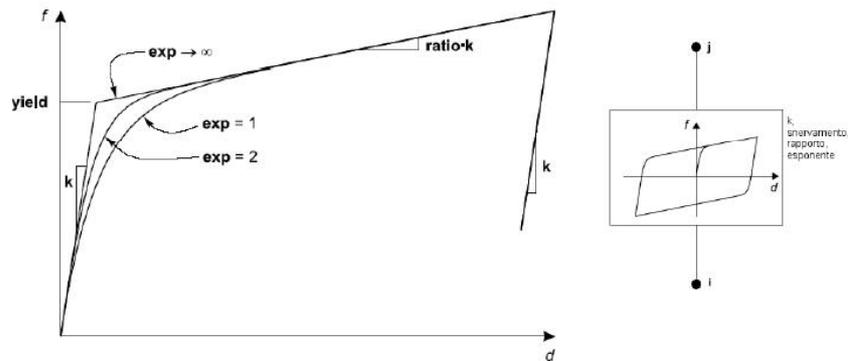
I coefficienti $A; \beta; \xi; \eta$ possono essere settati sulla base di un determinato ciclo sperimentale, ma si può notare che uguagliando la risposta per un singolo ciclo non si uguagliano necessariamente le risposte per i cicli differenti da quello preso in esame. Ciò rappresenta la limitazione del modello isteretico di Wen tale da renderlo non del tutto affidabile per gli isolatori HDRB differentemente dagli isolatori LRB.

Il codice di calcolo adottato (SAP2000 v.10.0.7), consente l'implementazione di tale modello matematico, tramite l'elemento finito non lineare "NLlink" del tipo "Plastic Wen", già ampiamente illustrato nel § 2.1. Cap. II e per pronta memoria, viene nuovamente riportato in forma sintetica. Il comportamento meccanico del link "Plastic Wen" è definito dalla seguente espressione:

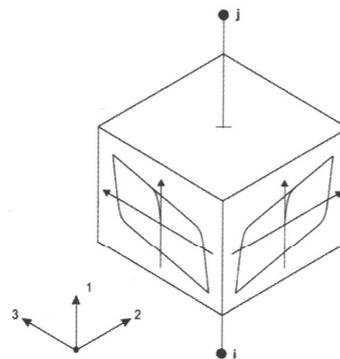
$$f = ratio kd + (1 - ratio)yeldz$$

in cui:

- f è la forza che nasce nel link;
- $ratio$ è il rapporto tra il valore della rigidezza dopo lo snervamento e il valore di rigidezza della fase elastica;
- k è il valore della rigidezza nella fase elastica;
- d è il valore della deformazione;
- $yeld$ è la forza di snervamento;
- z variabile isteretica interna con $|z| \leq 1$.



Sulla base di risultati sperimentali e in base alle informazioni riportate sul catalogo della casa produttrice, è possibile caratterizzare l'elemento finito non lineare nelle 3 direzioni, assegnando i seguenti valori:



dir. 1

effective stiffness

rigidezza in direzione verticale = 1627 KN/mm (valore particolarmente elevato, tale da poter rendere fisso il g.d.l. nella direzione 1)

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione verticale = 0

dir. 2; dir. 3

effective stiffness

rigidezza secante corrispondente ad una deformazione tagliante del 100% = 1.45 KN/mm

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione orizzontale = 0.10

stiffness

rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico = $F_1/d_1 = 2.90$ KN/mm

yield strenght

forza di snervamento = 136.66 KN

post yield stiffness ratio

rapporto tra il valore della rigidezza post- snervamento e il valore di rigidezza elastica = 0.4068

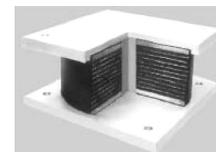
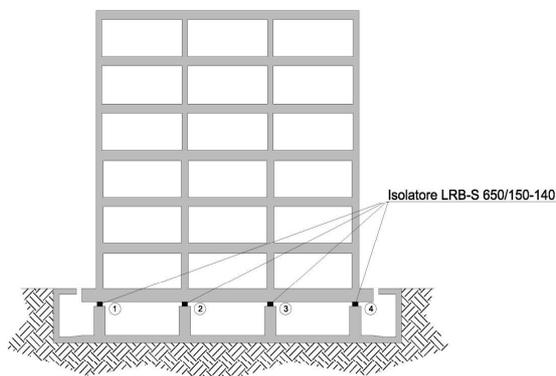
yielding exponent

coefficiente di raccordo tra il ramo elastico e il ramo plastico del ciclo isteretico = 20

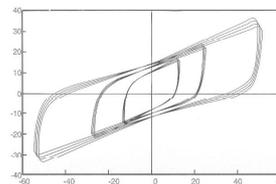
La procedura di dimensionamento del sistema di isolamento con LRB è stata già illustrata in precedenza, parallelamente al sistema HDRB. Il seguente sistema di isolamento adottato, è il seguente:

Sistema LRB ($T_{BI} = 2.06 \text{ sec}$)

▪ Descrizione del sistema d'isolamento



Isolatore LRB



Shear load-Deformation Curve of High Damping Rubber Bearings

Ciclo isteretico di un generico LRB

V	F_{zsl}	K_e	ξ_e	F_2	F_1	d_1	K_v	D_g	t_e	h	H	Z	
kN	kN	kN/mm per $d_2^{sl,v} = 250 \text{ mm}$	%	KN	KN	mm	kN/mm	mm	mm	mm	mm	mm	
LRB-S 650/150-140	2290	6070	1.49	26	373	172	12	1470	650	150	272	332	700

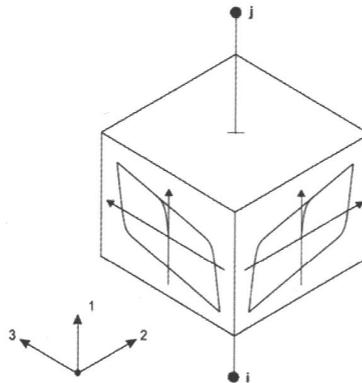
300 mm spostamento massimo allo SLC

V	Carico verticale massimo agente sull'isolatore in presenza del sisma corrispondente allo SLC (allo spostamento $d_2^{sl,v}$)
F_{zsl}	Carico verticale massimo allo SLU in esercizio
K_e	Rigidità orizzontale equivalente (allo spostamento $d_2^{sl,v}$)
ξ_e	Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (allo spostamento $d_2^{sl,v}$)
F_2	Forza massima (allo spostamento $d_2^{sl,v}$)
F_1	Forza al limite elastico
d_1	Spostamento al limite elastico
K_v	Rigidità verticale
D_g	Diametro elastomero
t_e	Spessore totale gomma
h	Altezza isolatore escluse piastre di ancoraggio
H	Altezza totale incluse piastre di ancoraggio
Z	Lato piastre di ancoraggio

▪ Descrizione della modellazione non lineare dell'isolatore

Per la modellazione non lineare degli isolatori elastomerici, è stato adottato il modello isteretico proposto da Wen come per il sistema HDRB.

Il codice di calcolo adottato (SAP2000 v.10.0.7), consente l'implementazione di tale modello matematico, tramite l'elemento finito non lineare "NLlink" del tipo "Plastic Wen", ampiamente illustrato in precedenza.



dir. 1

effective stiffness

rigidezza in direzione verticale = 1479 KN/mm (valore particolarmente elevato, tale da poter rendere fisso il g.d.l. nella direzione 1)

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione verticale = 0

dir. 2; dir. 3

effective stiffness

rigidezza secante corrispondente ad una deformazione tagliante del 100% = 1.49 KN/mm

effective damping

smorzamento viscoso equivalente, in direzione orizzontale = 0.26

stiffness

rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico = $F_1/d_1 = 14.33$ KN/mm

yield strenght

forza di snervamento = 172 KN

post yield stiffness ratio

rapporto tra il valore della rigidezza post- snervamento e il valore di rigidezza elastica = 0.072

yielding exponent

coefficiente di raccordo tra il ramo elastico e il ramo plastico del ciclo isteretico = 20

2.2. Sistemi di isolamento attritivi (sistema FPS e sistema DCFP)

Al fine di rendere completa l'analisi comparativa con il sistema HDHSI, vengono illustrati ulteriori sistemi di isolamento come i sistemi a scorrimento ricentranti: sistema a singola superficie di scorrimento (Friction Pendulum System - FPS) e sistema a doppia superficie di scorrimento (Double Concave Friction Pendulum - DCFP).

Verranno descritti i dispositivi secondo il loro modello matematico, verranno illustrate le modellazione ad elementi finiti e la procedura di dimensionamento del sistema di isolamento applicato alla struttura oggetto di studio.

2.2.1. Sistema FPS: descrizione e modellazione non lineare

Il vantaggio fondamentale di un sistema di isolamento in cui si utilizzano i dispositivi FPS risiede nel fatto che il periodo fondamentale della struttura a base isolata T_{BI} è indipendente dalla massa della sovrastruttura. Ciò comporta che un sistema di isolamento così realizzato, può essere adottato anche nei casi di isolamento alla base per strutture con masse modeste, come ad esempio gli edifici con un numero di piani ridotto, per i quali i sistemi di isolamento elastomerici, presentano varie limitazioni. Tuttavia, i sistemi di isolamento FPS o DCFP, avranno un valore di rigidezza orizzontale effettiva, strettamente legato al carico gravante sul singolo isolatore.

Nel caso oggetto di studio sono stati utilizzati gli FPS dell'AlgaSism. Tali dispositivi, chiamati AlgaPend, sono caratterizzati dall'aver la superficie di scorrimento curva non realizzata in Teflon, ma con un nuovo materiale chiamato Xlide di cui la stessa AlgaSism detiene il brevetto. Questo nuovo materiale risulta molto più resistente e stabile alle condizioni ambientali rispetto al Teflon. Inoltre, tale materiale consente di avere un coefficiente di attrito con valori compresi, in base alla pressione di progetto gravante sul dispositivo, tra il 2% ed il 20%.

Le prove cicliche a spostamento imposto crescente, consentono di descrivere il caratteristico comportamento che, generalmente, assume l'andamento riportato in figura.

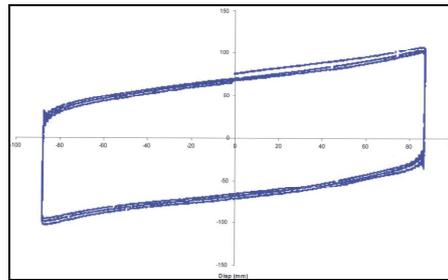


Fig. n.108 - Ciclo isteretico tipico di un dispositivo FPS.

Si può osservare che il legame costitutivo è non lineare, ma presenta una marcata regolarità e stabilità dato che la rigidità laterale (pendenza del singolo ciclo) risulta costante al variare dello spostamento.

Per quel che concerne la modellazione del dispositivo, le NTC 2008, offrono la possibilità di modellare il sistema di isolamento, in relazione alle sue caratteristiche meccaniche, con un modello visco-elastico lineare oppure con un legame costitutivo non lineare.

Per descrivere il comportamento del dispositivo, occorre illustrare il meccanismo di funzionamento del pendolo tenendo conto dell'effettiva geometria dell'isolatore FPS. Infatti, con riferimento alla Fig. n.109, la forza verticale W si può scomporre in due componenti di cui una ortogonale ($W \cos \theta$) e l'altra tangente ($W \sin \theta$) alla superficie di scorrimento.

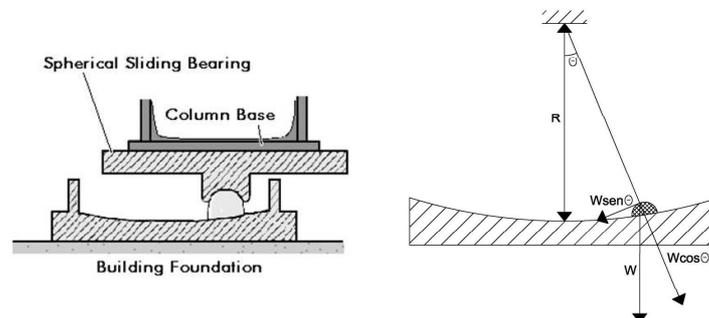


Fig. n.109 – Funzionamento di un dispositivo FPS.

Se l'angolo θ risulta molto piccolo, è lecito approssimare:

$$\begin{aligned}\cos \theta &\approx 1 \\ \text{sen} \theta &\approx 1/R\end{aligned}$$

Per cui le due componenti della forza verticale W diventano:

$$\begin{aligned}W \cos \theta &\approx W \\ W \text{sen} \theta &\approx W/R\end{aligned}$$

Inoltre, lungo la tangente alla superficie di scorrimento e con segno concorde alla componente tangente della forza verticale W , agisce la forza di attrito F_a funzione del coefficiente di attrito μ e della componente della forza verticale W ortogonale alla superficie di scorrimento. Pertanto, la forza di attrito F_a è pari a:

$$F_a = \mu W \cos \theta$$

Illustrate le forze che entrano in gioco nel funzionamento del dispositivo, si intuisce che il comportamento dell'isolatore può essere interpretato come un Friction Slider (FS) e un Elastic Spring (ES) in parallelo, ovvero un isolatore a scorrimento a superficie piana ed una molla elastica.

