



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

Modellazione e analisi di isolatori a pendolo per ponti isolati Modelling of friction pendulum devices for isolated bridges

Relatore: Prof. Ing. Claudio Modena
Correlatore: Ing. Giovanni Tecchio
Correlatore: Ing. Alberto Dusi

Laureando: Alberto Candeo

Matricola: 1035828

Anno Accademico: 2013 - 2014

Indice Capitoli

PREMESSA	11
1 I vantaggi dell'isolamento sismico	12
2 Principi dell'isolamento sismico.....	14
3 Esempi di isolamento sismico	15
3.1 Nell'antichità	15
3.2 All'inizio dell'epoca moderna	16
3.3 Progressi recenti.....	17
4 Principali tipologie di dispositivi antisismici	20
4.1 Isolatori.....	20
4.1.1 Isolatori elastomerici	20
4.1.2 Isolatori elastomerici con nucleo in piombo	22
4.1.3 Isolatori a scorrimento a superficie curva.....	23
4.1.4 Isolatori a scorrimento a superficie piana con dissipatori	24
4.2 Dissipatori.....	25
4.2.1 Dispositivi dipendenti dalla velocità.....	25
4.2.1.1 Dispositivi viscosi.....	25
4.2.1.2 Dispositivi viscosi ricentranti.....	26
4.2.2 Dispositivi dipendenti dallo spostamento.....	27
4.2.2.1 Dispositivi isteretici in acciaio	27
4.2.2.2 Dispositivi in lega a memoria di forma	28
4.2.2.3 Dispositivi viscoelastici elastomerici	29
5 Normativa di riferimento.....	31
5.1 Cenni sulle indicazioni contenute nella normativa	31
6 Caratteristiche dei dispositivi a scorrimento	34
7 Modellazione numerica del sistema pila-isolatore	39
7.1 Programma utilizzato	39
7.2 Range parametri scelti per l'analisi	39
7.3 Descrizione modello pila-isolatore	40
7.4 Accelerogrammi di INPUT	40

7.5 Approfondimento sui limiti da normativa per i dispositivi a scorrimento	42
7.6 Descrizione e risultati dell'Analisi Lineare Equivalente.....	46
7.7 Risultati modello bilineare	49
7.8 Risultati Modello Friction Pendulum.....	57
7.8.1 Risultati modello FP senza variazione del coefficiente d'attrito.....	59
7.8.2 Influenza della velocità e della pressione sul coefficiente d'attrito	61
7.8.2.1 La teoria dell'attrito	61
7.8.2.2 Leggi sulla variazione del coefficiente di attrito rispetto alla pressione e alla velocità 64	
7.8.3 Modello di attrito in opensees	67
7.8.4 Parametri considerati nel modello.....	67
7.8.5 Risultati modello FP con variazione del coefficiente d'attrito	70
7.9 Conclusioni sul modello pila-isolatore	76
8 Modellazione numerica del sistema ponte isolato	78
8.1 Descrizione modello	78
8.2 Caratteristiche delle combinazioni scelte	81
8.3 Risultato analisi lineare equivalente	82
8.3.1 Calcolo caratteristiche limite per gli isolatori	82
8.3.2 Risultato dell'analisi lineare equivalente per il LBDP	83
8.4 Risultato analisi time history	87
9 Conclusioni modello ponte isolato	94
APPENDICE	95

Indice Figure

Figura 1.1:Principio Isolamento	12
Figura 2.1:Effetto Allungamento del periodo proprio di vibrazione	14
Figura 2.2:Effetto maggiorazione smorzamento	14
Figura 4.1:Categorie di dispositivi antisismici	20
Figura 4.2:Isolatore elastomerico	21
Figura 4.3:Tipico diagramma isteretico di un isolatore elastomerico ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente	21
Figura 4.4:Isolatore elastomerico con nucleo in piombo	22
Figura 4.5:Tipico diagramma isteretico di un isolatore elastomerico con nucleo in piombo ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente	22
Figura 4.6:Isolatore a scorrimento a superficie curva	23
Figura 4.7:Cicli isteretici sperimentali di un isolatore a scorrimento in una prova a velocità costante	23
Figura 4.8:Isolatore a scorrimento a superficie piana con dissipatori.....	24
Figura 4.9:Cicli isteretici sperimentali di un isolatore a superficie piana con dissipatori isteretici in acciaio	24
Figura 4.10:Prova su un dissipatore viscoso presso il laboratorio FIP	25
Figura 4.11:Cicli isteretici sperimentali di un isolatore a superficie piana con dissipatori isteretici in acciaio	26
Figura 4.12:Un dissipatore viscoso ricentrante installato	26
Figura 4.13:Cicli isteretici sperimentali di un dissipatore viscoso ricentrante senza forza di precarico	27
Figura 4.13:Dissipatori installati nella scuola Cappuccini a Ramacca (CT)	28
Figura 4.14:Cicli isteretici sperimentali di un dissipatore isteretico in acciaio con elementi a falce di luna	28
Figura 4.15:Dispositivi installati nella Basilica di San Francesco ad Assisi	29
Figura 4.16:Curva sperimentale forza-spostamento di un dispositivo in lega a memoria di forma	29
Figura 4.17:Un dissipatore installato nella scuola Gentile-Fermi di Fabriano	30
Figura 4.18:Cicli isteretici sperimentali di un dissipatore viscoelastico (frequenza 0.5 Hz, deformazione di taglio 100 %).....	30
Figura 6.1:Spaccato di un isolatore a scorrimento a singola superficie curva	34

Figura 6.2:Spaccato di un isolatore a scorrimento a doppia superficie curva.....	35
Figura 6.3:Diagramma isteretico rappresentato con una curva bilineare.....	38
Figura 7.1:Estratto dal programma che descrive i cicli esterni	39
Figura 7.2:Rappresentazione del modello pila-isolatore e parametri base	40
Figura 7.3:Spettro di riferimento orizzontale	41
Figura 7.4:Set di accelerogrammi orizzontali.....	41
Figura 7.5:Spettro di riferimento verticale	42
Figura 7.6:Set di accelerogrammi verticali.....	42
Figura 7.7:Rappresentazione limite 1	43
Figura 7.8:Rappresentazione limite 4	45
Figura 7.9:Estratto dal programma che rappresenta il calcolo dei parametri base del link rappresentante l'isolatore.....	49
Figura 7.10:Variazione dei diagrammi isteretici per le combinazioni scelte	50
Figura 7.11:Risultati Analisi Time History per la combinazione "R1000 – f2.5"	51
Figura 7.12:Rappresentazione spostamenti per le varie combinazioni	52
Figura 7.13:Rappresentazione errore medio per le varie combinazioni	53
Figura 7.15:Confronto spostamenti ed errori ALE THA(BL)	54
Figura 7.16:Relazione tra " ξ " e l'errore per la serie R1000	55
Figura 7.17:Relazione tra " ξ " e l'errore per la serie R2000	55
Figura 7.18:Relazione tra " ξ " e l'errore per la serie R3000	56
Figura 7.19:Relazione tra " ξ " e l'errore per la serie R4000	56
Figura 7.20:Riassunto risultati per tutte le serie con coefficiente d'attrito esteso.....	57
Figura 7.21:Estratto dal sito di Opensees con la descrizione dell'elemento Friction Pendulum .	58
Figura 7.22:Estratto dal sito di Opensees con la descrizione delle possibili leggi di attrito	58
Figura 7.23:Confronto modello BL e FP per la combinazione "R1000-f2.5"	60
Figura 7.24:Andamento errore tra i modelli BL e FP al variare del coefficiente di smorzamento viscoso	61
Figura 7.25:Risposta attrito di interfaccia Teflon-acciaio (pressione di confinamento di 30MPa) a diverse frequenze di carico (Bondonet e Filiatrault, 1997).....	63
Figura 7.26:Variazioni del coefficiente di attrito di primo distacco (a sinistra) e dinamico (a destra) con velocità massima assoluta (Bondonet e Filiatrault, 1997)	63

Figura 7.27:Variazioni del coefficiente d'attrito di primo distacco (a sinistra) e dinamico (a destra) coefficienti rispetto alla variazione della pressione di confinamento (Bondonet e Filiatrault, 1997)	63
Figura 7.28:Dipendenza di “ $1 / \mu$ ” rispetto alla pressione durante lo scorrimento (Constantinou et al.,1999).....	64
Figura 7.29:Coefficiente di attrito tra superfici PTFE e acciaio inox lucidato al variare della velocità e del carico normale	65
Figura 7.30:Effetto del parametro velocità e del rapporto f_{max} / f_{min}	65
Figura 7.31:Effetto della velocità e della pressione su " μ " di Teflon non trattato (a destra), e nel valore f_{max} del Teflon trattato con fibra di vetro (Constantinou et al., 1999)	66
Figura 7.32:Effetto della pressione su " f_{max} " di Teflon (Constantinou et al., 1994)	66
Figura 7.33:Descrizione modello di attrito in Opensees.....	67
Figura 7.34:Andamento coefficiente d’attrito per i valori scelti per l’analisi a variare della velocità	68
Figura 7.35: Andamento tipico della velocità per un evento sismico.....	69
Figura 7.36: Determinazione area di contatto.....	69
Figura 7.37:Andamento coefficiente d’attrito per i valori scelti per l’analisi a variare della pressione	70
Figura 7.38:Estratto dal programma contenente le definizioni delle 3 leggi di variazioni di attrito assunte per i vari casi considerati	70
Figura 7.39:Confronto diagrammi isteretici per i vari modelli FP per una accelerazione e una combinazione	71
Figura 7.40:Confronto spostamenti per i vari modelli FP per una accelerazione e una combinazione	71
Figura 7.41:Andamento differenza tra il modello con e senza accelerazione verticale al variare del coefficiente di smorzamento viscoso	72
Figura 7.42:Confronto grafico risultati ottenuti tra i modelli FP e BL.....	73
Figura 7.43:Andamento differenza BL e FP al variare dello smorzamento viscoso equivalente .	74
Figura 7.44:Confronto spostamenti medi tra i modelli FP con e senza variazione del coefficiente di attrito.....	75
Figura 7.45:Confronto grafico risultati ottenuti tra i modelli FP(VertPresVel) e BL.....	75
Figura 7.46:Andamento differenza BL e FP(VertPresVel) al variare dello smorzamento viscoso equivalente.....	76

Figura 8.1:Rappresentazione schematica modello ponte	78
Figura 8.2:Estratto dal programma che descrive i cicli esterni.....	79
Figura 8.3:Rappresentazione sezione impalcato in acciaio	79
Figura 8.4:definizione elementi FP nello script del programma.....	81
Figura 8.5:Diagrammi isteretici per la combinazione 111 e tutti i 7 accelerogrammi	88
Figura 8.6:Diagrammi isteretici per l'accelerogramma 1 e tutte le 5 combinazioni considerate ..	88
Figura 8.7:Andamento degli spostamenti per l'accelerogramma 1 e le 5 combinazioni considerate	89
Figura 8.8:Confronto spostamenti analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila centrale.....	90
Figura 8.9:Confronto forze analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila centrale ..	90
Figura 8.10:Confronto spostamenti analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila laterale.....	91
Figura 8.11:Confronto forze analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila laterale .	92

Indice Equazioni

Equazione 2.1:Pulsazione e periodo di vibrazione.....	14
Equazione 4.1:Legge dispositivo viscoso.....	25
Equazione 4.2:Legge dispositivo viscoso ricentrante.....	26
Formula 6.1:Rigidzza equivalente e smorzamento viscoso equivalente	37
Formula 7.1:Limite 1.....	43
Formula 7.2:Limite 1 coefficiente smorzamento viscoso equivalente	43
Formula 7.3:Limite 3.....	44
Formula 7.4:Limite 4.....	45
Formula 7.5:Spostamento secondo Eurocodice per $T_{eff} < T_D$	47
Formula 7.5:Spostamento secondo Eurocodice per $T_{eff} > T_D$	47
Formula 7.6:Errore medio tra spostamento "ALE" e "THA"	53
Formula 7.7:Relazione tra il coefficiente d'attrito e la velocità di scorrimento	65
Formula 7.8:Relazione tra il coefficiente d'attrito massimo e la pressione	66
Formula 7.9:Parametri assunti per il modello per la legge attrito-velocità.....	68
Formula 7.10:Parametri assunti per il modello per la legge attrito-pressione.....	69

Indice Tabelle

Tabella 5.1:Prescrizioni da normativa per i dispositivi.....	32
Tabella 5.2:Limiti da normativa per una analisi semplificata ad un ponte isolato	33
Tabella 6.1:Valori minimi del coefficiente d'attrito	36
Tabella 7.1:Riassunto limiti per le combinazioni scelte	46
Tabella 7.2:Parametri previsti da Eurocodice per gli spettri di tipo 1	47
Tabella 7.3:Risultati Analisi Lineare Equivalente per la combinazione f:2.5% - R:1000 mm.....	48
Tabella 7.4:Riassunto risultati Analisi Lineare Equivalente per le 16 combinazioni	49
Tabella 7.5:Riassunto risultati confronto analisi lineare equivalente e modello bilineare	52
Tabella 7.5:Riassunto risultati confronto ALE e risultati THA per modello BL e modello FP	60
Tabella 7.6:Confronto dati tra i due modelli con e senza accelerazione verticale	72
Tabella 7.7:Confronto dati ottenuti dai modelli FP per i 3 accelerogrammi verticali.....	73
Tabella 7.8:Confronto dati ottenuti tra i modelli FP con e senza variazione del coefficiente di attrito.....	74
Tabella 7.9:Confronto dati spostamento per 3 accelerogrammi verticali diversi	75
Tabella 8.1:Combinazioni scelte e limiti da normativa	81
Tabella 8.2:Risultati analisi lineare equivalente per il limite inferiore e superiore	86
Tabella 8.2:Risultati analisi lineare equivalente per il valore nominale del coefficiente di attrito	87
Tabella 8.3:Risultati in forza e spostamento per il dispositivo sulla pila centrale	90
Tabella 8.3:Risultati in forza e spostamento per il dispositivo sulla pila laterale	91
Tabella 8.3:Differenze percentuali in forza e spostamento per il dispositivo sulla pila centrale e laterale.....	93

PREMESSA

Il presente studio ha l'obiettivo di indagare il comportamento dei dispositivi di isolamento sismico a pendolo al variare delle caratteristiche geometriche principali che ne modificano il comportamento.

In particolare si vuole per prima cosa valutare l'attendibilità di una analisi lineare semplificata per schematizzarne il comportamento durante un evento sismico e confrontarne i risultati con una serie di analisi dinamiche non lineari. Sono stati presi in considerazione prima alcuni possibili set di dispositivi con caratteristiche geometriche selezionate all'interno di un range di valori commerciali e se ne è studiato il comportamento e i possibili limiti nella modellazione. Poi, selezionato un dispositivo, se ne è studiato il comportamento nell'applicazione quale sistema di isolamento per un set di ponti con caratteristiche geometriche differenti; per verificare l'influenza del parametro geometrico prescelto nella risposta sismica del sistema d'isolamento valutato sempre mediante un confronto tra i risultati ottenuti da analisi dinamiche e l'analisi lineare equivalente.

1 I vantaggi dell'isolamento sismico

Il principio dell'isolamento sismico consiste nell'intervenire impedendo che buona parte della sollecitazione trasmessa dal terreno porti oltre il limite di resistenza gli elementi componenti la struttura. La figura di seguito nella sua semplicità illustra al meglio il principio base dell'isolamento.



Figura 1.1: Principio Isolamento

L'isolamento come metodo di difesa dall'azione sismica può offrire numerosi vantaggi, alcuni dei quali sono di seguito descritti:

- I danni strutturali sono limitati e possono essere concentrati ai dispositivi con maggior capacità dissipative e di resistenza.
- I danni ai servizi ed alle strutture secondarie interne risultano di scarso interesse rispetto a quelli che avrebbero influenzato le perdite causate agli impianti del gas e delle acque reflue di una struttura non isolata. L'isolamento alla base limiterà le deformazioni plastiche degli elementi strutturali garantendo che la sovrastruttura manifesti un comportamento elastico all'inizio e durante le sollecitazioni sismiche trasmesse dal terreno.

- I danni secondari e le lesioni causate dalla caduta di mobili risulterebbero limitate. In altre parole il livello di sicurezza aumenta significativamente quando l'edificio è progettato con un sistema di isolamento alla base rispetto ai sistemi convenzionali;
- Non subendo danni considerevoli la sovrastruttura può garantire un livello di operatività che può risultare essenziale per gli edifici con interesse strategico quali caserme, ospedali e locali di rifugio.
- Per gli edifici progettati in zone ad alto rischio sismico l'utilizzo di sistemi di isolamento permette un risparmio di materiale quale acciaio d'armatura con un vantaggio economico notevole.

2 Principi dell'isolamento sismico

In generale, le tecniche di isolamento alla base seguono due approcci. In primo luogo, il sistema di isolamento introduce un collegamento di bassa rigidità laterale tra la struttura e la fondazione. Questo collegamento garantisce alla struttura un periodo naturale che è molto più lungo rispetto al suo periodo naturale a base fissa.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Equazione 2.1:Pulsazione e periodo di vibrazione

Dove “ ω ” rappresenta la frequenza di vibrazione e con “ m ” e “ k ” sono indicati rispettivamente la masse e la rigidezza laterale della struttura.

Il periodo di vibrazione naturale della struttura “ T ” aumenta al diminuire della rigidezza laterale. Come mostrato dallo spettro di progetto elastico in *figura 2.1*, questo allungamento del periodo può ridurre l'accelerazione e quindi le forze sismiche indotte alla struttura, ma al contrario porta ad un aumento delle deformazioni. La maggior parte di queste tuttavia è concentrata nel sistema d'isolamento che risulta essere l'unico elemento da tenere sotto controllo.

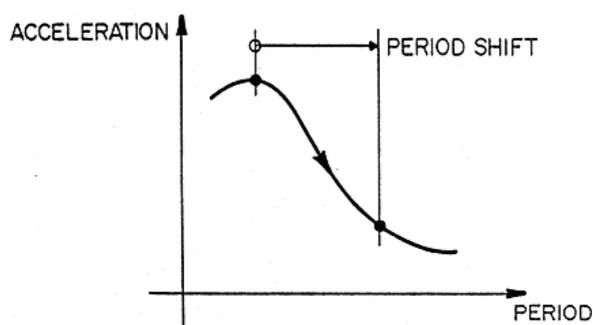


Figura 2.1:Effetto Allungamento del periodo proprio di vibrazione

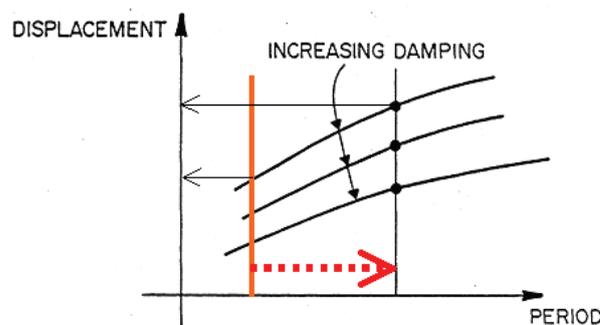


Figura 2.2:Effetto maggiorazione smorzamento

La capacità di smorzamento intrinseca nell'isolatore è utile per ridurre le forze agenti sulla sovrastruttura e le deformazioni sul sistema d'isolamento. Il sistema più comune di questo tipo è rappresentato da elementi elastomerici, quali dispositivi di gomma naturale semplici, o con nucleo irrigidente in piombo o composti da gomme ad elevato potere di smorzamento; negli ultimi anni sono stati sviluppati molti dispositivi che sfruttano diversi principi o le proprietà intrinseche nei materiali.

3 Esempi di isolamento sismico

Storicamente risulta essere una delle più grandi sfide per i ricercatori quella di raggiungere un livello di progettazione che possa essere garanzia di sicurezza per gli occupanti in caso di disastri naturali; quali i terremoti.

Molti sforzi sono stati fatti in passato per trovare le migliori soluzioni capaci a resistere a eventi catastrofici.

3.1 Nell'antichità

In primo luogo si trovano testimonianze rinvenute in alcuni edifici storici in regioni sismicamente attive del mondo, dove utilizzando multi-strati di pietre si riusciva a creare una sorta di cuscinetto sotto l'edificio in modo da isolarlo e proteggerlo dalle sollecitazioni generate dall'evento sismico.

Si possono trovare esempi sensibili in alcuni dei monumenti della capitale dell'antica Persia, che risalgono ad almeno 2500 anni fa e sono arrivati senza danni sismici fino ad oggi. Un altro esempio di questo tipo si trova nei muri a secco del Tempio del Sole a Machu Pichu in Perù (risale al 15 ° secolo).

In Europa, la comprensione dei concetti di isolamento sismico è giunto dopo parecchie centinaia di anni. Ad esempio, lo storico romano "Gaio Plinio Secondo" ha scritto nel I secolo dc, circa un esempio di magnificenza greca degna di vera meraviglia: il tempio di Diana a Efeso che ha richiesto 120 anni per essere costruito; tale tempio è stato eretto in una zona paludosa in modo che non ci fosse la paura di terremoti o crepe nel suolo, e per evitare fondare un tale monumento sul suolo scivoloso e instabile uno strato di scaglie di carbone e uno strato di velli di lana sono state poste sotto.

Altri tipi di primi sistemi di protezione erano costituiti da uno schema di travi a sezione circolare in legno disposte parallele tra la struttura leggera e il piano di fondazione.

In Giappone, un tempio di cinque piani che risale al dodicesimo secolo è noto per mostrare l'adozione di un sistema di controllo passivo che gli garantiva un lungo periodo di vibrazione grazie allo smorzamento viscoso delle sue cornici di legno e alla particolare conformazione delle colonne centrali (Izumi, 1988). L'ex palazzo imperiale a Pechino, in Cina, è un altro esempio di una sorta di sistema di isolamento alla base; perché la sua fondazione posa su uno strato composto da riso glutinoso bollito e calce, così da garantire un alta viscosità e capacità di smorzamento.

3.2 All'inizio dell'epoca moderna

Proseguendo nella lista dei tentativi di limitare gli effetti di grandi terremoti in modi univoci e diversi, come ad esempio il disaccoppiamento della struttura dalla sua base, è stato evidenziato da alcune applicazioni nel tardo 19° secolo. Uno dei primi in questo senso è il brevetto di Jules Touaillon di San Francisco depositato presso l'Ufficio Brevetti degli Stati Uniti nel febbraio 1870.

Esso descrive un "Edificio a prova di terremoto", che è disposto su un letto di sfere d'acciaio che rotolano dentro dei piatti; purtroppo poche di queste prime proposte sono state costruite, molto probabilmente a causa della loro impraticabilità e della mancanza di entusiasmo da parte dei costruttori dell'epoca.

Vent'anni dopo, nel 1891, una struttura con isolamento alla base è stata proposta da Kawai dopo il terremoto di Nobi in Giappone sul "Journal of Architecture and Building Science"; la sua struttura disponeva di rulli disposti a interasse predefinito e lungo le due direzioni, che permettevano di formare una superficie di scorrimento tra la sovrastruttura ed il piano di fondazione.

Nel 20° secolo, una proposta simile è stata fatta in Italia nel 1909 dalla Commissione a cui era stato dato il compito di formulare proposte per la ricostruzione della zona distrutta dal terremoto di Messina del 1908. Questa proposta consisteva nell'interposizione di rotoli di materiali o strati di sabbia tra la base della struttura e la terra.

Dopo il grande terremoto di Kanto del 1923, sono stati presentati numerosi brevetti in Giappone; tra queste da notare la proposta di doppia colonna con smorzatore di Nakamura.

Nel 1927 Nakamura ha proposto un sistema che consisteva in diverse colonne infisse per una profondità di 15 metri sotto al solaio del piano terra e installando degli ammortizzatori in corrispondenza dei punti di giunzione tra il solaio del piano terra e queste colonne.

Ha chiamato il suo progetto "Double Column and Dampers". Un anno dopo, nel 1928, Oka ne ha proposto e progettato un particolare tipo per gli edifici della Banca di Fuco in Giappone. Tuttavia, alcuni dei modelli di isolamento alla base hanno avuto, quanto a spostamenti ed accelerazioni, risposte più grandi di strutture ordinarie testati con test sismici artificiali.

Nel 1930 l'idea della colonna del primo piano flessibile è stata proposta da Martel 1929, Green 1935, Jacobsen 1938. Uno dei pionieri di questo progetto è stato R. R. Martel negli U.S.A.

Questa idea sembrava essere impraticabile a causa del cedimento delle colonne che riduce enormemente il massimo carico di punta. Un esempio reale è l'ospedale "Olive View" in California che è stato danneggiato irreparabilmente solo un anno dopo la costruzione durante il terremoto di San Fernando nel 1971 (FEMA 451B, 2007). Durante la seconda guerra mondiale e negli anni subito seguenti non è stato segnalato alcun progresso nel concetto di isolamento alla base.

Nel 1968 un edificio in Macedonia è stato costruito sopra dei blocchi di gomma dura. Poco dopo, nel 1969 una scuola elementare in Jugoslavia è stata eretta su dei cuscinetti di gomma come un isolamento alla base per il forte rischio sismico. Il primo sistema di cuscinetti in gomma rinforzati da strati di lamine d'acciaio è stato sviluppato allo stesso tempo in Giappone. Durante quel periodo il concetto di isolamento alla base con l'utilizzo di cuscinetti in gomma stava diventando sempre più una soluzione comune per ingegneri e costruttori. Una progressiva ricerca ha portato all'invenzione di un nuovo tipo di cuscinetto denominato "Lead Rubber Bearing" (LRB) nel 1970. Il LRB permise di ovviare alla mancanza di forza di ri-centraggio e smorzamento fornito dal semplice cuscinetto di gomma, ma non completamente. Questi tipi di cuscinetto erano rigidi sotto carichi verticali e molto flessibili in presenza di carichi laterali. Nei primi anni 1980 gli sviluppi della tecnologia applicata alle gomme ha portato a nuove mescole di gomma che sono state chiamate "High Damping Rubber" (HDR).

Il "Friction Pendulum System" (FPS), introdotto da Zayas nel 1986, è un altro tipo di sistema di isolamento alla base che utilizza principio dell'attrito per spostare tra 2 superfici che scorrono l'una sull'altra per spostare il periodo fondamentale della struttura verso valori più alti e quindi lontani dall'intervallo di periodo che caratterizza la componente più distruttiva dell'impulso sismico.

Il FPS è costituito da un cursore libero di scorrere nella direzione longitudinale e trasversale permettendo così lo spostamento relativo della sovrastruttura rispetto alle fondazioni secondo una o due superfici sferiche. Il periodo proprio del sistema è dipendente solo dal raggio di curvatura della superficie di scorrimento e l'attrito tra le due superfici permette un alto smorzamento; dissipando molta energia sotto forma di calore.

Dagli anni '90 a oggi sono stati sviluppati diversi tipi di dispositivi in grado di filtrare l'azione sismica e ridurre così gli effetti nella struttura. Questi dispositivi permettono di sfruttare la duttilità dell'acciaio e di impegnare buona parte dell'energia in entrata prodotta dal sisma nel processo di snervamento.

3.3 Progressi recenti

L'uso di LRB, HDR e sistemi FPS come tecniche di isolamento alla base hanno preso sempre più piede negli ultimi 2 decenni. Il concetto di isolamento alla base ha avuto un crescente interesse per molte aziende e gruppi di ricercatori ed ingegneri che hanno lavorato insieme per sviluppare questa idea di controllo della risposta sismica passiva.

Nel 1986 una semplice regolamentazione chiamata "Tentative Seismic Isolation Design Requirement" è stata pubblicata da un sottocomitato della "Structural Engineers Association of

Northern California" (SEAONC), che è anche conosciuto come il "Libro Giallo". Le disposizioni contenute in questo libro, insieme con le successive e riviste disposizioni nel SEAOC libro blu (SEAOC 1990,1996), ed al "Uniform Building Code" (ICBO 1991,1994, 1997) ed alle regolamentazioni del "NEHRP" (National Earthquake Hazards Reduction Program) (NEHRP 1995, 1997) hanno aperto la strada per l'espandersi dell'isolamento sismico negli Stati Uniti (ASCE, 2004).

Al giorno d'oggi, le norme globali in materia di isolamento sismico di base, sono disponibili per gli ingegneri e gli scienziati nel "IBC" (International Building Code) 2012, così come nell'ultima versione delle disposizioni "NEHRP" pubblicate dal "FEMA" (Federal Emergency Management Agency).

Attualmente, strutture importanti come edifici storici, musei, ospedali e anche edifici ufficiali negli Stati Uniti sono sempre più progettati e costruiti o adattati per mezzo delle tecniche di isolamento alla base in zone sismiche.

Il Giappone è conosciuto come una delle aree più sensibili ad eventi sismici nel mondo poiché è situato vicino ai confini di intersezione di tre placche tettoniche principali: pacifica, Eurasiatica e delle Filippine. Le isole del Giappone sono infatti il risultato di diversi grandi movimenti oceanici che si sono verificati nel corso di centinaia di milioni di anni.

Terremoti distruttivi, spesso con conseguenti tsunami, si sono verificati più volte nel secolo scorso. L'attività tettonica e vulcanica ha generato una lunga serie di terremoti in questo paese. Il Giappone ha una storia molto colorata sulla regolazione del costruire nel corso degli ultimi 100 anni.

Il "Japanese Seismic Design Code" (BSL) è stato rivisto nel 2000. Le disposizioni sismiche nel BSL sono state significativamente riviste nel 2000 per consentire l'applicazione di innovative scelte di progettazione strutturale, in particolare l'utilizzo di materiali di nuova concezione, elementi e sistemi strutturali. Il numero di strutture isolate sismicamente in Giappone sono sempre in aumento così come l'applicazione di altri sistemi di adeguamento sismico, in particolare dopo il terremoto di Kobe del 1995.

Uno dei paesi pionieri nella progettazione di isolamento sismico è la Nuova Zelanda. Il primo codice di progettazione sismica "NZSS 95" è stato pubblicato nel 1935 e la prima applicazione di un isolatore in gomma con nucleo in piombo (LRB) è stato installato nel "William Clayton Building" a Wellington, Nuova Zelanda nel 1981. Questo edificio è stato anche il primo edificio isolato alla base in Nuova Zelanda.

In Europa, l' "Eurocodice 8" ha menzionato alcuni provvedimenti in un capitolo denominato "Design of structure for earthquake resistance". Il paese europeo più soggetto ad azioni sismiche è l'Italia. Durante il periodo 1982-1992 più di un centinaio di ponti autostradali (costruzioni nuove o esistenti) sono stati dotati di sistemi d'isolamento sismico. Nel 1998 il ministero italiano del lavoro

ha emesso la prima disposizione ufficiale per la progettazione di strutture isolate sismicamente, in cui particolare attenzione è stata evidenziata sull'impiego di sistemi d'isolamento in gomma. Questo è un passo importante che ha favorito l'uso e la diffusione dell'isolamento sismico in Italia. L'ultima normativa italiana " Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni " (DM del 14 gennaio 2008) rispecchia in parte le indicazioni inserite nell'Eurocodice.

In Cina l'uso diffuso d'isolamento alla base per le abitazioni è stato impiegato solo dal 1990 con la prima normativa riguardante questa tecnologia pubblicata nel 2000. Nel capitolo 12 del "Chinese Code for Seismic Design of Buildings" (versione 2010), sono menzionate le norme per la progettazione di edifici sismicamente isolati e dotati di dissipatori di energia.

4 Principali tipologie di dispositivi antisismici

Le principali tipologie di dispositivi antisismici si possono dividere in due macro categorie:

- **ISOLATORI**: limitano le accelerazioni trasmesse alla struttura, e quindi riducono le forze inerziali mediante l'aumento del periodo di oscillazione.
- **DISSIPATORI**: dissipano parte dell'energia trasmessa alla struttura secondo la loro legge costitutiva, sulla base della quale si distinguono in due grandi famiglie, i dispositivi dipendenti dalla velocità e i dispositivi dipendenti dallo spostamento.

Nella *Figura 4.1* sono riportate le 2 macro categorie di dispositivi e le sottocategorie di cui queste sono composte.

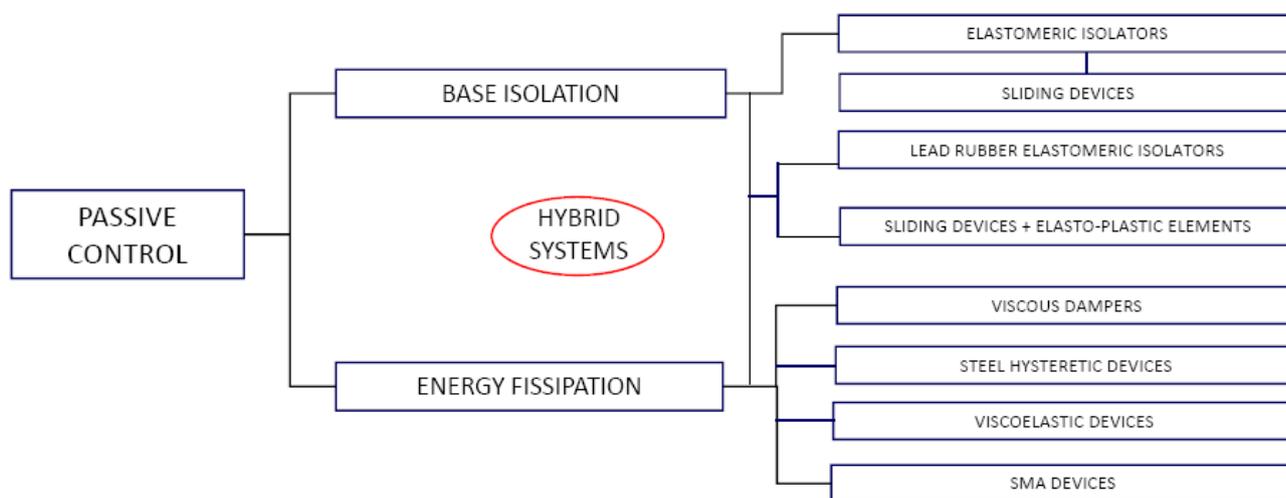


Figura 4.1: Categorie di dispositivi antisismici

4.1 Isolatori

Gli isolatori a loro volta si dividono in varie sottocategorie:

- Isolatori elastomerici;
- Isolatori elastomerici con nucleo in piombo;
- Isolatori a scorrimento a superficie curva;
- Sistemi accoppiati a scorrimento con elementi elastoplastici.

4.1.1 Isolatori elastomerici

Gli isolatori elastomerici sono dispositivi d'appoggio in elastomero armato, cioè costituiti da strati alterni di acciaio e di elastomero collegati mediante vulcanizzazione. Solitamente sono a pianta circolare, ma possono essere realizzati anche con sezione quadrata o rettangolare. Sono caratterizzati da ridotta rigidità orizzontale, elevata rigidità verticale ed opportuna capacità

dissipativa. Queste caratteristiche consentono rispettivamente di aumentare il periodo proprio della struttura, di sostenere i carichi verticali senza apprezzabili cedimenti, e di contenere lo spostamento orizzontale della struttura isolata.

I parametri progettuali fondamentali nella determinazione delle rigidità verticale ed orizzontale sono le caratteristiche geometriche degli isolatori (ad esempio le dimensioni globali, gli spessori dei singoli strati, ecc.) e le caratteristiche meccaniche dell'elastomero. La capacità dissipativa degli isolatori è invece determinata dal tipo di miscela elastomerica, che solitamente è ad alto smorzamento.

In base alla capacità dissipativa è possibile prevedere il diagramma isteretico dell'isolatore; in *Figura 4.3* è riportato un diagramma tipo.