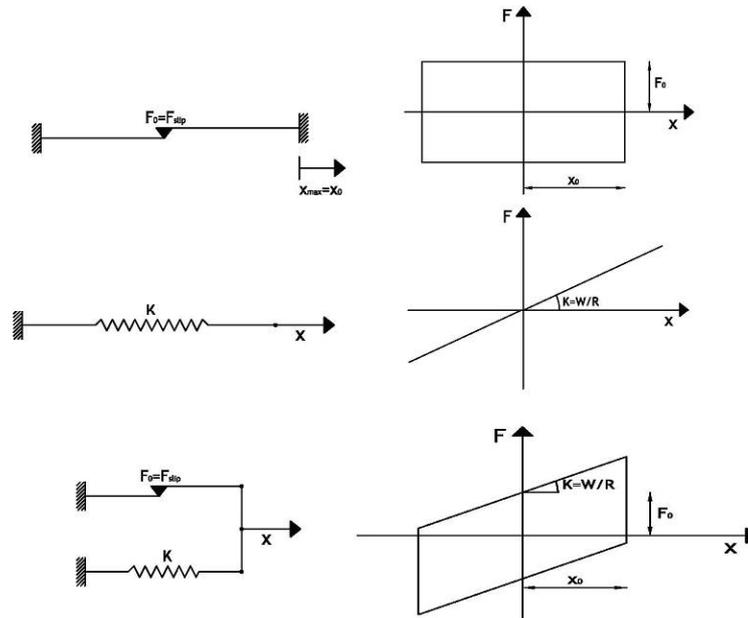


Fig. n.110 – Modello bilinare del dispositivo FPS.

Per quel che concerne il comportamento del Friction Slider, la modellazione adottata è quella che prevede il coefficiente di attrito μ dipendente dalla velocità v , secondo la formulazione proposta da Mokha, *et al.* [6]:

$$\mu = f_{\max} - (f_{\max} - f_{\min})e^{-a|v|}$$

dove:

f_{\max} è il coefficiente di attrito ad alta velocità che caratterizza il dispositivo;

f_{\min} è il coefficiente di attrito a bassa velocità che caratterizza il dispositivo;

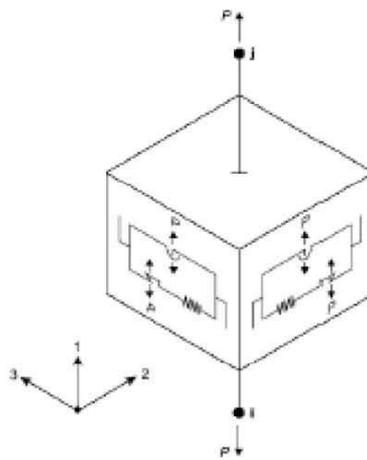
v è la velocità di scorrimento v ;

a è un coefficiente da determinarsi in funzione della velocità di scorrimento v .

Per quanto riguarda la molla elastica, il comportamento meccanico è lineare, caratterizzato dal seguente valore di rigidezza:

$$K = \frac{W}{R}$$

Il codice di calcolo adottato (SAP2000 v.10.0.7), consente l'implementazione di tale modello matematico, tramite l'elemento finito non lineare "NLlink" del tipo "T/C friction", ampiamente illustrato nel § 2.2.2. *Cap. II*. Sulla base dei risultati sperimentali e in base alle informazioni riportate sul catalogo della casa produttrice, è possibile assegnare i seguenti valori, al fine di caratterizzare l'elemento finito non lineare, nelle 3 direzioni.



dir. 1

stiffness

rigidezza in direzione verticale = 10^8 kN/m

gap

valore dell'apertura relativa al vincolo unilaterale = 0

dir. 2; dir.3

stiffness

rigidezza nella fase elastica, in direzione orizzontale. Corrisponde alla rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico = 10^8 kN/m

friction coefficient, Slow: valore del coefficiente d'attrito MIN

friction coefficient, Fast: valore del coefficiente d'attrito MAX

rate parameter: coefficiente dipendente dall'inverso della velocità di scorrimento

radius of sliding surface: raggio della superficie di scorrimento

Il legame costitutivo presenta, come già evidenziato, delle evidenti non linearità, ma ciò nonostante il comportamento ciclico dell'isolatore può essere

linearizzato, considerando la rigidezza effettiva (rigidezza secante) come rappresentativa del comportamento ciclico del dispositivo. Il procedimento di linearizzazione si completa, trasformando l'energia dissipata per isteresi (convenzionalmente calcolata come area racchiusa dal ciclo corrispondente allo spostamento di progetto) in smorzamento viscoso equivalente.

I parametri chiave di tale modellazione sono: la rigidezza effettiva K_{eff} e lo smorzamento viscoso equivalente ξ . Il valore della rigidezza effettiva K_{eff} è somma di due aliquote di cui una post-elastica K_p ed un'altra elastica K_e :

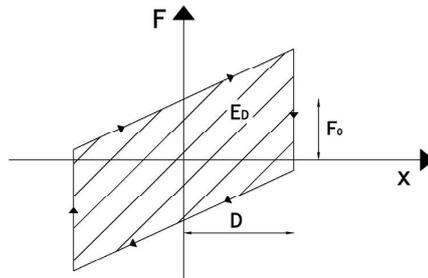
$$K_{eff} = K_p + K_e$$

$$K_{eff} = \left(\frac{DW}{R} + F_0 \right) \frac{1}{D} = \left(\frac{DW}{R} + \mu W \right) \frac{1}{D} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D} = W \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D} \right)$$

in cui:

- K_{eff} è la rigidezza effettiva;
- K_e è la rigidezza elastica;
- K_p è la rigidezza post-elastica;
- W è il carico verticale agente sul dispositivo;
- R è il raggio di curvatura della superficie di scorrimento;
- μ è il coefficiente di attrito della superficie di scorrimento;
- D è lo spostamento di progetto del dispositivo.

Il valore dello smorzamento viscoso equivalente ξ invece, viene determinato a partire dall'energia dissipata per il singolo ciclo del dispositivo (E_d).



In particolare risulta che:

$$\xi = \frac{E_d}{4\pi E_{el}}$$

$$\xi = \frac{4F_0 D}{4\pi \frac{1}{2} K_{eff} D^2} = \frac{4\mu W D}{2\pi \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{D} \right)} = \frac{2\mu}{\pi \left(\frac{D}{R} + \mu \right)}$$

2.2.2. Sistema FPS: progettazione

La strategia adottata per la progettazione del sistema di isolamento, è quella dell'elongazione del periodo. È stato fissato un periodo di riferimento (Target Period) della struttura a base isolata (T_{BI}) per poi procedere al dimensionamento del sistema di isolamento.

Fissato il periodo target T_{BI} , lo step successivo riguarda la determinazione del raggio di curvatura R . Esso deve essere identico per tutti gli isolatori per non generare spostamenti verticali differenziati alla base dei pilastri con conseguente stato di sollecitazione indotta nelle travi.

La relazione analitica che lega T_{BI} ed R , si ottiene dalla definizione stessa di periodo fondamentale:

$$T_{BI} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}}$$

dove:

M è la massa totale della sovrastruttura;

K è la rigidezza orizzontale assicurata dal sistema di isolamento.

Alla luce di quanto esposto precedentemente, risulta che:

$$K = \frac{W}{R} = \frac{M \cdot g}{R}$$

pertanto si ha:

$$T_{BI} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}}$$

In conclusione, fissato il valore del periodo target T_{BI} , si determina il valore del raggio di curvatura R della superficie di scorrimento dalla seguente relazione:

$$R = \frac{g \cdot T_{BI}^2}{4\pi^2}$$

Nel caso studiato, T_{BI} è stato fissato pari a 2.0sec e quindi si ricava $R = 0,994m$.

Successivamente, se il sistema di isolamento fosse realizzato da dispositivi FPS tutti caratterizzati dal medesimo valore di coefficiente di attrito (μ), tale valore si potrebbe valutare, fissando uno smorzamento viscoso equivalente (ξ) e determinando lo spostamento di progetto (D) del sistema di isolamento tramite lo spettro di risposta elastico allo SLC.

$$\xi = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu}{\mu + D/R} \right) \Rightarrow \text{si ricava il valore di } \mu$$

Noto il valore del coefficiente di attrito μ si verifica, in base alla pressione agente sul singolo FPS, che sia possibile garantirlo per ogni dispositivo.

Successivamente, note le forze verticali V agenti sul singolo dispositivo, si può determinare la rigidità effettiva dell'isolatore:

$$K_{eff} = \frac{V}{R} + \frac{\mu V}{D}$$

Conseguentemente, si valuta l'effettivo periodo fondamentale della struttura a base isolata $T_{Bl,eff}$, tenendo conto non solo della componente elastica, ma anche della componente attrittiva e verificando che il periodo calcolato sia prossimo a quello target fissato inizialmente:

$$T_{Bl,eff} = 2\pi \sqrt{\frac{V_{tot}}{K_{eff} \cdot g}} \quad \text{con} \quad T_{Bl} \approx T_{Bl,eff}$$

in cui V_{tot} rappresenta il carico totale agente sul sistema di isolamento pari a $M_{tot} \cdot g$; mentre K_{eff} rappresenta la rigidità del sistema d'isolamento quale somma delle rigidità effettive dei singoli isolatori.

Le relazioni esposte, mettono in evidenza come il periodo fondamentale della struttura a base isolata T_{Bl} è indipendente dalla massa della sovrastruttura (con conseguenti vantaggi per alcune tipologie strutturali), ma la stessa massa riveste un ruolo importante nella determinazione delle rigidità effettive dei singoli isolatori dato che tali rigidità dipendono dai carichi verticali agenti sul singolo isolatore $V_i = M_i \cdot g$. Ciò comporta che un isolatore con identiche caratteristiche geometriche e meccaniche, avrà una rigidità orizzontale diversa a seconda della posizione assunta in pianta nel sistema di isolamento.

Inoltre, poiché la rigidità effettiva e lo smorzamento di un isolatore FPS, dipendono dallo spostamento di progetto (D) che non è noto inizialmente, occorre seguire un procedimento iterativo. Tale procedimento prevede di imporre un valore di tentativo allo spostamento (D) e quindi calcolare, in base ad esso, la rigidità effettiva, il periodo di vibrazione e lo smorzamento viscoso equivalente.

Si può così ottenere, attraverso lo spettro di risposta elastico allo SLC, un nuovo valore di (D) con il quale si ripete il calcolo fino a raggiungere la convergenza. Se lo spostamento ricavato dalla spettro elastico, è prossimo a quello assunto inizialmente, allora i valori K_{eff} assunti per i diversi isolatori, sono corretti. Se invece, lo spostamento massimo è distante da quello assunto inizialmente, occorre procedere con un altro tentativo assegnando un nuovo valore di (D) . Ovviamente, se il valore di (D) ottenuto dalla spettro è maggiore di quello assegnato nel tentativo iniziale, allora nel tentativo successivo si adotterà un (D) maggiore e viceversa.

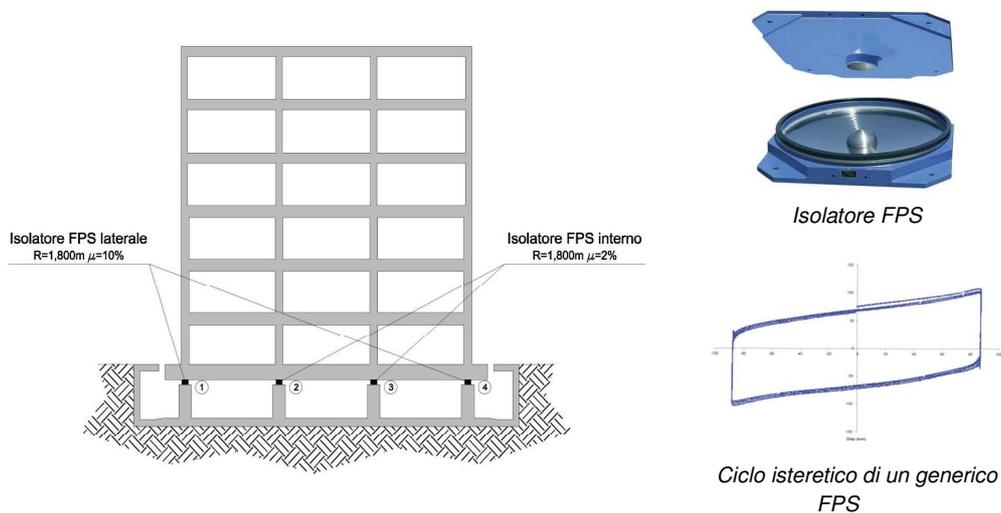
È importante precisare che, per il sistema d'isolamento FPS saranno automaticamente nulli gli effetti torsionali in seguito alla coincidenza tra il baricentro di rigidezza del sistema d'isolamento e la proiezione del centro di massa della sovrastruttura sul piano d'isolamento. Tale coincidenza è intrinsecamente garantita dal sistema FPS dato che la rigidezza dei singoli isolatori è funzione della forza peso che su di essi grava e quindi della massa che ad essi afferisce. In particolare, osservando l'espressione della rigidezza effettiva dell'isolatore FPS, si nota che se la massa si incrementa e quindi se si incrementa la forza peso, anche la rigidezza aumenterà in modo proporzionale.

Infine, concluso il procedimento iterativo sullo spostamento (D) , si controlla che l'effettivo periodo fondamentale della struttura a base isolata $T_{Bl,eff}$, che tiene conto della componente elastica e attritiva degli FPS, sia prossimo al periodo target T_{Bl} imposto inizialmente (tale verifica, a differenza delle altre due, non risulta vincolante).

Nel caso oggetto di studio, è stato previsto un sistema di isolamento con due tipologie di isolatori FPS caratterizzati da un identico raggio di curvatura (R) pari a $1.8m$, ma con due differenti coefficienti d'attrito. Per gli isolatori FPS disposti al di sotto dei pilastri interni, è stato adottato un coefficiente di attrito pari al 2%, mentre per gli isolatori FPS disposti al di sotto dei pilastri esterni, è stato adottato un coefficiente d'attrito pari al 10%.

Il dimensionamento del sistema di isolamento ha previsto che le due tipologie di dispositivi avessero dei valori delle rigidezze effettive prossime tra loro e quindi, dovendo avere raggio R identico, sono stati scelti due coefficienti d'attrito che permettessero di raggiungere il requisito richiesto.

Sistema FPS ($T_{BI} = 2.10 \text{ sec}$)



	[/]	[m]	[kN]	[m]	[m]	[m]	[/]	[m]
Tipo	$D_{catalogo}$	V	A	B	Ht	μ_{isol}	R	
Laterale	0,100	1400	0,440	0,240	0,130	0,100	1,800	
Interno	0,100	2800	0,520	0,320	0,140	0,020	1,800	

$D_{catalogo}$	spostamento orizzontale longitudinale
V	carico verticale massimo
A	diametro della piastra superiore
B	diametro della piastra inferiore
Ht	altezza totale
μ_{isol}	coefficiente di attrito della superficie di scorrimento
R	raggio di curvatura della superficie di scorrimento

Si riportano nella tabella successiva, i valori di rigidezza effettiva K_{eff} per ciascun isolatore con le caratteristiche geometriche e meccaniche per ciascuno dei due dispositivi adottati.

Informazioni da catalogo										
[/]	[/]	[kN]	[m]	[m]	[kN]	[m]	[/]	[m]	[kN/m]	[kN/m]
N° isol	Tipol	V tot	D	D catalogo	V	A	μ isol	R	Kisol	K tot
1	Laterale	934,00	0,100	0,100	1400	0,440	0,100	1,800	1452,89	5687,73
2	Interno	1841,00	0,100	0,100	2800	0,520	0,020	1,800	1390,98	
3	Interno	1841,00	0,100	0,100	2800	0,520	0,020	1,800	1390,98	
4	Laterale	934,00	0,100	0,100	1400	0,440	0,100	1,800	1452,89	

2.2.3. Sistema DCFP: descrizione e modellazione non lineare

Gli isolatori DCFP sono dei dispositivi innovativi e possono considerarsi un’evoluzione degli FPS. Il dispositivo a pendolo con doppia superficie concava, può essere visto come l’unione di due isolatori FPS disposti in serie.

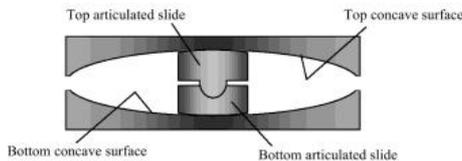


Fig. n.111 – Dispositivo DCFP.

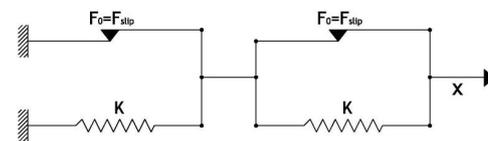


Fig. n.112 – Modellazione dispositivo DCFP.

Il dispositivo DCFP è un isolatore a scorrimento che presenta due superfici di scorrimento curve, una superiore ed un’altra inferiore. La prima superficie di scorrimento è caratterizzata da un raggio di curvatura R_1 e da un coefficiente d’attrito μ_1 ; mentre la seconda, da un raggio di curvatura R_2 e da un coefficiente d’attrito μ_2 . Il dispositivo presenta, oltre alle due superfici concave anche un’articolazione centrale che permette lo scorrimento relativo delle due superfici.

Come accade per gli FPS, anche i DCFP, possono essere utilizzati quali unici isolatori per realizzare un sistema di isolamento completo, dato che consentono sia di disaccoppiare il moto della struttura dal quello del terreno, sia di dissipare energia, sia di ricentrare la struttura.

L’utilizzo di isolatori DCFP comporta, come nel caso di utilizzo di isolatori FPS, il notevole vantaggio di poter considerare il periodo della struttura a base isolata T_{BI} indipendente dalla massa della sovrastruttura. Tuttavia, la stessa massa

(in particolare il carico gravante sul singolo isolatore DCFP) è strettamente legato al valore della rigidità orizzontale effettiva del singolo dispositivo.

Un sistema di isolamento con isolatori DCFP comporta significativi vantaggi rispetto alle tipologie di sistemi di isolamento visti in precedenza. Infatti, se il periodo target da raggiungere è molto elevato (ad esempio 4 - 4.5 sec) le strategie usuali che prevedono l'utilizzo di dispositivi elastomerici (HDRB, LRB) non riescono a raggiungere l'obiettivo prefissato dato che richiederebbero l'utilizzo di dispositivi con dimensioni in pianta molto ridotte e con notevole altezza del pacchetto di gomma elastomerica, con conseguenti problemi per le verifiche di stabilità degli isolatori. Invece, tramite gli isolatori DCFP è possibile raggiungere periodi target prossimi ai 4 sec, rendendo possibile l'isolamento di strutture caratterizzate da periodi fondamentali elevati (ad esempio edifici molto alti).

L'isolatore a doppia superficie di scorrimento consente uno spostamento orizzontale pari al doppio dello spostamento che consentirebbe il dispositivo FPS a parità di dimensioni in pianta. Tale peculiarità, permette di assicurare spostamenti maggiori, adottando dispositivi di dimensioni contenute e quindi più economici degli analoghi FPS. Inoltre, nel caso in cui i dispositivi tradizionali non potessero essere utilizzati per spostamenti eccessivi, i dispositivi DCFP riuscirebbero a soddisfare la richiesta di spostamento. Infine, un ultimo vantaggio consiste nella possibilità di gestire più parametri e quindi poter meglio adattare il sistema di isolamento alle proprie esigenze progettuali. Tale dispositivo è caratterizzato dalla possibilità di poter giostrare su 4 parametri, piuttosto che su due soli soltanto come per il dispositivo FPS (raggio di curvatura R e coefficiente d'attrito μ). I quattro parametri sono i seguenti: $R_1; \mu_1$ per la superficie concava superiore e $R_2; \mu_2$ per la superficie concava inferiore. Ovviamente, la prima superficie che scorre, sarà quella con coefficiente d'attrito minore e successivamente scorreranno entrambe.

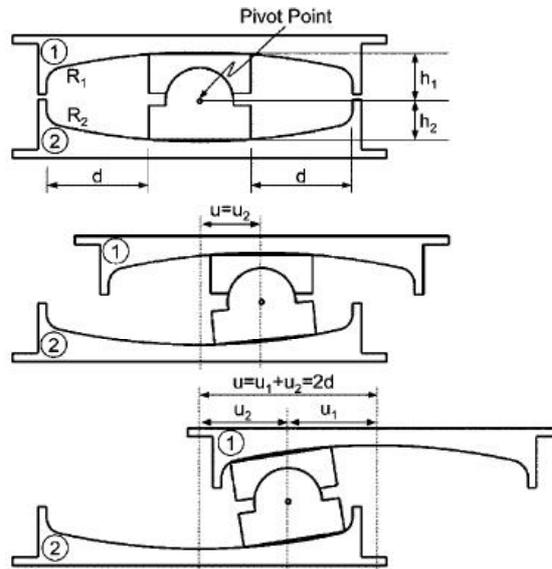


Fig. n.113 – Fasi di funzionamento del dispositivo DCFP.

È possibile trovare le seguenti tipologie di isolatori DCFP:

- *isolatori DCFP con raggi di curvatura uguali e coefficienti di attrito diversi per le due superfici di scorrimento ($R_1 = R_2; \mu_1 \neq \mu_2$);*
- *isolatori DCFP con raggi di curvatura diversi e coefficienti di attrito uguali per le due superfici di scorrimento ($R_1 \neq R_2; \mu_1 = \mu_2$);*
- *isolatori DCFP con raggi di curvatura e coefficienti di attrito diversi per le due superfici di scorrimento ($R_1 \neq R_2; \mu_1 \neq \mu_2$);*
- *isolatori DCFP con raggi di curvatura e coefficienti di attrito uguali per le due superfici di scorrimento ($R_1 = R_2; \mu_1 = \mu_2$).*

Nel caso oggetto di studio, sono stati utilizzati isolatori DCFP con raggi di curvatura e coefficienti di attrito uguali per le due superfici di scorrimento ($R_1 = R_2; \mu_1 = \mu_2$) realizzati dalla AlagaSism.

Le prove cicliche su tali dispositivi DCFP consentono di descrivere il caratteristico comportamento che, generalmente, assume l'andamento riportato in figura seguente.

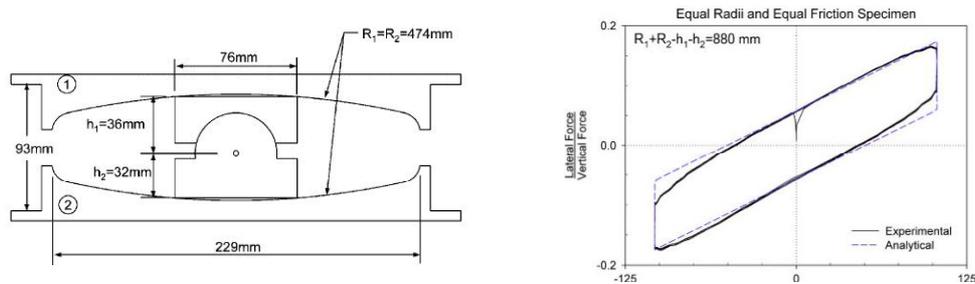
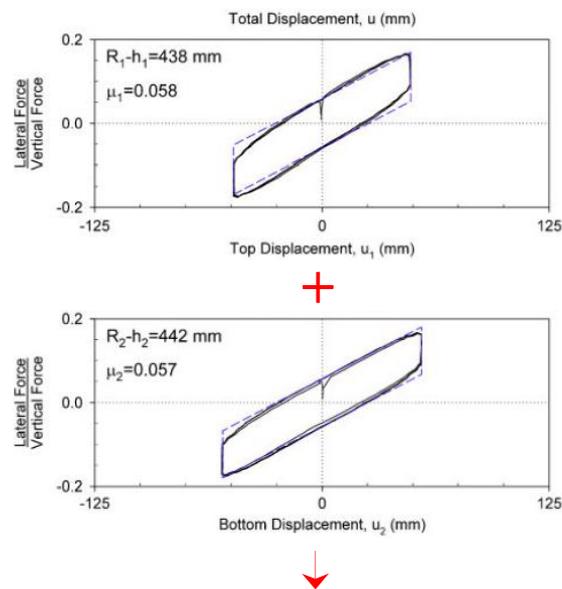


Fig. n.114 – Dispositivo DCFP con raggi di curvatura e coefficienti d'attrito uguali per le due superfici.

Si può osservare che il legame costitutivo è non lineare, ma presenta una marcata regolarità dato che la rigidità laterale (pendenza del singolo ciclo) risulta costante al variare dello spostamento. Il dispositivo a pendolo con doppia superficie concava, può essere visto come l'unione di due isolatori FPS disposti in serie. Con riferimento all'isolatore riportato in Fig. n.114, si ottiene:



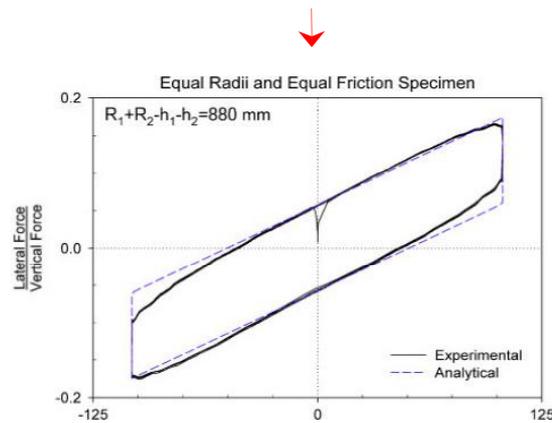


Fig. n.115 – Composizione dell'isolatore DCFP con 2 FPS disposti in serie.

Per quel che concerne la modellazione del dispositivo, le NTC 2008 offrono la possibilità di modellare il sistema di isolamento, in relazione alle sue caratteristiche meccaniche, con un modello elastico lineare equivalente oppure con un modello non lineare.

Le immagini riportate in Fig. n. 115, mettono in evidenza che il ciclo isteretico del dispositivo DCFP risulta qualitativamente molto simile a quello del dispositivo FPS. Infatti, per quel che concerne la modellazione analitica dell'isolatore DCFP si considerano le medesime relazioni e i medesimi modelli esposti nel caso degli FPS. L'unica precisazione riguarda il valore di R dato per i DCFP si hanno due superfici di scorrimento e non più una sola come per gli FPS. Alla luce di tale osservazione, il valore di R , da adottare nel modello matematico, è fornito dalla relazione seguente:

$$R^* = (R_1 - h_1) + (R_2 - h_2)$$

in cui, come indicato nella figura successiva, h_1 e h_2 sono le altezze di ciascuna delle due superfici di scorrimento.

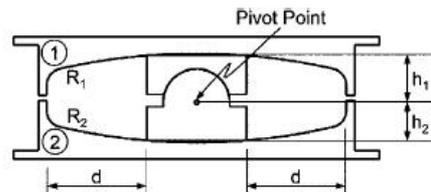
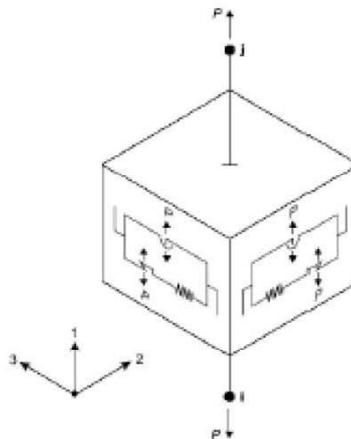


Fig. n.116 – Isolatore DCFP con raggi e coefficienti d'attrito uguali.