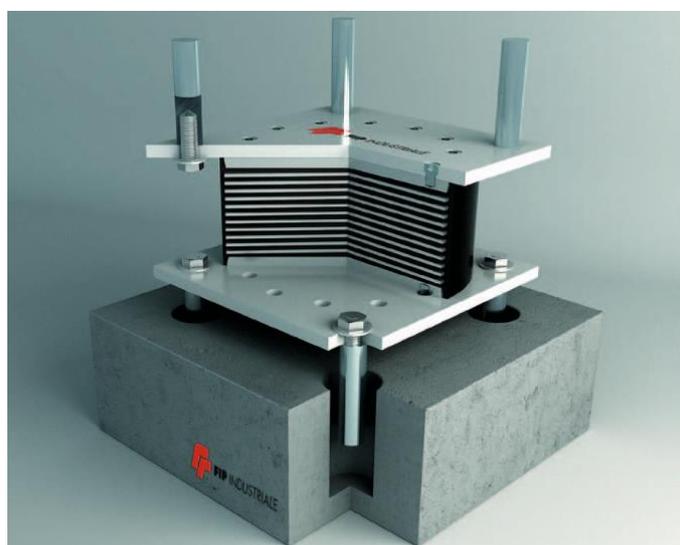


Figura 4.2: Isolatore elastomerico

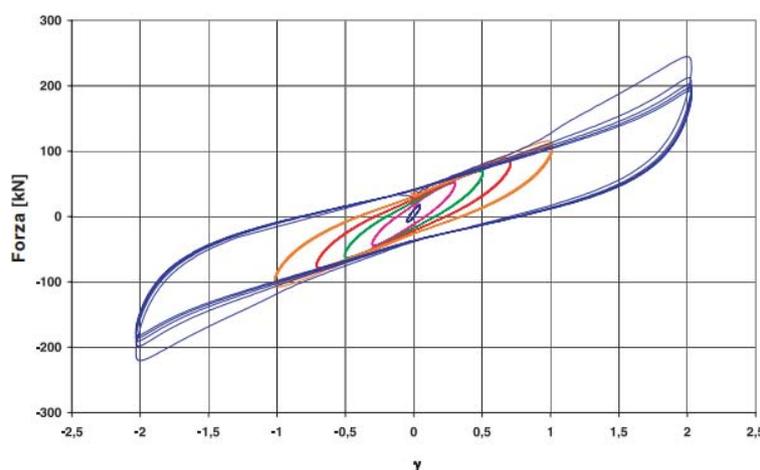


Figura 4.3: Tipico diagramma isteretico di un isolatore elastomerico ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente

4.1.2 Isolatori elastomerici con nucleo in piombo

Gli isolatori elastomerici sono dispositivi d'appoggio in elastomero armato, cioè costituiti da strati alterni di acciaio e di elastomero collegati mediante vulcanizzazione, con un nucleo centrale in piombo di forma cilindrica. La dissipazione di energia fornita dal nucleo in piombo, mediante la sua plasticizzazione, consente di ottenere un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente fino a circa il 30%, cioè il doppio rispetto a quello ottenibile con gli isolatori elastomerici ad alto smorzamento. Grazie alla elevata capacità dissipativa, si riesce a ridurre lo spostamento orizzontale rispetto a quello di un sistema d'isolamento con la stessa rigidezza equivalente ma con minore capacità dissipativa.



Figura 4.4: Isolatore elastomerico con nucleo in piombo

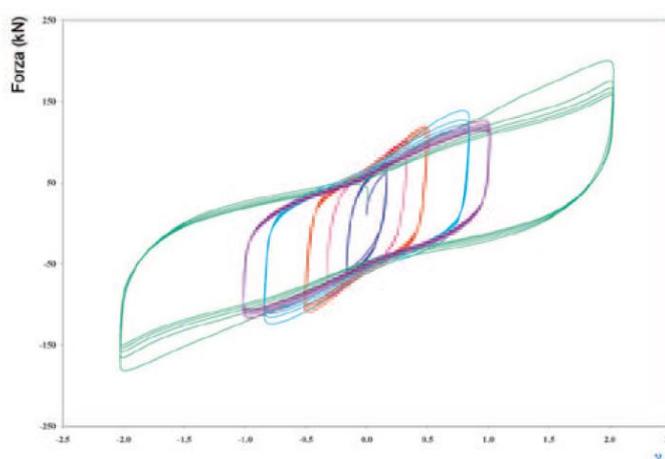


Figura 4.5: Tipico diagramma isteretico di un isolatore elastomerico con nucleo in piombo ottenuto in prove dinamiche ad ampiezza crescente

4.1.3 Isolatori a scorrimento a superficie curva

Il funzionamento degli isolatori a scorrimento a superficie curva o isolatori a pendolo scorrevole è riconducibile a quello del pendolo semplice, in cui il periodo di oscillazione non dipende dalla massa ma solo dalla lunghezza del pendolo stesso. Il periodo proprio di vibrazione di una struttura sismicamente isolata con isolatori a scorrimento a superficie curva dipende principalmente dal raggio di curvatura della superficie di scorrimento, ed è invece quasi indipendente dalla massa della struttura. La dissipazione di energia è fornita dall'attrito che si sviluppa durante lo scorrimento, e la capacità di ricentraggio è fornita dalla curvatura della superficie di scorrimento.

Possono essere realizzati in due tipologie; con una o due superfici di scorrimento primarie che consentono lo spostamento orizzontale.



Figura 4.6: Isolatore a scorrimento a superficie curva

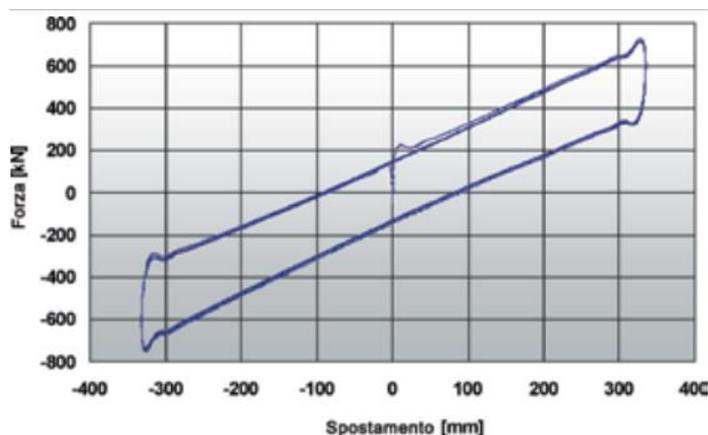


Figura 4.7: Cicli isteretici sperimentali di un isolatore a scorrimento in una prova a velocità costante

4.1.4 Isolatori a scorrimento a superficie piana con dissipatori

Questi isolatori costituiscono la combinazione in un unico dispositivo di un apparecchio d'appoggio e di dissipatori; questi ultimi sono tipicamente dissipatori isteretici in acciaio e/o dissipatori viscosi. Sono quindi caratterizzati da un'elevata capacità dissipativa. L'apparecchio di appoggio può essere multidirezionale o unidirezionale. Gli isolatori possono comprendere anche dispositivi di vincolo a fusibile meccanico.



Figura 4.8: Isolatore a scorrimento a superficie piana con dissipatori

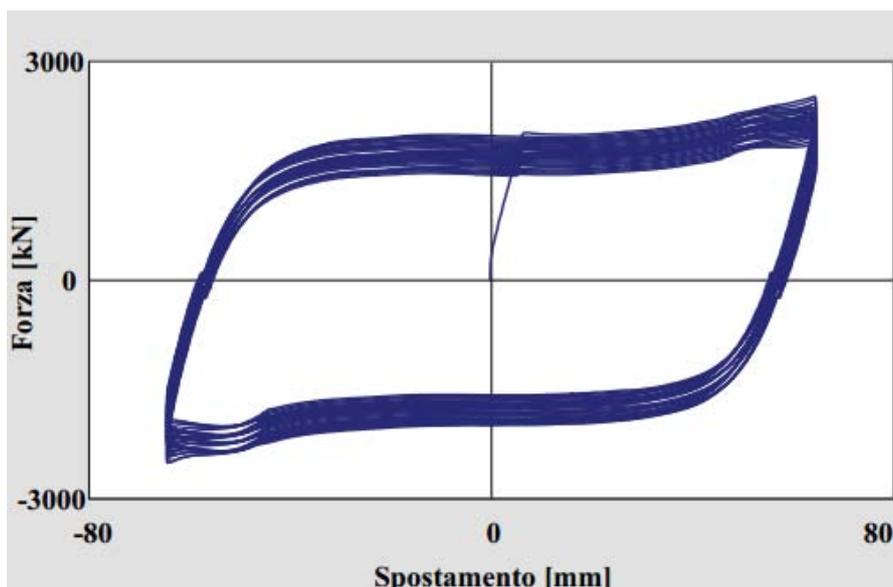


Figura 4.9: Cicli isteretici sperimentali di un isolatore a superficie piana con dissipatori isteretici in acciaio

4.2 Dissipatori

Gli isolatori a loro volta si dividono in varie sottocategorie:

- Dispositivi dipendenti dalla velocità;
- Dispositivi dipendenti dallo spostamento.

4.2.1 Dispositivi dipendenti dalla velocità

Principalmente sono evidenziabili 2 tipi principali di dispositivi viscosi con o senza capacità di ricentraggio.

4.2.1.1 Dispositivi viscosi

I dispositivi viscosi sono generalmente dispositivi cilindro/pistone in cui la laminazione di un fluido siliconico attraverso un idoneo circuito idraulico permette la dissipazione di energia. Il tipico legame costitutivo che ne risulta è non lineare, ed è espresso dalla seguente equazione, dove F =forza, C =costante di smorzamento, v =velocità, $\alpha=0.15$.

$$F = Cv^{\alpha}$$

Equazione 4.1: Legge dispositivo viscoso



Figura 4.10: Prova su un dissipatore viscoso presso il laboratorio FIP

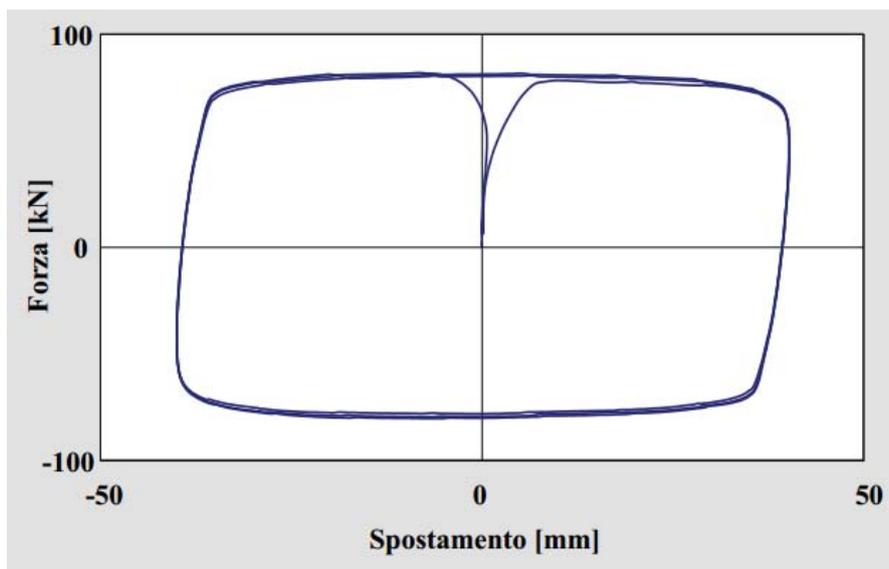


Figura 4.11: Cicli isteretici sperimentali di un isolatore a superficie piana con dissipatori isteretici in acciaio

4.2.1.2 Dispositivi viscosi ricentranti

I dissipatori viscosi ricentranti sono dispositivi cilindro/pistone caratterizzati da un legame costitutivo in cui la forza di reazione “F” dipende sia dalla velocità “v” che dallo spostamento “x”, secondo la legge seguente, dove F_0 è l'eventuale forza di precarico, K è la rigidezza, C è la costante di smorzamento e $\alpha=0.15$.

La forza di precarico può essere utile per evitare spostamenti per le azioni orizzontali di servizio.

$$F = F_0 + Kx + Cv^\alpha$$

Equazione 4.2: Legge dispositivo viscoso ricentrante



Figura 4.12: Un dissipatore viscoso ricentrante installato

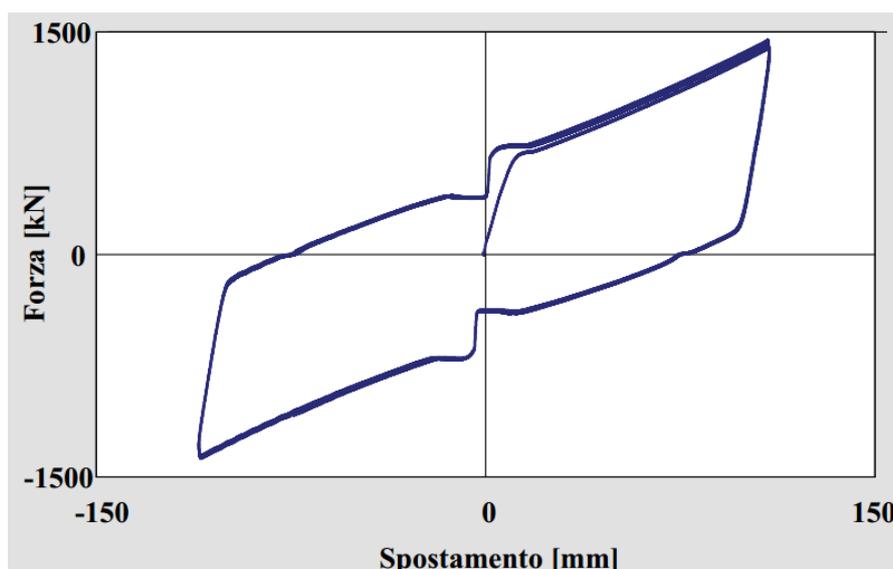


Figura 4.13: Cicli isteretici sperimentali di un dissipatore viscoso ricentrante senza forza di precarico

4.2.2 Dispositivi dipendenti dallo spostamento

Sono divisi nelle seguenti sottoclassi:

- Dissipatori isteretici in acciaio
- Dissipatori in lega a memoria di forma
- Dissipatori viscoelastici elastomerici

4.2.2.1 Dispositivi isteretici in acciaio

I dissipatori isteretici in acciaio sfruttano la plasticizzazione di elementi in acciaio di forma opportuna, progettata per garantire un comportamento ciclico stabile.

Gli elementi a falce di luna e a piolo sono i più usati per i ponti, mentre i dissipatori isteretici assiali ad instabilità impedita sono i più usati come controventi dissipativi negli edifici.

Per i ponti, i dissipatori isteretici in acciaio possono essere combinati con dispositivi di vincolo dinamico.



Figura 4.13: Dissipatori installati nella scuola Cappuccini a Ramacca (CT)

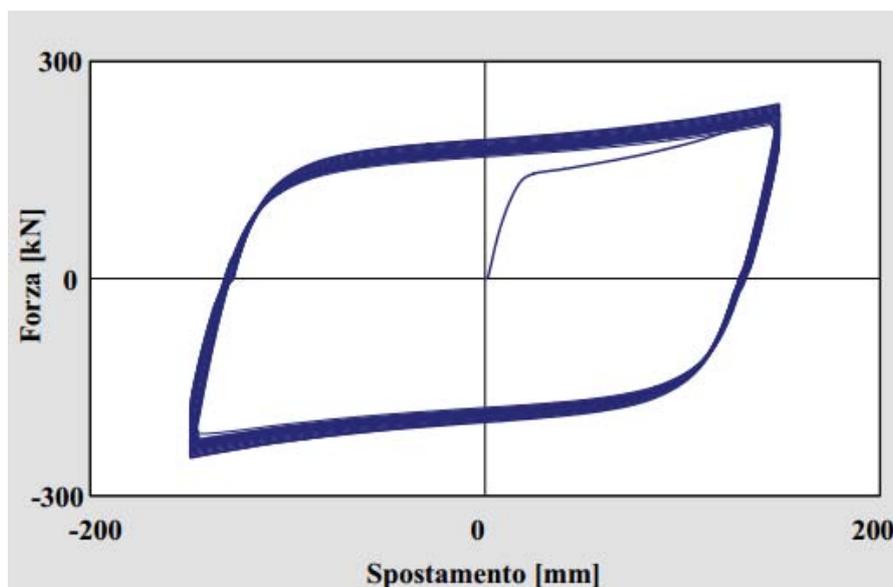


Figura 4.14: Cicli isteretici sperimentali di un dissipatore isteretico in acciaio con elementi a falce di luna

4.2.2.2 Dispositivi in lega a memoria di forma

I dispositivi in lega a memoria di forma sono dispositivi assiali di vincolo che sfruttano le proprietà superelastiche delle leghe a memoria di forma.

La curva forza-spostamento, caratterizzata da uno o più "plateaux" (tratti in cui la forza rimane pressoché costante all'aumentare dello spostamento), consente ai dispositivi di limitare la forza massima trasmessa alla struttura a cui sono connessi. Sono caratterizzati anche da un'elevata capacità ricentrante.



Figura 4.15: Dispositivi installati nella Basilica di San Francesco ad Assisi

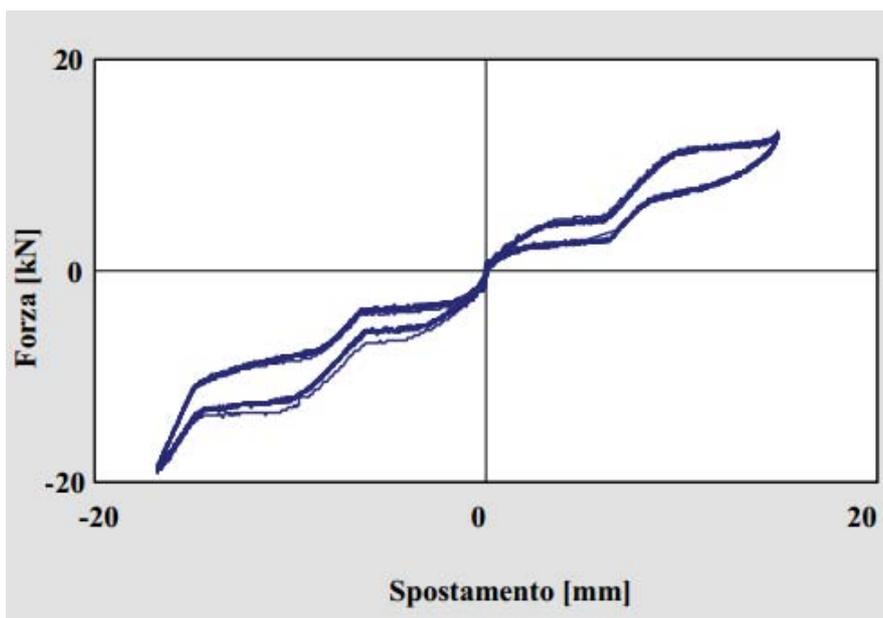


Figura 4.16: Curva sperimentale forza-spostamento di un dispositivo in lega a memoria di forma

4.2.2.3 Dispositivi viscoelastici elastomerici

I dissipatori viscoelastici elastomerici sono costituiti da uno o più strati in mescola elastomerica ad alto smorzamento, ossia caratterizzata da smorzamento viscoso equivalente 15÷20% alla deformazione di taglio del 100%.

Solitamente sono utilizzati come componenti di controventi dissipativi in edifici intelaiati; gli strati di elastomero possono essere disposti sia sul piano verticale che orizzontale.



Figura 4.17: Un dissipatore installato nella scuola Gentile-Fermi di Fabriano

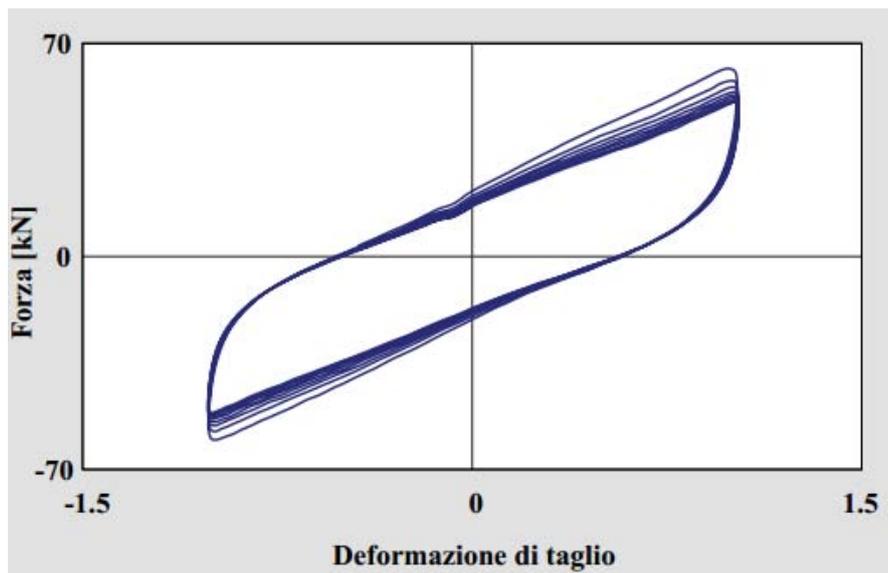


Figura 4.18: Cicli isteretici sperimentali di un dissipatore viscoelastico (frequenza 0.5 Hz, deformazione di taglio 100 %)

5 Normativa di riferimento

Dopo aver raccolto informazioni sui principali codici di progettazione sismica ci si è proposti di mettere in evidenza le principali diversità riguardo l'isolamento sismico:

normativa italiana

- D.M. 14.01.2008 – “Nuove norme Tecniche per le Costruzioni (Capitolo 11- superata)”
- UNI EN 15129 – “Dispositivi antisismici” (dal 1/08/2011 è diventata preponderante rispetto alle indicazioni contenute nel D.M. 14.01.2008).

normativa europea

- EUROCODICE 8 – “Seismic Design of Buildings”
- EN 15129 – “Anti-seismic devices”

normativa americana

- AASHTO 2010 – “Guide Specifications for Seismic Isolation Design”
- AASHTO 2012 – “Bridge Design Specifications”
- ASCE 7-10 – “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”

5.1 Cenni sulle indicazioni contenute nella normativa

La norma armonizzata per i prodotti antisismici EN 15129 è entrata in vigore l'1/8/2010, e per un anno ha coesistito con la normativa nazionale (D.M. 14/1/2008 Capitolo 11)

Dall' 1/8/2011 è diventata obbligatoria e da quella data in poi è diventato obbligatorio immettere nel mercato solo dispositivi antisismici marcati CE.

Poiché l'azione sismica in una struttura isolata si concentra principalmente sui dispositivi; la normativa risulta essere piuttosto severa quanto ai test da effettuare sui dispositivi e rispetto ai controlli sui materiali ed al ciclo produttivo.

La suddetta normativa oltre a stabilire le prove necessarie affinché il dispositivo in esame possa essere considerato stabile rispetto agli effetti dell'usura, all'invecchiamento dei materiali, alla temperatura ed alla frequenza di esercizio; definisce anche i casi in cui un dispositivo possa essere considerato a comportamento lineare e quando invece debba essere modellato attraverso leggi non lineari.

Per dispositivi a comportamento lineare applicati come isolamento a strutture geometricamente regolari o che rispettino una serie di parametri limite definiti da normativa, si prevede la possibilità di applicare una analisi semplificata che non richiede oneri computazionali elevati come per le analisi non lineari e/o dinamiche non lineari.

Di seguito sono riportate in *Tabella 5.1* le indicazioni previste nelle norme rispetto al comportamento lineare dei dispositivi.

CRITERI	UNI EN 15129 – DISPOSITIVI ANTISISMICI	EUROCODICE 8	AASHTO LRFD 2012	
Capacità di ricentraggio	$E_s \geq 0,25E_h$ (4.4.3) dove: E _s :energia accumulata in modo reversibile E _h : energia dissipata dai dispositivi	$F_{ric}(d_{Ed}) - F_{ric}(0,5d_{Ed}) \geq 0,025W_{sup}$	$F_{ric}(d_{Ed}) - F_{ric}(0,5d_{Ed}) \geq 0,025W_{sup}$	
Limiti sul coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_e	$\xi_{effb,h} < 15\%$ (6.2 Nota 2)	$\xi_1 = \frac{\text{area totale}}{2\pi k \max d_{Ed}^2} < 10\%$	-	
Limite sul coefficiente di rigidezza equivalente K_e	$\frac{ K_{effb,h} - K_{s,h} }{K_{s,h}} < 0,2$ (6.2 Nota 2)	$K_s(d_{Ed}) \geq 50\%K_s(0,2d_{Ed})$	$K_s(d_{Ed}) \geq \frac{K_s(0,2d_{Ed})}{3}$	
Limitazioni per garantire un comportamento ciclico stabile	$\frac{ K_{e,(i)} - K_{e,(3)} }{K_{e,(3)}} < 10\%$ (6 – nota 5) $\frac{ \xi_{e,(i)} - \xi_{e,(3)} }{\xi_{e,(3)}} < 10\%$ (6 – nota 5)	$\frac{ K_{e,(i)} - K_{e,(3)} }{K_{e,(3)}} < 10\%$ $\frac{ K_{e,(i)} - K_{e,(20)} }{K_{e,(3)}} < 20\%$ $\frac{ \xi_{e,(i)} - \xi_{e,(20)} }{\xi_{e,(20)}} < 20\%$	$\frac{ K_{eff,(i)} - K_{eff,(3)} }{K_{eff,(3)}} < 20\%$ $\frac{ EDC_{(i)} - EDC_{(3)} }{EDC_{(3)}} < 25\%$ EDC: Energy dissipated for cycle	
Massime differenze tra le caratteristiche meccaniche di progetto e di qualificazione		Ke	ξe	Verificare la non dipendenza dei dispositivi per: <ul style="list-style-type: none"> • Int.temperatura: -5 -> 35 • Invecchiamento • Storia di carico
	Fornitura	±15%	±15%	
	Invecchiamento	±20%	±15%	
	Temperatura	±40%	±15%	
	Frequenza di prova	±10%	±10%	

Tabella 5.1: Prescrizioni da normativa per i dispositivi

Di seguito sono riportate in *Tabella 5.2* le indicazioni previste nelle norme rispetto all'utilizzo di un'analisi semplificata per lo studio di ponti isolati.

CRITERI	NTC 2008	EUROCODICE 8	AASHTO 2010
Limitazioni Geografiche	-	Distanza da faglia attiva più vicina >15 km	Distanza da faglia attiva più vicina >10 km
Limitazione sulla classe del terreno	-	A,B	A,B,C,D
Caratteristiche ponte	<ul style="list-style-type: none"> • sostanziale rettilineità dell'impalcato, <ul style="list-style-type: none"> • luci uguali, • rapporto massimo tra le rigidezze delle pile inferiore a 2, • la massa della metà superiore delle pile è inferiore a 1/5 della massa dell'impalcato, • lunghezza totale dell'impalcato continuo inferiore a 150m, <ul style="list-style-type: none"> • $h_{pil} < 20m$ 	nella direzione longitudinale di ponti approssimativamente dritti con impalcato continuo e verificato che $\sum M_{pil} < 0,2 * M_{imp}$ nella direzione trasversale quando il sistema strutturale è circa simmetrico rispetto al centro dell'impalcato e verificato che: $ C_M - C_R < 5\% L_{imp}$	Impalcato rettilineo (angolo di curvatura <30°)
Smorzamento efficace del sistema d'isolamento ξ_{eff}	$\xi_{eff} \leq 30\%$	$\xi_{eff} \leq 10\%$	$\xi_{eff} \leq 30\%$
Eccentricità massima tra centro di massa e centro di rigidezza	$5\% L_{imp}$	$5\% L_{imp}$	-
Rapporto K_v/K_e	$\frac{K_v}{k_{eff}} > 800$	$\frac{K_v}{k_{eff}} > 150$	-
Range di Periodo di T_{eff}	$3T_r < T_{eff} < 3 s$	$3T_r < T_{eff} < 3 s$	$T_{eff} < 3 s$

Tabella 5.2: Limiti da normativa per una analisi semplificata ad un ponte isolato

6 Caratteristiche dei dispositivi a scorrimento

Come riportato al capitolo 4 il funzionamento degli isolatori a scorrimento a superficie curva o isolatori a pendolo scorrevole è riconducibile a quello del pendolo semplice, in cui il periodo di oscillazione non dipende dalla massa ma solo dalla lunghezza del pendolo stesso. Il periodo proprio di vibrazione di una struttura sismicamente isolata con isolatori a scorrimento a superficie curva dipende principalmente dal raggio di curvatura della superficie di scorrimento, ed è invece quasi indipendente dalla massa della struttura. La dissipazione di energia è fornita dall'attrito che si sviluppa durante lo scorrimento, e la capacità di ricentraggio è fornita dalla curvatura della superficie di scorrimento.

Possono essere realizzati in due tipologie; con una o due superfici di scorrimento primarie che consentono lo spostamento orizzontale.

Nella *Figura 6.1* sono schematizzati gli elementi componenti un isolatore ad una superficie di scorrimento.

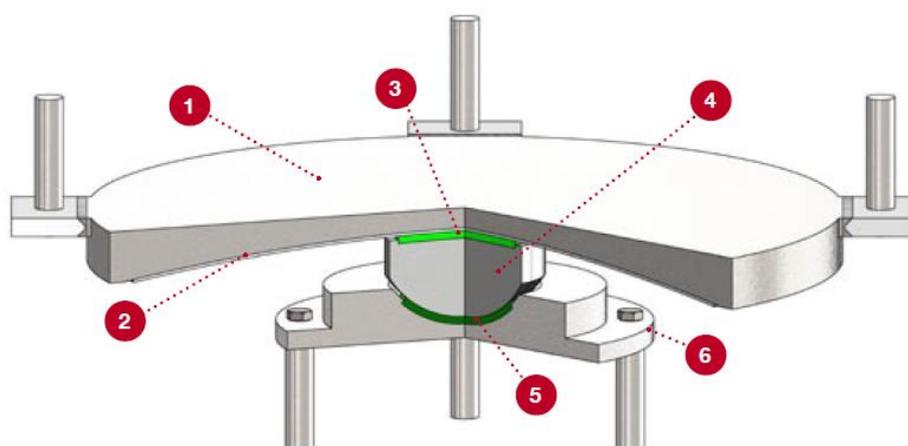


Figura 6.1: Spaccato di un isolatore a scorrimento a singola superficie curva

I dispositivi solitamente sono caratterizzati da:

1. una piastra superiore che permette il collegamento del dispositivo con la sovrastruttura;
2. un elemento con una superficie di scorrimento concava primaria il cui raggio di curvatura determina il periodo di oscillazione, e che consente lo spostamento orizzontale;
3. uno strato trattato in modo da garantire un prefissato coefficiente d'attrito;
4. un elemento centrale con due superfici convesse opportunamente sagomate per accoppiarsi alle superfici concave degli altri due elementi. Il dispositivo può anche essere installato capovolto, con la superficie di scorrimento primaria in basso anziché in alto;

5. un elemento di base con una superficie di scorrimento concava secondaria che consente la rotazione;
6. una piastra superiore che permette il collegamento del dispositivo con la sovrastruttura.

I dispositivi a scorrimento a doppia superficie curva, sono caratterizzati da due superfici di scorrimento concave con lo stesso raggio di curvatura; entrambe consentono sia lo spostamento orizzontale che la rotazione (che si trasforma in spostamento orizzontale). In questo caso ogni singola superficie curva è progettata solamente per metà dello spostamento orizzontale, cosicché le dimensioni in pianta dei dispositivi possono essere notevolmente ridotte rispetto a quelle del dispositivo ad una superficie.

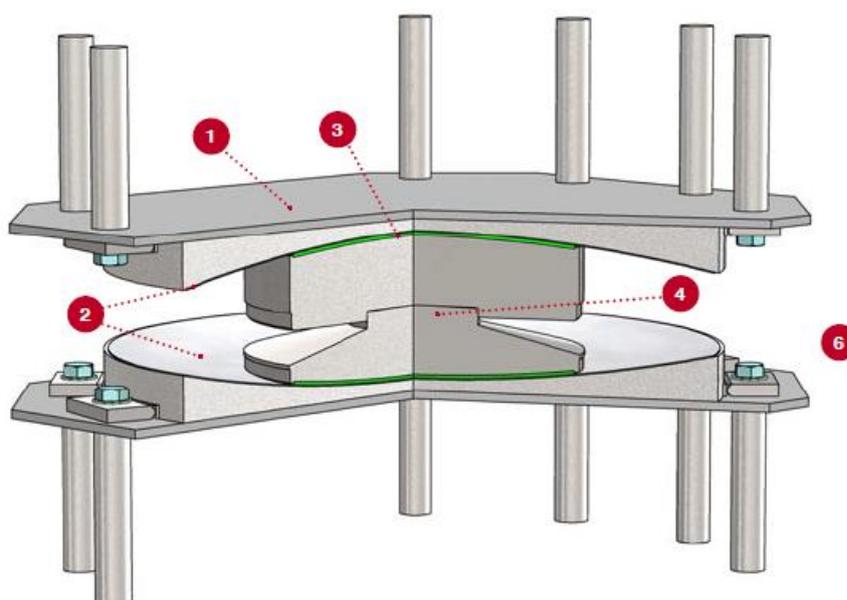


Figura 6.2: Spaccato di un isolatore a scorrimento a doppia superficie curva

E' individuabile un ulteriore vantaggio del dispositivo a doppia curvatura: il dimezzamento dell'eccentricità del carico verticale (effetto $P-\Delta$), pari alla metà dello spostamento anziché a tutto lo spostamento.

Per controllare l'attrito viene utilizzato uno speciale materiale termoplastico (di colore verde nelle figure), accoppiato ad acciaio inossidabile, tanto nelle superfici di scorrimento primarie quanto in quella secondaria.

La scelta del materiale di scorrimento è essenziale per dare agli isolatori a scorrimento a superficie curva un comportamento ottimale in termini di:

- capacità portante;

- coefficiente d'attrito e conseguente dissipazione d'energia;
- stabilità del ciclo isteretico forza-spostamento sia con la temperatura che durante cicli ripetuti;
- durabilità;
- resistenza all'usura.

Il materiale di scorrimento usato nella superficie di scorrimento primaria degli isolatori singoli ed in entrambe le superfici di scorrimento degli isolatori doppi è solitamente il politetrafluoroetilene (PTFE) noto con il nome commerciale di Teflon; questo polimero è caratterizzato da buone ma limitate capacità di carico, resistenza all'usura, stabilità e durabilità.

Con il diffondersi di questa tipologia di isolamento sono stati svolti approfonditi studi su nuovi polimeri ad altissimo peso molecolare (Ultra-High Molecular Weight Poly-Ethylene - UHMWPE) caratterizzati da proprietà eccezionali per quanto concerne la capacità di carico (dispositivi con superfici trattate con questi polimeri hanno capacità di carico doppie rispetto a quelli con PTFE), la resistenza all'usura, la stabilità e la durabilità.

Altre importanti caratteristiche del materiale sono l'assenza del fenomeno di stick-slip ed il basso rapporto tra attrito di primo distacco ed attrito dinamico. Tali proprietà è richiesto che vengano verificate attraverso numerose prove sperimentali.

Il coefficiente di attrito dinamico è il parametro più importante che l'Ingegnere Strutturista deve conoscere per modellare una struttura con isolatori a scorrimento a superficie curva. Per qualsiasi materiale di scorrimento il coefficiente di attrito è dipendente sia dalla velocità che dalla pressione. La dipendenza dalla velocità solitamente non è significativa nel campo di velocità associate all'eccitazione sismica di una struttura isolata. Al contrario, è risaputo dalla letteratura, e confermato dai risultati sperimentali, che la dipendenza dalla pressione (carico verticale) non è trascurabile: in particolare il coefficiente d'attrito diminuisce all'aumento del carico verticale.

In *Tabella 6.1* sono riportati i valori tipici del coefficiente di attrito dinamico, rispettivamente per materiale a basso attrito e ad medio attrito.

Tipo di Materiale	a basso attrito	a medio attrito
Coefficiente d'attrito minimo (%)	2.5	5.5

Tabella 6.1: Valori minimi del coefficiente d'attrito

I valori del coefficiente di attrito riportati in tabella sono i valori minimi e corrispondono al carico verticale massimo di progetto N_{Ed} dell'isolatore a scorrimento a superficie curva; il valore di N_{Ed} per gli isolatori è solitamente riportato dalle tabelle fornite da catalogo delle aziende produttrici e per il progettista fa riferimento al carico verticale massimo che l'isolatore può sopportare nelle combinazioni di carico SLU comprensive del sisma, o comunque in qualsiasi combinazione di carico che includa spostamento orizzontale.

Il modello matematico più semplice e che solitamente rappresenta il funzionamento degli isolatori a scorrimento a superficie curva è la curva bilineare isteretica mostrata nella *Figura 6.3* e dove i principali parametri sono:

$$F_o = \mu \cdot N_{Sd} \quad \rightarrow \quad \text{forza di attrito sviluppata dall'isolatore}$$

$$F_{max} = F_o + K_r \cdot d = \mu \cdot N_{Sd} + \frac{N_{Sd}}{R} \cdot d \quad \rightarrow \quad \text{forza orizzontale massima}$$

$$K_r = \frac{N_{Sd}}{R} \quad \rightarrow \quad \text{rigidezza di richiamo}$$

$$\mu \quad \rightarrow \quad \text{coefficiente di attrito}$$

$$N_{Sd} \quad \rightarrow \quad \text{carico verticale agente sull'isolatore}$$

$$R \quad \rightarrow \quad \text{raggio di curvatura equivalente}$$

$$d \quad \rightarrow \quad \text{spostamento}$$

Negli isolatori a curvatura singola, il raggio di curvatura equivalente "R" è quasi coincidente con il raggio geometrico di curvatura della superficie primaria, mentre negli isolatori a doppia curvatura, "R" equivale approssimativamente a due volte il raggio geometrico di curvatura di ognuna delle due superfici curve.