Nel caso di DCFP con superfici di scorrimento caratterizzate da raggi di curvatura e coefficienti di attrito uguali, l'espressione di R^* è la seguente:

$$R^* = (R_1 - h_1) + (R_2 - h_2) = 2R - 2h = 2(R - h)$$

Il codice di calcolo adottato (SAP2000 v.10.0.7), consente la modellazione non lineare del DCFP a raggi di curvatura e coefficienti d'attrito uguali, tramite l'elemento finito non lineare "NLink" del tipo "T/C friction", ampiamente illustrato nei paragrafi precedenti. Sulla base dei risultati sperimentali e in base alle informazioni riportate sul catalogo della casa produttrice, è possibile assegnare i seguenti valori, al fine di caratterizzare l'elemento finito non lineare, nelle 3 direzioni.



dir. 1

stiffness

rigidezza in direzione verticale = 10^8 kN/m

gap

valore dell'apertura relativa al vincolo unilaterale = 0

dir. 2; dir.3**stiffness**

rigidezza nella fase elastica, in direzione orizzontale. Corrisponde alla rigidezza del primo ramo del ciclo isteretico = 10^8 kN/m

friction coefficient, Slow: valore del coefficiente d'attrito MIN

friction coefficient, Fast: valore del coefficiente d'attrito MAX

rate parameter: coefficiente dipendente dall'inverso della velocità di scorrimento

radius of sliding surface: raggio della superficie di scorrimento

2.2.4. Sistema DCFP: progettazione

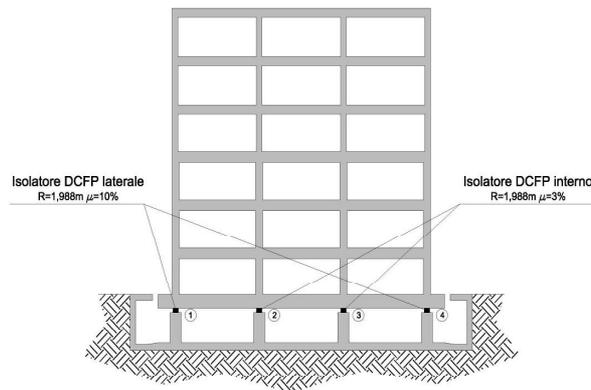
La strategia per la progettazione del sistema di isolamento è stata quella dell'elongazione del periodo. Il primo passo è stato quello di fissare un periodo di riferimento (Target Period) della struttura a base isolata T_{BI} per poter poi risalire, mediante alcune relazioni analitiche, alle caratteristiche geometriche dei singoli dispositivi.

Il dispositivo DCFP è un'evoluzione dell'isolatore FPS e presenta diversi aspetti simili al dispositivo a pendolo con un'unica superficie di scorrimento. Il dispositivo DCFP, come già illustrato nel paragrafo precedente, può essere visto come l'insieme di due isolatori FPS disposti in serie. Per cui, sia le relazioni analitiche che le procedure da adottare per il dimensionamento del sistema di isolamento, sono del tutto analoghe a quelle viste per il caso degli FPS, se si sostituisce il raggio di curvatura R con $R^* = 2R - 2h = 2(R - h)$.

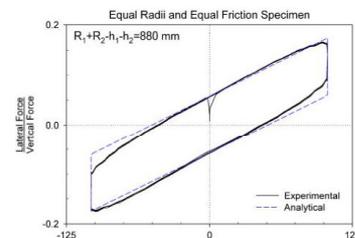
La procedura iterativa per il dimensionamento del sistema di isolamento con DCFP è identica a quella descritta in precedenza per il caso degli FPS.

Il sistema di isolamento adottato, prevede l'utilizzo di due tipologie di isolatori DCFP caratterizzati da un raggio di curvatura R pari a $1.988m$ e differenti valori del coefficiente d'attrito. Per gli isolatori DCFP disposti al di sotto dei pilastri interni, è stato adottato un coefficiente di attrito pari al 3% mentre, per quelli disposti al di sotto dei pilastri esterni, è stato adottato un coefficiente di attrito pari al 10%.

Sistema DCFP ($T_{BI} = 2.04 \text{ sec}$)



Isolatore DCFP



Ciclo isteretico di un generico DCFP

	[m]	[kN]	[m]	[m]	[m]	[/]	[m]
Tipo	$D_{catalogo}$	V	A	B	Ht	μ_{isol}	R
Laterale	0,300	1400	0,540	0,340	0,200	0,100	1,988
Interno	0,300	2800	0,620	0,420	0,210	0,030	1,988

$D_{catalogo}$	spostamento orizzontale longitudinale
V	carico verticale massimo
A	diametro della piastra superiore
B	diametro della piastra inferiore
Ht	altezza totale
μ_{isol}	coefficiente di attrito della superficie di scorrimento
R	raggio di curvatura della superficie di scorrimento

Si riportano, nella tabella successiva, i valori di rigidità effettiva K_{eff} per ciascun isolatore e le caratteristiche geometriche e meccaniche per ciascuno dei due dispositivi adottati.

Informazioni da catalogo										
[/]	[/]	[kN]	[m]	[m]	[kN]	[m]	[/]	[m]	[kN/m]	[kN/m]
N° isol	Tipo	V_{tot}	D	$D_{catalogo}$	V	A	μ_{isol}	R	K_{isol}	K_{tot}
1	Laterale	934,00	0,090	0,300	1400	0,540	0,100	1,988	1507,62	6094,75
2	Interno	1841,00	0,090	0,300	2800	0,620	0,030	1,988	1539,76	
3	Interno	1841,00	0,090	0,300	2800	0,620	0,030	1,988	1539,76	
4	Laterale	934,00	0,090	0,300	1400	0,540	0,100	1,988	1507,62	

2.3. Sistemi di isolamento a confronto

In questo paragrafo, viene proposto il confronto delle risposte sismiche della struttura oggetto di studio, isolata con i differenti sistemi di isolamento precedentemente descritti. Nel confronto, è stata considerata anche la medesima struttura a base fissa.

L'analisi comparativa viene eseguita con riferimento alla registrazione di El Centro non scalata quale registrazione compatibile con lo spettro elastico allo SLV e la registrazione di El Centro amplificata di 1.25 quale registrazione compatibile con lo spettro elastico allo SLC.

Vengono riportate le time history in termini di taglio alla base della sovrastruttura per i differenti sistemi di isolamento, confrontate con l'analogia time history della struttura a Base Fissa (BF).

Successivamente, si riporta una sovrapposizione delle diverse time history del taglio alla base, dello spostamento alla base e dei drift di piano, per i diversi sistemi di isolamento e per ciascuna delle due registrazioni considerate, al fine di rendere più immediato il confronto.

Inoltre, limitatamente alla registrazione di El Centro amplificata di 1.25 quale registrazione compatibile con lo spettro elastico allo SLC, vengono visualizzati i cicli isteretici dei singoli isolatori al fine di rendere immediata la verifica di compatibilità tra capacità e domanda di spostamento.

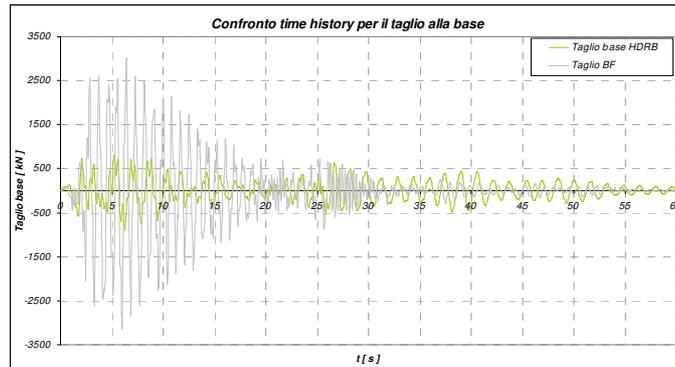
Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.0$)

Fig. n.117 – Time history del taglio alla base – sistema HDRB; struttura a Base Fissa.

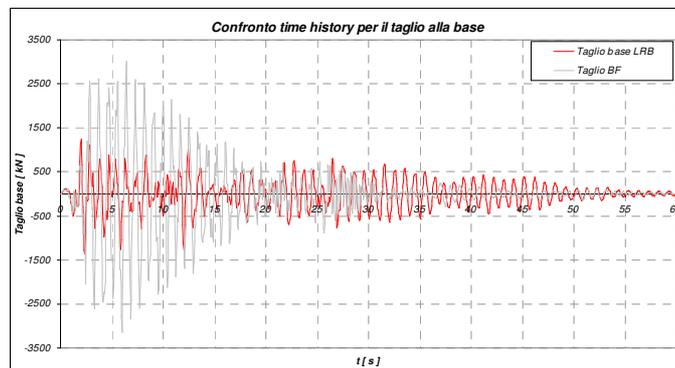


Fig. n.118 – Time history del taglio alla base – sistema LRB; struttura a Base Fissa.

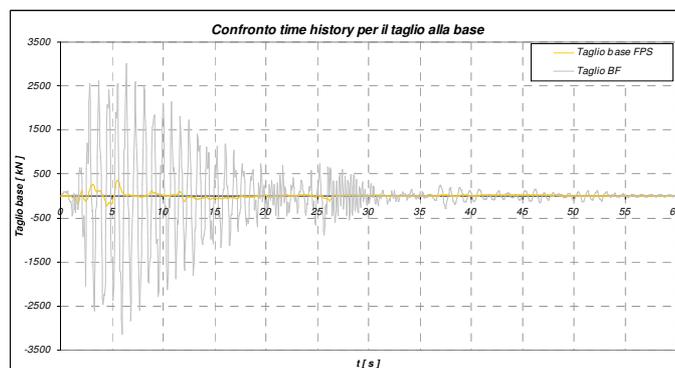


Fig. n.119 – Time history del taglio alla base – sistema FPS; struttura a Base Fissa.

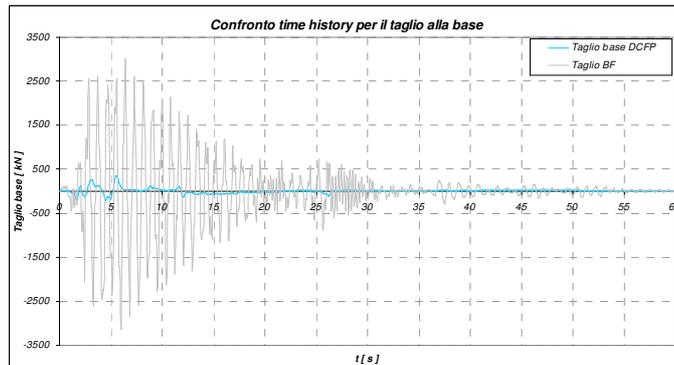


Fig. n.120 – Time history del taglio alla base – sistema DCFP; struttura a Base Fissa.

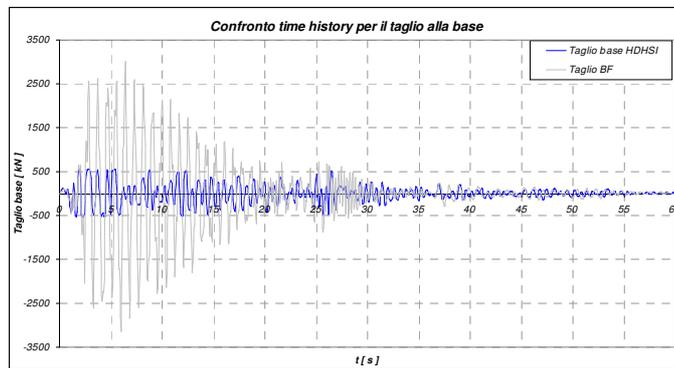


Fig. n.121 – Time history del taglio alla base – sistema HDHSI; struttura a Base Fissa.

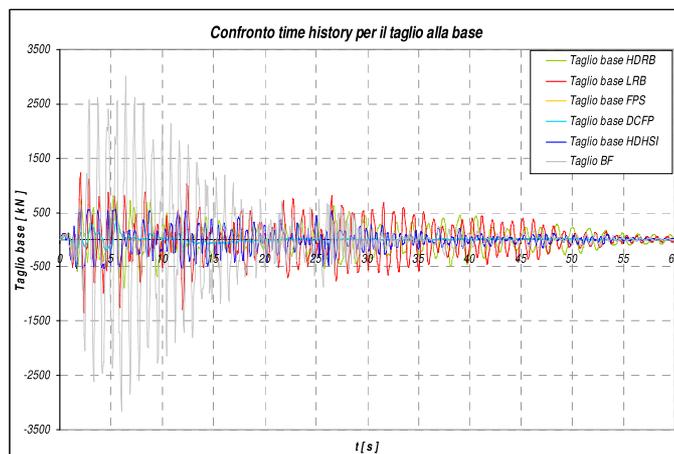


Fig. n.122 – Time history del taglio alla base – sistema HDRB;LRB; FPS; DCFP; HDHSI; struttura a Base Fissa.