Qualora le norme utilizzate per la progettazione strutturale consentano di modellare il comportamento non lineare sopra descritto con un modello lineare equivalente, la rigidezza equivalente e lo smorzamento viscoso equivalente possono essere calcolati con le seguenti formule:

$$K_e = N_{sd} \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d} \right) \quad \xi_e = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \right)$$

Formula 6.1: Rigidezza equivalente e smorzamento viscoso equivalente

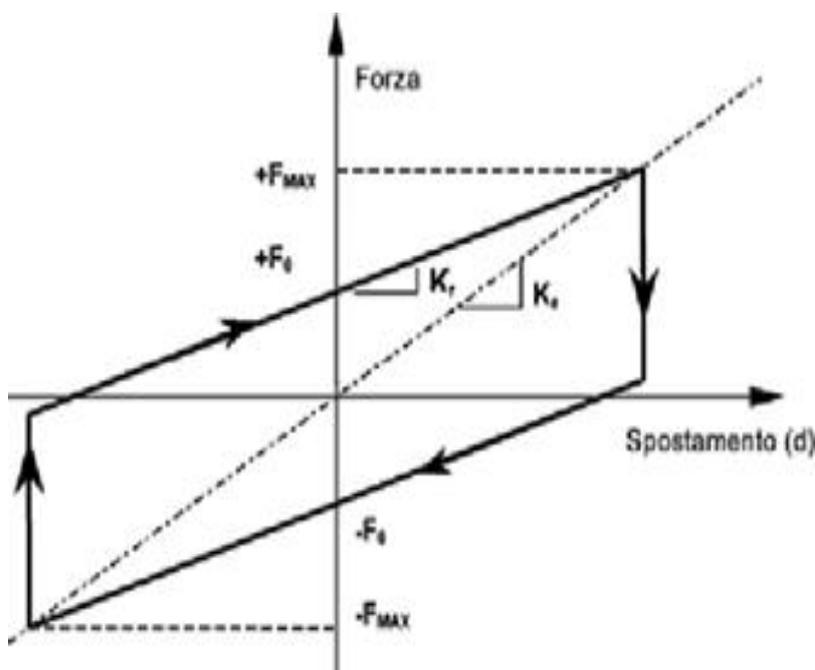


Figura 6.3: Diagramma isteretico rappresentato con una curva bilineare

Vale la pena segnalare come tanto la rigidezza equivalente quanto il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente dipendano dallo spostamento. Di conseguenza, anche quando è concesso dalle norme modellare il sistema di isolamento come lineare equivalente, va applicata una procedura iterativa, finché la differenza tra i valori di spostamento a due passi successivi diventi trascurabile.

Grazie alla dipendenza della rigidezza equivalente dal carico verticale, il centro di rigidezza del sistema di isolamento ed il baricentro delle masse coincidono in pianta.

Il periodo proprio equivalente, ossia il periodo associato alla rigidezza equivalente, di una struttura isolata con isolatori a superficie curva può essere calcolato come segue:

$$T_e = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{1}{g \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{\mu}{d}\right)}}$$

Formula 6.2: Periodo di vibrazione proprio della struttura isolata

Invece, il periodo associato alla rigidezza di richiamo K_r è lo stesso di un pendolo semplice di lunghezza R :

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}}$$

Formula 6.3: Periodo di vibrazione associato alla rigidezza di richiamo

7 Modellazione numerica del sistema pila-isolatore

7.1 Programma utilizzato

I modelli per lo studio parametrico sono stati generati attraverso il programma open source “OPENSEES” (The Open System for Earthquake Engineering Simulation) è un software per fare simulazioni della risposta sismica di sistemi strutturali. OPENSEES è stato sviluppato come piattaforma di calcolo per la ricerca in Ingegneria Sismica del “Pacific Earthquake Engineering Research Center”.

“OPENSEES” permette di gestire in modo molto agevole e semplificato analisi parametriche che usando programmi commerciali richiederebbero decine di modelli e molta difficoltà nella interpretazione dei risultati; grazie alla possibilità di includere il programma principale dentro dei cicli iterativi definiti dall’autore del modello è possibile dimezzare i tempi di esecuzione.

Inoltre con una conoscenza base del linguaggio di programmazione “TCL” è possibile scrivere dei post-programmi che agevolino la lettura dei risultati e la loro formattazione.

7.2 Range parametri scelti per l’analisi

Per prima cosa bisogna definire i parametri da far variare e i range d’interesse; come si vede dall’estratto dello “script” riportato in *Figura 7.1*; per lo studio seguente si è deciso considerare un set di raggi di curvatura “R” della superficie del dispositivo ed un set di coefficienti d’attrito “f”; il range di variazione dei parametri assunto è:

- R: < 1000mm 2000mm 3000mm 4000mm >
- f: < 2.5% 3.5% 4.5% 5.5% >

```

19 #Setting external cycle
20
21 set RadiusList "1000. 2000. 3000. 4000."
22 set fList "0.025 0.035 0.045 0.055"
23 set TList "20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00"
24
25 puts "RadiusList: $RadiusList"
26 puts "FrictionList:$fList"
27 puts "TimeAccelerationList: $TList"
28 puts ""
29 puts "Start Analysis"
30
31 foreach R $RadiusList {
32   file mkdir Radius$R; # create data directory
33   puts "Radius: $R"
34   foreach f $fList {
35     puts "FrictionCoefficient: $f"
36     for {set i 1} {$i < [expr [llength $TList]+1]} {incr i 1} {
37
38       puts "NaturalAcceleration: $i";
39       set TA [lindex $TList [expr $i-1]];
40       puts "TimeDurationAcceleration: $TA";
41
42       file mkdir Radius$R/Friction$f/Acc$i;
43       # SET UP -----
44       wipe; # clear opensees model
45       model basic -ndm 2 -ndf 3; # 2 dimensions, 3 dof per node

```

Figura 7.1: Estratto dal programma che descrive i cicli esterni

7.3 Descrizione modello pila-isolatore

Il modello per lo studio parametrico è stato creato nello spazio 2D ed è composto da un elemento elastico-lineare rappresentante la pila e da un elemento di collegamento che riproduce il comportamento dell'isolatore (questo è l'unico punto del modello che verrà variato a seconda della legge assunta per modellare l'isolatore); all'estremità libera dell'isolatore è assegnata una massa che rappresenta il peso associato all'area d'influenza dell'isolatore.

Di seguito è riportata in *Figura 7.2* la rappresentazione del modello e l'estratto dello script che descrive i parametri base.

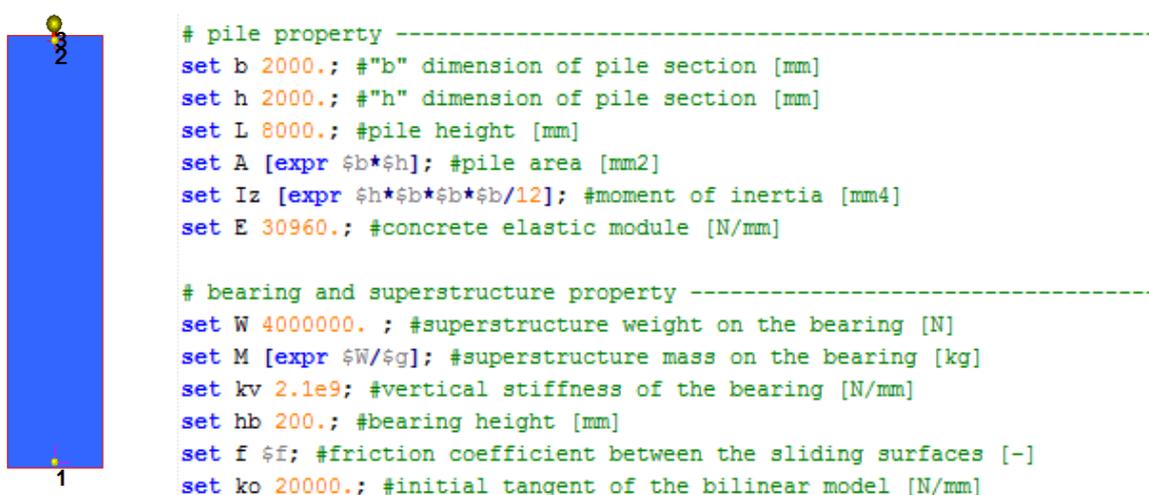


Figura 7.2: Rappresentazione del modello pila-isolatore e parametri base

Come si può vedere si è assunta una pila quadrata di dimensione 2m x2m e di altezza 8m; inoltre è stato assunto un carico di progetto sull'isolatore di 4000 kN.

Per ciascuna combinazione di "R" raggio di curvatura e "f" coefficiente d'attrito (16 combinazioni) sono state svolte 7 "Time History Analysis" (THA) e 1 "Analisi Lineare Equivalente" (ALE).

A parte per i modelli con accelerazioni verticali per cui le analisi THA sono 7x3 (21) per ogni combinazione perché fanno riferimento a 3 accelerogrammi verticali.

I 7 accelerogrammi sintetici orizzontali e 3 verticali sono stati opportunamente ricavati attraverso il programma "SIMQKE-GELFI".

7.4 Accelerogrammi di INPUT

Stabilito il genere di spettro ricercato; per l'analisi in oggetto si fa riferimento a quello di tipo 1 definito dall'Eurocodice 8; scelto un valore di accelerazione al suolo ed una classe di terreno;

“ $a_G=0.4g$ ” e “Site Class EC8=B” il programma genera un opportuno set di 7 accelerogrammi che rispettino i vincoli imposti dalla normativa; di seguito sono riportati in *Figura 7.3 7.4 7.5 7.6* lo spettro di riferimento orizzontale e verticale, gli accelerogrammi orizzontali e verticali.

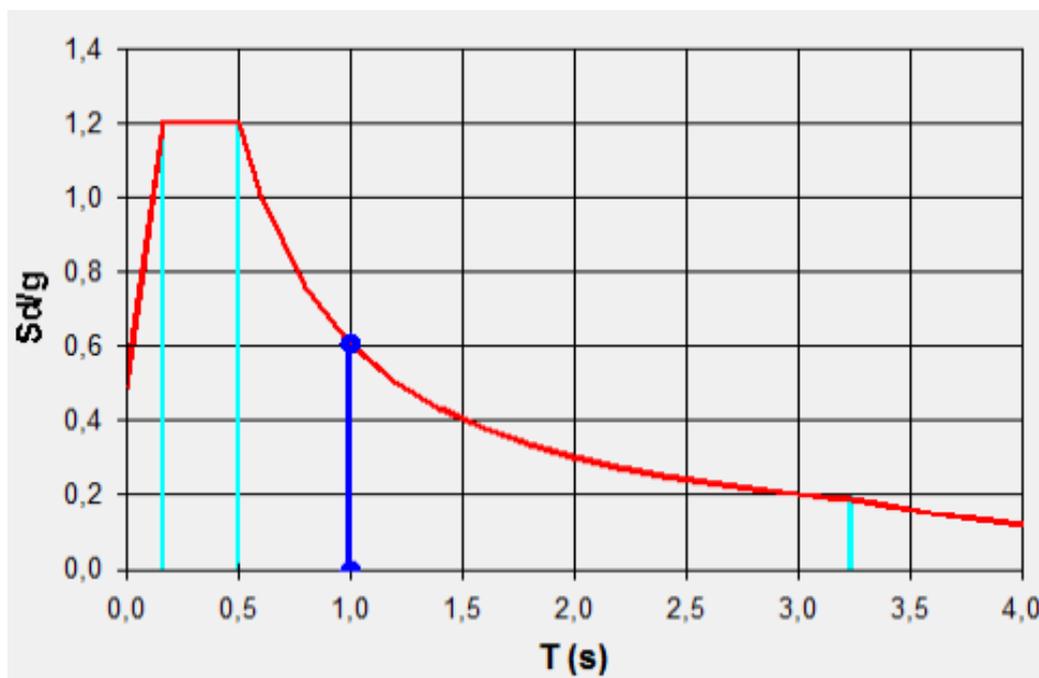


Figura 7.3:Spettro di riferimento orizzontale

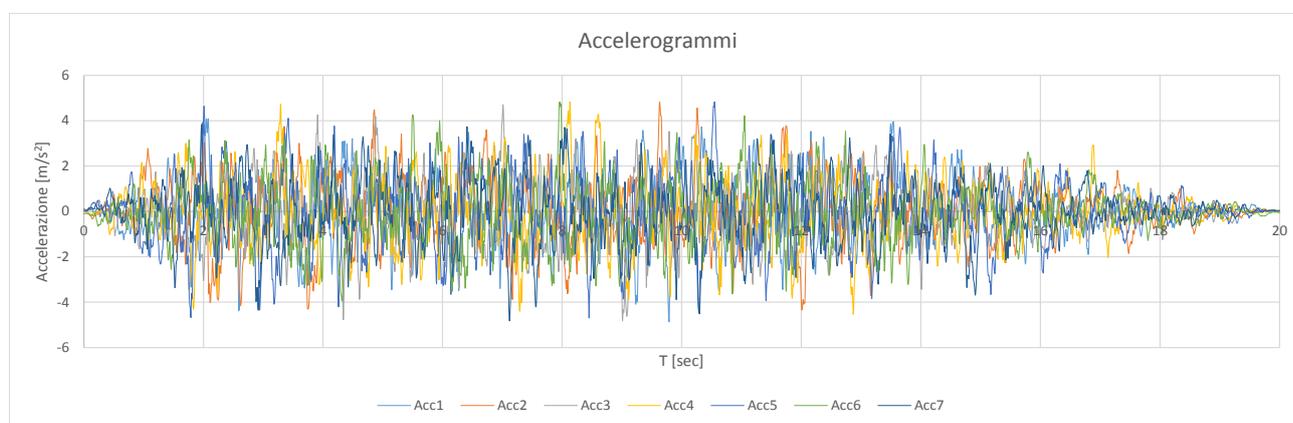


Figura 7.4:Set di accelerogrammi orizzontali

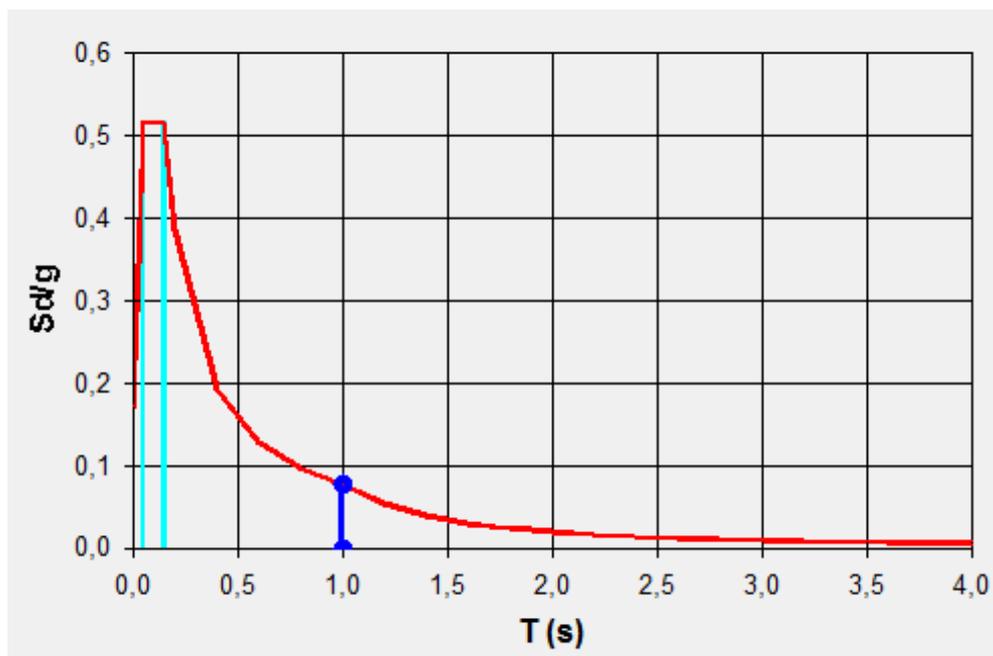


Figura 7.5:Spettro di riferimento verticale

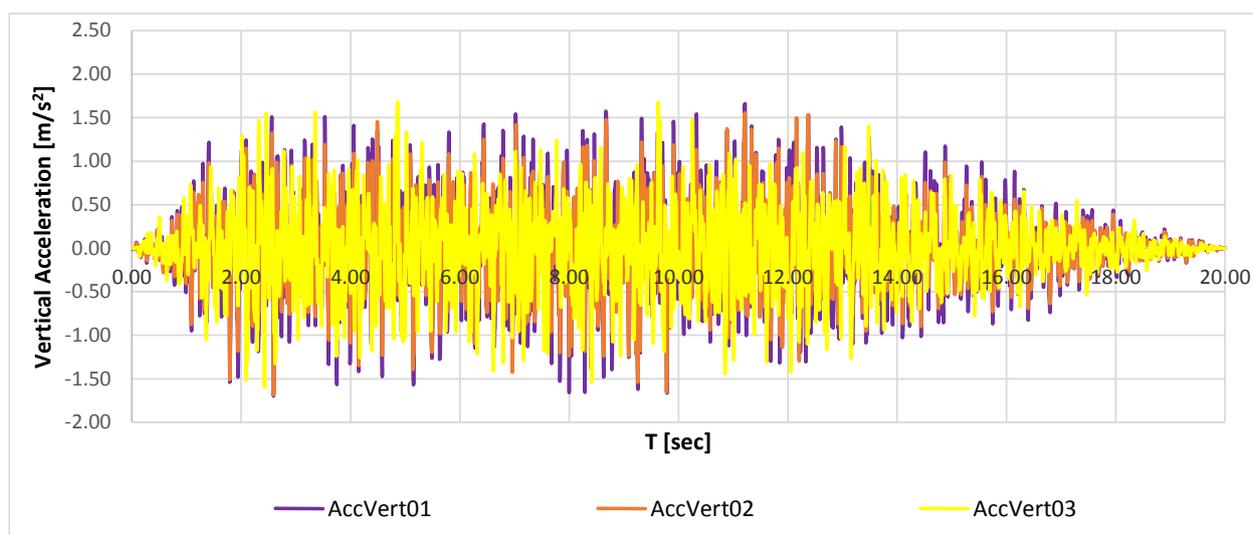


Figura 7.6:Set di accelerogrammi verticali

7.5 Approfondimento sui limiti da normativa per i dispositivi a scorrimento

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

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

$$\frac{R}{d_{dc}} \leq \frac{1}{3f_{din}}$$

Formula 7.1: Limite 1

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

Il soddisfacimento del requisito costituisce un forte vincolo sul valore del raggio (e quindi del periodo) per cui la modellazione lineare di dispositivi dal periodo elevato è possibile solo in presenza di cicli isteretici sufficientemente "sottili", ovvero caratterizzati da attrito basso e spostamento elevato o, in altre parole, per comportamenti poco dissipativi.

Essendo lo smorzamento viscoso equivalente definito come sopra, risulta:

$$\xi_{esi} = \frac{2}{\pi(f_{din} + d/R)} = \frac{2}{\pi\left(f_{din} + \frac{d}{f_{din} \cdot R}\right)} \leq \frac{1}{2\pi} \rightarrow \xi_{esi} \leq 15.9\%$$

Formula 7.2: Limite 1 coefficiente smorzamento viscoso equivalente

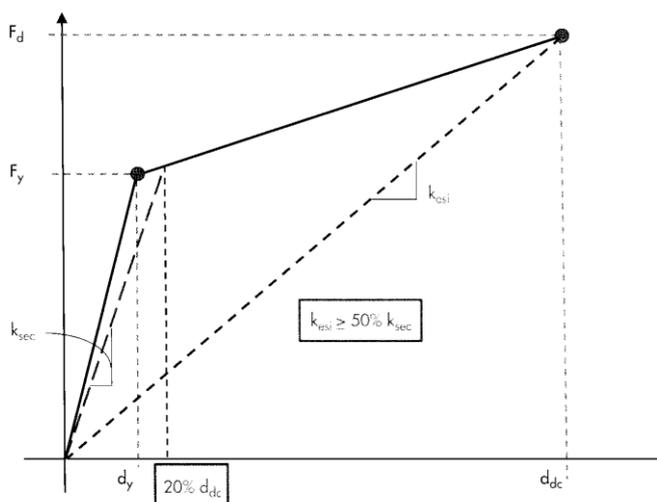


Figura 7.7: Rappresentazione limite 1

- Limite 2: lo smorzamento lineare equivalente del sistema di isolamento deve essere inferiore al 30%. Per dispositivi FP il campo di applicazione interessa valori prossimi al 15%÷25%, e la verifica in oggetto risulta certamente soddisfatta, in quanto vincolata dal requisito limite 1, che impone una limitazione dello smorzamento al 15.9%.
- Limite 3: le caratteristiche forza-spostamento del sistema di isolamento non devono essere soggette a scostamenti superiori al 10% per effetto di variazioni:
 - della velocità di deformazione, in un campo del $\pm 30\%$ intorno al valore di progetto; con riferimento alla velocità media di scorrimento definita in funzione del periodo tangente dell'isolatore (ovvero il periodo isolato T), in generale piuttosto elevato, è verosimile che tale requisito risulti soddisfatto.
 - dell'azione verticale sui dispositivi, nel campo di variabilità di progetto. Le variazioni dell'attrito in funzione di velocità e condizioni di carico non possono essere in generale trascurate e pertanto il requisito in oggetto nella maggior parte delle applicazioni non può ritenersi soddisfatto. In presenza di una componente verticale dell'accelerazione superiore a 0.1g è generalmente necessario il ricorso ad un'analisi comprensiva degli effetti della componente verticale del sisma, con utilizzo di un modello non-lineare in grado di riprodurre il comportamento in funzione della variazione del carico assiale, Ai sensi delle Norme Tecniche, la componente verticale deve essere necessariamente introdotta in presenza di dispositivi con rigidità assiale relativamente modesta (inferiore ad 800 volte il valore in direzione orizzontale) e non è certamente questo il caso di isolatori FP, per i quali, in quanto realizzati con elementi in acciaio, la rigidità assiale è dell'ordine di 10000 volte la rigidità orizzontale; oppure per la progettazione in zone del territorio non appartenenti alle classi sismiche 3 e 4, ovvero la componente deve essere comunque introdotta in presenza di un'accelerazione verticale di picco al terreno superiore a 0.15g.

$$\frac{\Delta W}{W} \leq 10\%$$

Formula 7.3:Limite 3

- Limite 4: l'incremento della forza nel sistema di isolamento per spostamenti tra $0.5d_{dc}$ e d_{dc} deve essere almeno pari al 2.5% del peso totale W della sovrastruttura. Tale richiesta comporta l'utilizzo di un raggio di curvatura limitato a 20 volte il valore dello spostamento di progetto. Infatti, affinché sia rispettata la condizione di verifica in oggetto, ipotizzando che lo spostamento di progetto sia compreso tra 10 cm e 1 m, occorre utilizzare superfici con raggio di curvatura inferiore rispettivamente a 2 m e 20 m.

$$\frac{\Delta F}{W} = \frac{W \cdot \Delta d / R}{W} \xrightarrow{\Delta d = 0.5d_{dc}} 0.5 \cdot \frac{d_{dc}}{R} \geq 2.5\% \rightarrow R \leq \frac{d_{dc}}{0.05}$$

Formula 7.4: Limite 4

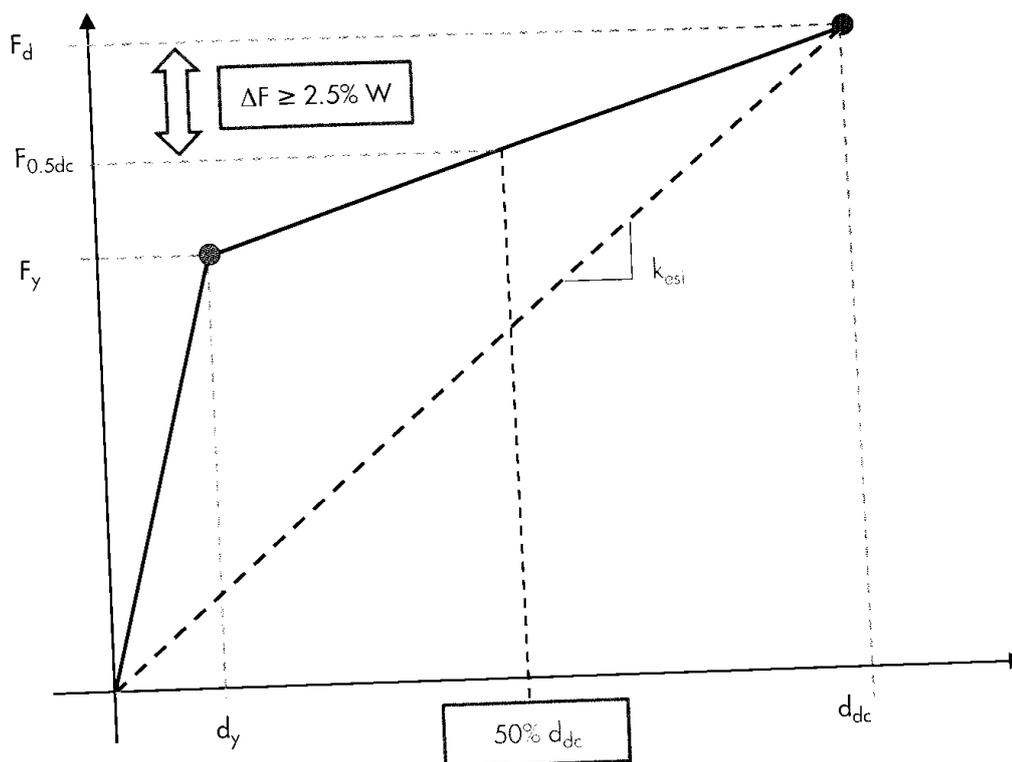


Figura 7.8: Rappresentazione limite 4

Per le combinazioni scelte e definite in precedenza è possibile determinare quali soddisfino i requisiti da normativa per una sollecitazione sismica di progetto come definita precedentemente;

visto che per questo modello non è stata considerata l'accelerazione verticale il limite 3 risulta automaticamente soddisfatto.

Comb.	R mm	f %	ξ_e [%]	d(ALE) mm	Valore 1 -	Limite 1 -	Verifica 1 -	Valore 2 %	Limite 2 %	Verifica 2 -	Valore 3 kN	Limite 3 kN	Verifica 3 -	Valore 4 mm	Limite 4 mm	Verifica 4 mm
1000-2.5	1000	2.50	5	285	3.51	13.33	OK	5.13	30.00	OK	0.00	400.00	OK	1000	5699	OK
1000-3.5	1000	3.50	8	246	4.06	9.52	OK	7.91	30.00	OK	0.00	400.00	OK	1000	4926	OK
1000-4.5	1000	4.50	11	215	4.65	7.41	OK	11.01	30.00	OK	0.00	400.00	OK	1000	4299	OK
1000-5.5	1000	5.50	14	190	5.27	6.06	OK	14.29	30.00	OK	0.00	400.00	OK	1000	3793	OK
2000-2.5	2000	2.50	11	235	8.53	13.33	OK	11.17	30.00	OK	0.00	400.00	OK	2000	4690	OK
2000-3.5	2000	3.50	16	205	9.77	9.52	NO	16.20	30.00	OK	0.00	400.00	OK	2000	4096	OK
2000-4.5	2000	4.50	21	186	10.77	7.41	NO	20.77	30.00	OK	0.00	400.00	OK	2000	3715	OK
2000-5.5	2000	5.50	25	173	11.57	6.06	NO	24.75	30.00	OK	0.00	400.00	OK	2000	3458	OK
3000-2.5	3000	2.50	17	199	15.06	13.33	NO	17.40	30.00	OK	0.00	400.00	OK	3000	3984	OK
3000-3.5	3000	3.50	24	176	17.08	9.52	NO	23.81	30.00	OK	0.00	400.00	OK	3000	3514	OK
3000-4.5	3000	4.50	29	162	18.54	7.41	NO	28.95	30.00	OK	0.00	400.00	OK	3000	3237	OK
3000-5.5	3000	5.50	33	153	19.59	6.06	NO	32.93	30.00	NO	0.00	400.00	OK	3000	3062	OK
4000-2.5	4000	2.50	23	179	22.36	13.33	NO	22.79	30.00	OK	0.00	400.00	OK	4000	3578	NO
4000-3.5	4000	3.50	30	160	24.98	9.52	NO	29.67	30.00	OK	0.00	400.00	OK	4000	3203	NO
4000-4.5	4000	4.50	35	150	26.75	7.41	NO	34.76	30.00	NO	0.00	400.00	OK	4000	2991	NO
4000-5.5	4000	5.50	39	143	28.01	6.06	NO	38.60	30.00	NO	0.00	400.00	OK	4000	2856	NO

Tabella 7.1: Riassunto limiti per le combinazioni scelte

7.6 Descrizione e risultati dell'Analisi Lineare Equivalente

L'analisi lineare equivalente o il metodo d'analisi del modo fondamentale è descritto nell'EN 1998-1:2005+A1:2009; 7.5.4.

Verificato che l'isolatore rispetti le proprietà di linearità contenute nella Tabella 5.1, il comportamento del sistema pila-isolatore può essere considerato semplicemente come una massa collegata ad un punto vincolato al terreno, che schematizza la fondazione rigida, attraverso una molla elastica che riproduce la rigidità della pila e dell'isolatore disposte in serie; la risposta del sistema può essere considerata valutando:

- la rigidità effettiva del sistema isolatore – pila K_{eff} (per questo studio è stato trascurato il contributo dato dalla pila essendo questo di molto inferiore rispetto a quello dell'isolatore);
- il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente del sistema ξ_{eff} ;
- la massa della sovrastruttura influente sull'isolatore.
- l'accelerazione ricavata dallo spettro $S_e(T_{eff}, \xi_{eff})$ corrispondente al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ_{eff} ed al periodo proprio del sistema T_{eff} .

Il coefficiente di smorzamento viscoso equivalente è calcolato secondo la Formula 6.1; lo spostamento di progetto secondo la Formula 7.5 per periodi inferiori al valore di T_D definito

nell'eurocodice e riportato in *Tabella 7.2* assieme ai valori di T_C e S ; per periodi superiori a T_D si fa riferimento alla *Formula 7.6*.

$$d_{cd}' = \left(0.625/\pi^{1.2}\right) \cdot a_g \cdot S \cdot \eta_{eff} \cdot T_{eff} \cdot T_C$$

Formula 7.5: Spostamento secondo Eurocodice per $T_{eff} < T_D$

$$d_{cd}' = \left(0.625/\pi^{1.2}\right) \cdot a_g \cdot S \cdot \eta_{eff} \cdot T_D \cdot T_C$$

Formula 7.5: Spostamento secondo Eurocodice per $T_{eff} > T_D$

Ground type	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1.00	0.15	0.40	2.00
B	1.20	0.15	0.50	2.00
C	1.15	0.20	0.60	2.00
D	1.35	0.20	0.80	2.00
E	1.40	0.15	0.50	2.00

Tabella 7.2: Parametri previsti da Eurocodice per gli spettri di tipo 1

NOTA IMPORTANTE: Per i ponti isolati si assume come valore di T_D : 2.50 sec.

Il calcolo prevede un procedimento iterativo che partendo da un valore di spostamento di primo tentativo porta ad un valore di spostamento calcolato che ha una differenza inferiore ad una tolleranza definita in precedenza.

Di seguito in *Tabella 7.3* si riporta un estratto del foglio di calcolo creato per svolgere tali analisi per una delle 16 combinazioni.

Parametri combinazione in esame		
R (raggio di curvatura)	1	m
W (peso influente sull'isolatore)	4000	kN
f (coefficiente di attrito)	2.5	%
Primo tentativo		
d_{cd} (assunto di primo tentativo)	0.300	m
$K_{eff} = F/d_{cd} = W_d \cdot \left[\mu_d + d_{cd}/R_b\right] / d_{cd}$	4333.333	kN/m
$T_{eff} = 2\pi \cdot \sqrt{m/k_{eff}}$	1.927	sec

$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \right)$	0.049	-
$\eta_{eff} = \left[\frac{0.10}{(0.05 + \xi_{eff})} \right]^{0.5}$	1.005	-
$d_{cd}' = \left(\frac{0.625}{\pi^2} \right) \cdot a_g \cdot S \cdot \eta_{eff} \cdot T_{eff} \cdot T_c$	0.289	m
error= d _{cd} '-d _{cd} 0.011 m		
Esegui un'altra iterazione error > 0.001		
"n" tentativo		
d _{cd} (assunto all' "n" tentativo)	0.285	m
K _{eff}	4350.757	kN/m
T _{eff}	1.924	sec
ξ _{eff}	0.051	-
η _{eff}	0.993	-
d _{cd} '	0.285	m
errore= d _{cd} '-d _{cd} 0.000 m		
Tolleranza raggiunta error < 0.001		

Risultati per la combinazione f:2.5% – R:1000mm		
d _{ed}	285	mm
ξ _{eff}	5.13	%

Controllo limiti da normativa		
R/d _{ed}	3.51	OK <Limite 1
Limite 1	13.33	-
ξ _{eff}	5.13	OK <Limite 2
Limite 2	30.00	%
ΔN	0.00	OK <Limite 3
Limite 3	400.00	kN
R	1.00	OK <Limite 4
Limite 4	5.70	m

Tabella 7.3: Risultati Analisi Lineare Equivalente per la combinazione f:2.5% - R:1000 mm

Nella Tabella 7.4 sono riportati i risultati ottenuti attraverso l'analisi lineare equivalente per le 16 combinazioni.

Combinazione	R mm	f %	ξ_e [%]	d(ALE) mm
1000-2.5	1000	2.50	5	285
1000-3.5	1000	3.50	8	246
1000-4.5	1000	4.50	11	215
1000-5.5	1000	5.50	14	190
2000-2.5	2000	2.50	11	235
2000-3.5	2000	3.50	16	205
2000-4.5	2000	4.50	21	186
2000-5.5	2000	5.50	25	173
3000-2.5	3000	2.50	17	199
3000-3.5	3000	3.50	24	176
3000-4.5	3000	4.50	29	162
3000-5.5	3000	5.50	33	153
4000-2.5	4000	2.50	23	179
4000-3.5	4000	3.50	30	160
4000-4.5	4000	4.50	35	150
4000-5.5	4000	5.50	39	143

Tabella 7.4: Riassunto risultati Analisi Lineare Equivalente per le 16 combinazioni

7.7 Risultati modello bilineare

Nel modello è stato possibile descrivere il comportamento dell'isolatore soggetto ad una forza laterale con una curva bilineare caratterizzata da una rigidezza "K₀" iniziale (fissata già all'inizio del programma); il valore limite del primo tratto "F₀ = W·f" e la pendenza del secondo tratto che rappresenta la rigidezza di richiamo "K_r = W/R" sono i parametri necessari che vengono calcolati per ogni combinazione e poi assegnati all'elemento "link" che rappresenta l'isolatore. Si riporta in *Figura 7.9* un estratto dal programma che descrive questo passaggio.

```

68 set ko 20000.; # [N/mm]
69 set Fy [expr $W*$f]; # [N]
70 set kr [expr $W/$R]; # [N/mm]
71 set alpha [expr $kr/$ko]; # [-]

```

Figura 7.9: Estratto dal programma che rappresenta il calcolo dei parametri base del link rappresentante l'isolatore

Per prima cosa si osserva l'andamento tipo dei diagrammi isteretici ottenuti per un accelerogramma tipo applicato al modello bilineare; è intuibile evidenziare come:

- All'aumentare del coefficiente di attrito si avrà un aumento del valore della forza "F₀", essendo questa direttamente proporzionale alla variabile in esame, con un osservabile ampliamento in altezza del diagramma;

- All’aumentare del raggio di curvatura invece si noterà un abbassamento del ramo secondario della bilineare che lo descrive essendo il valore “ k_r ” inversamente proporzionale al raggio di curvatura tra le superfici di scorrimento.

In Figura 7.10 si può notare l’influenza delle 2 variabili scelte (f; R) nell’andamento dei diagrammi isteretici.

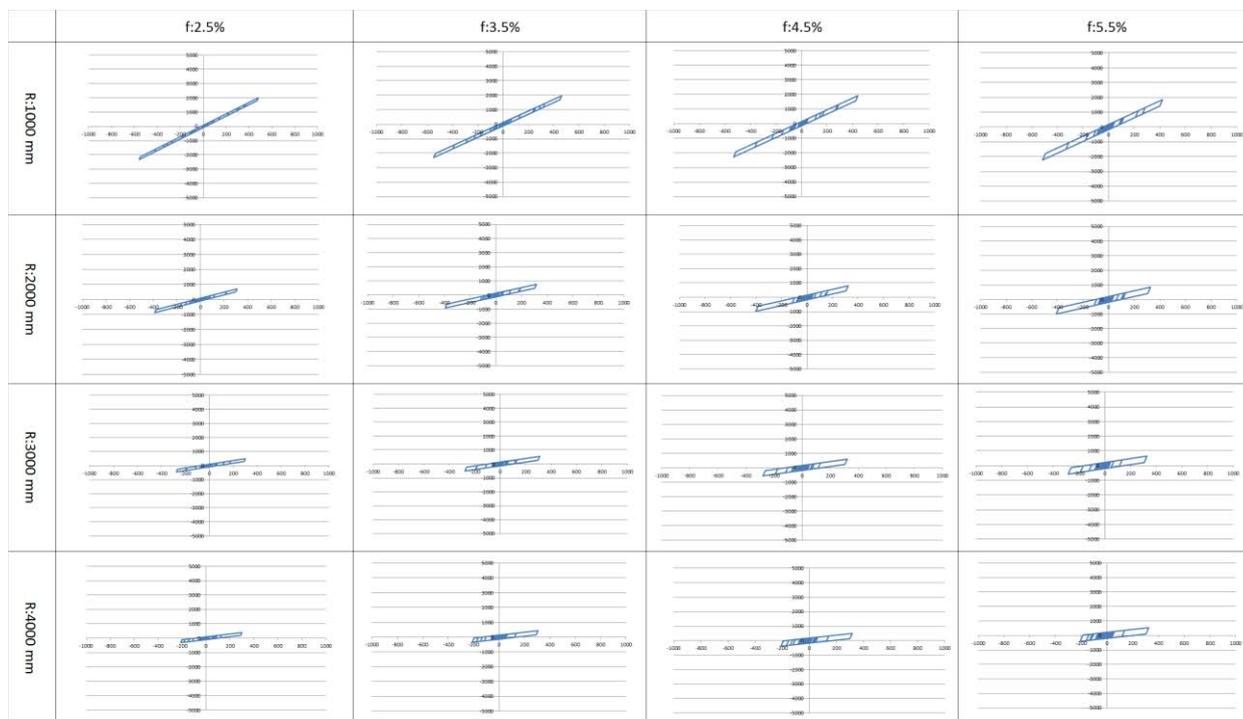


Figura 7.10:Variazione dei diagrammi isteretici per le combinazioni scelte

Il primo obiettivo preposto è quello di valutare l’errore tra i risultati ottenuti mediante l’analisi lineare equivalente (ALE) e le 7 analisi time history (THA). I risultati dell’analisi lineare equivalente sono riportati in Tabella 7.5 mentre di seguito si riportano i risultati ottenuti per la combinazione “R:1000mm – f:2.5%” dalle 7 analisi time history.

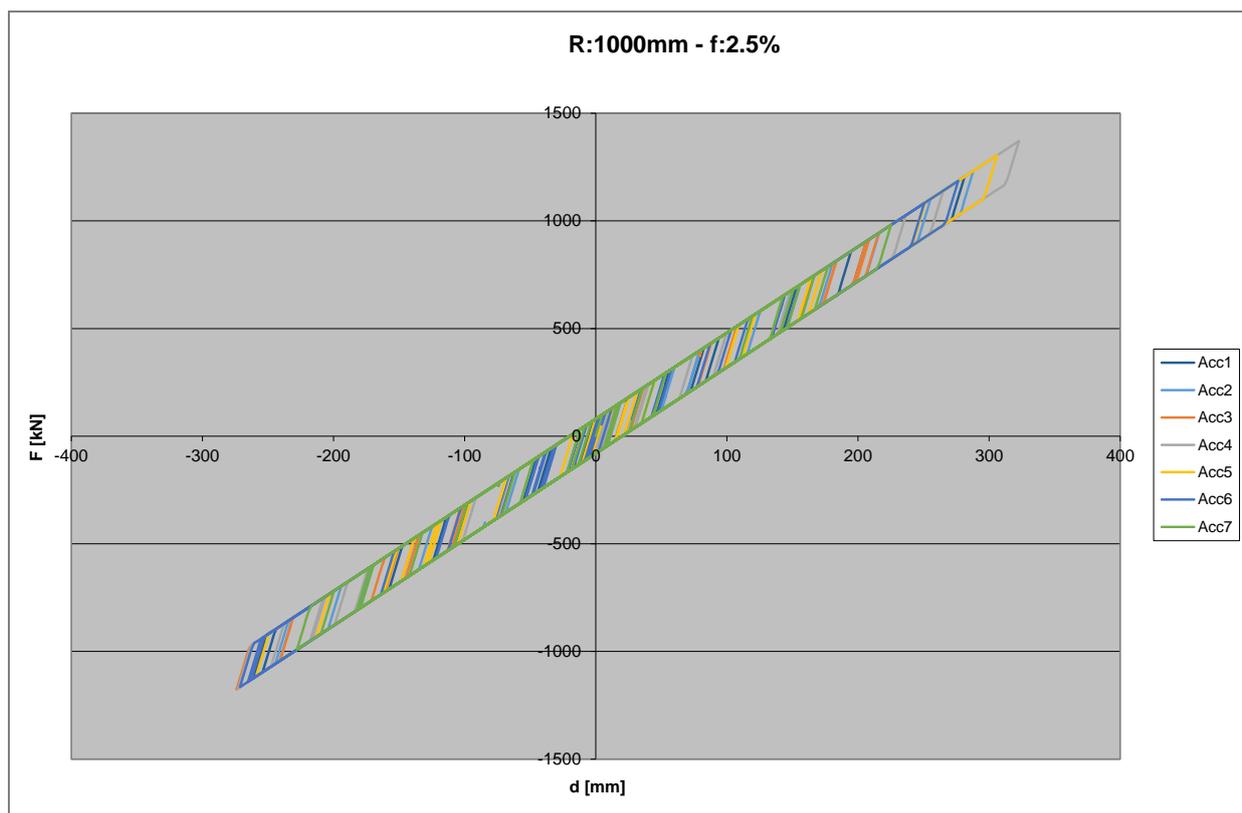
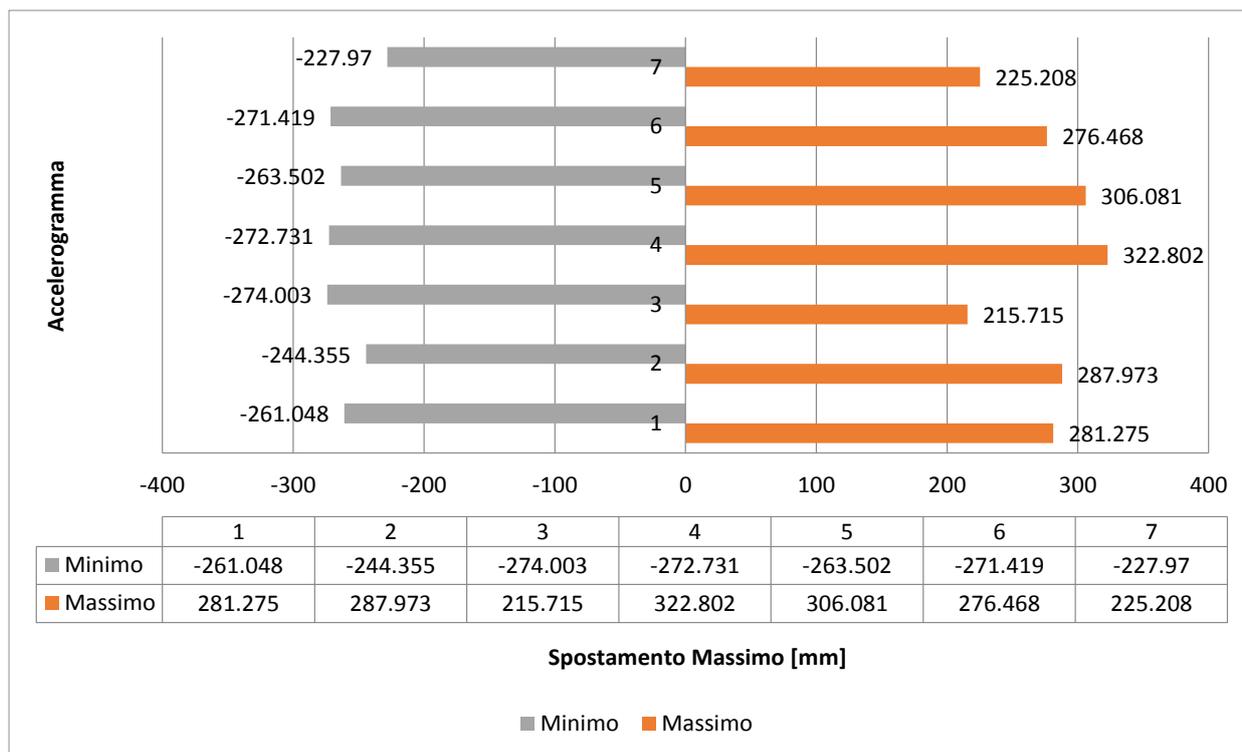


Figura 7.11: Risultati Analisi Time History per la combinazione "R1000 – f2.5"

Riassunto combinazioni

Nella *Tabella 7.5* sono riportati i risultati e i confronti delle analisi svolte; è evidenziato il fattore di smorzamento viscoso equivalente " ξ_e " per le varie combinazioni delle variabili.

Questo valore è molto importante nella scelta della tipologia di analisi che possa meglio interpretare il comportamento del dispositivo.

La normativa di riferimento fissa un valore limite del 15% per poter considerare il dispositivo a comportamento lineare; per dispositivi con coefficienti d'attrito elevati il diagramma risulta essere troppo esteso per poter considerare il comportamento del dispositivo assimilabile ad una molla con rigidezza “ k_E ” ed uno smorzatore viscoso con smorzatore viscoso equivalente “ ξ_e ” e quindi l'analisi lineare equivalente porterà ad un valore che sottostimerà lo spostamento massimo prevedibile sotto azione sismica.

Combinazioni	R mm	f %	ξ_e [%]	d(ALE) mm	d(THA) _{max} mm	d(THA) _{min} mm	d(THA) _{med} mm	E _{max} %	E _{min} %	E _{med} %
1000-2.5	1000	2.50	5	285	323	228	282	11.72	25.00	0.92
1000-3.5	1000	3.50	8	246	258	190	235	4.65	29.64	4.82
1000-4.5	1000	4.50	11	215	225	164	203	4.63	30.82	5.77
1000-5.5	1000	5.50	14	190	204	142	176	7.12	34.00	7.62
2000-2.5	2000	2.50	11	235	442	257	320	47.00	8.73	26.68
2000-3.5	2000	3.50	16	205	296	185	246	30.88	10.66	16.65
2000-4.5	2000	4.50	21	186	263	170	222	29.44	9.05	16.41
2000-5.5	2000	5.50	25	173	238	153	202	27.50	13.25	14.27
3000-2.5	3000	2.50	17	199	408	249	320	51.21	19.90	37.74
3000-3.5	3000	3.50	24	176	336	183	259	47.74	4.14	32.23
3000-4.5	3000	4.50	29	162	287	158	233	43.67	2.18	30.50
3000-5.5	3000	5.50	33	153	266	149	212	42.44	2.84	27.64
4000-2.5	4000	2.50	23	179	448	252	329	60.06	28.93	45.63
4000-3.5	4000	3.50	30	160	345	174	269	53.62	8.03	40.40
4000-4.5	4000	4.50	35	150	307	164	242	51.35	9.05	38.14
4000-5.5	4000	5.50	39	143	280	150	219	49.04	5.10	34.88

Tabella 7.5: Riassunto risultati confronto analisi lineare equivalente e modello bilineare

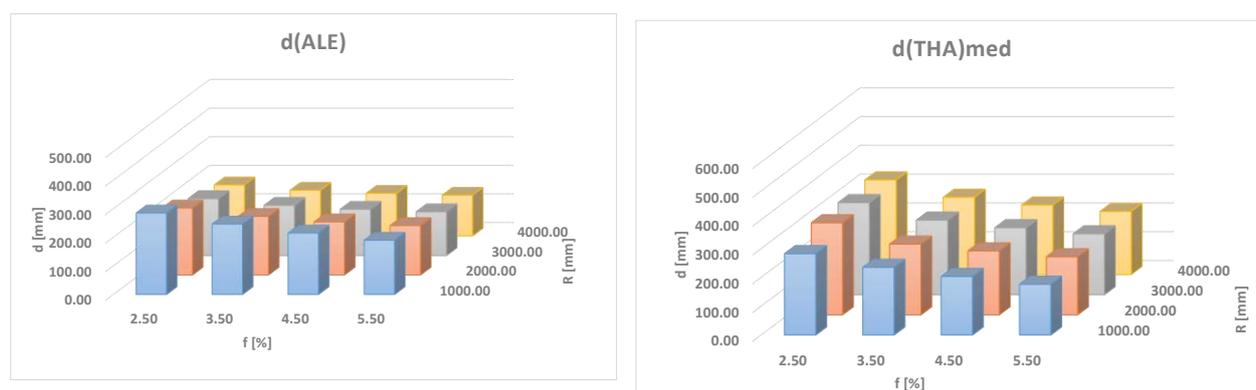


Figura 7.12: Rappresentazione spostamenti per le varie combinazioni

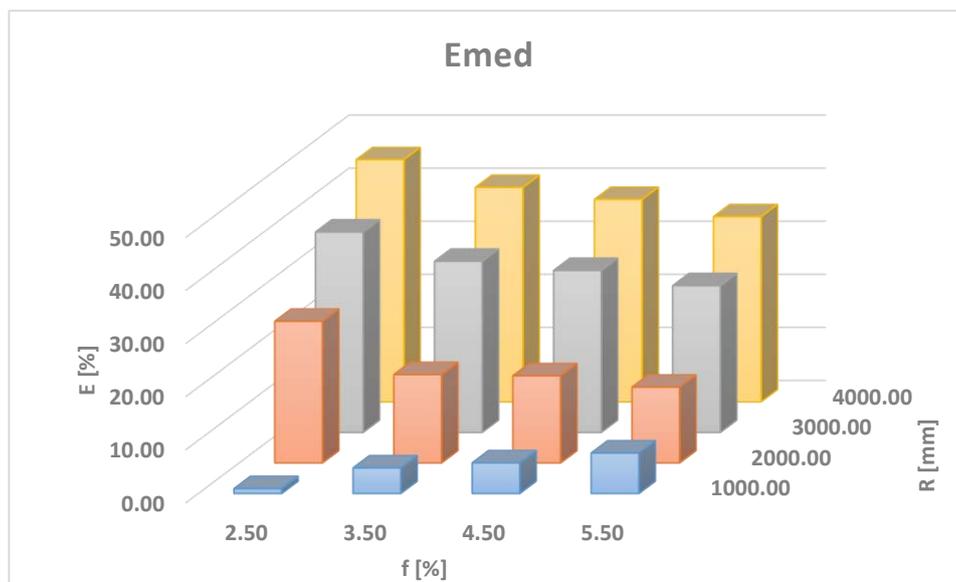


Figura 7.13: Rappresentazione errore medio per le varie combinazioni

L'errore riportato nel grafico in Figura 7.13 è calcolato con la *Formula 7.6*:

$$E_{med} = \frac{d(ALE) - d(THA)_{med}}{d(THA)_{med}} \%$$

Formula 7.6: Errore medio tra spostamento "ALE" e "THA"

Si può notare come per le combinazioni prese in esame l'analisi lineare equivalente (ALE) sia coerente con i risultati ottenuti con le analisi time history (THA) solo per poche combinazioni ed in particolare per un raggio di curvatura di 1 metro.

Per gli altri raggi di curvatura la (THA) stima uno spostamento massimo che arriva ad errori del 50 % rispetto ai risultati ottenuti con l'analisi semplificata; questo fatto avvalorava l'ipotesi che per diagrammi isteretici sempre più larghi il modello lineare semplificato non sia efficace a riprodurre un comportamento non lineare.

I grafici riportati in *Figura 7.14* servono a valutare una eventuale dipendenza dell'errore medio rispetto al parametro di smorzamento viscoso equivalente che come è stato illustrato in precedenza evidenzia i limiti definiti da normativa sui modelli utilizzabili per rappresentare il comportamento dei dispositivi sismici.

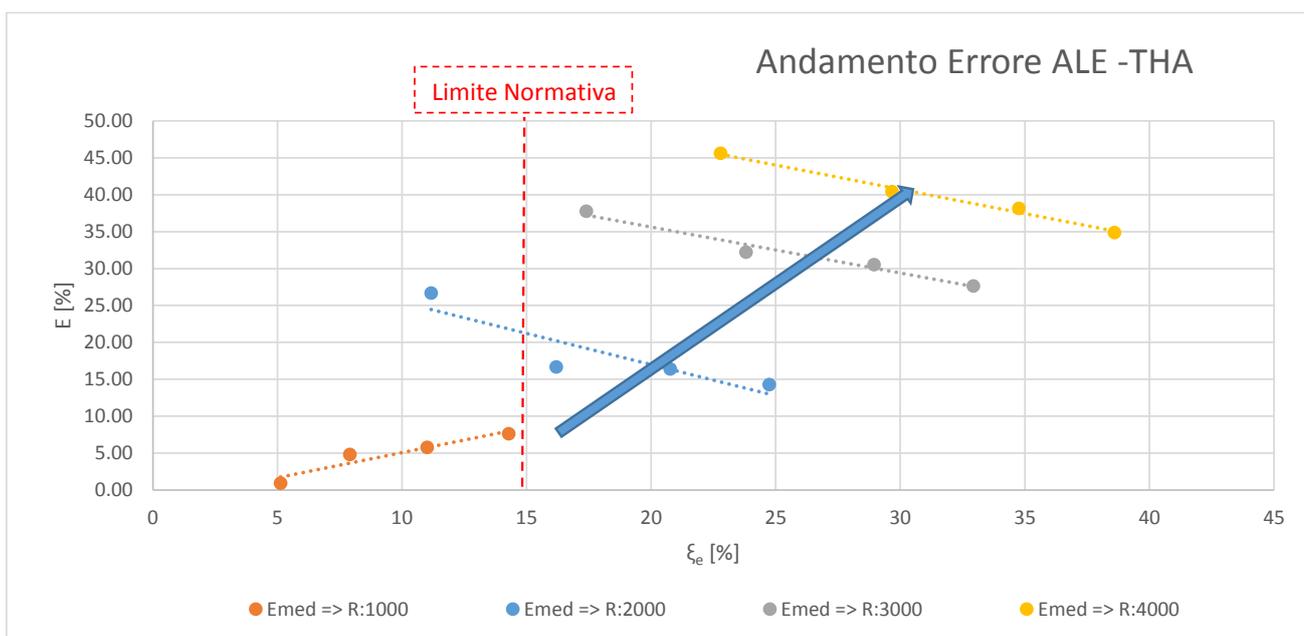
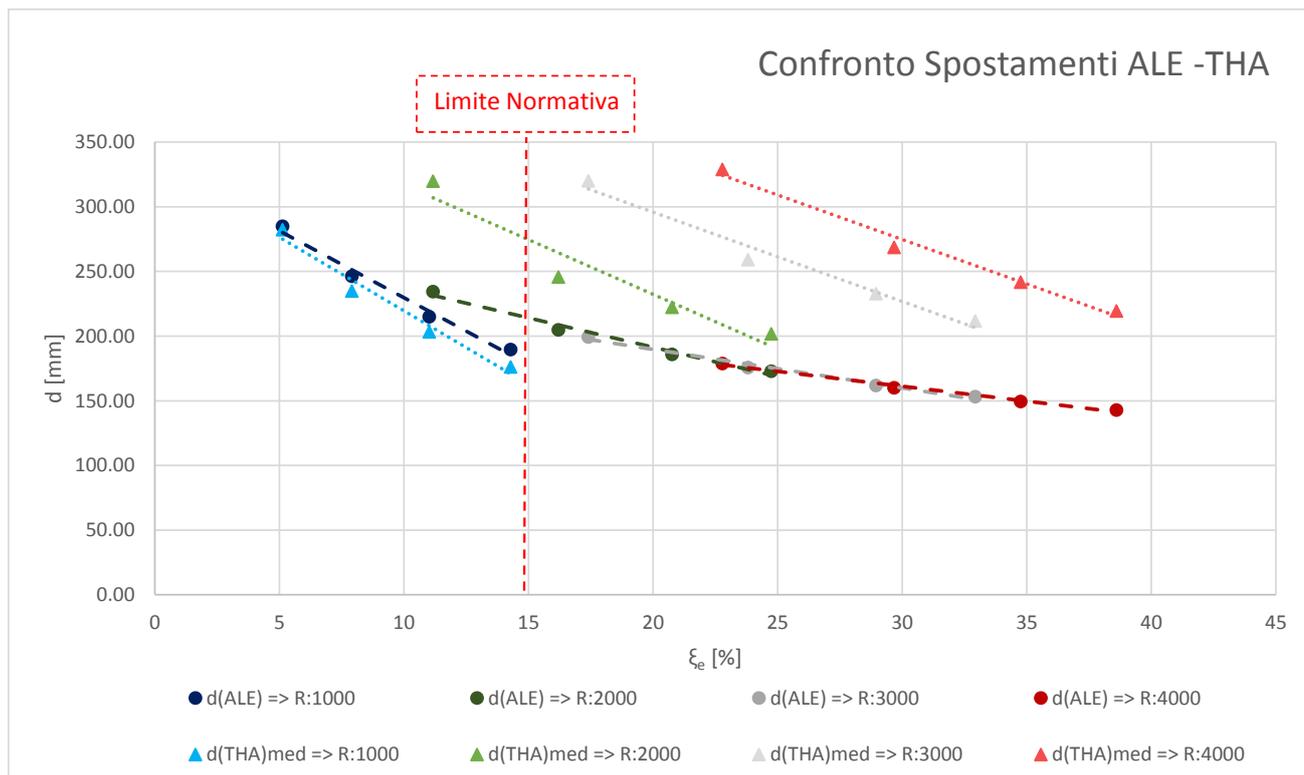


Figura 7.15: Confronto spostamenti ed errori ALE THA(BL)

I grafici sembrano evidenziare una certa dipendenza dell'errore rispetto al parametro in osservazione (ξ_e) ma sembra più evidente l'effetto del raggio di curvatura.

Per approfondire questo aspetto si è deciso di valutare il comportamento dei modelli per 4 combinazioni di dispositivi con raggio di curvatura fissato (1000 – 2000 – 3000 - 4000mm) ed estendere il valore del coefficiente d'attrito fino al 9.5% per avere più risultati da valutare.

f %	ξ_e [%]	E_{max} %	E_{min} %	E_{med} %
2.5	5	12	32	1
3.5	8	5	30	5
4.5	11	5	36	6
5.5	14	7	34	8
6.5	18	1	23	12
7.5	21	6	31	8
8.5	24	12	22	1
9.5	27	16	15	7



Figura 7.16: Relazione tra “ ξ ” e l’errore per la serie R1000

Osservazione R1000: l’errore resta sotto limiti del 15 % ma non è evidenziabile una chiara dipendenza rispetto al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente.

f %	ξ_e [%]	E_{max} %	E_{min} %	E_{med} %
2.5	11	29	1	27
3.5	16	28	11	17
4.5	21	29	37	16
5.5	25	27	13	14
6.5	28	24	14	8
7.5	31	24	17	1
8.5	34	27	16	3
9.5	38	31	9	11



Figura 7.17: Relazione tra “ ξ ” e l’errore per la serie R2000

Osservazione R2000: è evidenziabile una dipendenza dell’errore medio rispetto al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente; però a differenza di quanto ci si aspettava all’aumentare del coefficiente di attrito e quindi dello smorzamento viscoso equivalente l’errore diminuisce.

f	ξ_e	E_{max}	E_{min}	E_{med}
%	[%]	%	%	%
2.5	17	51	16	38
3.5	24	51	4	36
4.5	29	44	7	30
5.5	33	43	3	28
6.5	36	40	2	20
7.5	39	38	6	16
8.5	41	35	10	11
9.5	43	34	6	15

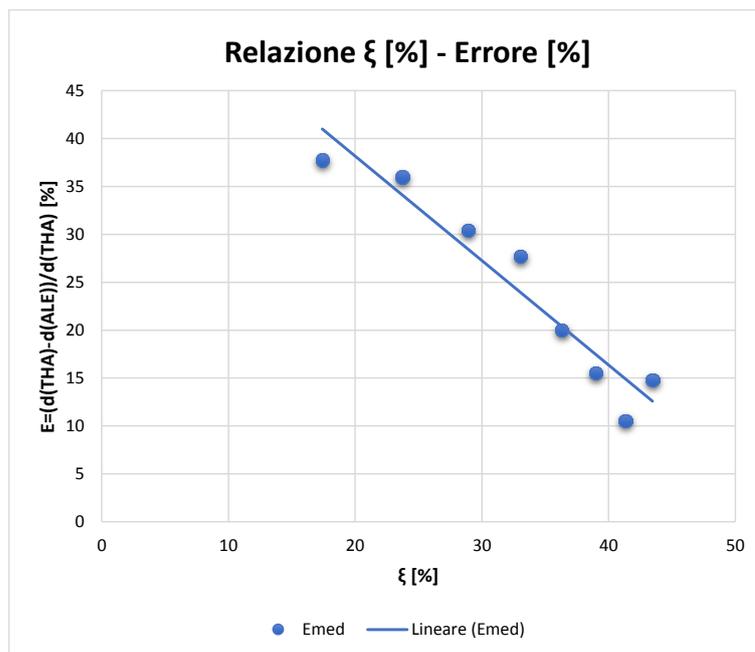


Figura 7.18: Relazione tra “ ξ ” e l’errore per la serie R3000

Osservazione R3000: è evidenziabile una dipendenza sempre maggiore dell’errore medio rispetto al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente; la linea di tendenza risulta sempre a pendenza negativa ma si attesta su valori d’errore più alti.

f	ξ_e	E_{max}	E_{min}	E_{med}
%	[%]	%	%	%
2.5	23	53	18	46
3.5	30	53	8	40
4.5	35	51	6	38
5.5	39	49	5	35
6.5	42	46	7	26
7.5	44	42	6	22
8.5	46	38	0	19
9.5	47	35	4	21

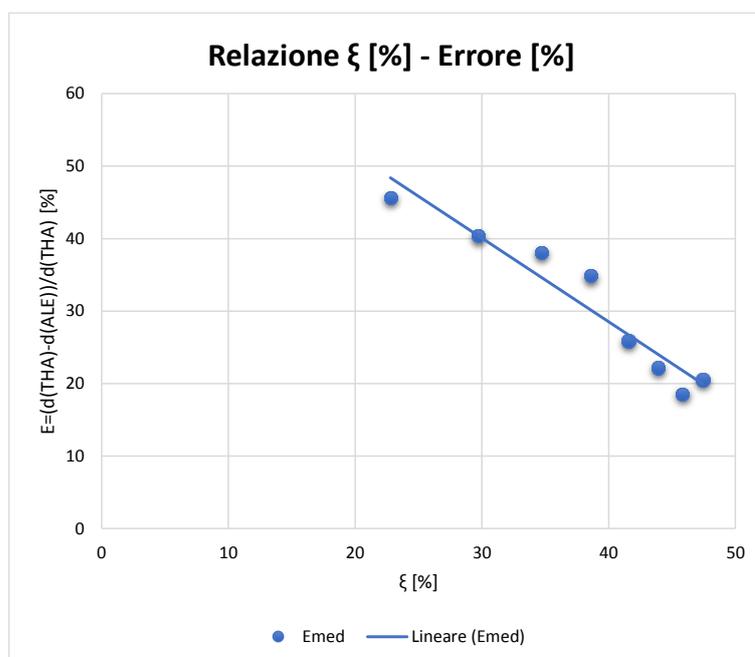


Figura 7.19: Relazione tra “ ξ ” e l’errore per la serie R4000

Osservazione R4000: stesse osservazioni evidenziate per la serie con raggio R:3000mm

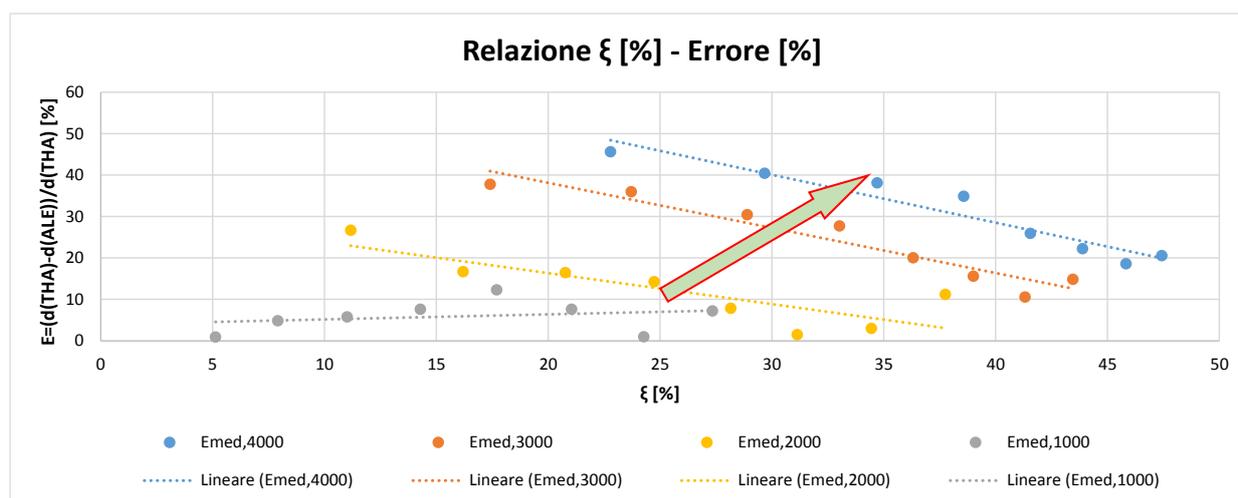


Figura 7.20: Riassunto risultati per tutte le serie con coefficiente d'attrito esteso

Come si può vedere dai risultati ottenuti si può individuare un legame tra il raggio di curvatura del dispositivo e l'errore tra la stima media fatta secondo la "ALE" e la "THA"; per R:1000 l'errore medio non supera il 15% mentre per R:4000 l'errore arriva a valori prossimi al 50%.

Mentre per lo stesso raggio è evidenziabile una dipendenza lineare negativa rispetto alle serie R:2000; R:3000; R:4000.

7.8 Risultati Modello Friction Pendulum

Nel programma Opensees è implementato l'elemento rappresentante il dispositivo a scorrimento chiamato "Single Friction Pendulum Bearing Element".

Come si può vedere dalla *Figura 7.21*, che riporta la spiegazione del comportamento dell'elemento presa dal sito "<http://opensees.berkeley.edu>", è possibile definire oltre alle caratteristiche dell'elemento la legge che descrive il variare del coefficiente d'attrito rispetto alla velocità di scorrimento ed alla pressione esercitata tra le due superfici di contatto; inoltre il modello mette in relazione diretta la forza di richiamo esercitabile dall'isolatore e la pressione agente sulla superficie di scorrimento permettendo così di prendere in considerazione una variazione del carico verticale sotto forma di accelerogramma verticale.

Single Friction Pendulum Bearing Element

Command_Manual

This command is used to construct a singleFPBearing element object, which is defined by two nodes. The iNode represents the concave sliding surface and the jNode represents the articulated slider. The element can have zero length or the appropriate bearing height. The bearing has unidirectional (2D) or coupled (3D) friction properties (with post-yield stiffening due to the concave sliding surface) for the shear deformations, and force-deformation behaviors defined by UniaxialMaterials in the remaining two (2D) or four (3D) directions. To capture the uplift behavior of the bearing, the user-specified UniaxialMaterial in the axial direction is modified for no-tension behavior. By default (sDratio = 0.0) P-Delta moments are entirely transferred to the concave sliding surface (iNode). It is important to note that rotations of the concave sliding surface (rotations at the iNode) affect the shear behavior of the bearing. To avoid the introduction of artificial viscous damping in the isolation system (sometimes referred to as "damping leakage in the isolation system"), the bearing element does not contribute to the Rayleigh damping by default. If the element has non-zero length, the local x-axis is determined from the nodal geometry unless the optional x-axis vector is specified in which case the nodal geometry is ignored and the user-defined orientation is utilized.

For a two-dimensional problem:

```
element singleFPBearing $eleTag $iNode $jNode $frnMdlTag $reff $klnit -P $smatTag -Mz $smatTag <-orient $x1 $x2 $x3 $y1 $y2 $y3> <shearDist $sDratio> <-doRayleigh> <-mass $m> <-iter $maxIter $tol>
```

For a three-dimensional problem:

```
element singleFPBearing $eleTag $iNode $jNode $frnMdlTag $reff $klnit -P $smatTag -T $smatTag -My $smatTag -Mz $smatTag <-orient $x1 $x2 $x3 $y1 $y2 $y3> <-shearDist $sDratio> <-doRayleigh> <-mass $m> <-iter $maxIter $tol>
```

\$eleTag	unique element object tag
\$iNode \$jNode	end nodes
\$frnMdlTag	tag associated with previously-defined FrictionModel d
\$reff	effective radius of concave sliding surface
\$klnit	initial elastic stiffness in local shear direction
-P \$smatTag	tag associated with previously-defined UniaxialMaterial in axial direction
-T \$smatTag	tag associated with previously-defined UniaxialMaterial in torsional direction
-My \$smatTag	tag associated with previously-defined UniaxialMaterial in moment direction around local y-axis
-Mz \$smatTag	tag associated with previously-defined UniaxialMaterial in moment direction around local z-axis
\$x1 \$x2 \$x3	vector components in global coordinates defining local x-axis (optional)
\$y1 \$y2 \$y3	vector components in global coordinates defining local y-axis (optional)
\$sDratio	shear distance from iNode as a fraction of the element length (optional, default = 0.0)
-doRayleigh	to include Rayleigh damping from the bearing (optional, default = no Rayleigh damping contribution)
\$m	element mass (optional, default = 0.0)
\$maxIter	maximum number of iterations to undertake to satisfy element equilibrium (optional, default = 20)
\$tol	convergence tolerance to satisfy element equilibrium (optional, default = 1E-8)

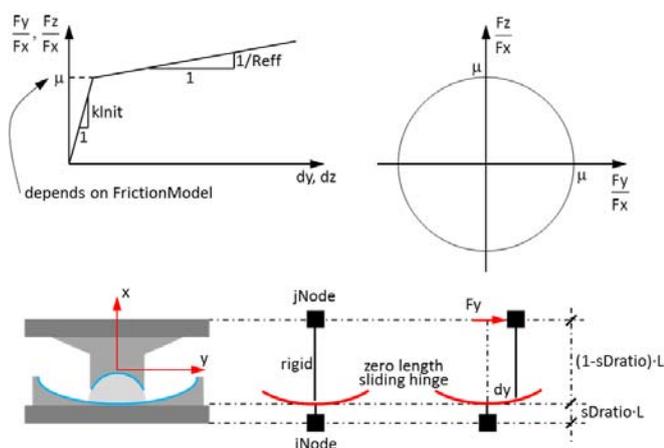


Figura 7.21: Estratto dal sito di Opensees con la descrizione dell'elemento Friction Pendulum

La possibilità di poter decidere la legge che descrive il coefficiente d'attrito non è presente nella maggior parte dei codici di calcolo commerciali che solitamente hanno implementata all'interno solo la dipendenza del coefficiente d'attrito rispetto alla velocità di scorrimento.

I quattro possibili modelli di attrito presenti in "opensees" sono riportati in *Figura 7.22*.

FrictionModel Command

Command_Manual

The frictionModel command is used to construct a friction model object, which specifies the behavior of the coefficient of friction in terms of the absolute sliding velocity and the pressure on the contact area. The command has at least one argument, the friction model type. Each type is outlined below.

```
frictionModel frnMdlType? arg1? ...
```

The type of friction model created and the additional arguments required depend on the frnMdlType? provided in the command.

The following contain information about frnMdlType? and the args required for each of the available friction model types:

- Coulomb Friction
- Velocity Dependent Friction
- Velocity and Pressure Dependent Friction
- Multi-Linear Velocity Dependent Friction

Figura 7.22: Estratto dal sito di Opensees con la descrizione delle possibili leggi di attrito

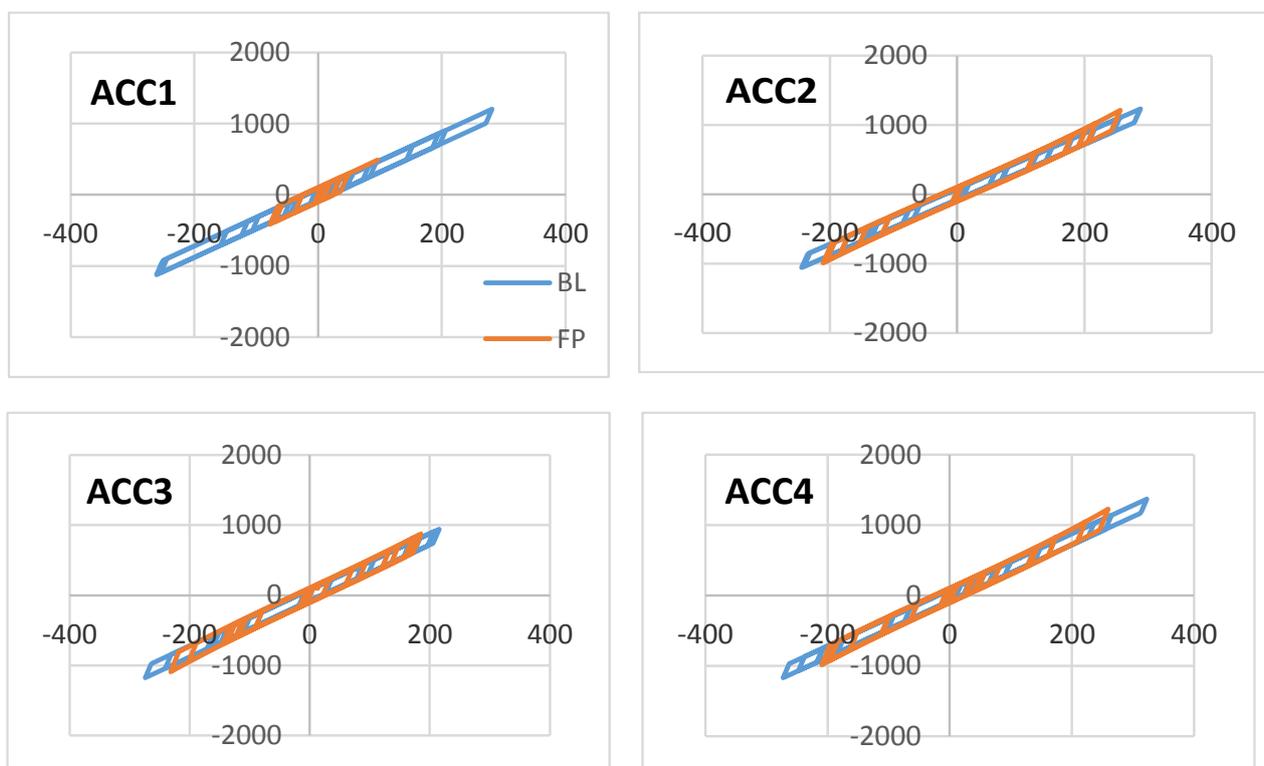
Per primo verrà analizzato il modello basato su una legge d'attrito di tipo coulombiano; quindi senza considerare una eventuale dipendenza del coefficiente rispetto alla velocità o alla variazione di pressione tra le due superfici.