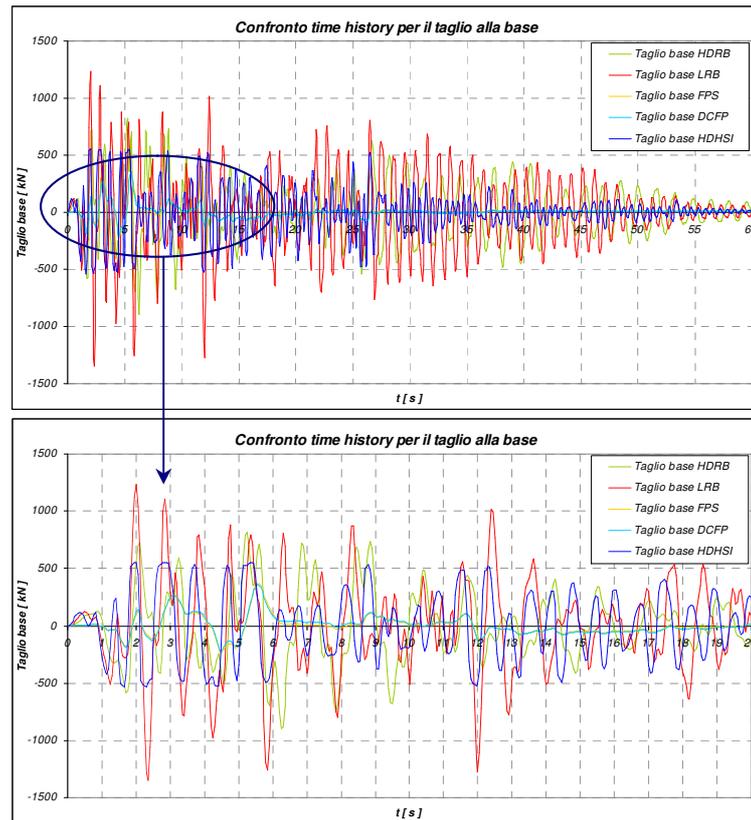


Fig. n.123 – Time history del taglio alla base – sistema HDRB; LRB; FPS; DCFP; HDHSI.

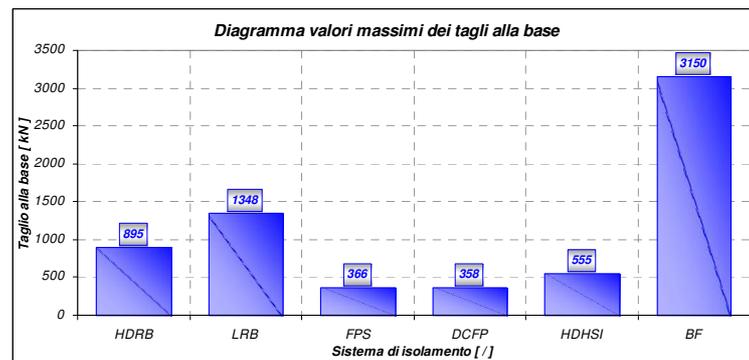


Fig. n.124 – Comparazione dei massimi tagli alla base - sistema HDRB;LRB; FPS; DCFP; HDHSI; struttura a Base Fissa.

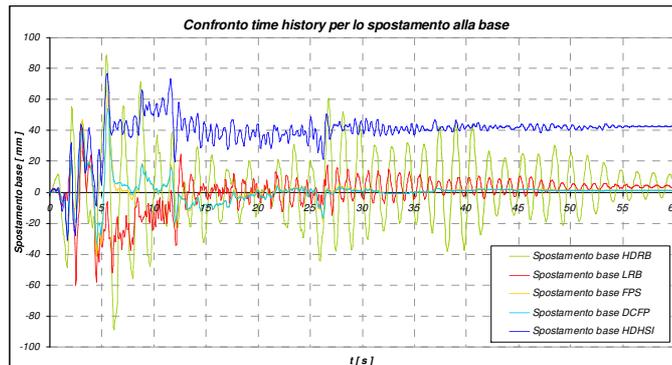


Fig. n.125 – Time history dello spostamento alla base – sistema HDRB; LRB; FPS; DCFP; HDHSI.

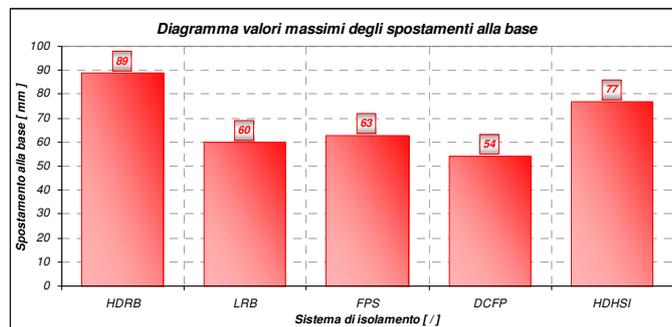


Fig. n.126 – Comparazione del massimo spostamento alla base – sistema HDRB; LRB; FPS; DCFP; HDHSI.

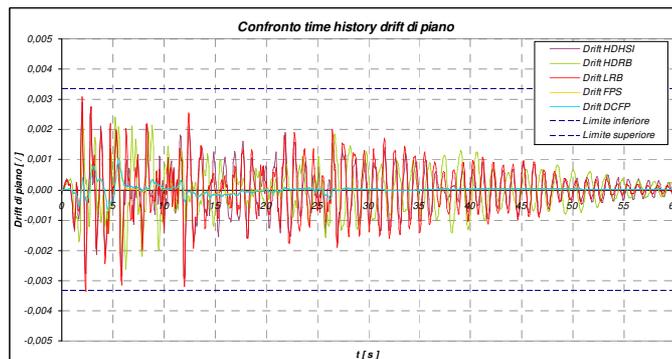
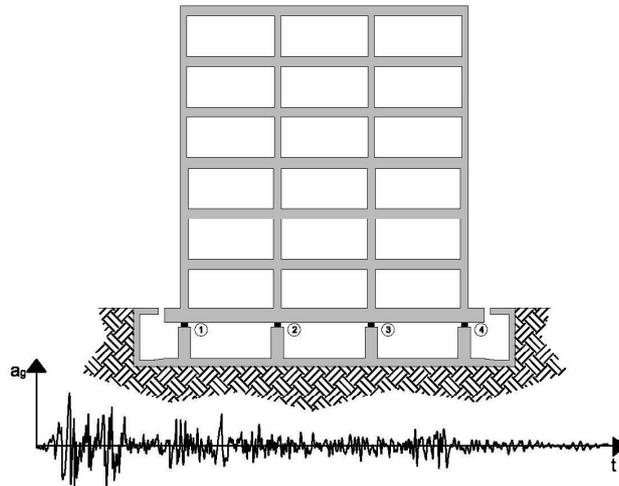


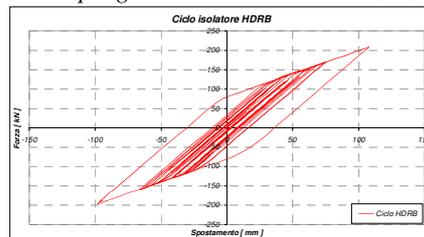
Fig. n.127 – Time history dei drift di piano – sistema HDRB; LRB; FPS; DCFP; HDHSI.

Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.25$)

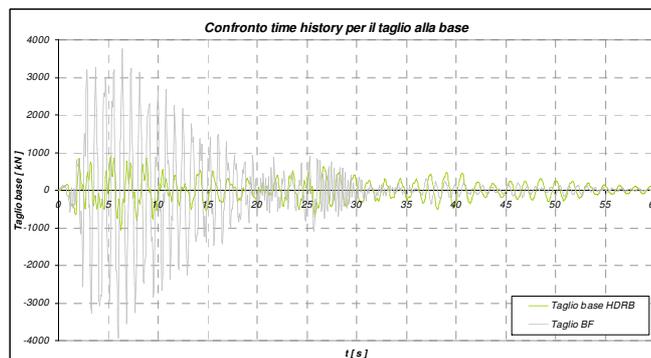
Sistema HDRB



Spostamento di progetto dell'isolatore allo SLC ($D = 320$ mm)

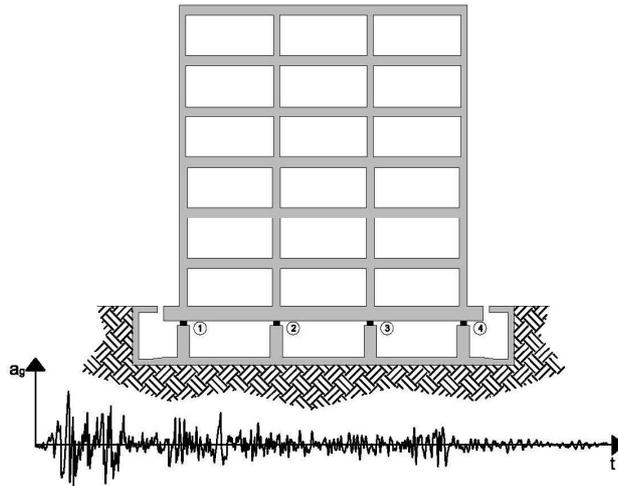


Ciclo isteretico isolatore HDRB (1), (2), (3), (4)

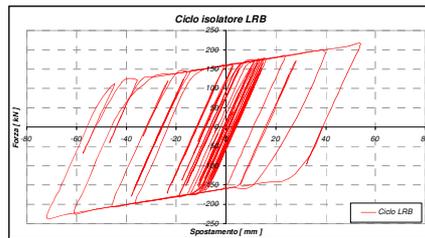


Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.25$)

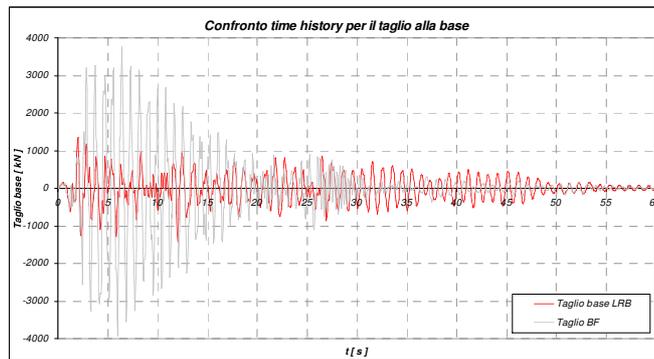
Sistema LRB



Spostamento di progetto dell'isolatore allo SLC ($D = 300$ mm)

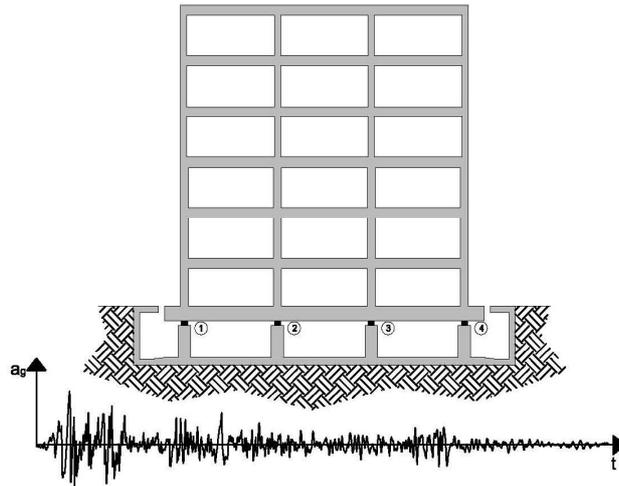


Ciclo isteretico isolatore LRB (1), (2), (3), (4)

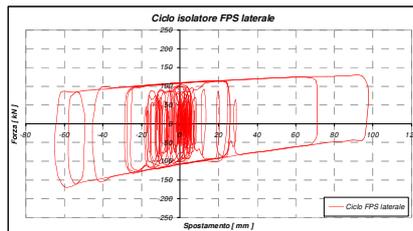


Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.25$)

Sistema FPS

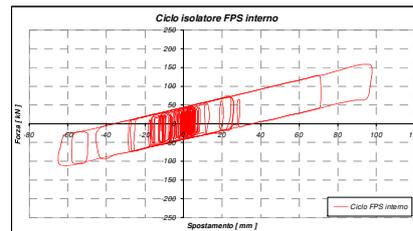


Spostamento di progetto dell'isolatore allo SLC (D = 100 mm)

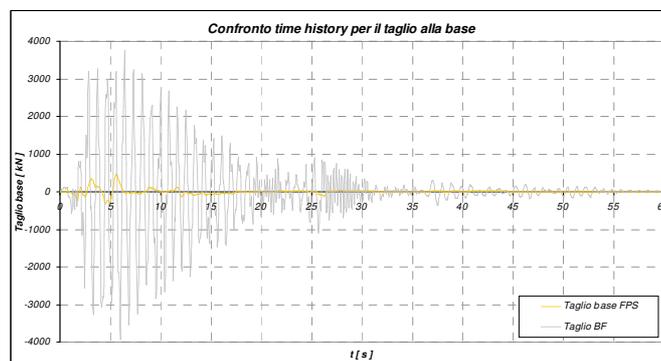


Ciclo isteretico FPS laterale (1) e (4)

Spostamento di progetto dell'isolatore allo SLC (D = 100 mm)

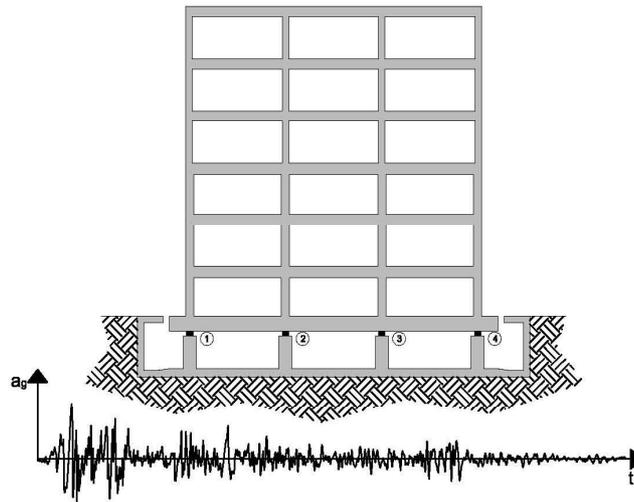


Ciclo isteretico FPS interno (2) e (3)

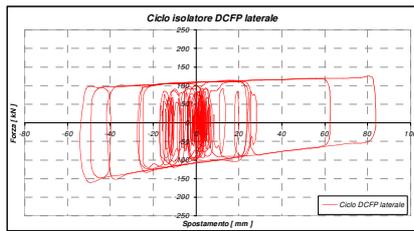


Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.25$)

Sistema DCFP

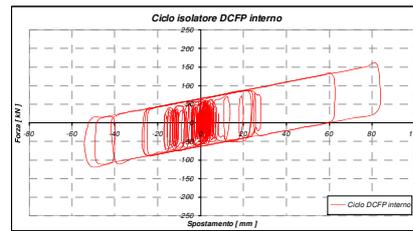


Spostamento di progetto dell'isolatore allo SLC (D = 100 mm)

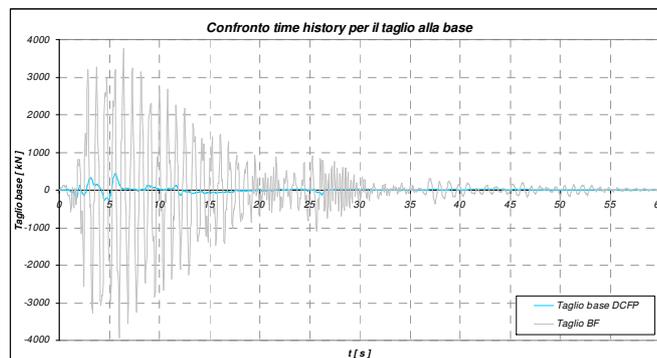


Ciclo isteretico DCFP laterale (1) e (4)

Spostamento di progetto dell'isolatore allo SLC (D = 100 mm)

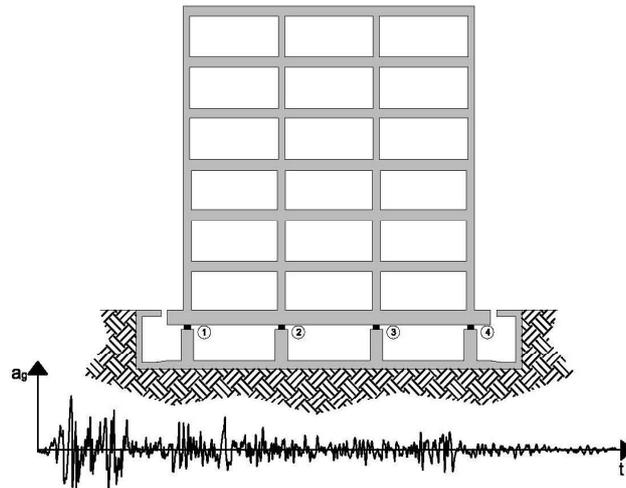


Ciclo isteretico DCFP interno (2) e (3)

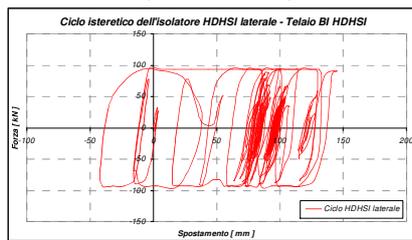


Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.25$)

Sistema HDHSI

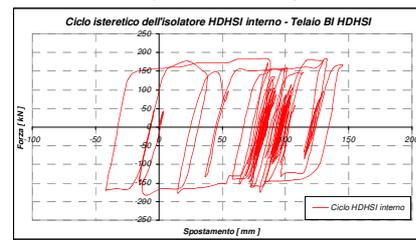


Spostamento di progetto dell'isolatore allo
SLC ($D = 300$ mm)

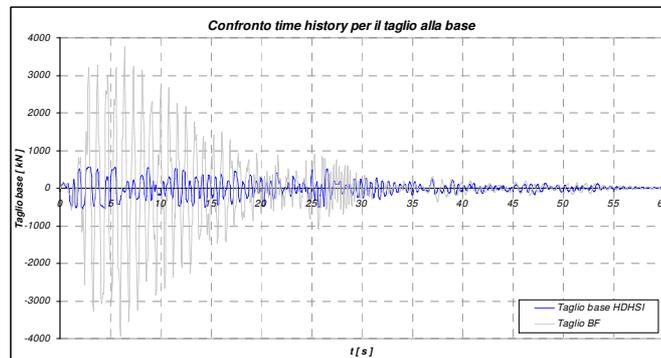


Ciclo isteretico HDHSI laterale (1) e (4)

Spostamento di progetto dell'isolatore allo
SLC ($D = 300$ mm)



Ciclo isteretico HDHSI interno (2) e (3)



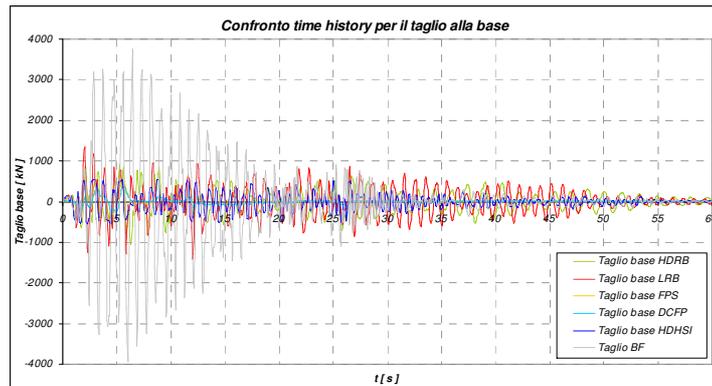


Fig. n.128 – Time history del taglio alla base – sistema HDRB;LRB; FPS; DCFP; HDHSI; struttura a Base Fissa.

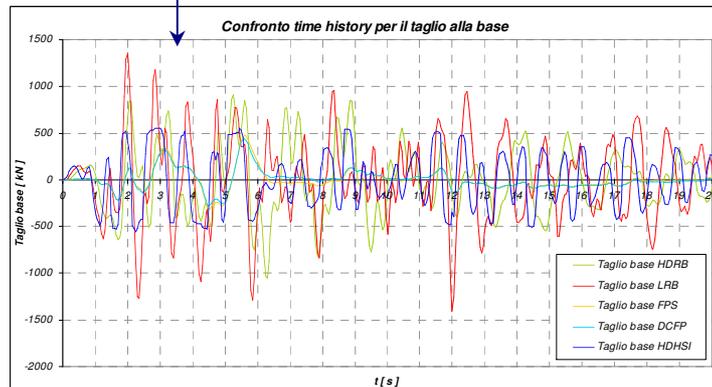
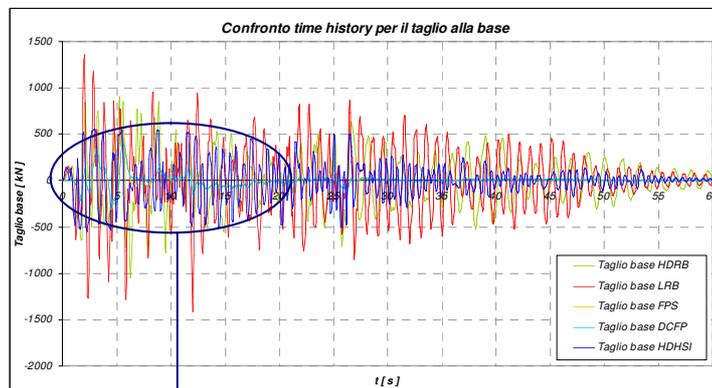


Fig. n.129 – Time history del taglio alla base – sistema HDRB;LRB; FPS; DCFP; HDHSI.

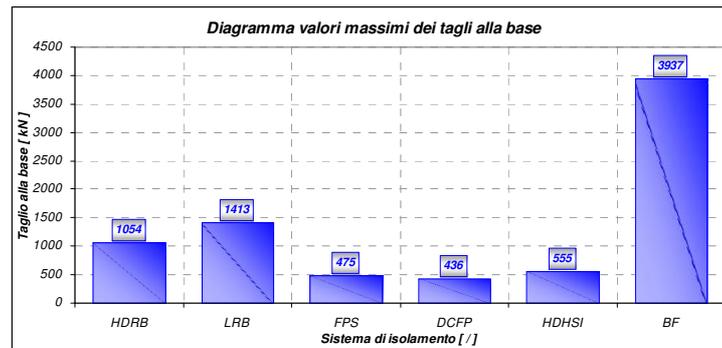


Fig. n.130 – Comparazione dei massimi tagli alla base - sistema HDRB;LRB; FPS; DCFP; HDHSI; struttura a Base Fissa.

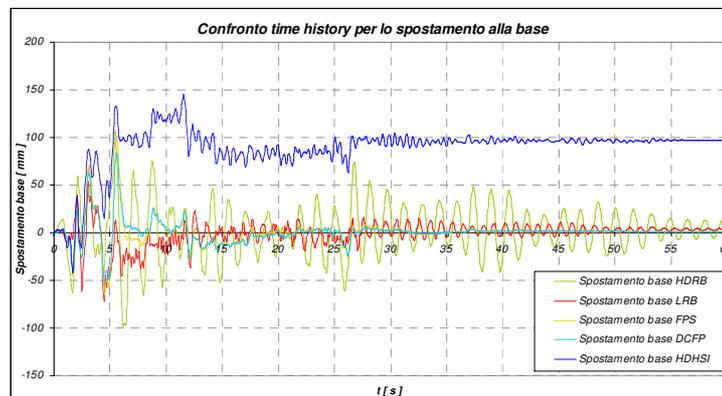


Fig. n.131 – Time history dello spostamento alla base – sistema HDRB; LRB; FPS; DCFP; HDHSI.

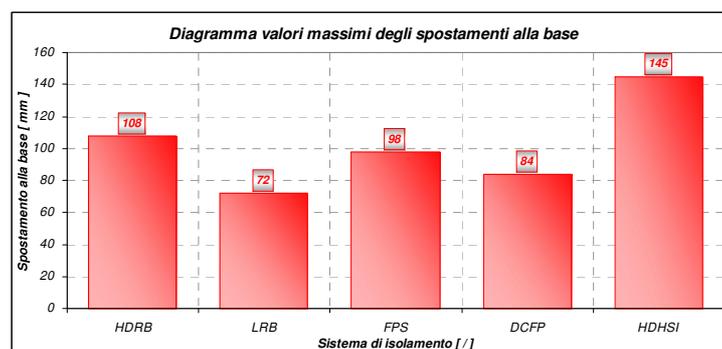


Fig. n.132 – Comparazione del massimo spostamento alla base - sistema HDRB; LRB; FPS; DCFP; HDHSI.

Dai risultati ottenuti, si evince che il sistema HDHSI presenta un'ottima risposta sismica alle azioni di progetto compatibili con lo SLV e lo SLC. Il taglio massimo alla base di 555 kN rende minime le sollecitazioni sulla sovrastruttura, al pari dei sistemi FPS, DCFP e con una maggiore riduzione rispetto ai sistemi HDRB ed LRB. Si nota la presenza dello spostamento residuo alla base della sovrastruttura, molto contenuto e pari a circa 1/3 della capacità di spostamento ($\delta_{max} = 300\text{mm}$). Si potrebbe contenere maggiormente lo spostamento massimo alla base e lo spostamento residuo, imponendo un coefficiente d'attrito $\mu_{max} = 0.2$ piuttosto che 0.1. Ciò avrebbe però comportato, un taglio massimo alla base, non più di 555 kN bensì di 1110 kN che rappresenta comunque un'ottima barriera di forza nei riguardi di eventi sismi anomali.

In definitiva, con $\mu_{max} = 0.1$ si ha l'attivazione dell'isolatore a scorrimento per azioni orizzontali di media intensità, mentre con $\mu_{max} = 0.2$ si ha l'attivazione dell'isolatore a scorrimento per azioni orizzontali d'intensità superiore a quella prevista per lo SLV con conseguente incremento del taglio alla base, ma senza spostamenti residui.

Si riporta una tabella prestazionale per riassumere il confronto tra i diversi sistemi di isolamento analizzati:

Parametro analizzato	Sistema di protezione				
	HDRB	LRB	FPS	DCFP	HDHSI
RIDUZIONE - Accelerazione massima - base sovrastruttura	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●●●
RIDUZIONE - Spostamento massimo - base sovrastruttura	●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●
RIDUZIONE - Drift di piano	●●●●	●●●	●●●●	●●●●	●●●●
PROTEZIONE - "Maximum credible earthquake"	●	●	●	●●●	●●●●●
RICENTRAGGIO - Sovrastruttura	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●
VANTAGGI - Operazione di sostituzione del dispositivo	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●
AFFIDABILITA' - Modellazione del dispositivo con SAP2000	●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●	●●●●●

Leggenda	
●	discreto/a
●●	sufficiente
●●●	buono/a
●●●●	molto buono/a
●●●●●	ottimo/a

Tab. n.9 – Tabella prestazionale per i 5 sistemi di isolamento analizzati.

3. Sistema di isolamento in serie: HDHSI vs. EDF

Si procede al confronto del sistema in serie EDF con il sistema HDHSI che vuol esserne un'ottimizzazione. Si può asserire che a parità di limitazione della forza, il sistema proposto garantisce una maggiore riduzione dello spostamento massimo alla base, grazie alla sua maggiore dissipazione che pur incrementando il drift di piano, assicura comunque un comportamento elastico alla sovrastruttura. Quanto detto viene evidenziato riportando il confronto per la registrazione di El Centro non scalata e per El Centro amplificata di 1.25.

Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.0$)

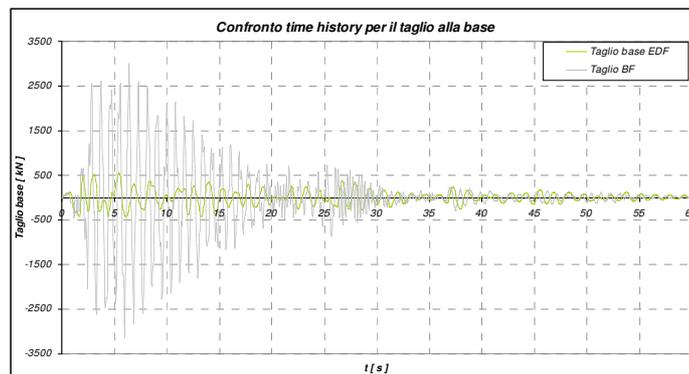


Fig. n.133 – Time history del taglio alla base – sistema EDF; struttura a Base Fissa.