7.8.1 Risultati modello FP senza variazione del coefficiente d'attrito

Le combinazioni assunte sono le stesse del modello bilineare e si è valutato anche per questo modello la differenza dei risultati ottenuti rispetto al modello bilineare e all'analisi lineare equivalente.

Di seguito in *Figura 7.23* sono riportati i confronti per una combinazione rispetto ai 7 accelerogrammi utilizzati; bisogna precisare che il seguente modello richiede un onere computazionale più elevato e può trovare maggiore difficoltà ad andare a convergenza.

Si è rimediato definendo uno "step" temporale di integrazione di base dimezzato che verrà ridotto maggiormente qualora il programma trovasse difficoltà ad andare a convergenza. Tuttavia per alcuni accelerogrammi non è stato possibile completare le analisi; cosa comunque non molto influente visto l'ampio set di accelerogrammi adottato.



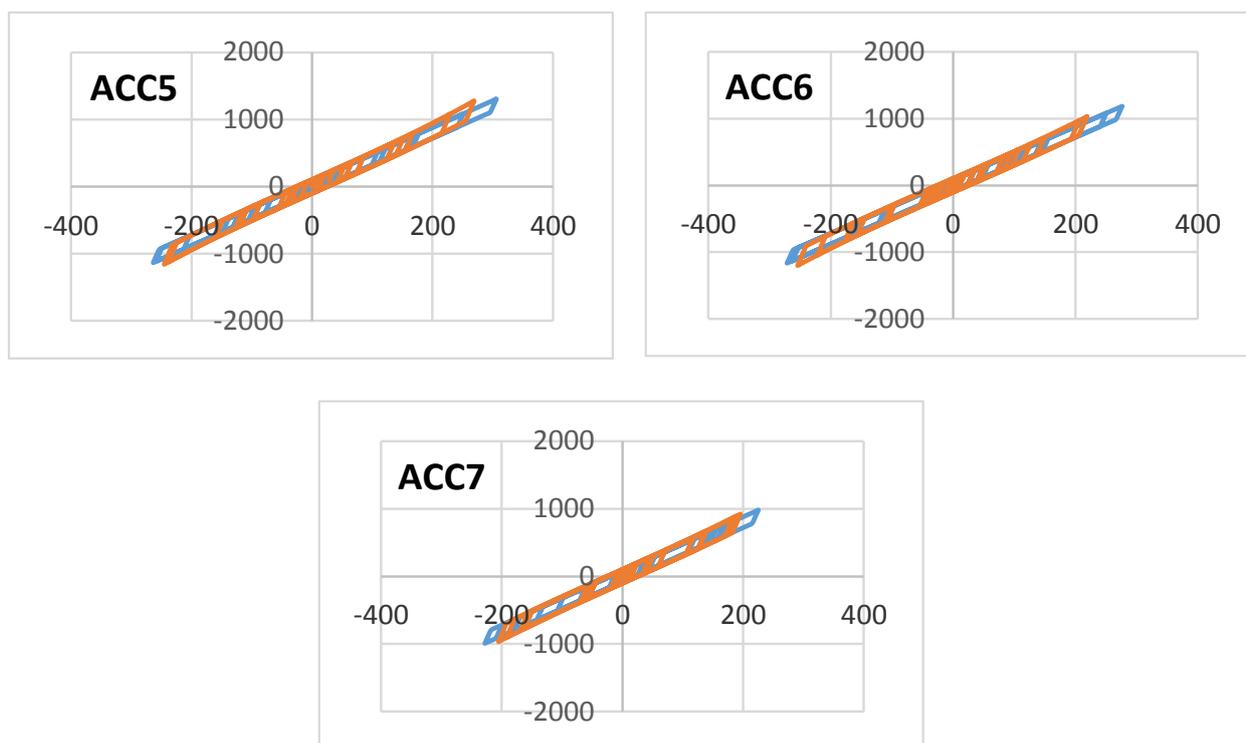


Figura 7.23: Confronto modello BL e FP per la combinazione "R1000-f2.5"

Come si può notare i modelli differiscono abbastanza e si può notare come l'analisi per l'accelerogramma 1 non sia completa e quindi come per un altro paio verranno escluse dai risultati in modo da non influenzare i valori medi; di seguito è riportato il confronto per tutte le combinazioni analizzate.

Combinazioni	R mm	f %	ξ_e [%]	d(ALE) mm	d(BL) _{max} mm	d(BL) _{min} mm	d(BL) _{med} mm	d(FP) _{max} mm	d(FP) _{min} mm	d(FP) _{med} mm	(d(BL) _{med} -d(FP) _{med})/d(BL) _{med} %
1000-2.5	1000	2.50	5	285	323	228	282	269	186	246	12.91
1000-3.5	1000	3.50	8	246	258	190	235	225	156	202	14.09
1000-4.5	1000	4.50	11	215	225	164	203	177	134	163	19.74
1000-5.5	1000	5.50	14	190	204	142	176	167	121	152	13.49
2000-2.5	2000	2.50	11	235	442	257	320	396	210	306	4.18
2000-3.5	2000	3.50	16	205	296	185	246	277	141	235	4.17
2000-4.5	2000	4.50	21	186	263	170	222	250	126	211	5.05
2000-5.5	2000	5.50	25	173	238	153	202	222	110	189	6.18
3000-2.5	3000	2.50	17	199	408	249	320	349	224	290	9.51
3000-3.5	3000	3.50	24	176	336	183	259	322	168	245	5.65
3000-4.5	3000	4.50	29	162	287	158	233	279	148	226	3.14
3000-5.5	3000	5.50	33	153	266	149	212	257	135	195	7.75
4000-2.5	4000	2.50	23	179	448	252	329	423	207	319	3.13
4000-3.5	4000	3.50	30	160	345	174	269	336	171	262	2.55
4000-4.5	4000	4.50	35	150	307	164	242	300	158	236	2.45
4000-5.5	4000	5.50	39	143	280	150	219	272	147	212	3.38

Tabella 7.5: Riassunto risultati confronto ALE e risultati THA per modello BL e modello FP

Se si va a valutare l'andamento della differenza ottenuta per i due modelli rispetto all'aumentare del coefficiente di smorzamento viscoso equivalente si può notare come l'errore tenda ad annullarsi

per valori crescenti; portando i due modelli ad avere risultati comparabili o con errori inferiori al 5%.

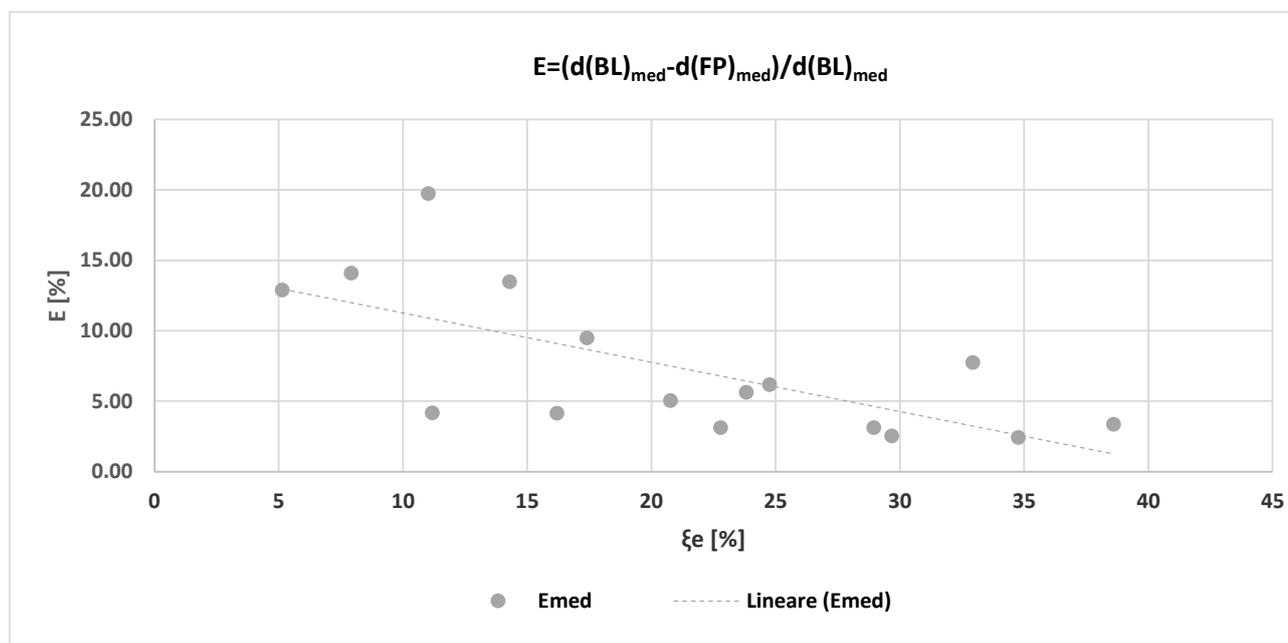


Figura 7.24: Andamento errore tra i modelli BL e FP al variare del coefficiente di smorzamento viscoso

7.8.2 Influenza della velocità e della pressione sul coefficiente d'attrito

7.8.2.1 La teoria dell'attrito

La teoria base sull'attrito a secco si basa su tre presupposti, validati sperimentalmente sotto specifiche condizioni:

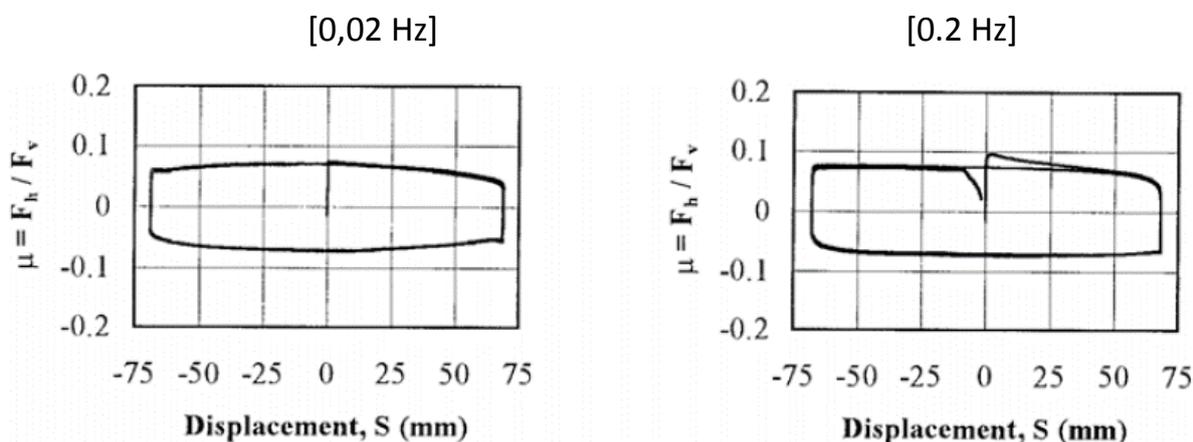
- la forza di attrito totale che si può sviluppare è indipendente dall'area di contatto apparente;
- la forza di attrito totale sviluppabile è proporzionale alla forza normale totale che agisce sull'area,
- in caso di velocità di scorrimento lente, la forza di attrito totale è indipendente dalla velocità;
- immediatamente prima dello slittamento, l'attrito è superiore rispetto a quello durante lo scorrimento (forza di attrito di distacco).

Le ultime due osservazioni sono particolarmente importanti nel caso di moto sismico, quando il movimento attraversa tutte le fasi, dalla sua attivazione fino alle alte velocità, e quando la variazione del coefficiente di attrito rispetto alla condizione di funzionamento dell'interfaccia potrebbe essere rilevante.

Diversi autori hanno studiato la variazione del coefficiente di attrito (es Bondonet e Filiatrault, 1997 Constantinou et al. , 1999). I risultati delle prove eseguite sulle interfacce di tipo foglio "PTFE-acciaio" da Bondonet e Filiatrault (1997) vengono riportati di seguito. Le prove sono state fatte variando la pressione normale agente (5, 15, 30, 45 MPa), la frequenza di ingresso sinusoidale (0,02; 0,2; 1,0; 2,0; 5,0 Hz) e lo spostamento (± 10 mm, ± 70 mm), per una velocità massima di scorrevolezza di 0,82 m/s, corrispondente ad una accelerazione massima di 1,03 g. Sono stati testati tre tipi di Teflon: PTFE non rivestito, PTFE rivestito di fibra di vetro, PTFE rivestito con fibra di carbonio.

I risultati del test sono mostrati nelle *Figure 7.25, 7.26, 7.27*. Da queste ed altre prove sperimentali (Tsai 1997) sulle interfacce teflon-acciaio si osserva che:

- le differenze tra il coefficiente di attrito statico e il coefficiente di attrito dinamico sono piccole a bassa frequenze di eccitazione, mentre aumentando la frequenza di eccitazione una significativa risposta transitoria è registrati;
- il coefficiente di attrito di primo distacco aumenta da un minimo ad un massimo con il crescere della velocità, mentre il coefficiente di attrito dinamico diminuisce all'aumentare della velocità
- entrambi i coefficienti diminuiscono al crescere della pressione di confinamento.
- il coefficiente di attrito quasi statico è linearmente proporzionale alla pressione normale;
- la forza di attrito risultante ha la stessa linea di azione dell'incremento di spostamento ma nel senso opposto di direzione, e dipende sia dalla velocità istantanea sia dalla pressione normale (Immagini seguenti).
- il fattore di amplificazione (cioè l'incremento della forza di attrito dinamico rispetto alla quasi- forza statica e alla stessa pressione normale applicata), è una semplice funzione della velocità di scorrimento, e appropcio ad un valore costante dopo velocità di scorrimento superare un certo valore.
- la forza di attrito quasi statico è indipendente dalla successione della pressione normale sulla superficie di contatto.



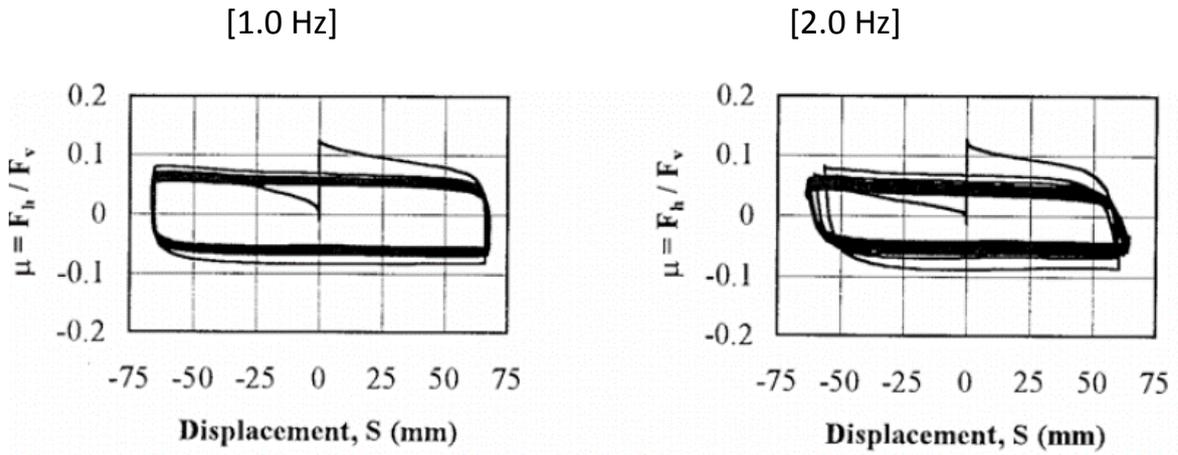


Figura 7.25: Risposta attrito di interfaccia Teflon-acciaio (pressione di confinamento di 30MPa) a diverse frequenze di carico (Bondonet e Filiatrault, 1997)

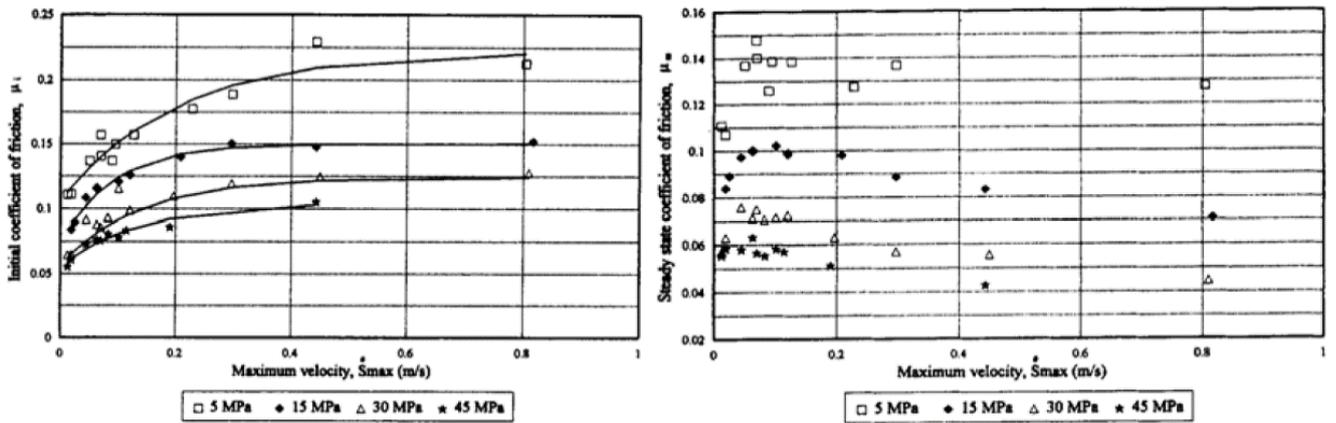


Figura 7.26: Variazioni del coefficiente di attrito di primo distacco (a sinistra) e dinamico (a destra) con velocità massima assoluta (Bondonet e Filiatrault, 1997)

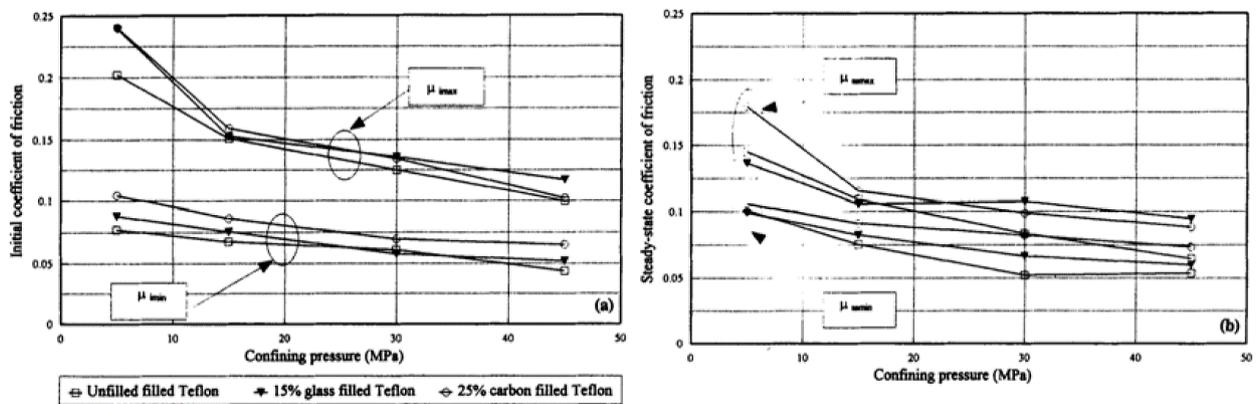


Figura 7.27: Variazioni del coefficiente d'attrito di primo distacco (a sinistra) e dinamico (a destra) coefficienti rispetto alla variazione della pressione di confinamento (Bondonet e Filiatrault, 1997)

Altri risultati mostrano come il coefficiente di attrito vari in funzione del permanere del carico (tempo di caricamento), spostamenti cumulati, usura, rugosità dell'acciaio inossidabile, contaminazione (presenza di detriti all'interfaccia) e lubrificazione. Descrizione dettagliata di questi effetti, relativamente meno importanti, si trovano sugli studi di Constantinou *et al.* (1999).

7.8.2.2 Leggi sulla variazione del coefficiente di attrito rispetto alla pressione e alla velocità

Constantinou *et al.* (1999), dopo un esame approfondito sulla teoria dell'attrito, ha concluso che la forza di taglio "S" sull'interfaccia in prima approssimazione può essere considerata una funzione lineare della pressione effettiva "P", del tipo "S= S₀ + α". Di conseguenza, il coefficiente di attrito, è dato dall'equazione seguente, dove A₀ è l'area apparente di contatto (molto simile alla superficie di contatto reale per questo tipo di interfacce) e N è il carico normale.

Considerando che "α" è molto piccolo rispetto agli altri termini, l'inverso del coefficiente di attrito si trova ad essere una funzione lineare della pressione normale, osservazione coerente con i risultati sperimentali (Figura 7.28).

$$\mu = \frac{A_0 S_0}{N} + \alpha \tag{2.}$$

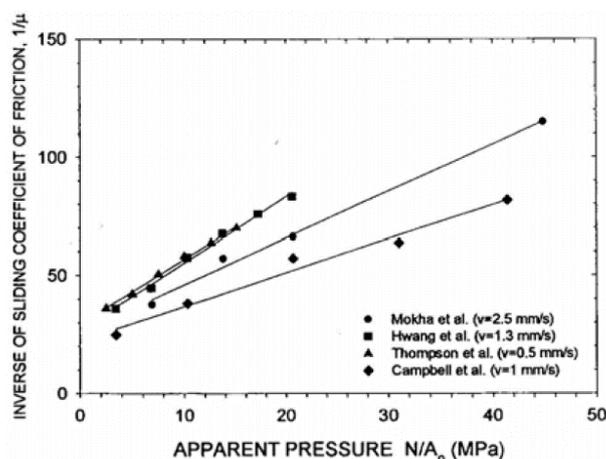


Figura 7.28: Dipendenza di "1 / μ" rispetto alla pressione durante lo scorrimento (Constantinou *et al.*, 1999)

La Figura 7.29 mostra la dipendenza del coefficiente di attrito rispetto alla velocità di scorrimento ed alla pressione agente sui dispositivi per superfici pulite e lubrificate ed a temperatura ambiente normale. Il valore di scorrimento del coefficiente di attrito è caratterizzato da un valore minimo f_{min} che cresce progressivamente con la velocità, raggiungendo un valore costante f_{max} per le alte velocità. L'incremento rispetto al f_{min} è circa 5-6 volte più grande rispetto a f_{min} per velocità che interessano le applicazioni sismiche (velocità sopra i 0,5 m/s). In queste condizioni c'è un notevole riscaldamento all'interfaccia, che può anche portare ad una fusione

locale del PTFE, provocando una ulteriore riduzione del coefficiente di attrito, come discusso nella sezione seguente.

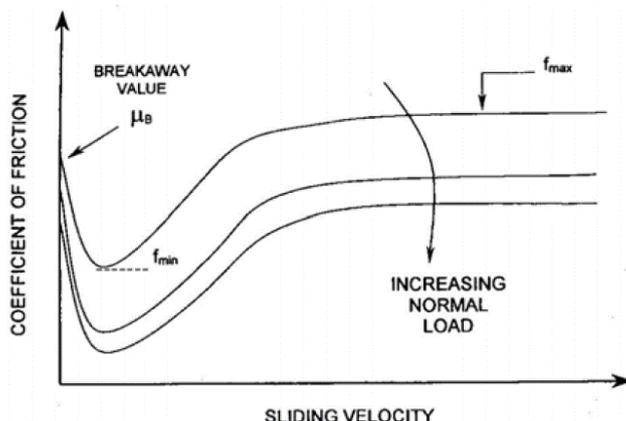


Figura 7.29:Coefficiente di attrito tra superfici PTFE e acciaio inox lucidato al variare della velocità e del carico normale

In generale, per un valore fisso della pressione apparente, il coefficiente di attrito dinamico può essere descritto dall'equazione seguente (Mokha *et al.*, 1988 Constantinou *et al.*, 1990 e 1993), dove "a" = 20-30 s / m per PTFE non trattati, e "a" > 100 s / m per PTFE trattato. La Formula 7.7 descrive questa variazione ed è tracciata nelle Figure 7.30, 7.31, e mostra gli effetti evidenti del rapporto f_{max}/f_{min} .

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

Formula 7.7:Relazione tra il coefficiente d'attrito e la velocità di scorrimento

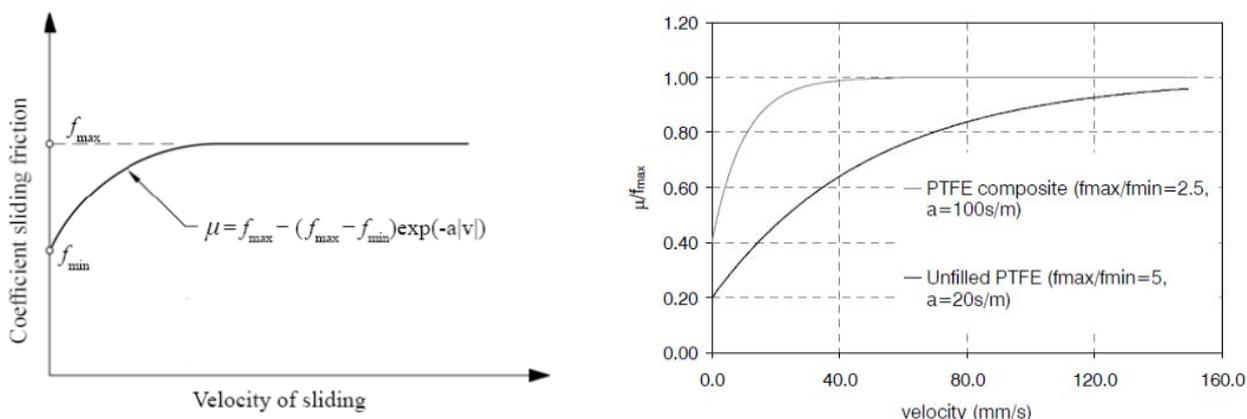


Figura 7.30:Effetto del parametro velocità e del rapporto f_{max}/f_{min}

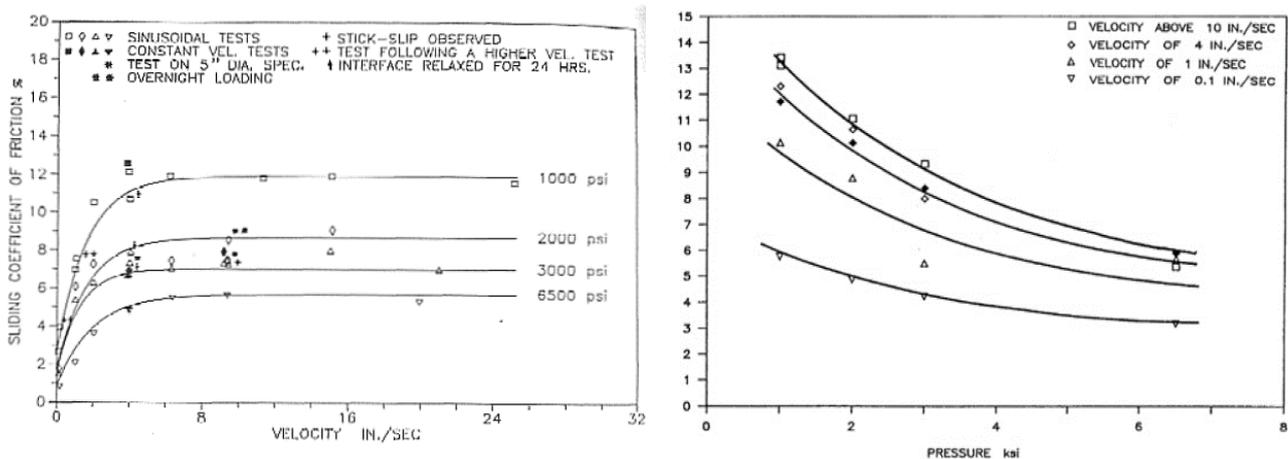


Figura 7.31: Effetto della velocità e della pressione su "μ" di Teflon non trattato (a destra), e nel valore f_{max} del Teflon trattato con fibra di vetro (Constantinou et al., 1999)

In generale, i parametri f_{max} , f_{min} e "a" sono funzioni di pressione e temperatura del dispositivo. Tuttavia, la dipendenza di f_{min} e "a" rispetto alla pressione è debole (non quella di f_{max}) e può essere trascurata (Tsopelas et al., 1994).

Un'espressione rappresentativa (in caso di Teflon) che descrive la variazione del parametro f_{max} rispetto alla pressione è data dalla Formula 7.8 ed è rappresentata in Figura 7.32.

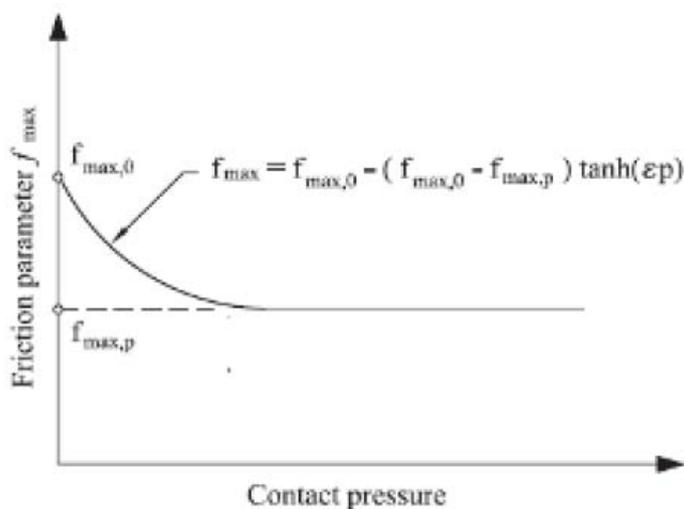


Figura 7.32: Effetto della pressione su "f_max" di Teflon (Constantinou et al., 1994)

$$f_{max} = f_{max,0} - (f_{max,0} - f_{max,p}) \tanh(\epsilon p)$$

Formula 7.8: Relazione tra il coefficiente d'attrito massimo e la pressione

Dove il parametro f_{max} varia da $f_{max,0}$ a pressione quasi nulla, a $f_{max,p}$ ad altissima pressione, "p" è la pressione normale agente sul dispositivo, e "ε" è una costante che controlla la variazione di f_{max} tra molto basse e altissime pressioni. La figura mostra la variazione presunta del parametro di attrito f_{max} con la pressione (tipico comportamento in caso di Teflon, Soong e Constantinou, 1994).

7.8.3 Modello di attrito in opensees

Come riportato sopra in OPENSEES è implementato un modello che permette di considerare la variazione del coefficiente di attrito rispetto alla pressione agente ed alla velocità per ogni step di integrazione temporale.

Si riporta di seguito la descrizione del modello presa dal sito "<http://opensees.berkeley.edu>".

Velocity and Pressure Dependent Friction

Command_Manual

This command is used to construct a VelPressureDep friction model object.

frictionModel VelPressureDep \$frnTag \$muSlow \$muFast0 \$A \$deltaMu \$alpha \$transRate

\$frnTag	unique friction model object tag
\$muSlow	coefficient of friction at low velocity
\$muFast0	initial coefficient of friction at high velocity
\$A	nominal contact area
\$deltaMu	pressure parameter calibrated from experimental data
\$alpha	pressure parameter calibrated from experimental data
\$transRate	transition rate from low to high velocity

Figura 7.33:Descrizione modello di attrito in Opensees

Le seguenti parti di programma sono prese dagli script completi che implementano il modello "VelPressureDep friction model" in OPENSEES (McKenna, F., Fenves, G., and Scott, M. (2006)).

Legge che regola il coefficiente di attrito " μ_{fast} " (μ_{fast}) al variare di "N":sforzo Normale

$$\mu_{Fast} = \mu_{Fast0} - \delta\mu * \tanh(\alpha * \text{trialN}/A)$$

Legge che regola il coefficiente di attrito " μ " al variare di "v" :velocità

$$\mu = \mu_{Fast} - (\mu_{Fast} - \mu_{Slow}) * \exp(-\text{transRate} * \text{fabs}(\text{trialVel}))$$

Come riportato sopra in OPENSEES è implementato un modello che permette di considerare la variazione del coefficiente di attrito rispetto alla pressione agente ed alla velocità per ogni step di integrazione temporale.

7.8.4 Parametri considerati nel modello

Come si è visto il coefficiente di attrito tra acciaio e teflon può essere descritto dalla seguente legge per quanto riguarda l'influenza della velocità sul coefficiente d'attrito:

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

Per l'analisi che si sta per svolgere si è assunto:

$$f_{max} = f_d$$
$$f_{min} = f_d/2.5$$
$$\alpha = 0.01$$

Formula 7.9: Parametri assunti per il modello per la legge attrito-velocità

Le assunzioni fatte sono giustificate da studi su dati ricercati tra i produttori di cuscinetti di teflon.

Nel grafico seguente è riportato l'andamento del coefficiente di frizione al variare della velocità.

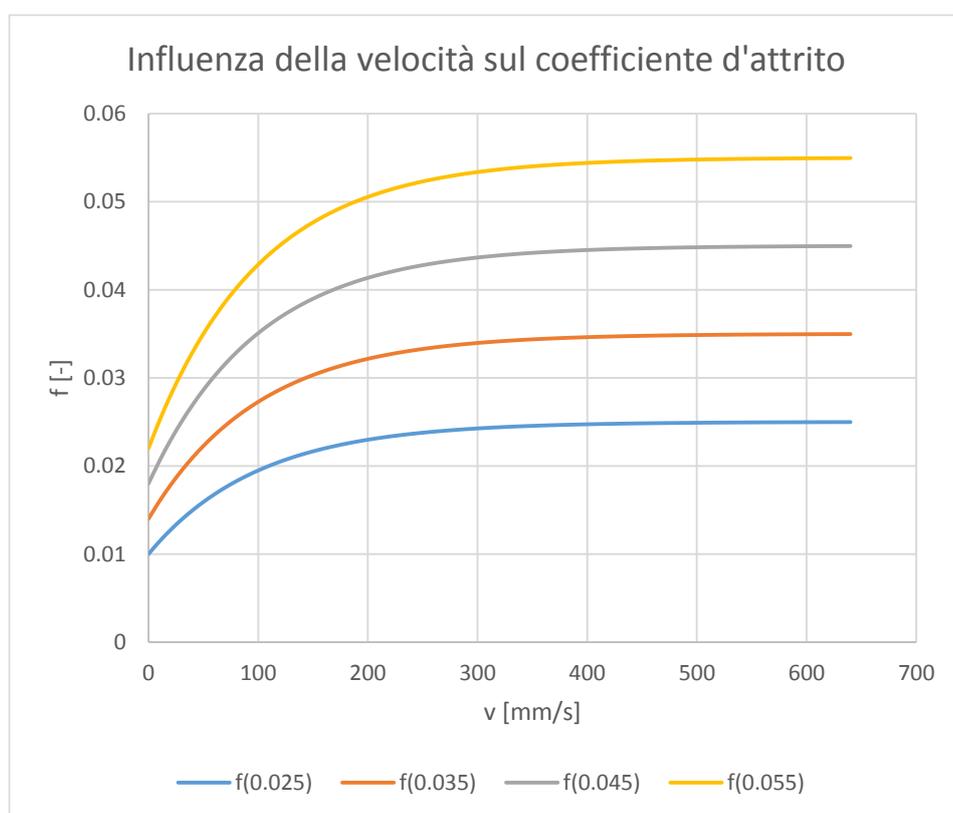


Figura 7.34: Andamento coefficiente d'attrito per i valori scelti per l'analisi a variare della velocità

Per meglio comprendere l'influenza della velocità in una analisi sismica si riporta di seguito l'andamento della velocità per un isolatore tipo sottoposto ad una delle accelerazioni di input.

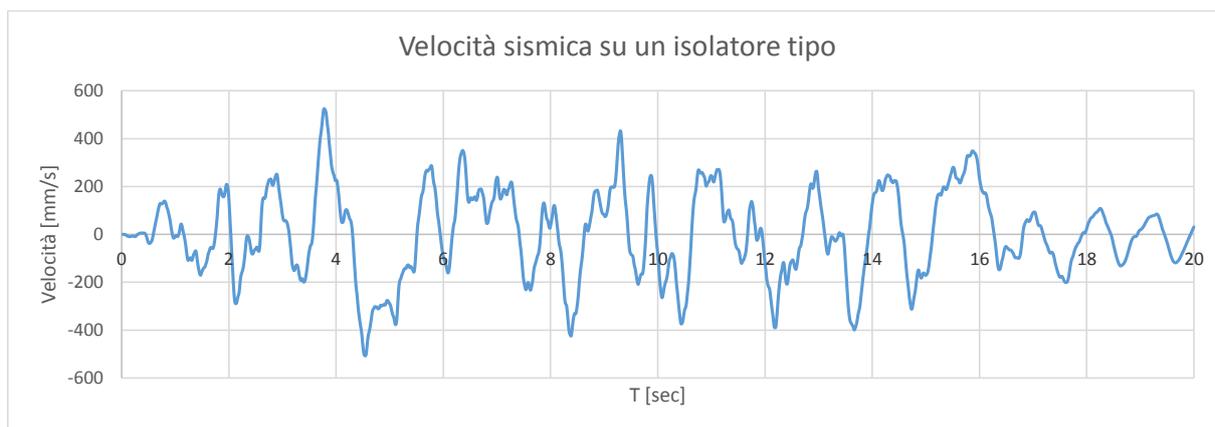


Figura 7.35: Andamento tipico della velocità per un evento sismico

L'influenza della pressione sul coefficiente d'attrito la legge è:

$$f_{max} = f_{max,0} - (f_{max,0} - f_{max,p}) \tanh(\varepsilon p)$$

I parametri assunti per l'analisi sono:

$$f_{max,0} = f_d * 5$$

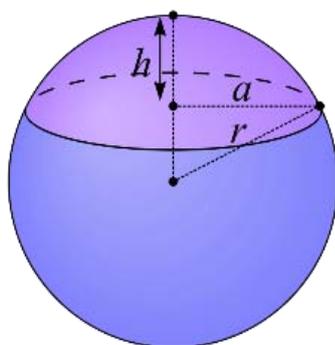
$$f_{max,p} = f_d$$

$$\varepsilon = 0.07$$

Formula 7.10: Parametri assunti per il modello per la legge attrito-pressione

Bisogna notare che lo script del programma in OPENSEES richiede l'inserimento dell'area di contatto tra le 2 superfici di scorrimento.

Noto il carico applicato al modello e fatto riferimento alla pressione limite assunta per il teflon di 60 MPa si è calcolata una superficie di scorrimento tale da ottenere una pressione agente intorno ai 40 MPa; visto la figura riportata di seguito si riporta il calcolo dell'area di contatto per un valore di a=180mm.



a [mm]	180.00	180.00	180.00	180.00
r [mm]	1000.00	2000.00	3000.00	4000.00
h [mm]	16.33	8.12	5.40	4.05
S [mm ²]	102625.71	101994.56	101879.38	101839.18
P [Mpa]	38.98	39.22	39.26	39.28
P (+30%) [Mpa]	50.67	50.98	51.04	51.06
P (-30%) [Mpa]	27.28	27.45	27.48	27.49

Figura 7.36: Determinazione area di contatto

Le assunzioni fatte sono giustificate da studi su dati ricercati tra i produttori di cuscinetti di teflon.

Nel grafico seguente è riportato l'andamento del coefficiente di frizione al variare della pressione.

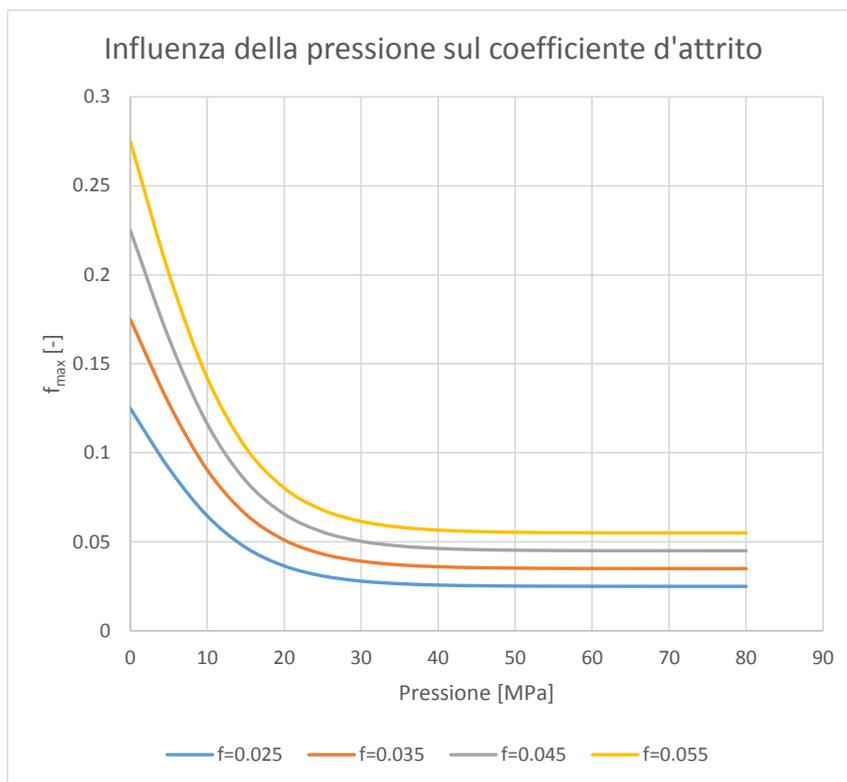


Figura 7.37: Andamento coefficiente d'attrito per i valori scelti per l'analisi a variare della pressione

Lo script ottenuto dalle seguenti assunzioni per il "frictionModel VelPressureDep" è:

```
# Define friction model for FP elements
# -----
# frictionModel Coulomb tag mu
frictionModel Coulomb 1 $f

# frictionModel VDependent tag muSlow muFast transRate
frictionModel VDependent 1 [expr $f/2.5] $f 0.01
puts "muSlow:[expr $f/2.5] muFast:$f transRate:0.01"

# frictionModel VPDependent tag muSlow muFast0 A deltaMu alpha transRate
frictionModel VPDependent 1 [expr $f/2.5] $f [expr 2.*3.14*$R*( $R-pow((pow($R,2.)-pow(180.,2.)),0.5))] [expr 4.*$f] 0.07 0.01
puts "muSlow:[expr $f/2.5] muFast:$f A:[expr 2.*3.14*$R*( $R-pow((pow($R,2.)-pow(180.,2.)),0.5))] deltaMu:[expr 4.*$f] alpha:0.07 transRate:0.01 "
```

Figura 7.38: Estratto dal programma contenente le definizioni delle 3 leggi di variazioni di attrito assunte per i vari casi considerati

7.8.5 Risultati modello FP con variazione del coefficiente d'attrito

Nel modello in esame è stata applicata inoltre una accelerazione verticale di picco $a_G=0.15g$; valore limite definito da normativa.

Mel grafico seguente è riportato il confronto tra i risultati del modello senza considerare la variazione del coefficiente d'attrito e quello che valuta l'influenza della velocità e della pressione su tale coefficiente; per la combinazione tipo (R=2500 f=5.5%) e accelerazione 1:

- Modello BL;
- Modello FP con solo accelerazione orizzontale;
- Modello FP con anche accelerazione verticale e coefficiente di frizione costante;
- Modello FP con accelerazione verticale ed un modello di frizione dipendente dalla velocità e dalla pressione.

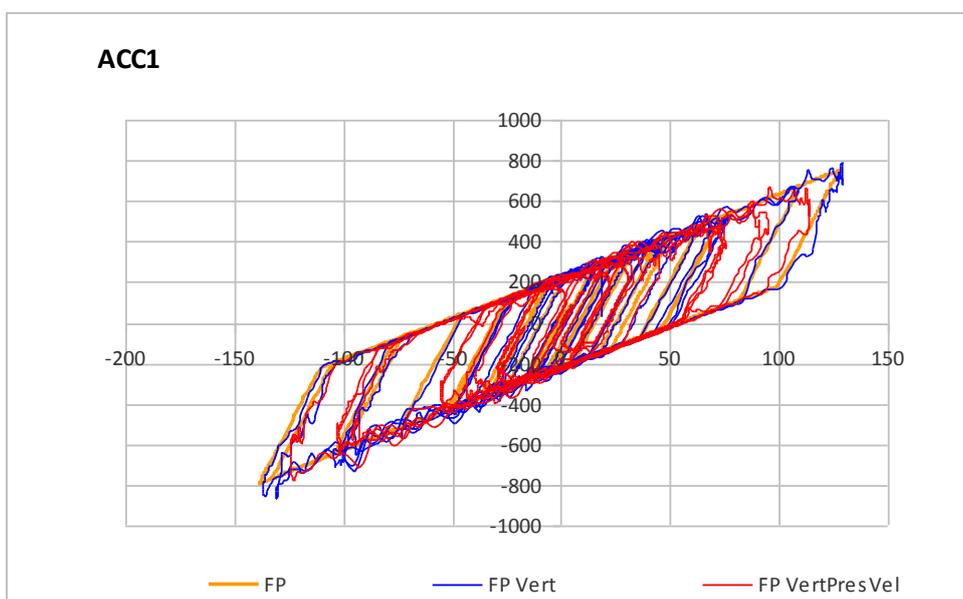


Figura 7.39: Confronto diagrammi isteretici per i vari modelli FP per una accelerazione e una combinazione

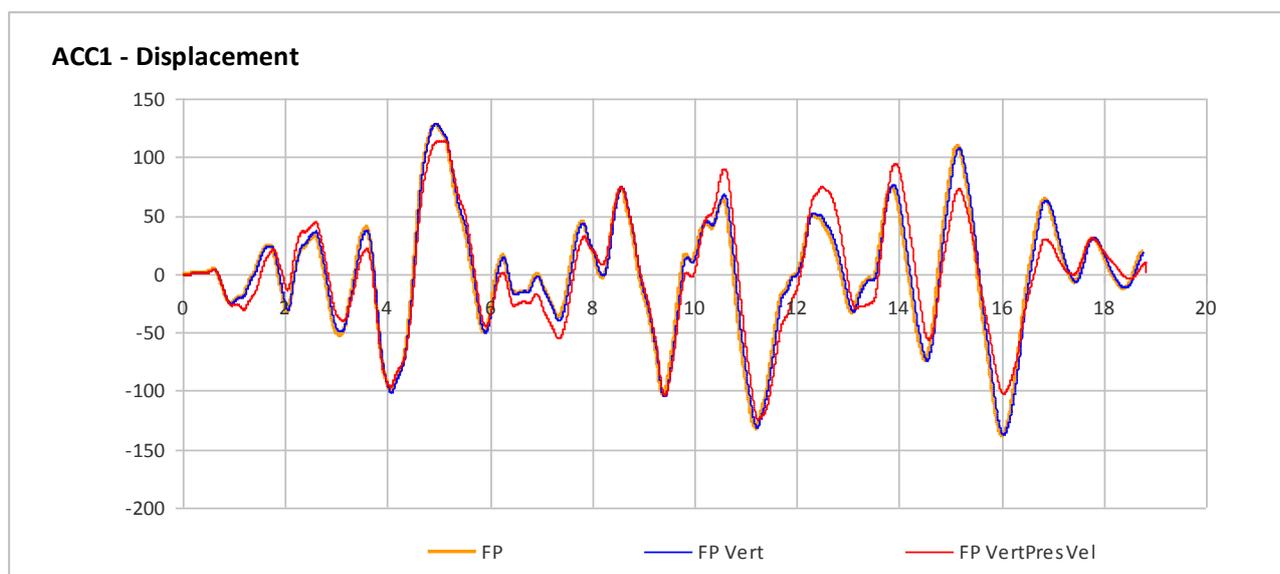


Figura 7.40: Confronto spostamenti per i vari modelli FP per una accelerazione e una combinazione

Comb.	Dati				NoVert			Vert			E=(d(NoVert) _{med} -d(Vert) _{med})/d(NoVert) _{med}		
	R mm	f %	ξe [%]	d(ALE) mm	d(THA) _{max} mm	d(THA) _{min} mm	d(THA) _{med} mm	d(THA) _{max} mm	d(THA) _{min} mm	d(THA) _{med} mm	E _{max} %	E _{min} %	E _{med} %
1000-2.5	1000	2.50	5	284.97	269.04	185.50	245.92	264.51	186.68	243.26	1.68	0.63	1.08
1000-3.5	1000	3.50	8	246.30	225.31	156.44	201.85	224.06	155.21	202.30	0.55	0.78	0.22
1000-4.5	1000	4.50	11	214.93	177.23	133.54	163.10	195.12	134.69	170.77	10.09	0.86	4.70
1000-5.5	1000	5.50	14	189.66	167.16	121.42	152.45	164.70	105.87	148.22	1.48	12.81	2.77
2000-2.5	2000	2.50	11	234.50	396.19	210.31	306.47	397.92	209.92	290.62	0.44	0.18	5.17
2000-3.5	2000	3.50	16	204.81	276.57	141.32	235.47	274.60	139.71	235.22	0.71	1.14	0.10
2000-4.5	2000	4.50	21	185.77	250.25	126.36	211.03	246.46	127.25	210.26	1.51	0.71	0.36
2000-5.5	2000	5.50	25	172.89	222.25	110.42	189.20	220.06	114.66	188.03	0.99	3.84	0.61
3000-2.5	3000	2.50	17	199.22	349.18	224.03	289.56	393.27	225.55	305.04	12.63	0.68	5.35
3000-3.5	3000	3.50	24	175.68	321.63	168.25	244.58	325.59	167.07	250.64	1.23	0.70	2.47
3000-4.5	3000	4.50	29	161.83	279.25	147.74	225.55	277.18	148.03	225.26	0.74	0.20	0.13
3000-5.5	3000	5.50	33	153.10	256.66	135.04	195.18	253.50	135.61	201.71	1.23	0.42	3.35
4000-2.5	4000	2.50	23	178.89	422.90	207.44	318.69	421.31	206.75	309.39	0.38	0.33	2.92
4000-3.5	4000	3.50	30	160.14	336.14	171.34	261.85	335.81	173.10	268.37	0.10	1.03	2.49
4000-4.5	4000	4.50	35	149.54	300.01	157.67	235.81	297.78	157.75	233.97	0.74	0.05	0.78
4000-5.5	4000	5.50	39	142.81	272.34	147.04	211.89	268.48	145.33	210.84	1.42	1.17	0.49

Tabella 7.6: Confronto dati tra i due modelli con e senza accelerazione verticale

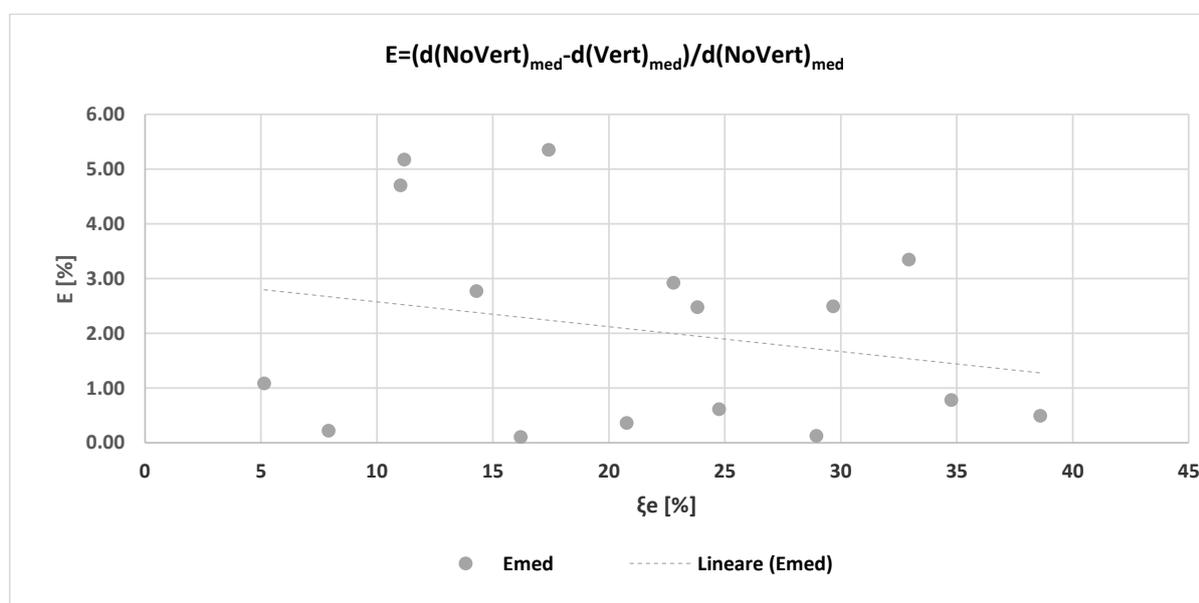


Figura 7.41: Andamento differenza tra il modello con e senza accelerazione verticale al variare del coefficiente di smorzamento viscoso

L'effetto di una accelerazione verticale con $a_G: 0.4g$ porta ad errori contenuti entro il 6% e non risulta esserci una dipendenza rispetto al coefficiente di smorzamento viscoso.

Si è ritenuto opportuno ripetere l'analisi parametrica per 3 serie di accelerogrammi verticali; di seguito sono riportati i risultati e un grafico che mette in evidenza l'andamento dell'errore ottenuto rispetto al modello bilineare.

Comb.	FP(Accelerazione verticale 1)			FP(Accelerazione verticale 2)			FP(Accelerazione verticale 3)		
	d(THA) _{max}	d(THA) _{min}	d(THA) _{med}	d(THA) _{max}	d(THA) _{min}	d(THA) _{med}	d(THA) _{max}	d(THA) _{min}	d(THA) _{med}
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1000-2.5	264.51	186.68	243.26	265.87	185.58	243.41	268.98	187.58	245.70
1000-3.5	218.22	163.48	196.30	223.94	155.56	204.55	226.35	157.56	204.92
1000-4.5	177.23	133.54	163.10	195.06	134.29	170.88	196.65	134.53	172.36
1000-5.5	167.16	121.42	152.45	165.65	105.86	148.54	167.98	104.79	142.26
2000-2.5	396.19	210.31	306.47	396.35	209.20	289.91	396.52	213.57	290.93
2000-3.5	276.57	141.32	235.47	275.09	140.67	235.19	277.04	140.96	236.15
2000-4.5	250.25	126.36	211.03	247.23	127.01	210.32	251.10	128.14	212.52
2000-5.5	222.25	110.42	189.20	219.76	118.01	209.35	220.63	112.94	184.46
3000-2.5	393.01	224.03	304.34	392.36	225.54	302.37	394.43	225.81	305.34
3000-3.5	321.63	168.25	244.58	324.73	167.06	250.65	322.36	167.38	251.46
3000-4.5	279.25	147.74	225.55	279.25	147.74	225.55	278.71	148.07	226.42
3000-5.5	256.66	135.04	195.18	253.90	135.55	201.84	255.45	136.82	203.47
4000-2.5	422.90	207.44	318.69	422.00	205.59	318.42	421.55	207.63	317.48
4000-3.5	336.14	171.34	261.85	336.56	172.50	261.36	335.03	170.11	261.85
4000-4.5	300.01	157.67	235.81	298.38	157.91	234.41	298.11	158.41	235.26
4000-5.5	272.34	147.04	211.89	269.23	145.67	211.25	270.89	116.86	198.55

Tabella 7.7: Confronto dati ottenuti dai modelli FP per i 3 accelerogrammi verticali

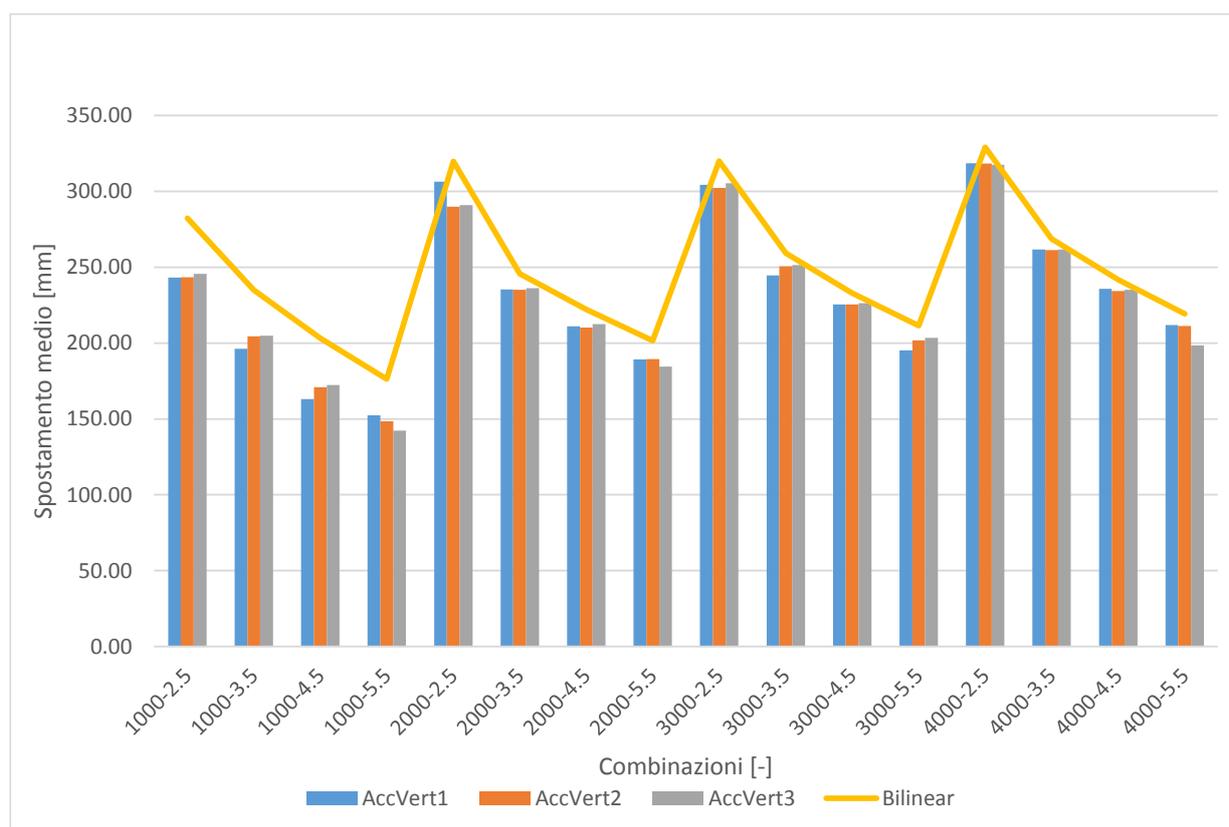


Figura 7.42: Confronto grafico risultati ottenuti tra i modelli FP e BL

Si può notare come la differenza tra i risultati ottenuti per le 3 accelerazioni verticali sono molto discrete.

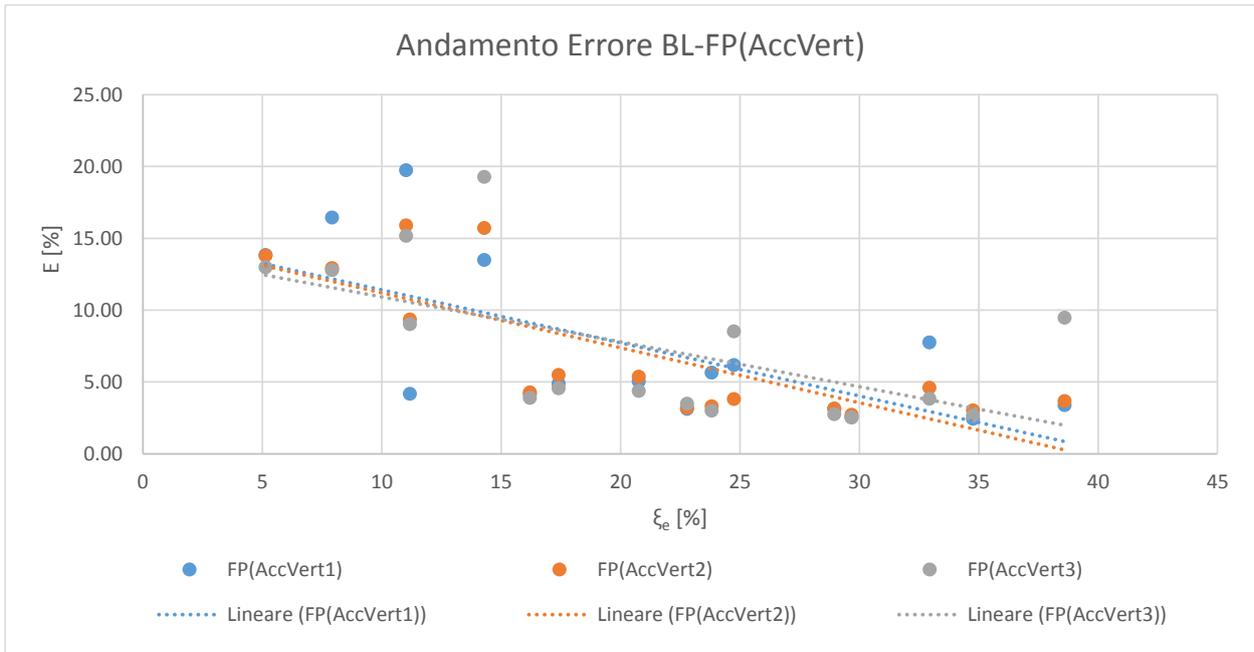


Figura 7.43: Andamento differenza BL e FP al variare dello smorzamento viscoso equivalente

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per il modello con la variazione del coefficiente di attrito al variare della pressione e la velocità.

Comb.	Dati				Vert			VertPresVel			E=(d(Vert) _{med} -d(VertPresVel) _{med})/d(Vert) _{med}		
	R mm	f %	ξ _e [%]	d(ALE) mm	d(THA) _{max} mm	d(THA) _{min} mm	d(THA) _{med} mm	d(THA) _{max} mm	d(THA) _{min} mm	d(THA) _{med} mm	E _{max} %	E _{min} %	E _{med} %
1000-2.5	1000	2.50	5	284.97	264.51	186.68	243.26	263.42	199.66	241.04	0.41	6.95	0.91
1000-3.5	1000	3.50	8	246.30	224.06	155.21	202.30	215.96	158.10	198.90	3.62	1.86	1.68
1000-4.5	1000	4.50	11	214.93	195.12	134.69	170.77	187.55	119.92	166.76	3.88	10.97	2.35
1000-5.5	1000	5.50	14	189.66	164.70	105.87	148.22	164.93	109.14	143.87	0.14	3.08	2.94
2000-2.5	2000	2.50	11	234.50	397.92	209.92	290.62	400.12	202.39	290.28	0.55	3.59	0.12
2000-3.5	2000	3.50	16	204.81	274.60	139.71	235.22	286.36	143.59	228.78	4.28	2.78	2.74
2000-4.5	2000	4.50	21	185.77	246.46	127.25	210.26	244.84	130.23	204.40	0.66	2.33	2.79
2000-5.5	2000	5.50	25	172.89	220.06	114.66	188.03	213.73	118.95	178.82	2.87	3.75	4.90
3000-2.5	3000	2.50	17	199.22	393.27	225.55	305.04	376.74	223.29	299.58	4.21	1.00	1.79
3000-3.5	3000	3.50	24	175.68	325.59	167.07	250.64	324.90	167.48	242.11	0.21	0.25	3.40
3000-4.5	3000	4.50	29	161.83	277.18	148.03	225.26	277.27	139.17	212.84	0.03	5.99	5.51
3000-5.5	3000	5.50	33	153.10	253.50	135.61	201.71	235.76	132.11	189.41	6.99	2.58	6.10
4000-2.5	4000	2.50	23	178.89	421.31	206.75	309.39	419.31	204.89	316.56	0.47	0.90	2.32
4000-3.5	4000	3.50	30	160.14	335.81	173.10	268.37	332.44	170.52	255.74	1.00	1.49	4.71
4000-4.5	4000	4.50	35	149.54	297.78	157.75	233.97	283.51	143.41	222.83	4.79	9.09	4.76
4000-5.5	4000	5.50	39	142.81	268.48	145.33	210.84	245.76	136.70	195.21	8.46	5.93	7.41

Tabella 7.8: Confronto dati ottenuti tra i modelli FP con e senza variazione del coefficiente di attrito

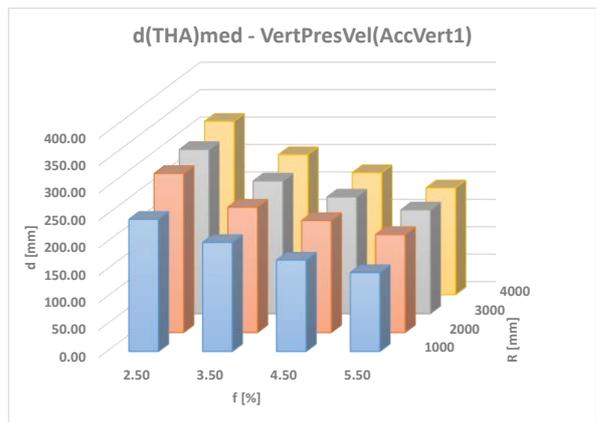
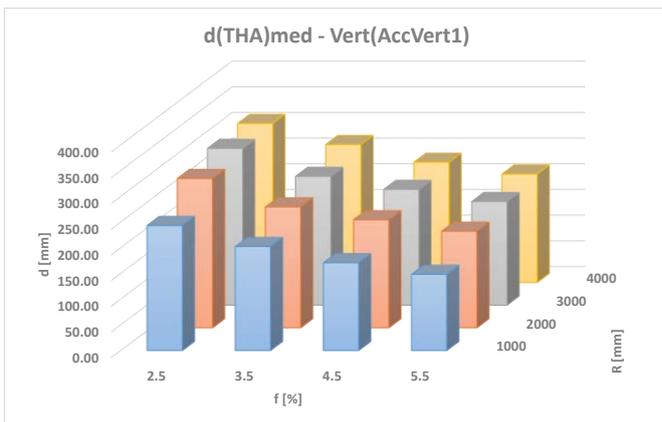


Figura 7.44: Confronto spostamenti medi tra i modelli FP con e senza variazione del coefficiente di attrito

Come per il modello senza variazione del coefficiente di attrito si sono svolte altre 2 analisi con le altre 2 serie di accelerogrammi verticali.

Di seguito se ne riportano i risultati ed un confronto con il modello bilineare.

Comb.	BL			VertPresVel 1			VertPresVel 2			VertPresVel 3		
	d(THA) _{max}	d(THA) _{min}	d(THA) _{med}	d(THA) _{max}	d(THA) _{min}	d(THA) _{med}	d(THA) _{max}	d(THA) _{min}	d(THA) _{med}	d(THA) _{max}	d(THA) _{min}	d(THA) _{med}
	mm											
1000-2.5	322.80	227.97	282.37	263.42	199.66	241.04	264.52	199.43	241.45	266.62	201.12	245.83
1000-3.5	258.30	189.98	234.96	215.96	158.10	198.90	216.75	157.83	199.14	216.24	156.74	199.96
1000-4.5	225.37	164.29	203.21	187.55	119.92	166.76	187.38	120.48	168.06	187.52	121.13	167.66
1000-5.5	204.21	141.54	176.23	164.93	109.14	143.87	165.24	109.06	147.52	166.68	110.79	142.57
2000-2.5	442.42	256.94	319.83	400.12	202.39	290.28	399.24	202.64	289.94	398.08	201.87	299.14
2000-3.5	296.32	185.09	245.71	286.36	143.59	228.78	285.47	143.50	228.60	285.66	144.68	229.04
2000-4.5	263.27	170.36	222.25	244.84	130.23	204.40	244.83	130.23	204.47	245.22	132.96	202.21
2000-5.5	238.46	152.66	201.66	213.73	118.95	178.82	213.48	117.74	186.68	212.62	119.41	183.07
3000-2.5	408.35	248.70	319.98	376.74	223.29	299.58	340.26	223.75	291.65	375.60	224.59	299.47
3000-3.5	336.17	183.26	259.24	324.90	167.48	242.11	324.72	167.34	241.84	321.51	167.46	241.50
3000-4.5	287.31	158.38	232.86	277.27	139.17	212.84	277.48	138.59	212.92	273.43	139.04	212.88
3000-5.5	266.01	148.87	211.58	235.76	132.11	189.41	236.03	131.72	189.43	236.16	133.10	189.42
4000-2.5	447.95	251.70	329.00	419.31	204.89	316.56	419.12	204.60	316.39	418.57	205.06	316.11
4000-3.5	345.31	174.13	268.69	332.44	170.52	255.74	332.70	170.62	255.59	328.93	171.37	255.01
4000-4.5	307.36	164.41	241.72	283.51	143.41	222.83	284.64	142.80	222.73	282.05	143.31	222.85
4000-5.5	280.24	150.49	219.31	245.76	136.70	195.21	246.71	136.34	195.52	247.32	138.02	195.62

Tabella 7.9: Confronto dati spostamento per 3 accelerogrammi verticali diversi

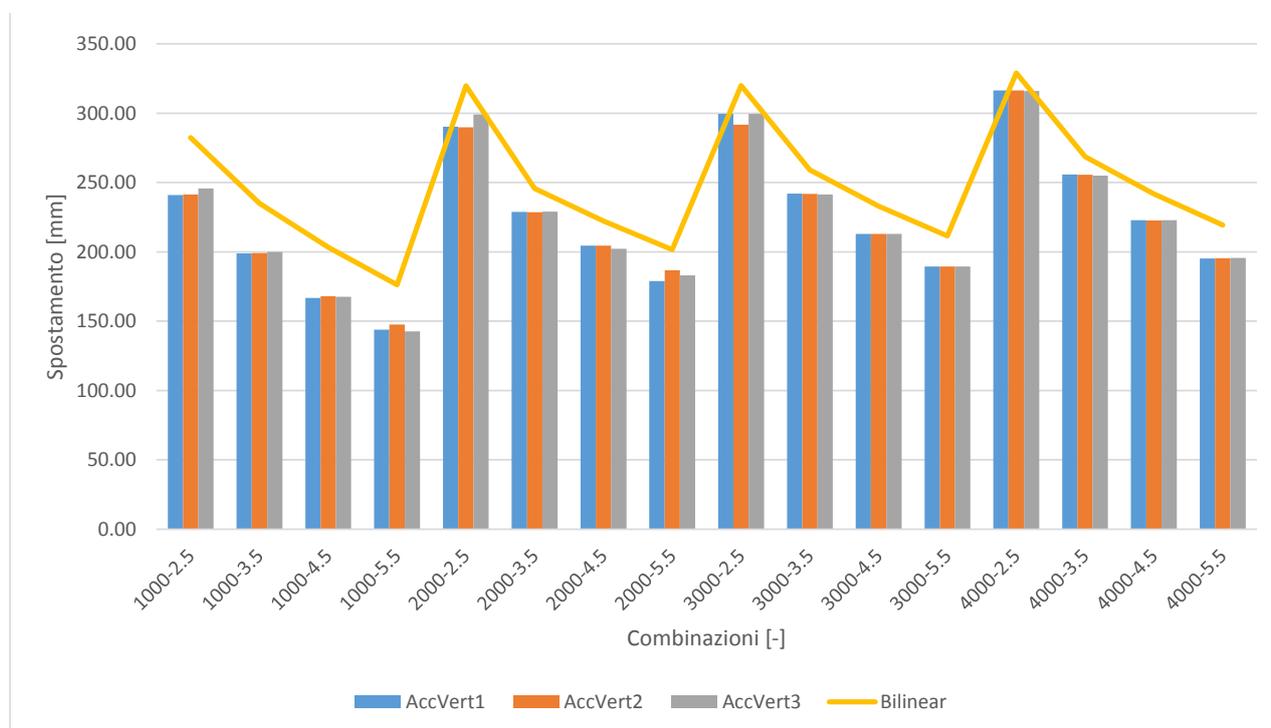


Figura 7.45: Confronto grafico risultati ottenuti tra i modelli FP (VertPresVel) e BL

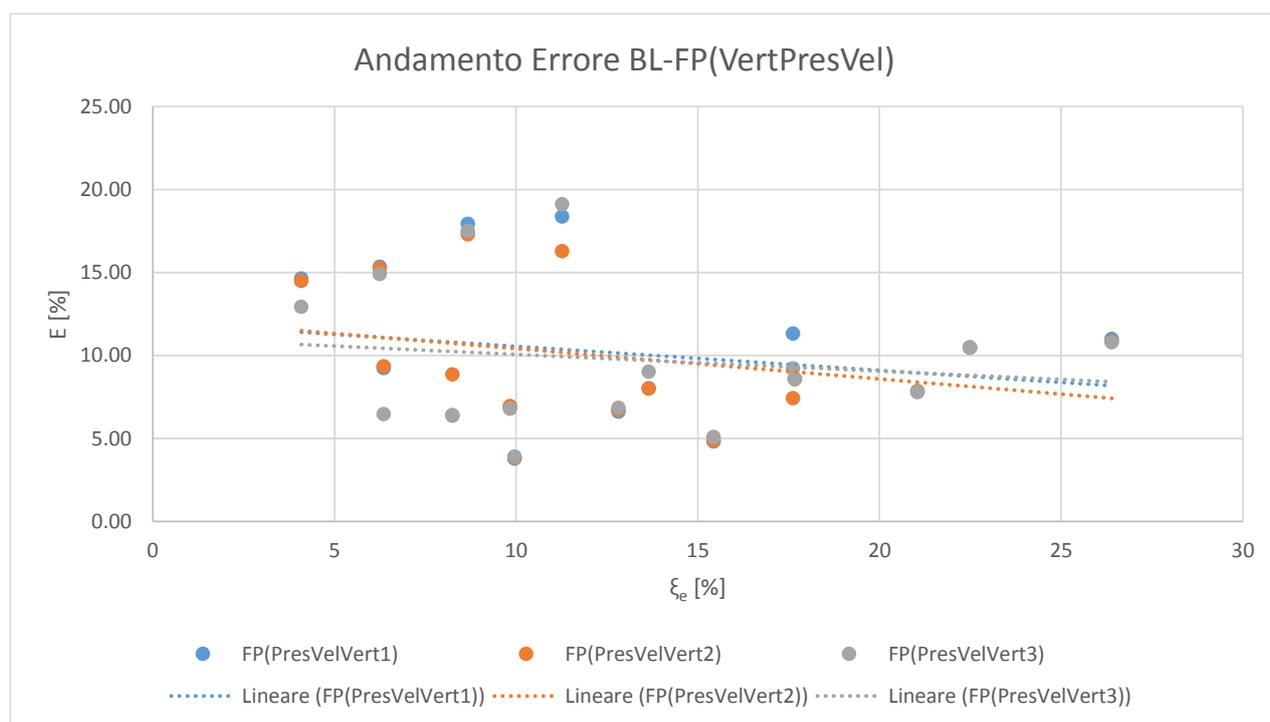


Figura 7.46: Andamento differenza BL e FP(VertPresVel) al variare delo smorzamento viscoso equivalente

Come si può evidenziare dai grafici riportati sopra l'errore tra il considerare o no l'influenza della velocità e della pressione sul coefficiente di attrito risulta dipendente dal coefficiente di smorzamento viscoso equivalente (l'errore sulla stima dello spostamento massimo si attesta su un range [0 –10%]).