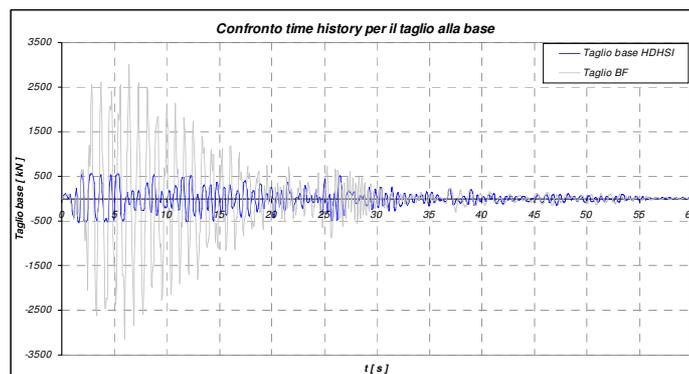


Fig. n.134 – Time history del taglio alla base – sistema HDHSI; struttura a Base Fissa.

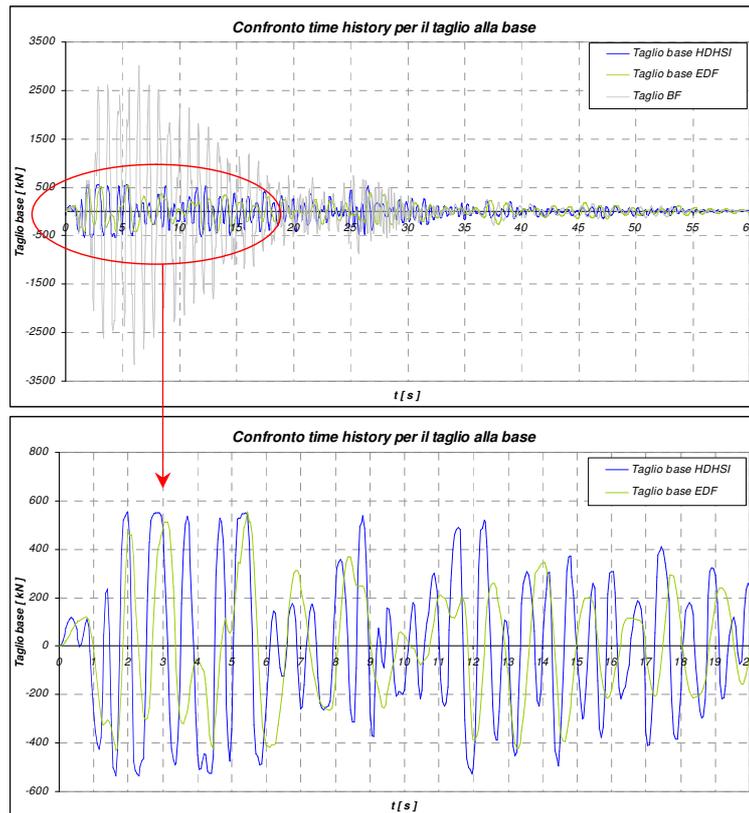


Fig. n.135 – Time history del taglio alla base – sistema HDHSI; sistema EDF; struttura a Base Fissa.

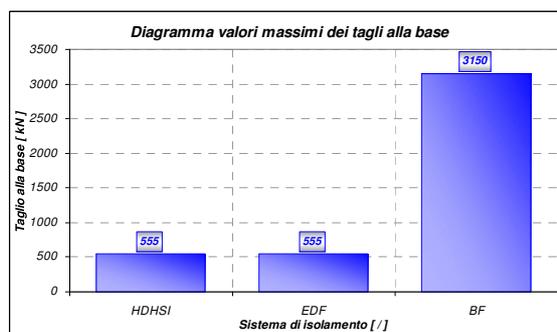


Fig. n.136 – Comparazione dei massimi tagli alla base – sistema HDHSI; sistema EDF; struttura a Base Fissa.

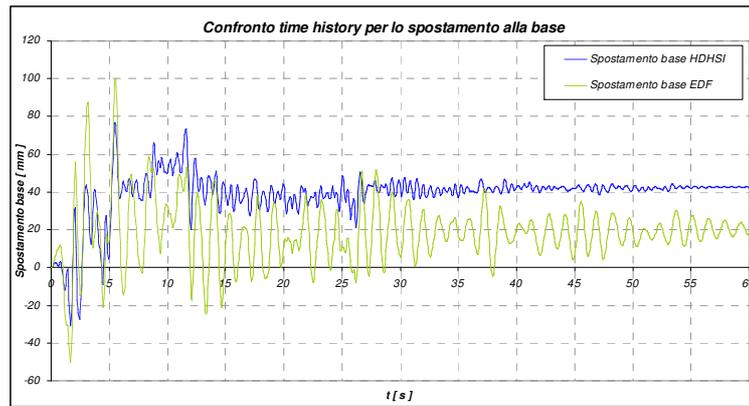


Fig. n.137 – Time history dello spostamento alla base – sistema HDHSI; sistema EDF.

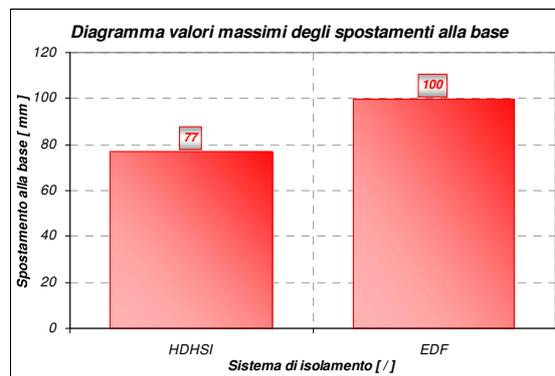


Fig. n.138 – Comparazione del massimo spostamento alla base – sistema HDHSI; sistema EDF.

Time History taglio alla base - El Centro ($\alpha = 1.25$)

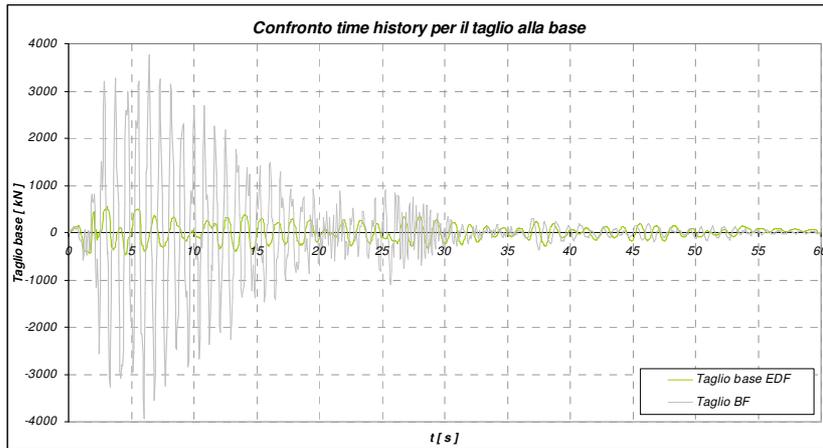


Fig. n.139 – Time history del taglio alla base – sistema EDF; struttura a Base Fissa.

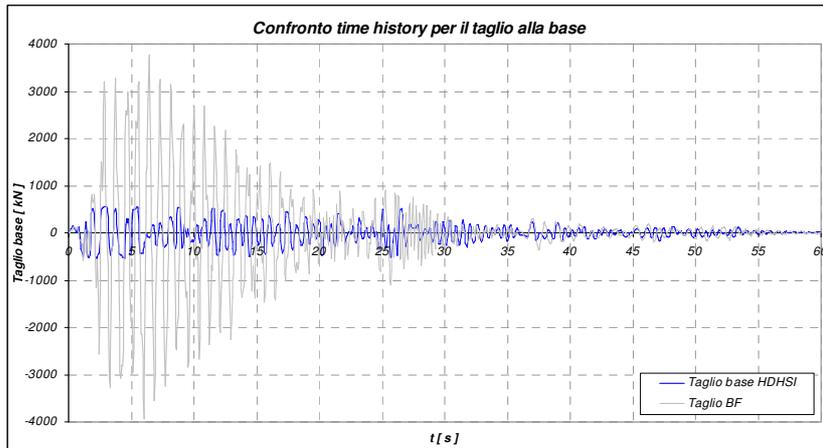


Fig. n.140 – Time history del taglio alla base – sistema HDHSI; struttura a Base Fissa.

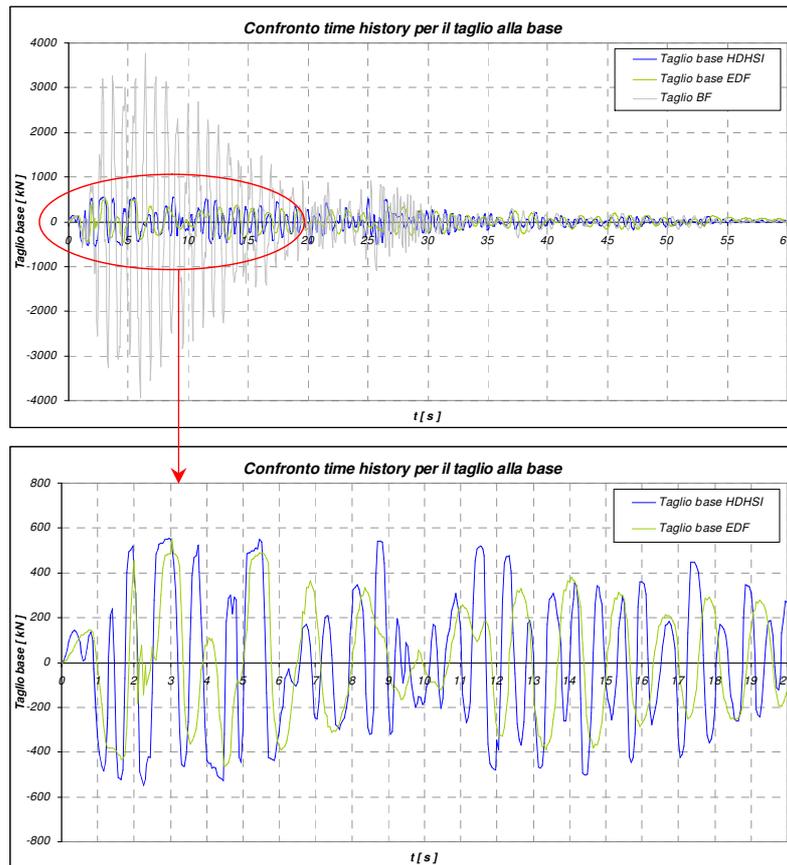


Fig. n.141 – Time history del taglio alla base – sistema HDHSI; sistema EDF.

Si riporta una tabella prestazionale per riassumere il confronto tra i due sistemi di isolamento analizzati:

Parametro analizzato	Sistema di protezione	
	HDHSI	EDF
RIDUZIONE - Accelerazione massima - base sovrastruttura	●●●●●	●●●●●
RIDUZIONE - Spostamento massimo - base sovrastruttura	●●	●
PROTEZIONE - "Maximum credible earthquake"	●●●●●	●●●●●
RICENTRAGGIO - Sovrastruttura	●●	●●
VANTAGGI - Operazione di sostituzione del dispositivo	●●●	●●●
AFFIDABILITA' - Modellazione del dispositivo con SAP2000	●●●●●	●●

Leggenda	
●	discreto/a
●●	sufficiente
●●●	buono/a
●●●●	molto buono/a
●●●●●	ottimo/a

Tab. n.10 – Tabella prestazionale per i 2 sistemi di isolamento analizzati.

Il sistema HDHSI, a parità di limitazione della forza, garantisce una maggiore riduzione dello spostamento alla base e quindi una maggiore possibilità di fronteggiare eventi sismici anomali senza che venga raggiunta la crisi del sistema di isolamento. Consente inoltre, una migliore riproducibilità per via numerica del reale comportamento ciclo-isteretico, mediante il consolidato modello isteretico di Bouc-Wen. Infatti, come ampiamente evidenziato nel § 2.1. *Cap. II*, l'isolatore LRB che costituisce la parte elastomerica del dispositivo HDHSI, differentemente dall'isolatore elastomerico HDRB che invece costituisce la parte elastomerica del dispositivo EDF, presenta una forma del ciclo molto stabile, caratterizzata da valori della rigidezza elastica (K_e) e della rigidezza post-snervamento (K_p), che non subiscono apprezzabili variazioni con il variare del livello di deformazione a taglio e/o con il variare della frequenza della forzante. Ciò permette di caratterizzare il comportamento ciclico isteretico, indipendentemente dal valore di deformazione a taglio (γ) nonché dalla storia di carico e quindi, senza la necessità di aggiornare le rigidezze ($K_e; K_p$) per ogni variazione di (γ) e/o per ogni variazione di frequenza della forzante.

Capitolo V

Conclusioni

Il sistema d'isolamento ibrido proposto (H.D.H.S.I. – High Damping Hybrid Seismic Isolator) assicura un'ottima protezione sismica sia nei riguardi di eventi sismici di progetto che nei riguardi di eventi sismici eccezionali, definibili anomali rispetto ai precedenti, per intensità e/o contenuto in frequenza.

Le prestazioni che tale sistema assicura nei riguardi di azioni sismiche di progetto quali quelle previste agli stati limite ultimi SLV e SLC, sono in linea con i più diffusi sistemi di isolamento (sistema con isolatori elastomerici HDRB o LRB; sistema con isolatori attritivi FPS o DCFP) come si evince dall'analisi comparativa che è stata eseguita.