Rispetto all'andamento dell'errore tra il modello bilineare di partenza e quello che tiene conto della variazione del coefficiente d'attrito non si evidenziano particolari differenze; come si può vedere dal grafico sopra i punti risultano essere molto dispersi e quindi non manifestano una particolare dipendenza rispetto al coefficiente di smorzamento viscoso equivalente.

7.9 Conclusioni sul modello pila-isolatore

Attraverso questo studio è stato possibile verificare e commentare i limiti posti da normativa sull' utilizzazione di un modello lineare per gli isolatori friction pendulum.

Per isolatori con diagrammi forza-spostamento stretti e quindi caratterizzati da un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente inferiore al 15% sono ben rappresentati dall'Analisi Lineare Equivalente che porta ad un valore dello spostamento massimo di progetto paragonabile a quello ottenuto mediante analisi dinamiche; il range di errore risulta [0% - 20%].

Per valori superiori a tale limite il metodo semplificato sembra non riuscire più a rappresentare un fenomeno che perde di linearità e quindi genera differenze notevoli tra i due metodi di analisi utilizzati con errori medi contenuti dentro un range [20% - 50%].

Si evidenzia una forte influenza del raggio di curvatura sulla differenza di risultato data dai modelli; con l'aumentare del raggio di curvatura il range di errori si alza notevolmente.

È stata valutata inoltre l'influenza di una accelerazione verticale limite definita da normativa (a_G : 0.15g); essendo il friction pendulum un isolatore con comportamento influenzato principalmente dalla massa verticale che agisce sulla superficie di contatto, la presenza di una sollecitazione sismica verticale porta a differenze del 5% sulla valutazione dello spostamento massimo.

Vista la possibilità offerta da "Opensees" di includere nell'analisi leggi che descrivano la variazione del coefficiente di attrito rispetto alla velocità di scorrimento ed alla pressione di contatto, la differenza sulla valutazione dello spostamento massimo si attesta su valori contenuti entro il 10 % per le combinazioni prese in esame.

8 Modellazione numerica del sistema ponte isolato

8.1 Descrizione modello

Valutata la possibilità di utilizzare una analisi lineare per descrivere il comportamento del sistema pila-isolatore il secondo caso di studio riguarda la modellazione di un ponte nella sua completezza.

Ci si è preposti di svolgere uno studio parametrico per valutare la possibile correlazione tra l'irregolarità geometrica e la risposta sismica di un ponte isolato; riguardo la possibilità di usare una analisi lineare equivalente.

Per l'analisi si fa riferimento agli accelerogrammi definiti al **capitolo 7.4**.

In *Figura 8.1* si può vedere una rappresentazione schematica del modello parametrico.

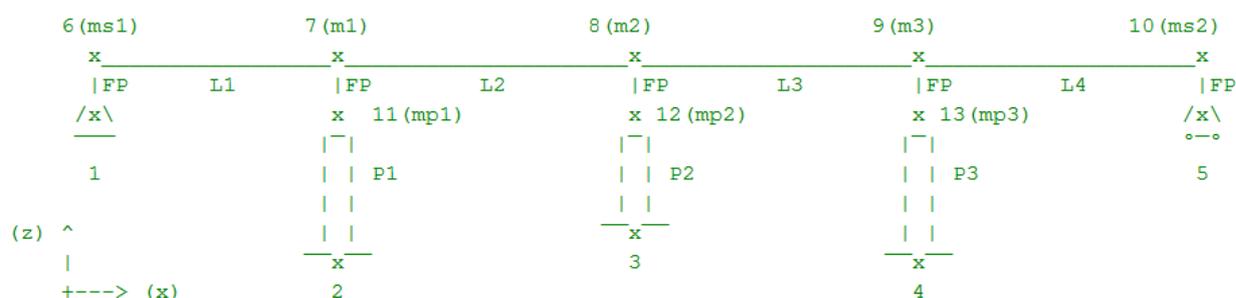


Figura 8.1: Rappresentazione schematica modello ponte

Come si può vedere il modello molto semplificato per permettere una veloce analisi parametrica rappresenta un ponte continuo di quattro campate da 40 metri ciascuna per una lunghezza totale dell'impalcato di 160 metri.

L'impalcato che nel modello verrà schematizzato come un elemento "beam" elastico è collegato alle estremità alle spalle pensate esercitanti un vincolo rigido attraverso un dispositivo a scorrimento; centralmente l'impalcato poggia su 3 pile di lunghezza "A_i · P"; dove "P" è considerato un valore fisso che rappresenta l'altezza base della colonna, che per questo modello è assunta di 5 metri, mentre "A_i" rappresenta il valore parametrico che verrà fatto variare all'interno del modello e fungerà da fattore moltiplicatore.

Lo studio prevede le seguenti combinazioni geometriche:

- 111 -----> [L1=5m;L2=5m;L3=5m]
- 114 -----> [L1=5m;L2=5m;L3=20m]
- 141 -----> [L1=5m;L2=20m;L3=5m]

- 144 -----> [L1=5m;L2=20m;L3=20m]
- 414 -----> [L1=20m;L2=5m;L3=20m]

Si riporta di seguito in *Figura 8.2* un estratto dello script del programma che mostra la creazione dei cicli esterni che permettono la variazione dei parametri geometrici delle pile e che fanno variare l'accelerazione di input per svolgere le 7 analisi previste per combinazione.

```

2
3 # File: fpbridge3d.tcl
4 # Esempio ponte a 4 campate con isolamento mediante dispositivi a pendolo scorrevole (impalcato acciaio)
5 # data:19/04/2014
6 # AC88
7 # unità di misura: N mm sec
8
9 set TList "20. 20. 20. 20. 20. 20. 20."
10 set AlphaList1 "1. 4."
11 set AlphaList2 "1. 4."
12 set AlphaList3 "1. 4."
13
14 foreach A3 $AlphaList3 {
15   foreach A2 $AlphaList2 {
16     foreach A1 $AlphaList1 {
17       for {set i 1} {$i < [expr [llength $TList]+1]} {incr i 1} {
18
19         puts "NaturalAcceleration: $i";
20         set TA [lindex $TList [expr $i-1]];
21         puts "TimeDurationAcceleration: $TA";

```

Figura 8.2: Estratto dal programma che descrive i cicli esterni

Di seguito sono riportate le caratteristiche dell'impalcato assunte per il modello e che fanno riferimento alla sezione come in *Figura 8.3*.

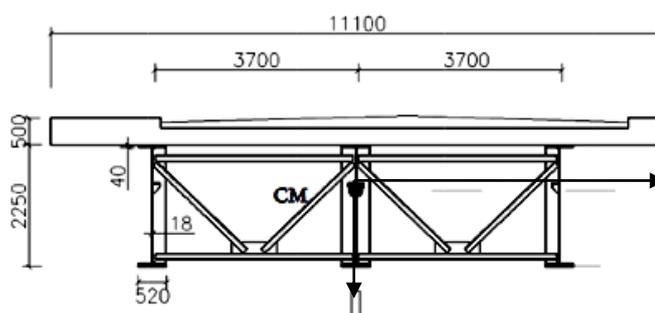


Figura 8.3: Rappresentazione sezione impalcato in acciaio

Dati sezione impalcato in acciaio:

- Area Impalcato: 0.75m²
- Modulo elastico del materiale componente la sezione: 206000 N/mm²
- Modulo di taglio del materiale componente la sezione: 85833 N/mm²
- Momento d'inerzia flessionale sezione impalcato (asse forte): 5.04e+12 mm⁴
- Momento d'inerzia flessionale sezione impalcato (asse debole): 5.71e+11 mm⁴

- Momento d'inerzia torsionale sezione impalcato: $1.37e+12 \text{ mm}^4$
- Peso sismico impalcato: 150 N/mm

Le pile anch'esse rappresentate come degli elementi "beam" elastici sono state assunte a sezione quadrata di 2 x 2 m ed hanno le caratteristiche meccaniche riportate di seguito.

Dati sezioni pile in calcestruzzo:

- Area pila: 4 m^2
- Modulo elastico del materiale componente la sezione: 30960 N/mm^2
- Modulo di taglio del materiale componente la sezione: 12900 N/mm^2
- Momento d'inerzia flessionale sezione pila: $1.33e+12 \text{ mm}^4$
- Momento d'inerzia torsionale sezione impalcato: $2.25e+12 \text{ mm}^4$
- Peso sismico pila: 100 N/mm

Come si può vedere dalla *Figura 8.1* riportata sopra gli isolatori sono stati modellati come degli elementi "link" che riproducono al meglio il comportamento dell'isolatore a scorrimento a superficie curva presente in Opensees come "Single Friction Pendulum Bearing Element" e già descritto nel capitolo precedente in *Figura 7.21*.

Di seguito sono riportate le caratteristiche assunte per i dispositivi modellati nel programma.

Dati isolatori a scorrimento a superficie curva:

- Raggio di curvatura isolatore: 3700 mm
- Coefficiente di attrito di progetto tra le superfici di scorrimento: 5.5 %
- Altezza isolatore: 200 mm
- Rigidezza verticale isolatore: $2.1e+9 \text{ N/mm}$

Per questa analisi i dispositivi sono stati modellati in Opensees come elementi "singleFPBearing" di seguito in *Figura 8.4* è riportato un pezzo dello script del programma.

```

174 # Define friction model for FP elements
175 # -----
176 # frictionModel Coulomb tag mu
177 # frictionModel Coulomb 1 $f
178
179 # frictionModel VDependent tag muSlow muFast transRate
180 #frictionModel VDependent 1 [expr $f/2.5] $f 0.01
181 #puts "muSlow:[expr $f/2.5] muFast:$f transRate:0.01" presvert.tcl
182
183 # frictionModel VDependent tag muSlow muFast0 A deltaMu alpha transRate
184 frictionModel VDependent 1 [expr $f/2.5] [expr $f*5.] [expr 2.*3.14*$R*(($R-pow((pow($R,2.))-pow(180,2.)),0.5))] [expr 4.*$f] 0.07 0.01
185 puts "muSlow:[expr $f/2.5] muFast:[expr $f*5.] A:[expr 2.*3.14*$R*(($R-pow((pow($R,2.))-pow(180,2.)),0.5))] deltaMu:[expr 4.*$f] alpha:0.07 transRate:0.01 ";
186
187 #element singleFPBearing $eleTag $iNode $jNode $frnMdlTag $Reff $kInit -P $matTag -T $matTag -My $matTag -Mz $matTag <-orient <$x1 $x2 $x3> $y1 $y2 $y3>
188 element singleFPBearing 34 1 6 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
189 element singleFPBearing 31 13 8 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
190 element singleFPBearing 32 14 9 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
191 element singleFPBearing 33 15 10 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
192 element singleFPBearing 35 5 12 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
193

```

Figura 8.4: definizione elementi FP nello script del programma

8.2 Caratteristiche delle combinazioni scelte

Come già riportato in *Tabella 5.2* si riportano le caratteristiche geometriche limite previste da normativa.

Caratteristiche geometriche:

1. sostanziale rettilinearità dell'impalcato,
2. luci uguali,
3. rapporto massimo tra le rigidezze delle pile inferiore a 2,
4. la massa della metà superiore delle pile è inferiore a 1/5 della massa dell'impalcato,
5. lunghezza totale dell'impalcato continuo inferiore a 150m,
6. $h_{pil} < 20m$

Le caratteristiche 1 e 2 sono sempre verificate mentre la 5 non sarebbe verificata avendo assunto una lunghezza totale dell'impalcato di 160m; di seguito si riportano in *Tabella 8.1* le varie tipologie di ponti studiate rispetto ai limiti da normativa.

Combinazioni	Pila 1			Pila 2			Pila 3			Totale
	P1 [mm]	K1 [N/mm]	W1 [N]	P2 [mm]	K2 [N/mm]	W2 [N]	P3 [mm]	K2 [N/mm]	W2 [N]	Wtot [N]
111 -----> [L1=5m;L2=5m;L3=5m]	5000	990720	500000	5000	990720	500000	5000	990720	500000	1500000
114 -----> [L1=5m;L2=5m;L3=20m]	5000	990720	500000	5000	990720	500000	20000	15480	2000000	3000000
141 -----> [L1=5m;L2=20m;L3=5m]	5000	990720	500000	20000	15480	2000000	5000	990720	500000	3000000
144 -----> [L1=5m;L2=20m;L3=20m]	5000	990720	500000	20000	15480	2000000	20000	15480	2000000	4500000
414 -----> [L1=20m;L2=5m;L3=20m]	20000	15480	2000000	5000	990720	500000	20000	15480	2000000	4500000

Combinazioni	Limite 3			Limite 4			Limite 4		
	Valore [ki/ki+1]	Valore normativa [-]	Verifica [-]	Valore [0.5*ΣMpil,i]	Valore normativa [0.2*Mimp]	Verifica [-]	Valore [max(Pi)]	Valore normativa [20000 mm]	Verifica [-]
111 -----> [L1=5m;L2=5m;L3=5m]	1	2	OK	750000	4800000	OK	5000	20000	OK
114 -----> [L1=5m;L2=5m;L3=20m]	64	2	NO	1500000	4800000	OK	20000	20000	NO
141 -----> [L1=5m;L2=20m;L3=5m]	64	2	NO	1500000	4800000	OK	20000	20000	NO
144 -----> [L1=5m;L2=20m;L3=20m]	64	2	NO	2250000	4800000	OK	20000	20000	NO
414 -----> [L1=20m;L2=5m;L3=20m]	64	2	NO	2250000	4800000	OK	20000	20000	NO

Tabella 8.1: Combinazioni scelte e limiti da normativa

OSSERVAZIONE: Il limite 3 risulta molto restrittivo, essendo la rigidezza inversamente proporzionale al cubo dell'altezza della pila, anche una differenza del 20% nell'altezza tra pile adiacenti porta a superare il limite previsto da normativa.

8.3 Risultato analisi lineare equivalente

Il metodo di analisi del modo fondamentale è già stato descritto nel paragrafo 7.6.

Per questo modello si fa inoltre riferimento alle prescrizioni contenute nell'eurocodice riguardo le possibili variazioni delle caratteristiche di progetto assunte per gli isolatori.

Di seguito si riporta il calcolo dei limiti inferiori e superiori per cui è previsto venga svolta l'analisi semplificata.

8.3.1 Calcolo caratteristiche limite per gli isolatori

a. Caratteristiche generali

I valori nominali assunti come proprietà degli isolatori, come già definiti nel paragrafo 8.1 sono:

- Coefficiente di attrito dinamico nominale: $f_d = 0.055$ (+/- 16% variabilità assunta per il valore nominale)
- Raggio di curvature del dispositivo: $R_b = 3.70\text{m}$

La normativa europea prevede dei coefficienti moltiplicativi che definiscano dei valori limite delle proprietà nominali degli isolatori.

Le proprietà nominali degli isolatori, e quindi del sistema di isolamento, possono essere influenzate dall'invecchiamento, dalla temperatura, dalla storia di carico, dalla contaminazione e dall'usura.

Questa variabilità è presa in considerazione conformemente alla norma EN 1998-2:2005 + A1:2009, 7.5.2.4 (2) P, utilizzando due serie di valori limite di progetto del sistema d'isolamento:

- Upper bound design properties (UBDP), che tipicamente porta a forze maggiori nella progettazione degli elementi strutturali del ponte, e
- Lower bound design properties (LBDP), che tipicamente porta a spostamenti maggiori nella progettazione dei dispositivi.

In generale si eseguono 2 analisi, una usando le proprietà dell'UBDP e una usando il LBDP.

Per il sistema di isolamento scelto solo il coefficiente di attrito dinamico f_d è soggetto alla variazione del valore nominale di progetto.

Il raggio di curvature della superficie di scorrimento è una proprietà geometrica che non risente di alcuna variabilità.

Il UBDP e il LBDP per f_d è calcolato in accordo con la normativa EN 1998- 2:2005+A1:2009, appendice J e JJ

$$\text{Valore nominale: } f_d = 0.055 \pm 16\% = 0.0462 \div 0.0638$$

$$\text{LBDP: } f_{d,\min} = \text{minDP}_{\text{nom}} = 0.0462$$

UBDP: secondo l'EN 1998-2 appendice J and JJ

b. Effetto della temperatura

$$T_{\min,b} = \psi_2 T_{\min} + \Delta T_1 = 0.5 \times (-20^\circ\text{C}) + 5.0^\circ\text{C} = -5.0^\circ\text{C}$$

Dove:

$\psi_2 = 0.5$ è il fattore di combinazione per le azioni termiche nell'analisi sismica secondo l'EN 1990:2002 – Appendice A2,

$T_{\min} = -20^\circ\text{C}$ è la temperatura minima dell'aria ipotizzata considerando una probabilità annua di superamento associate al percentile 2%, secondo l'EN 1990-1-5:2004, **6.1.3.2.**

$\Delta T_1 = +5.0^\circ\text{C}$ è il fattore di correzione della temperatura secondo EN 1998-2:2005+A1:2009, **Tavola J.1N.**

c. Fattori moltiplicativi λ_{\max} secondo l'EN 1998-2:2005+A1:2009, Appendice JJ

f1 - invecchiamento: $\lambda_{\max,f1} = 1.1$ (Tabella JJ.1, per fattori climatici normali, PTFE non trattati, con guarnizione protettiva)

f2 - temperatura: $\lambda_{\max,f2} = 1.15$ (Tabella JJ.2 per $T_{\min,b} = -5.0^\circ\text{C}$, PTFE non trattati)

f3 - contaminazione $\lambda_{\max,f3} = 1.1$ (Tabella JJ.3 per PTFE non trattati e superfici di scorrimento rivolte sia verso l'alto che verso il basso)

f4 – storia di carico $\lambda_{\max,f4} = 1.0$ (Tabella JJ.4 per PTFE non trattati e spazio percorso ≤ 1.0 km)

Fattore di combinazione $\psi_{fi} = 0.70$ per classe d'importanza II,

Combinazione dei valori dei fattori λ_{\max} : $\lambda_{U,fi} = 1 + (\lambda_{\max,fi} - 1)\psi_{fi}$ (eq. J.5)

f1 - invecchiamento: $\lambda_{U,f1} = 1 + (1.1 - 1) \times 0.7 = 1.07$

f2 - temperatura: $\lambda_{U,f2} = 1 + (1.15 - 1) \times 0.7 = 1.105$

f3 - contaminazione $\lambda_{U,f3} = 1 + (1.1 - 1) \times 0.7 = 1.07$

f4 – storia di carico $\lambda_{U,f4} = 1 + (1.0 - 1) \times 0.7 = 1.0$

d. Limite UBDP:

$$\text{UBDP} = \text{maxDP}_{\text{nom}} \cdot \lambda_{U,f1} \cdot \lambda_{U,f2} \cdot \lambda_{U,f3} \cdot \lambda_{U,f4} \text{ (equazione J.4)}$$

$$\mu_{d,\max} = 0.0638 \times 1.07 \times 1.105 \times 1.07 \times 1.0 = 0.0638 \times 1.265 = 0.0807$$

Pertanto la variabilità del coefficiente di attrito efficace risulta: $f_d = 0.0462 \div 0.0807$

8.3.2 Risultato dell'analisi lineare equivalente per il LBDP

L'analisi seguente corrisponde al limite inferiore del fattore di attrito di progetto del sistema di isolamento cioè $f_d = 0.0462$. La soluzione del calcolo è ricavata attraverso un solutore numerico ed è riportata nella *Tabella 8.2*.

LBDP – limite inferiore		
R (raggio di curvatura)	3.7	m
W (peso sismico ponte isolato)	24000	kN
f (coefficiente di attrito)	4.62	%

Primo tentativo		
d_{cd} (assunto di primo tentativo)	0.300	m
$K_{eff} = F/d_{cd} = W_d \cdot \left[\mu_d + \frac{d_{cd}}{R_b} \right] / d_{cd}$	10182.49	kN/m
$T_{eff} = 2\pi \cdot \sqrt{m/k_{eff}}$	3.080	sec
$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \right)$	0.230	-
$\eta_{eff} = \left[\frac{0.10}{(0.05 + \xi_{eff})} \right]^{0.5}$	0.597	-
$d_{cd}' = \left(\frac{0.625}{\pi^2} \right) \cdot a_g \cdot S \cdot \eta_{eff} \cdot T_{eff} \cdot T_C$	0.223	m
errore = $ d_{cd}' - d_{cd} $	0.077	m
Esegui un'altra iterazione errore > 0.001		
"n" tentativo		
d_{cd} (assunto all' "n" tentativo)	0.202	m
K_{eff}	11955.23	kN/m
T_{eff}	2.840	sec
ξ_{eff}	0.290	-
η_{eff}	0.543	-
d_{cd}'	0.202	m
errore = $ d_{cd}' - d_{cd} $	0.000	m
Tolleranza raggiunta errore < 0.001		

Risultati per l'analisi LBDP		
d_{cd}	202	mm
ξ_{eff}	29.00	%
$V_d = k_{eff} \cdot d_{cd}$	2414.95	kN

Controllo limiti da normativa		
ξ_{eff}	29.00	OK < Limite 1
Limite 1	30.00	%
K_v / k_{eff}	176000	OK > Limite 2 (sempre verificato per FP)
Limite 2	800	-
T_{eff}	2.84	OK < Limite 3
Limite 3	3.00	sec

UBDP – limite superiore		
R (raggio di curvatura)	3.7	m
W (peso sismico ponte isolato)	24000	kN
f (coefficiente di attrito)	8.07	%

Primo tentativo		
d_{cd} (assunto di primo tentativo)	0.200	m
$K_{eff} = F / d_{cd} = W_d \cdot \left[\mu_d + \frac{d_{cd}}{R_b} \right] / d_{cd}$	12030.49	kN/m
$T_{eff} = 2\pi \cdot \sqrt{m / k_{eff}}$	2.83	sec
$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \right)$	0.510	-
$\eta_{eff} = \left[\frac{0.10}{(0.05 + \xi_{eff})} \right]^{0.5}$	0.423	-
$d_{cd}' = \left(\frac{0.625}{\pi^2} \right) \cdot a_g \cdot S \cdot \eta_{eff} \cdot T_{eff} \cdot T_C$	0.158	m
errore = $ d_{cd}' - d_{cd} $	0.042	m
Esegui un'altra iterazione errore > 0.001		
"n" tentativo		
d_{cd} (assunto all' "n" tentativo)	0.156	m
$K_{eff} =$	19086.42	kN/m
$T_{eff} =$	2.250	sec
$\xi_{eff} =$	0.410	-
$\eta_{eff} =$	0.466	-
$d_{cd}' =$	0.156	m
errore = $ d_{cd}' - d_{cd} =$	0.000	m
Tolleranza raggiunta errore < 0.001		

Risultati per l'analisi UBDP			
d_{ed}	156	mm	
ξ_{eff}	41.00	%	
$V_d = k_{eff} \cdot d_{cd}$	2977	kN	

Controllo limiti da normativa			
ξ_{eff}	41.00	NO > Limite 1	
Limite 1	30.00	%	
K_v / k_{eff}	110000	OK > Limite 2 (sempre verificato per FP)	
Limite 2	800	-	
T_{eff}	2.25	OK < Limite 3	
Limite 3	3.00	sec	

Tabella 8.2: Risultati analisi lineare equivalente per il limite inferiore e superiore

Osservazioni

Come si può vedere dai risultati ottenuti l'analisi LBDP evidenzia spostamenti massimi del sistema di isolamento mentre l'analisi UBDP porta a determinare le forze massime sulla sottostruttura e sull'impalcato del ponte.

Per i confronti con i risultati ottenuti dalla analisi dinamica nella quale agli isolatori è stato applicato un coefficiente di attrito pari a quello nominale (5.5%) si riporta l'analisi lineare equivalente che fa riferimento al valore nominale.

Valore di attrito nominale			
R (raggio di curvatura)	3.7	m	
W (peso sismico ponte isolato)	24000	kN	
f (coefficiente di attrito)	5.50	%	

"n" tentativo			
d_{cd} (assunto all' "n" tentativo)	0.192	m	
$K_{eff} = F / d_{cd} = W_d \cdot \left[\mu_d + \frac{d_{cd}}{R_b} \right] / d_{cd}$	13337.56	kN/m	
$T_{eff} = 2\pi \cdot \sqrt{m / k_{eff}}$	2.69	sec	
$\xi_{eff} = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{\frac{d}{\mu R} + 1} \right)$	0.325	-	

$\eta_{eff} = \left[\frac{0.10}{(0.05 + \xi_{eff})} \right]^{0.5}$	0.516	-
$d_{cd}' = \left(\frac{0.625}{\pi^2} \right) \cdot a_g \cdot S \cdot \eta_{eff} \cdot T_{eff} \cdot T_C$	0.192	m
errore = $ d_{cd}' - d_{cd} = 0.000$ m		
Tolleranza raggiunta errore < 0.001		

Risultati per l'analisi con valore di progetto			
d_{ed}	192	mm	
ξ_{eff}	33.00	%	
$V_d = k_{eff} \cdot d_{cd}$	2566	kN	

Controllo limiti da normativa			
ξ_{eff}	33.00	NO > Limite 1	
Limite 1	30.00	%	
K_v / k_{eff}	110000	OK > Limite 2 (sempre verificato per FP)	
Limite 2	800	-	
T_{eff}	2.69	OK < Limite 3	
Limite 3	3.00	sec	

Tabella 8.2: Risultati analisi lineare equivalente per il valore nominale del coefficiente di attrito

Come si può vedere l'analisi lineare equivalente per il valore del coefficiente di attrito di progetto porta a determinare un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente che supera il valore previsto da normativa; che per il sistema di isolamento è del 30%.

Si prevede che un confronto con il risultati dati dall'analisi time history porti a ottenere errori significativi.

8.4 Risultato analisi time history

Di seguito si riportano i risultati ottenuti attraverso le analisi dinamiche studiate mediante il modello in Opensees (riportato completamente in appendice).

Essendo il modello composto da 5 elementi di collegamento, di cui 2 collegano le estremità dell'impalcato alle spalle considerate rigide, ed essendo simmetrico si è studiato il comportamento del dispositivo di collegamento tra l'impalcato e la parte superiore della pila centrale e tra l'impalcato e la pila laterale.

In *Figura 8.5* è riportato l'andamento dei diagrammi isteretici per i 7 accelerogrammi per la combinazione 111; mentre in *Figura 8.6* sono riportati quelli facenti riferimento all'accelerogramma 1 per le varie combinazioni.

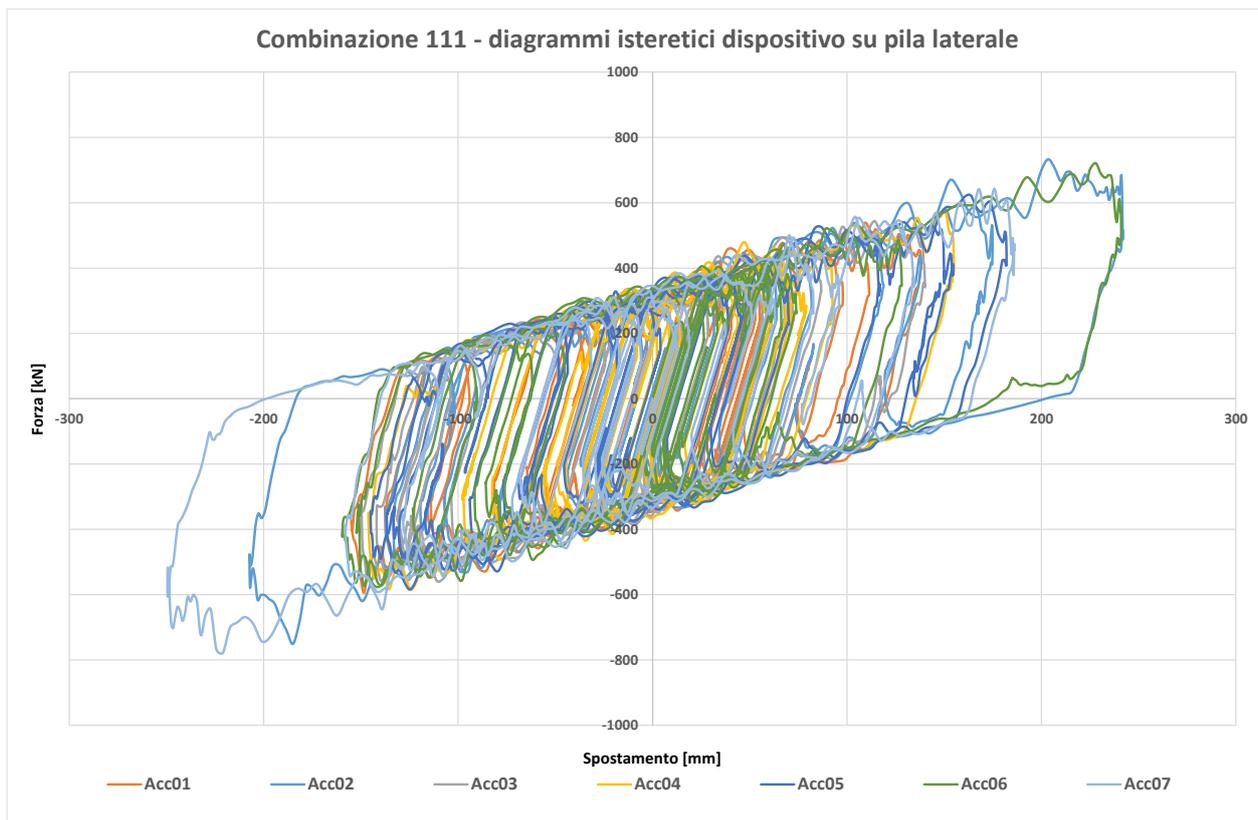


Figura 8.5: Diagrammi isteretici per la combinazione 111 e tutti i 7 accelerogrammi

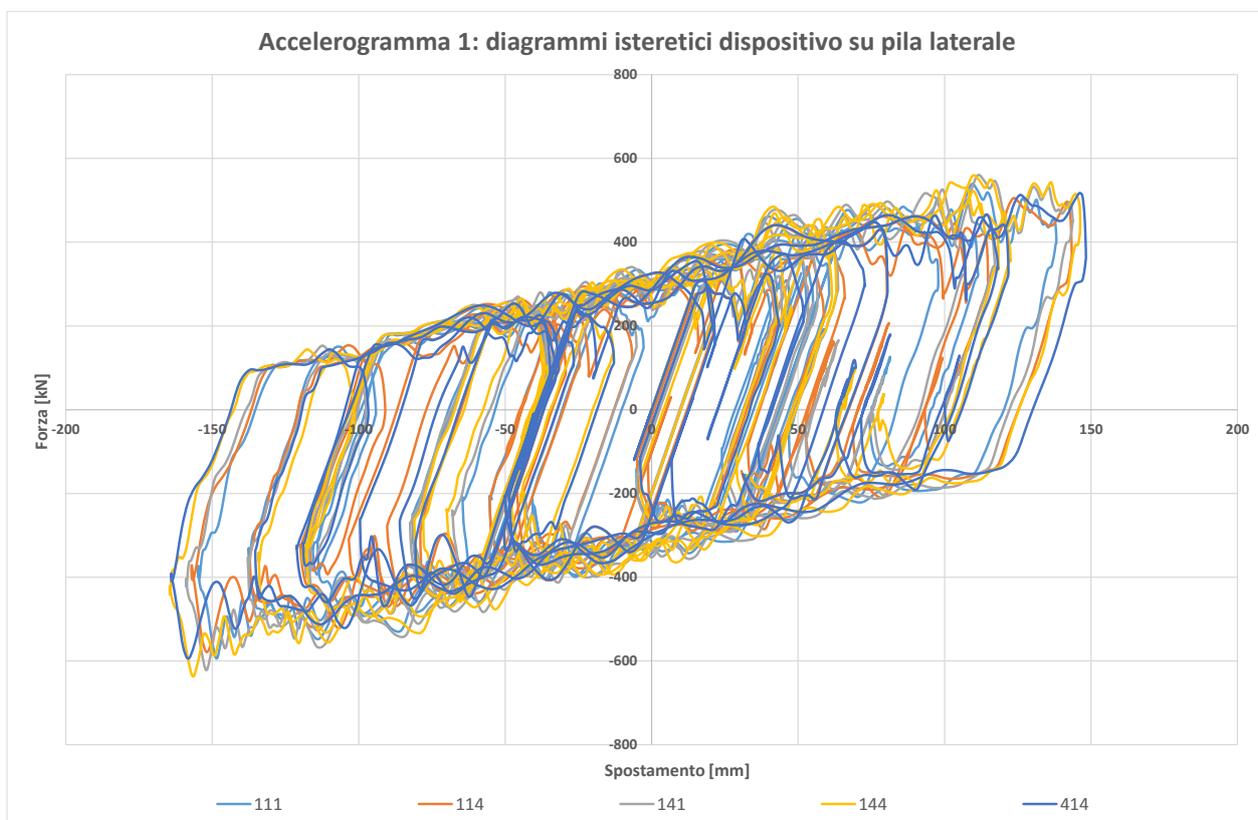


Figura 8.6: Diagrammi isteretici per l'accelerogramma 1 e tutte le 5 combinazioni considerate

Di seguito si riporta in *Figura 8.7* l'andamento dei soli spostamenti per l'accelerogramma 1 e le 5 combinazioni considerate.