Nei riguardi di eventi sismici anomali, evidenti sono i vantaggi che il sistema HDHSI assicura rispetto ai sistemi di isolamento precedentemente menzionati. In particolare, in presenza di tali eventi sismici, si osserva una notevole riduzione del taglio alla base della sovrastruttura grazie alla strategia della limitazione della forza assicurata dal meccanismo di scorrimento insito nel dispositivo stesso nonché la possibilità di rendere agevolmente soddisfatte le verifiche di compatibilità tra spostamento richiesto e spostamento disponibile dell'isolatore.

Per gli eventi sismici anomali per intensità, come El Centro (California – componente N00W, 1940) amplificato di 1.5 e 2, i vantaggi del sistema HDHSI rispetto al sistema LRB con cui è stato confrontato, si riscontrano nella forte riduzione del taglio alla base della sovrastruttura per effetto dello scorrimento degli FS e non tanto nel maggior margine di sicurezza nella verifica domanda-capacità di spostamento.

Mentre, per gli eventi sismici anomali per contenuto in frequenza, come Erzinkan (Turchia – componente N90W, 1992), il consistente vantaggio del sistema HDHSI si riscontra non solo nella riduzione del taglio alla base, ma anche nella verifica di compatibilità in termini di spostamento per gli isolatori. Il sistema costituito da soli LRB, ha evidenziato una domanda di spostamento, di gran lunga maggiore alla sua disponibilità come era giusto attendersi dal momento che tale sistema è stato progettato per fronteggiare, in condizioni estreme di funzionamento, lo SLC; mentre il sistema HDHSI ha assicurato ampio margine di sicurezza anche nei riguardi di eventi eccezionali con livelli prestazionali ben superiori a quelli richiesti dalla norma per lo SLC.

Da quanto detto si evidenzia la notevole riserva in termini di resistenza e deformabilità che una struttura, dotata di sistema HDHSI, ha nei riguardi di terremoti anomali per intensità e/o contenuto in frequenza, rispetto al più tradizionale sistema che prevede isolatori elastomerici LRB o HDRB (soli o in parallelo con gli FS) oppure isolatori attritivi FPS o DCFP.

Inoltre, confrontato il sistema in serie HDHSI con il sistema EDF, si può asserire che a parità di limitazione della forza, il sistema proposto garantisce una maggiore riduzione dello spostamento massimo alla base grazie alla sua maggiore dissipazione, assicurando quindi una più ampia possibilità nel fronteggiare eventi sismici anomali senza raggiungere la crisi. Il sistema HDHSI, in seguito alla sua maggiore capacità dissipativa, non determina significativi incrementi dei drift di piano rispetto al sistema EDF, continuando quindi ad assicurare un comportamento elastico alla sovrastruttura anche per sismi eccezionali. Consente inoltre, una migliore riproducibilità per via numerica del reale comportamento ciclo-isteretico, tramite il consolidato ed affidabile modello isteretico di Bouc-

Wen. Infatti, l'isolatore LRB che costituisce la parte elastomerica del dispositivo HDHSI, differentemente dall'isolatore elastomerico HDRB che invece costituisce la parte elastomerica del dispositivo EDF, presenta una forma del ciclo decisamente più stabile, caratterizzata da valori della rigidezza elastica (K_e) e della rigidezza post-snervamento (K_p), che non subiscono apprezzabili variazioni con il variare del livello di deformazione a taglio e/o con il variare della frequenza della forzante. Quanto detto permette di caratterizzare il comportamento ciclico isteretico, indipendentemente dal valore di deformazione a taglio (γ) e dalla storia di carico, senza la necessità di aggiornare le rigidezze ($K_e; K_p$) per ogni variazione di (γ) e/o variazioni di frequenza della forzante. Ciò consente di superare la limitazione insita nella modellazione isteretica proposta da Bouc-Wen in modo tale da continuare a ritenerla robusta ed affidabile, sfruttandone i vantaggi legati alla sua agevole implementazione numerica finalizzata alla riproducibilità del comportamento ciclico-isteretico di un isolatore elastomerico nonché la sua agevole convergenza nell'analisi computazionale della struttura isolata.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Y.K. Wen, "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.102, No. EM2, 1976.
- [2] E.L. Wilson, "A New Method of Dynamic Analysis for Linear and Non-Linear System", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol 1, 1985.
- [3] R. Gueraud, J.P. Noel-Leroux, M. Livolant and A.P. Michalopoulos, "Seismic isolation using sliding elastomer bearing pads", *Nuclear Engineering and Design* 84, 1985.
- [4] Y.J. Park, Y.K. Wen and A. H-S. Ang, "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-Directional Ground Motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, 1986.
- [5] V.A. Zayas, S.S. Low, S.A. Mahin, "The FPS earthquake resisting system", *Experimental Report No. UCB/EERC 87/01*, EERC, Berkeley, CA, 1987.
- [6] A. Mokha, M.C. Constantinou, A.M. Reinhorn, "Teflon bearings in seismic base isolation: experimental studies and mathematical modelling", *Technical Report No. NCEER-88-0038*, National Center for Earthquake Engineering Research. Buffalo, N.Y., 1988.
- [7] B.C. Lin, I.G. Tadjbakhsh, A.S. Papageorgiou and G. Ahmadi, "Performance of earthquake isolation systems", *Journal of Engineering Mechanics*, 116(2), 1990.
- [8] V. Zayas and S. Low, "A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation", *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No.2, 1990.
- [9] Y.B. Yang, T.Y. Lee and I.C. Tsai, "Response of multi-degree-of-freedom structures with sliding supports", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 19, 1990.

-
- [10] S. Nagarajaiah, A.M. Reinhorn and M.C. Constantinou, "3D-Basis: Nonlinear Dynamic Analysis of Three-Dimensional Base Isolated Structures: Part II", Technical Report NCEEER-91-0005, Nation Center For Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 1991.
- [11] M.C. Constantinou,, A. Kartoum,, A.M. Reinhorn and P. Bradford, "Sliding isolation system for bridges: Experimental study", *Earthquake Spectra*, Vol. 8, 1992.
- [12] E.L. Wilson, "An Efficient Computational Method for the Base Isolation and Energy Dissipation Analysis of Structural Systems", ATC17-1, Proceedings of the Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 1993.
- [13] W.H. Robinson, "Seismic isolation of bridges in New Zealand", Proc. of the Second U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Systems for Bridges, Japan, 1993.
- [14] G. Serino, "Passive and Active Structural Control in Earthquake Engineering", Lecture Notes of TEMPUS JEP 3008 intensive course, Ljubljana, 1995.
- [15] Anil K. Chopra, "Dynamics of structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, 1995.
- [16] M. Pasquino, A. Santini & I. Calì, "A parametric study for the dynamic response control of adjacent buildings", XI World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, 23-28 giugno 1996, Elsevier, Amsterdam, Paper No 1267.
- [17] J.M. Kelly, "Earthquake Design with Rubber", Springer-Verlag, Inc, N.Y., 1997.
- [18] ICBO – International Conference of Building Officials, "Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures – Appendix Chapter 16", Uniform Building Code, Whittier, CA, 1997.

-
- [19] F. Naeim, J.M. Kelly, "Design of Seismic Isolated Structures", Wiley & Sons, N.Y., 1999.
- [20] A. De Luca, G. Faella, F. Portioli, "Modellazione di dispositivi elastomerici ad alto smorzamento", PRIN '97, Atti del Convegno "Protezione sismica dell'edilizia esistente e di nuova edificazione attraverso sistemi innovativi", Final Workshop, Napoli, 2000.
- [21] R.S. Jangid, J.M. Kelly, "Base isolation for near-fault motions", Earthquake Engineering & Structural Dynamics Volume 30 Issue 5, 2001.
- [22] F. Paolacci, G. Serino, "Optimal design of passive energy dissipation systems for seismic protection of concrete bridges", Fifth World Conference on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Rome, 2001.
- [23] F. Braga, M. Laterza, "Differenti Tecniche Di Isolamento Alla Base: Il Sistema Misto Scivolatori/Isolatori Elastomerici della Struttura Sperimentale di Rapolla", Italian National Congress A.N.I.D.I.S. "L'ingegneria Sismica in Italia", 2001.
- [24] FIP Industriale, "Sistemi di protezione sismica delle strutture", Nota Tecnica 1566, 2002.
- [25] S.K. Park, S.W. Cho, I.W. Lee, "A Comparative Study on Aseismic Performances of Base Isolation Systems for Multi-Span Bridge", ASCE's First Virtual World Congress for Civil Engineering, 2002.
- [26] C.S. Tsai, T.-C. Chiang, B.-J. Chen And S.-B. Lin., "An advanced analytical model for high damping rubber bearings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32, (pp. 1373-1387), 2003.
- [27] V.A. Matsagar, R.S. Jangid, "Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures", Engineering Structures, Vol. 25, Issue 10, (pp. 1311-1323), 2003.
- [28] G.C. Giuliani, "Applicazione dell'isolamento sismico ad un centro commerciale in Nicosia (Cipro)", GLISnews 1-2004.

-
- [29] M. Abe, J. Yoshida, Y. Fujino, “Multiaxial Behaviors of Laminated Rubber Bearings and Their Modeling. II: Modeling”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130:8, (pp. 1133-1144), 2004.
- [30] M. Dolce, D. Cardone, F.C. Ponzio, A. Di Cesare, “Progetto di edifici con isolamento sismico”, IUSS Press, Pavia, 2004.
- [31] S.K. Park and K.B. Han, “Effects of seismic isolation bearing with sliding mechanism on the response of bridge”, *Materials and Structures / Materiaux et Constructions*, Vol. 37, 2004.
- [32] G.M. Calvi, B. Kawashima, M.J. Kowalsky, C. Nuti, P.E. Pinto, M. Rodriguez, A. Pecker, M.J.N. Priestley, “Design for enhanced control of damage” - 5th meeting of fib TG 7.4, Pavia, 2005.
- [33] Clarence W. de Silva, “Vibration and Shock Handbook”, *Mechanical Engineering Series*, CRC Press - Taylor & Francis Group, 2005.
- [34] CSI, SAP2000 Advanced, “Structural Analysis Programs, Theoretical and Users Manual”, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, 2005.
- [35] Federico M. Mazzolani, “Innovative Steel Structures for Seismic Protection of Building” – PRIN 2001, ed. Polimetrica Publisher, 2006.
- [36] S. Sorace, G. Terenzi, L. Bandini, “Le potenzialità della fast non linear analysis nell’analisi dinamica non lineare di strutture dotate di sistemi avanzati di protezione sismica”, GIMC, 2006.
- [37] D.M. Fenz and M.C. Constantinou, “Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006.
- [38] Federico M. Mazzolani, “Innovative steel structures for seismic protection of new and existing buildings: design criteria and methodologies” – PRIN 2003, ed. Polimetrica Publisher, 2007.
- [39] D. Cancellara, F. Fabbrocino, “Consideration on the linear and nonlinear models of HDRB devices for base isolated multistory frames”, XVIII Italian Conference of Theoretic and Applied Mechanics - AIMETA, Brescia, 2007.

-
- [40] D. Cancellara, M. Pasquino, “Valutazioni sull’incrudimento di isolatori HDRB per edifici isolati alla base”, XXXVI Convegno Nazionale - Associazione Italiana per l’Analisi delle Sollecitazioni - AIAS - Ischia, 2007.
- [41] A. Santini, P. Clemente, M. Ghafory-Ashtiany, “Seismic rehabilitation of the Iran Bastan Museum”, Proc., Fifth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, SEE5, IEES, Tehran, 2007.
- [42] F.Y. Cheng, H. Jiang, K. Lou, “Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control”, CRC Press, 2008.
- [43] F. Perotti, L. Corradi dell’Acqua, G. Forasassi, R. Lo Frano, M. Forni, S. Monti, P. Contri, “Problematiche strutturali negli impianti nucleari”, 21° Secolo Scienza e Tecnologia, n.3, Settembre 2009.
- [44] A. Martelli, “Development and application of innovative anti-seismic system for the seismic protection of cultural heritage”, Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09, Taylor & Francis Group, London, 2009.
- [45] D. Cancellara, M. Pasquino, “Performance Based Seismic Design, secondo l’EC8 di un edificio a Base Fissa e a Base Isolata”, Ingegneria Sismica, Anno XXVI, n.2, Patron editore – Bologna, 2009.
- [46] A.R. Bhuiyan, Y. Okui, H. Mitamura, T. Imai, “A rheology model of high damping rubber bearings for seismic analysis: Identification of nonlinear viscosity”, International Journal of Solids and Structures 46 (pp.1778–1792), 2009.
- [47] P. Clemente, A. Santini, M. Ghafory-Ashtiany, “The proposed isolation system for the Iran Bastan Museum”, Protection of Historical Buildings, PROHITECH 09, Taylor & Francis Group, London, 2009.
- [48] L. Corradi dell’Acqua, F. Perotti, G. Bianchi, D. Mantegazza, M. Domaneschi, “HDRB isolating devices: criteria for FE modeling and failure characterization”, CIRTEN-POLIMI RL 1137, Milano, 2010.
- [49] D. Cancellara, L. Tascino & M. Pasquino, “Analisi comparativa delle prestazioni sismiche di un edificio in c.a. isolato alla base mediante

differenti sistemi d'isolamento", XXXIX Convegno Nazionale - Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni - AIAS - Maratea, 2010.

- [50] D. Cancellara, M. Pasquino, "Edificio in c.a. con sistema di isolamento misto alla base (HDRB & FS in parallelo): analisi dinamiche lineari e non lineari a confronto", Ingegneria Sismica, Anno XXVII, n.3, Patron editore – Bologna, 2010.