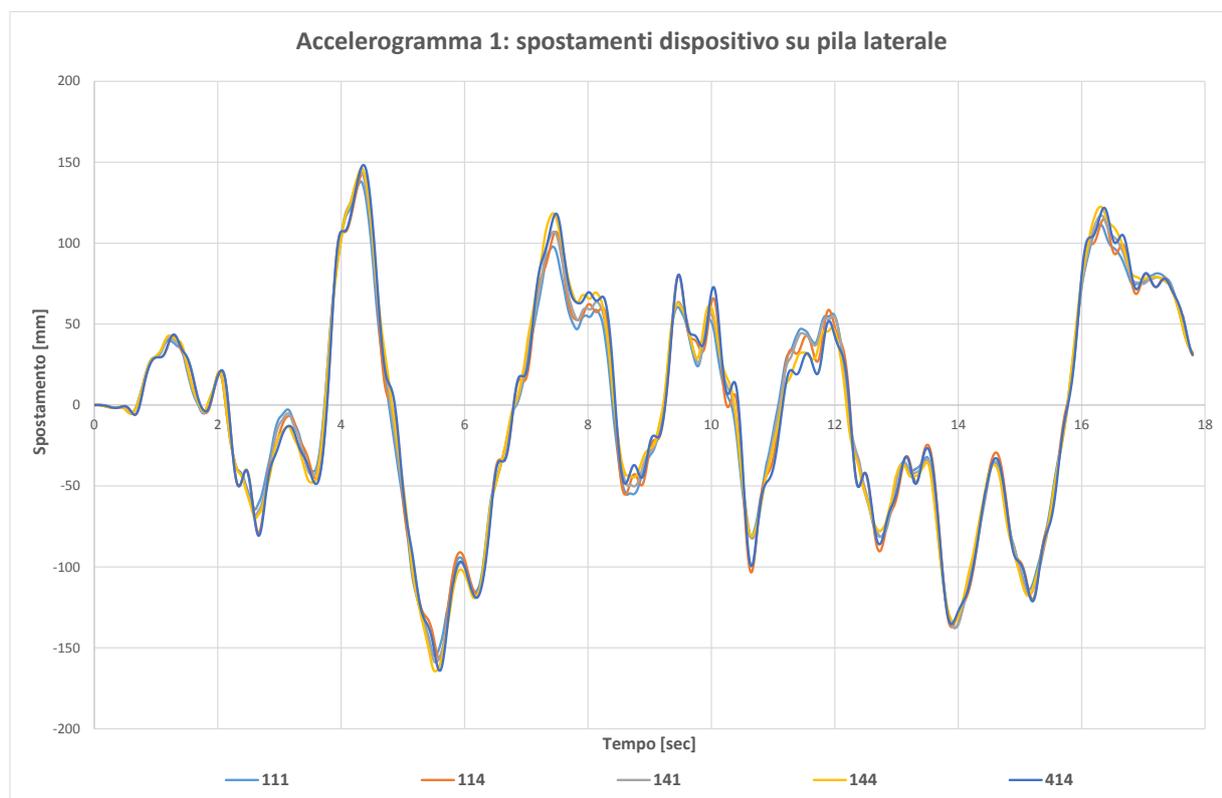


Figura 8.7: Andamento degli spostamenti per l'accelerogramma 1 e le 5 combinazioni considerate

Si può già osservare come benchè le combinazioni portino a configurazioni geometriche estreme, rapporto tra l'altezza di pile adiacenti uguale a 4, l'effetto non risulti molto significativo sullo studio del comportamento dei dispositivi d'isolamento e soprattutto nella previsione dello spostamento massimo sotto evento sismico di intensità di progetto.

Di seguito sono riportati in *Tabella 8.3* e *8.4* i risultati in spostamento e forza sul dispositivo centrale e laterale.

Pila centrale riassunto					
Combinazioni	Spostamenti [mm]				
	111	114	141	144	414
Acc01	159	159	159	162	162
Acc02	245	257	254	265	269
Acc03	150	150	158	0	151
Acc04	154	159	158	161	163
Acc05	184	192	204	212	201
Acc06	244	251	0	261	259
Acc07	252	255	247	248	257
Max	252	257	254	265	269
Med	198	203	197	218	209
Min	150	150	158	161	151

Combinazioni	Forze [kN]				
	111	114	141	144	414
Acc01	622	622	582	612	650
Acc02	758	805	734	778	852
Acc03	568	589	575	0	612
Acc04	582	610	554	575	623
Acc05	630	662	597	634	693
Acc06	731	766	0	718	785
Acc07	783	804	723	737	827
Max	783	805	734	778	852
Med	668	694	538	579	720
Min	568	589	554	575	612

Tabella 8.3: Risultati in forza e spostamento per il dispositivo sulla pila centrale

Dalla Figura 8.8 e 8.9 si può osservare un confronto tra i risultati medi in forza e spostamento del dispositivo centrale, ottenuti mediante le analisi dinamiche e i due limiti ricavati mediante l'analisi lineare equivalente.

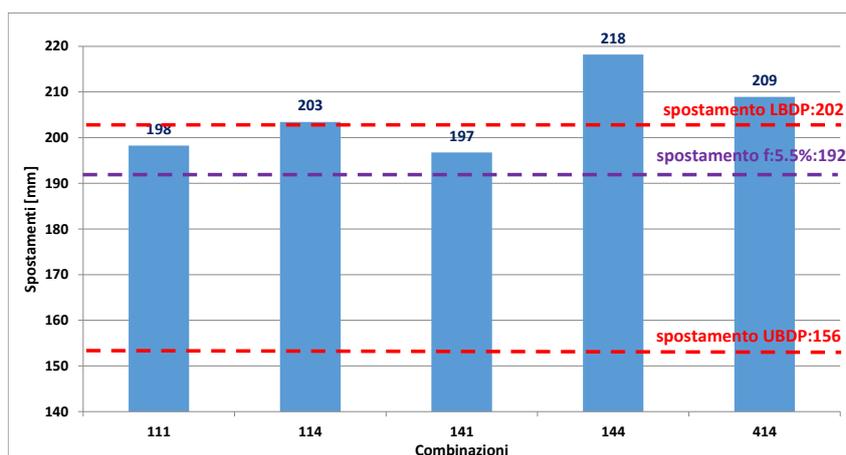


Figura 8.8: Confronto spostamenti analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila centrale

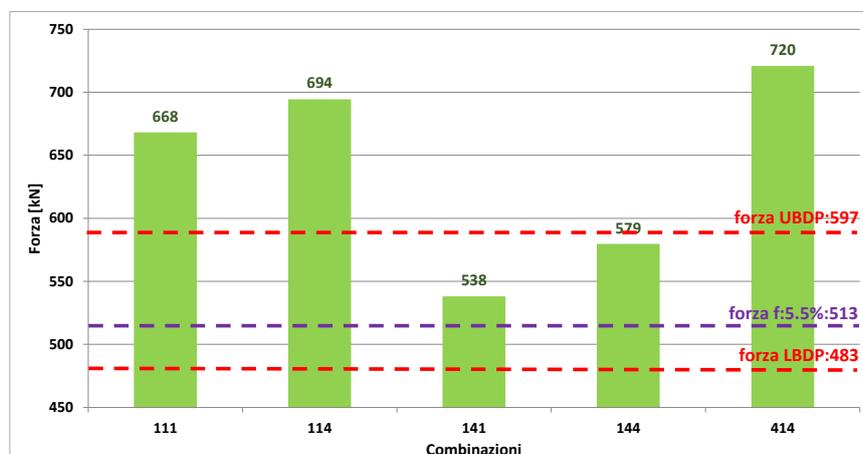


Figura 8.9: Confronto forze analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila centrale

Pila laterale riassunto					
Spostamenti					
Combinazioni	111	114	141	144	414
Acc01	155	157	159	164	164
Acc02	242	250	254	265	262
Acc03	150	155	152	0	160
Acc04	155	165	158	159	166
Acc05	182	201	189	195	207
Acc06	241	251	0	258	257
Acc07	250	246	253	254	246
Max	250	251	254	265	262
Med	196	204	194	216	209
Min	150	155	152	159	160

Forze					
Combinazioni	111	114	141	144	414
Acc01	594	579	622	637	595
Acc02	751	719	776	828	744
Acc03	559	560	580	0	576
Acc04	584	562	606	616	565
Acc05	622	593	652	661	598
Acc06	721	677	0	755	686
Acc07	778	715	801	796	713
Max	778	719	801	828	744
Med	658	629	577	613	640
Min	559	560	580	616	565

Tabella 8.3: Risultati in forza e spostamento per il dispositivo sulla pila laterale

Dalla Figura 8.10 e 8.11 si può osservare un confronto tra i risultati medi in forza e spostamento del dispositivo laterale, ottenuti mediante le analisi dinamiche e i due limiti ricavati mediante l'analisi lineare equivalente.

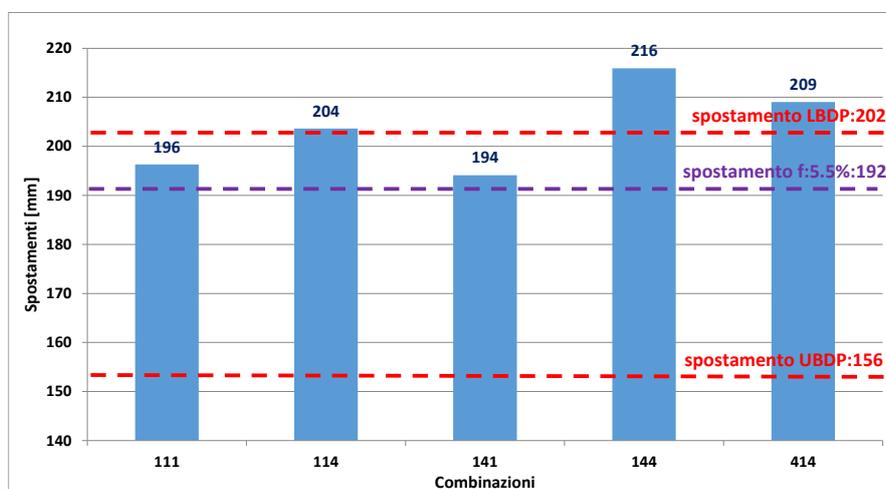


Figura 8.10: Confronto spostamenti analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila laterale

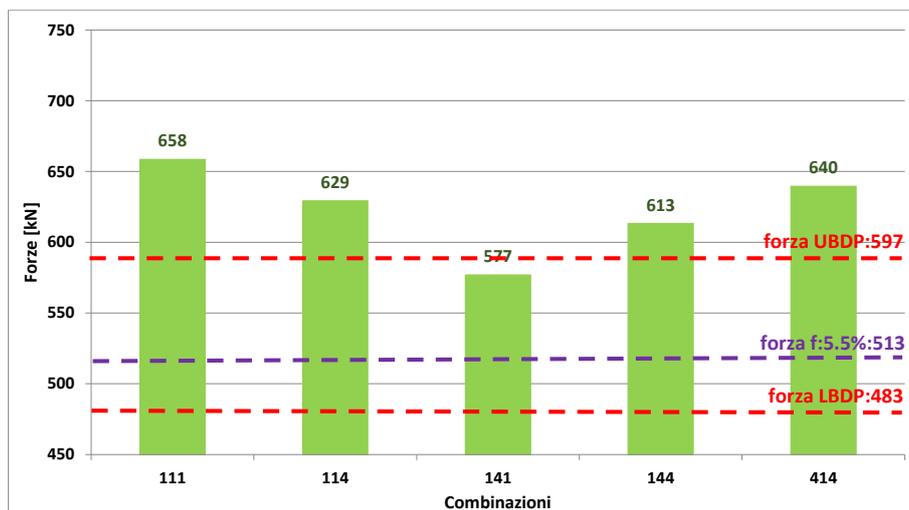


Figura 8.11: Confronto forze analisi dinamica e lineare equivalente dispositivo su pila laterale

Considerazioni sul parametro spostamento massimo del dispositivo

Si può notare come lo spostamento medio ottenuto mediante le analisi dinamiche per le varie combinazioni scelte si attesti su un range di valori [194-218]; la variabilità di tale valore non supera il +/- 10% rispetto al valore medio ottenuto da tutte le combinazioni.

Questo evidenzia in modo chiaro come l'effetto del fattore d'irregolarità geometrica considerato non influisca in modo molto rilevante sulla variabilità del parametro spostamento massimo; tale è la capacità del sistema d'isolamento di uniformare la sua risposta sismica al variare della caratteristiche geometriche della sottostruttura.

Considerazioni sul parametro forza agente sul dispositivo

Si può notare come la forza massima agente sui dispositivi, mediata per i 7 accelerogrammi utilizzati, per le varie combinazioni scelte si attesti su un range di valori [538-720] per la pila centrale mentre [577-658]; la variabilità di tale valore non supera il +/-10% rispetto al valore medio ottenuto dalla combinazione connotata da pile regolari (111). Tutti i valori comunque risultano maggiori rispetto a quello ottenuto mediante l'analisi lineare equivalente per f=5.5%.

Riassunto differenze tra la combinazione regolare e quelle irregolari per la pila centrale

Differenza percentuale spostamenti				
Combinazioni	114	141	144	414
Acc01	0	0	2	2
Acc02	5	4	8	10
Acc03	0	5	0	0
Acc04	3	2	4	6
Acc05	5	11	15	9
Acc06	3	0	7	7
Acc07	1	2	2	2
Med	2	3	6	5

Differenza percentuale forze				
Combinazioni	114	141	144	414
Acc01	0	6	2	5
Acc02	6	3	3	12
Acc03	4	1	0	8
Acc04	5	5	1	7
Acc05	5	5	1	10
Acc06	5	0	2	7
Acc07	3	8	6	6
Med	4	4	2	8

Riassunto differenze tra la combinazione regolare e quelle irregolari per la pila laterale									
Differenza percentuale spostamenti					Differenza percentuale forze				
Combinazioni	114	141	144	414	Combinazioni	114	141	144	414
Acc01	1	3	6	6	Acc01	3	5	7	0
Acc02	3	5	10	8	Acc02	4	3	10	1
Acc03	3	1	0	7	Acc03	0	4	0	3
Acc04	6	2	3	7	Acc04	4	4	5	3
Acc05	11	4	7	14	Acc05	5	5	6	4
Acc06	4	0	7	7	Acc06	6	0	5	5
Acc07	1	1	2	1	Acc07	8	3	2	8
Med	4	2	5	7	Med	4	3	5	3

Tabella 8.3: Differenze percentuali in forza e spostamento per il dispositivo sulla pila centrale e laterale

Se si va a valutare la differenza in spostamento ottenuta dall'analisi lineare equivalente per il valore del coefficiente di attrito da progetto rispetto ai valori medi di spostamento massimo ricavati dall'analisi time history; come si può vedere dai grafici 8.8 e 8.10 riportati sopra, si ottengono differenze percentuali che si attestano su un range [20% - 25%].

Differenza pila centrale [%] THA- ALE					
Combinazioni	111	114	141	144	414
Acc01	17	17	17	15	15
Acc02	28	34	33	38	40
Acc03	22	22	18	0	21
Acc04	20	17	18	16	15
Acc05	4	0	6	10	4
Acc06	27	31	0	36	35
Acc07	31	33	29	29	34
Med	21	22	20	24	24

Differenza pila laterale [%] THA- ALE					
Combinazioni	111	114	141	144	414
Acc01	19	18	17	14	15
Acc02	26	30	32	38	37
Acc03	22	19	21	0	17
Acc04	19	14	18	17	13
Acc05	5	5	1	2	8
Acc06	26	31	0	34	34
Acc07	30	28	32	32	28
Med	21	21	20	23	22

L'irregolarità geometrica assunta dalle varie combinazioni porta ad una oscillazione del valore di errore di meno di 5 punti percentuali.

Il sistema d'isolamento è capace di uniformare la risposta sismica del ponte anche rispetto a configurazioni geometriche molto diverse.

9 Conclusioni modello ponte isolato

Come già evidenziato dallo studio precedente sul modello pila-isolatore si evincono notevoli differenze tra i risultati ottenuti mediante i due metodi d'analisi utilizzati.

L'Analisi Lineare Equivalente porta a risultati comparabili a quelli dell'Analisi Tyme History solo per valori di smorzamento viscoso equivalente che non si allontanano molto dal valore limite posto da normativa [15%].

Per valori superiori i due metodi divergono ed il comportamento del sistema risulta essere sempre meno assimilabile a quello ad un grado di libertà approssimando il dispositivo con una molla elastica ed andando a ricercare iterativamente il valore di smorzamento viscoso che porta ad ottenere lo stesso spostamento ricavato dallo spettro elastico scalato, tenendo appunto conto della duttilità fornita dalla capacità isteretica del sistema d'isolamento.

Il modello del ponte completo ha permesso di osservare come il sistema d'isolamento sia in grado di uniformare la sua risposta al variare delle configurazioni geometriche che questo può assumere.

APPENDICE

Di seguito sono riportati i modelli scritti ed eseguiti in Opensees.

Modello Bilineare 2D

```

# -----
# File: bilinearmodel.tcl
# Modello Parametrico della Pila-Dispositivo (R,f,T)
# Modello Bilineare
# Data: 19/04/2014
# Autore: Alberto Candeo
# Unità di misura: N mm sec
#
# ^Y
# |
# o 3 _____
# | hb [mm] Dispositivo a comportamento bilineare
# o 2 _____
# | |
# | |
# | |
#(elem1) L [mm] Pila
# | |
# | |
# | |
# o 1 ---->X
#
#Settaggio dei cicli esterni

set RadiusList "1000. 2000. 3000. 4000."
set fList "0.025 0.035 0.045 0.055"
set TList "20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00"

puts "RadiusList: $RadiusList"
puts "FrictionList: $fList"
puts "TimeAccelerationList: $TList"
puts ""
puts "Start Analysis"

foreach R $RadiusList {
file mkdir Radius$R; #crea una cartella dati di OUTPUT
puts "Radius: $R"
foreach f $fList {
puts "FrictionCoefficient: $f"
for {set i 1} {$i < [expr [llength $TList]+1]} {incr i 1} {
puts "NaturalAcceleration: $i";
set TA [lindex $TList [expr $i-1]];
puts "TimeDurationAcceleration: $TA";

file mkdir Radius$R/Friction$f/Acc$i;
# SET UP -----
wipe; #pulisce la memoria da definizioni passate
model basic -ndm 2 -ndf 3; # 2 dimensioni, 3 gdl per nodo

# Definisco i parametri generali -----
set g 9810.; #parametro accelerazione di gravità [mm/s^2]

# Definisco la Geometria -----

# Proprietà delle pile -----
set b 2000.; #dimensione "b" della pila [mm]
set h 2000.; #dimensione "h" della pila [mm]
set L 8000.; #altezza della pila [mm]
set A [expr $b*$h]; #area della sezione delle pile[mm2]
set Iz [expr $h*$b*$b*$b/12]; #momento d'inerzia flessionale della pila[mm4]
set E 30960.; #modulo elastico del calcestruzzo [N/mm]

```

```

# Proprietà della sovrastruttura e dei dispositivi -----
set W 4000000. ; #peso della sovrastruttura [N]
set M [expr $W/$g]; #massa della sovrastruttura [kg]
set kv 2.1e9; #rigidezza verticale del dispositivo [N/mm]
set hb 200.; #altezza del dispositivo [mm]
set f $f; #coefficiente d'attrito di progetto del dispositivo [-]
set ko 20000.; #rigidezza trasversale iniziale [N/mm]
set Fy [expr $W*$f]; #forza limite primo tratto [N]
set kr [expr $W/$R]; #rigidezza trasversale di richiamo [N/mm]
set alpha [expr $kr/$ko]; #rapporto tra la rigidezza di secondo e quella di primo tratto [-]

# Coordinate dei nodi:
node 1 0 0; #IDnodo coordinata X [mm] coordinata Y[mm]
node 2 0 $L;
node 3 0 [expr $L+$hb];

# Condizioni al contorno - Vincoli
fix 1 1 1 1; #IDnodo DX DY RZ
fix 2 0 0 1;
fix 3 0 0 1;

# Masse nodali:
mass 3 $M 1.e-9 0.; #IDnodo Mx My Mz, Massa=Peso/g.

# Definisco gli elementi -----
# Definisco una trasforzazione geometrica
geomTransf Linear 1; #IDtrasformazione
# Definisco il materiale
uniaxialMaterial Elastic 1 $kv; #IDmateriale
uniaxialMaterial Elastic 2 0.

# Definisco i tipi di elemento:
#elemento elasticBeamColumn IDElemento iNodo jNodo Area Emateriale lsezione IDtrasformazione
element elasticBeamColumn 1 1 2 $A $E $Iz 1;
#elemento elastomericBearing IDElemento iNodo jNodo kInit Fy alpha -P IDmateriale -Mz IDmateriale
element elastomericBearing 2 2 3 $ko $Fy $alpha -P 1 -Mz 2;

# Definisco carichi statici -----
pattern Plain 1 Linear {
load 3 0. [expr -1*$W] 0.; #IDnodo FX FY MZ (Forze concentrate)
}

# Parametri analisi statica
set Tol 1.0e-8; #tolleranza di convergenza
constraints Plain; #modalità di gestione condizioni di vincolo
numberer Plain; #modalità di gestione numerazione nodi
system BandGeneral; #modalità di gestione e risoluzione del sistema di equazioni nell'analisi
test NormDispIncr $Tol 6; #test di convergenza
algorithm Newton; #definizione algoritmo: Newton
set NstepGravity 10; #step di applicazione dei carichi statici
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]; #primo incremento di carico;
integrator LoadControl $DGravity; #determina lo step temporale successivo per l'analisi
analysis Static; #definisco il tipo di analisi: Statica
analyze $NstepGravity; #applico i carichi statici

# Mantengo i carichi statici gravitazionali costanti e resetto il contatore temporale
loadConst -time 0.0

# Analisi Dinamica-----
# Analisi dinamica uniforme (accelerazione uniforme applicata a tutti i nodi vincolati)
set GMdirection 1; #direzione accelerazione
set GMfile "$i.txt" ; #file INPUT accelerazione
set GMfact 1000.; #fattore di scala accelerazione

# Definisco i parametri degli INPUT per dell'analisi dinamica
set DtAnalysis 0.01; #time-step "Dt" per l'analisi dinamica
set TmaxAnalysis $TA; #durata massima dell'analisi dinamica (dipende dall'accelerogramma di INPUT)

# Parametri per l'analisi dinamica
constraints Transformation; #modalità di gestione condizioni di vincolo
numberer Plain; #modalità di gestione numerazione nodi
system SparseGeneral -piv; #modalità di gestione e risoluzione del sistema di equazioni nell'analisi

```

```

# Definisco i parametri del test di convergenza
set Tol 1.e-8;           #tolleranza test di convergenza
set maxNumIter 10;      #numero massimo di iterazioni permesse per arrivare a convergenza
set printFlag 0;        #funzione di stampa informazioni sulla convergenza
set TestType EnergyIncr; #tipo test di convergenza
test $TestType $Tol $maxNumIter $printFlag

set algorithmType ModifiedNewton;           #definizione algoritmo: Newton modificato
algorithm $algorithmType;

# Definisco parametri dell'integratore
set NewmarkGamma 0.5;   #parametro gamma dell'integratore di Newmark
set NewmarkBeta 0.25;   #parametro beta dell'integratore di Newmark
integrator Newmark $NewmarkGamma $NewmarkBeta

analysis Transient;     #definisco il tipo di analisi: Transitoria

# Definisco smorzamento-----
# Definisco parametri di smorzamento di tipo Rayleigh from $xDamp
#  $D = \alpha M^*M + \beta K_{curr} * K_{current} + \beta K_{comm} * K_{lastCommit} + \beta K_{init} * K_{initial}$ 
set xDamp 0.02;         #2% percentuale di smorzamento
set lambda [eigen 1];   #valore del primo modo mode 1
set omega [expr pow($lambda,0.5)];
set alphaM 0.;         #M-prop. smorzamento;  $D = \alpha M^*M$ 
set betaKcurr 0.;      #K-proporzionale smorzamento;  $+ \beta K_{curr} * K_{current}$ 
set betaKcomm [expr 2.*$xDamp/($omega)]; #K-prop. parametro di smorzamento;  $+ \beta K_{comm} * K_{lastCommit}$ 
set betaKinit 0.;      #smorzamento riferito alla rigidità iniziale  $+ \beta K_{init} * K_{ini}$ 
# Definisco lo smorzamento
rayleigh $alphaM $betaKcurr $betaKinit $betaKcomm; # Applico smorzamento di tipo Rayleigh

# Inizio l'analisi dinamica -----
# Accelerazione uniforme: INPUT
set IDloadTag 8000;     #IDaccelerazione
set dt 0.01;           #step temporale accelerazione di INPUT
set GMfatt 1000.0;     #coefficiente di scala dati di INPUT
set AccelSeries "Series -dt $dt -filePath $GMfile -factor $GMfatt"; #informazioni sulla serie
pattern UniformExcitation $IDloadTag $GMdirection -accel $AccelSeries ; #creo accelerazione uniforme

# Definisco i risultati da registrare -----

recorder Element -file Radius$R/Friction$f/Acc$R/$f,$f,$f,FDisp.txt -time -ele 2 globalForce;# forze elementi
recorder Element -file Radius$R/Friction$f/Acc$R/$f,$f,$f,DDisp.txt -time -ele 2 deformations;# deformazione elementi

set Nsteps [expr int($TmaxAnalysis/$DtAnalysis)];
set ok [analyze $Nsteps $DtAnalysis]; #informazioni sullo stato dell'analisi

if {$ok != 0} { ; #se l'analisi fallisce
    #cicli che permettono di cambiare dei parametri sull'analisi nel caso il modello non arrivi a convergenza
    set ok 0;
    set controlTime [getTime];
    while {$controlTime < $TmaxAnalysis && $ok == 0} {
        set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
        set controlTime [getTime]
        set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
        if {$ok != 0} {
            puts "Trying Newton with Initial Tangent .."
            test NormDisplIncr $Tol 1000 0
            algorithm Newton -initial
            set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
            test $TestType $Tol $maxNumIter 0
            algorithm $algorithmType
        }
        if {$ok != 0} {
            puts "Trying Broyden .."
            algorithm Broyden 8
            set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
            algorithm $algorithmType
        }
        if {$ok != 0} {
            puts "Trying NewtonWithLineSearch .."
            algorithm NewtonLineSearch .8
            set ok [analyze 1 $DtAnalysis]
            algorithm $algorithmType
        }
    }
}

```

```

    }
}
};

puts "Ground Motion Done $i $R $f. End Time: [getTime]"

# -----
#postprogramma per agevolare la lettura dei risultati
# -----

set disp [open "Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,DDisp.txt"]
set force [open "Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,FDisp.txt"]
set lineNumber 0
set filename "Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,DispForce.txt"
set fileld [open $filename "w"]
set format1 "%7.3f\t%7.3f"
while {[gets $disp line] >= 0}{
    gets $force line1
    if {[length $line ] == 4 && [length $line1] == 7} {
        if {[index $line1] == 0.} {} else {
            puts $fileld [format $format1 [index $line 2] [expr [index $line1 1]/1000.]] } else { break }
        }
}
# -----
puts ""
}
puts ""
puts ""
}
puts ""
puts ""
}
puts "[expr [length $RadiusList]*[length $fList]*[length $TList]] ANALYSIS COMPLETED"
wipe
# -----
source percan2.tcl; #postprogramma per cancellare dati inutili

```

Modello Friction Pendulum 2D (3 tipi di leggi di attrito senza accelerazione verticale)

```

# -----
# File:fp2d.tcl
# Modello Parametrico della Pila-Dispositivo (R,f,T)
# Modello Bilineare
# Data:19/04/2014
# Autore:Alberto Candeo
# Unità di misura: N mm sec
#
# ^Y
# |
# o 3  ___
# |   hb [mm] Dispositivo FP
# o 2  ___
# |   |
# |   |
# |   |
#(elem1) L [mm] Pila
# |   |
# |   |
# |   |
# o 1  --- ----->X
#
#Settaggio dei cicli esterni

set RadiusList "1000. 2000. 3000. 4000."
set fList "0.025 0.035 0.045 0.055"
set TList "20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00 20.00"

puts "RadiusList: $RadiusList"
puts "FrictionList:$fList"
puts "TimeAccelerationList: $TList"

```

```

puts ""
puts "Start Analysis"

foreach R $RadiusList {
file mkdir Radius$R; #crea una cartella dati di OUTPUT
puts "Radius: $R"
foreach f $fList {
puts "FrictionCoefficient: $f"
for {set i 1} {$i < [expr [llength $TList]+1]} {incr i 1} {

puts "NaturalAcceleration: $i";
set TA [lindex $TList [expr $i-1]];
puts "TimeDurationAcceleration: $TA";

file mkdir Radius$R/Friction$f/Acc$i;
# SET UP -----
wipe; #pulisce la memoria da definizioni passate
model basic -ndm 2 -ndf 3; # 2 dimensioni, 3 gdl per nodo

# Definisco i parametri generali -----
set g 9810.; #parametro accelerazione di gravità [mm/s^2]

# Definisco la Geometria -----
# Proprietà delle pile -----
set b 2000.; #dimensione "b" della pila [mm]
set h 2000.; #dimensione "h" della pila [mm]
set L 8000.; #altezza della pila [mm]
set A [expr $b*$h]; #area della sezione delle pile[mm2]
set Iz [expr $h*$b*$b*$b/12]; #momento d'inerzia flessionale della pila[mm4]
set E 30960.; #modulo elastico del calcestruzzo [N/mm]

# Proprietà della sovrastruttura e dei dispositivi -----
set W 4000000. ; #peso della sovrastruttura [N]
set M [expr $W/$g]; #massa della sovrastruttura [kg]
set kv 2.1e9; #rigidezza verticale del dispositivo [N/mm]
set hb 200.; #altezza del dispositivo [mm]
set f $f; #coefficiente d'attrito di progetto del dispositivo [-]
set ko 20000.; #rigidezza trasversale iniziale [N/mm]
set Fy [expr $W*$f]; #forza limite primo tratto [N]
set kr [expr $W/$R]; #rigidezza trasversale di richiamo [N/mm]
set alpha [expr $kr/$ko]; #rapporto tra la rigidezza di secondo e quella di primo tratto [-]

# Coordinate dei nodi:
node 1 0 0; #IDnodo coordinata X [mm] coordinata Y[mm]
node 2 0 $L;
node 3 0 [expr $L+$hb];

# Condizioni al contorno - Vincoli
fix 1 1 1 1; #IDnodo DX DY RZ
fix 2 0 0 1;
fix 3 0 0 1;

# Masse nodali:
mass 3 $M 1.e-9 0.; #IDnodo Mx My Mz, Massa=Peso/g.

# Definisco gli elementi -----
# Definisco una trasforzazione geometrica
geomTransf Linear 1; #IDtrasformazione
# Definisco il materiale
uniaxialMaterial Elastic 1 $kv; #IDmateriale
uniaxialMaterial Elastic 2 0.

# Definisco i tipi di elemento:
#elemento elasticBeamColumn $IDelemento $iNodo $jNodo $Area $Emateriale $Izsezione $IDtrasformazione
element elasticBeamColumn 1 1 2 $A $E $Iz 1;

# Definisco il modello d'attrito per gli elementi "singleFPBearing" (3 possibilità)
# -----
# 1:frictionModel Coulomb IDmodello coefficiente d'attrito
frictionModel Coulomb 1 $f

# 2:frictionModel VDependent IDmodello coefficiente a basse velocità ; coefficiente ad alte velocità ; parametro di passaggio

```

frictionModel VDependent 1 0.012 0.025 0.77

frictionModel VDependent IDmodello; coefficiente a basse velocità; coefficiente ad alte velocità; area di contatto ; intervallo coefficiente (pressione); parametro di passaggio (pressione); parametro di passaggio(velocità)
frictionModel VDependent 1 0.012 0.025 7.0686 0.025 0.08 0.77

#element singleFPBearing IDelemento iNodo jNodo IDmodellofrizione; raggio curvatura; iniziale; -P IDmateriale; -Mz IDmateriale
element singleFPBearing 2 2 3 1 \$R \$ko -P 1 -Mz 2;

Definisco carichi statici -----
pattern Plain 1 Linear {
load 3 0. [expr -1*\$W] 0.; #IDnodo FX FY MZ (Forze concentrate)
}

Parametri analisi statica
set Tol 1.0e-8; #tolleranza di convergenza
constraints Plain; #modalità di gestione condizioni di vincolo
numberer Plain; #modalità di gestione numerazione nodi
system BandGeneral; #modalità di gestione e risoluzione del sistema di equazioni nell'analisi
test NormDispIncr \$Tol 6 ; #test di convergenza
algorithm Newton; #definizione algoritmo: Newton
set NstepGravity 10; #step di applicazione dei carichi statici
set DGravity [expr 1./\$NstepGravity]; #primo incremento di carico;
integrator LoadControl \$DGravity; #determina lo step temporale successivo per l'analisi
analysis Static; #definisco il tipo di analisi: Statica
analyze \$NstepGravity; #applico i carichi statici

Mantengo i carichi statici gravitazionali costanti e resetto il contatore temporale
loadConst -time 0.0

Analisi Dinamica-----
Analisi dinamica uniforme (accelerazione uniforme applicata a tutti i nodi vincolati)
set GMdirection 1; #direzione accelerazione
set GMfile "\$i.txt" ; #file INPUT accelerazione
set GMfact 1000.; #fattore di scala accelerazione

Definisco i parametri degli INPUT per dell'analisi dinamica
set DtAnalysis 0.01; #time-step "Dt" per l'analisi dinamica
set TmaxAnalysis \$TA; #durata massima dell'analisi dinamica (dipende dall'accelerogramma di INPUT)

Parametri per l'analisi dinamica
constraints Transformation; #modalità di gestione condizioni di vincolo
numberer Plain; #modalità di gestione numerazione nodi
system SparseGeneral -piv; #modalità di gestione e risoluzione del sistema di equazioni nell'analisi

Definisco i parametri del test di convergenza
set Tol 1.e-8; #tolleranza test di convergenza
set maxNumIter 10; #numero massimo di iterazioni permesse per arrivare a convergenza
set printFlag 0; #funzione di stampa informazioni sulla convergenza
set TestType EnergyIncr; #tipo test di convergenza
test \$TestType \$Tol \$maxNumIter \$printFlag

set algorithmType ModifiedNewton; #definizione algoritmo: Newton modificato
algorithm \$algorithmType;

Definisco parametri dell'integratore
set NewmarkGamma 0.5; #parametro gamma dell'integratore di Newmark
set NewmarkBeta 0.25; #parametro beta dell'integratore di Newmark
integrator Newmark \$NewmarkGamma \$NewmarkBeta

analysis Transient; #definisco il tipo di analisi: Transitoria

Definisco smorzamento-----
Definisco parametri di smorzamento di tipo Rayleigh from \$xDamp
D=\$alphaM*M + \$betaKcurr*Kcurrent + \$betaKcomm*KlastCommit + \$beatKinit*\$Kinitial
set xDamp 0.02; #2% percentuale di smorzamento
set lambda [eigen 1]; #valore del primo modo mode 1
set omega [expr pow(\$lambda,0.5)];
set alphaM 0.; #M-prop. smorzamento; D = alphaM*M
set betaKcurr 0.; #K-proporzionale smorzamento; +beatKcurr*KCurrent
set betaKcomm [expr 2.*\$xDamp/(\$omega)]; #K-prop. parametro di smorzamento; +betaKcomm*KlastCommitt
set betaKinit 0.; #smorzamento riferito alla rigidezza iniziale +beatKinit*Kini
Definisco lo smorzamento

```

rayleigh $alphaM $betaKcurr $betaKinit $betaKcomm; # Applico smorzamento di tipo Rayleigh

# Inizio l'analisi dinamica -----
# Accelerazione uniforme: INPUT
set IDloadTag 8000; #IDaccelerazione
set dt 0.01; #step temporale accelerazione di INPUT
set GMfatt 1000.0; #coefficiente di scala dati di INPUT
set AccelSeries "Series -dt $dt -filePath $GMfile -factor $GMfatt"; #informazioni sulla serie
pattern UniformExcitation $IDloadTag $GMdirection -accel $AccelSeries ; #creo accelerazione uniforme

# Definisco i risultati da registrare -----

recorder Element -file Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,FDisp.txt -time -ele 2 globalForce;#forze elementi
recorder Element -file Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,DDisp.txt -time -ele 2 deformations;#deformazione elementi

#cicli che permettono di ridurre lo step di integrazione nel caso il modello non arrivi a convergenza
set dtAna [expr $dt/2.]; #step temporale di calcolo
set dtMin 1.0e-5; #step temporale minimo
set dtMax $dtAna; #step temporale massimo

set ok 0;
set tFinal [expr $npts * $dt]
set tCurrent [getTime]

record

while {$ok == 0 && $tCurrent < $tFinal} {

    set ok [analyze 1 $dtAna]

    if {$ok != 0} {
        if {[expr $dtAna/2.0] >= $dtMin} {
            set dtAna [expr $dtAna/2.0]
            puts [format "\nReducing time step size (dtNew = %1.6e)" $dtAna]
            set ok 0
        }
    } else {
        if {[expr $dtAna*2.0] <= $dtMax} {
            set dtAna [expr $dtAna*2.0]
            puts [format "\nIncreasing time step size (dtNew = %1.6e)" $dtAna]
        }
    }

    set tCurrent [getTime]
}

if {$ok != 0} {
    puts [format "\nModel failed (time = %1.3e)" $tCurrent]
} else {
    puts [format "\nResponse-history analysis completed"]
}

puts "Ground Motion Done $i $R $f. End Time: [getTime]"

# -----
#postprogramma per agevolare la lettura dei risultati
# -----

set disp [open "Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,DDisp.txt"]
set force [open "Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,FDisp.txt"]
set lineNumber 0
set filename "Radius$R/Friction$f/Acc$i/$R,$f,$i,DispForce.txt"
set fileId [open $filename "w"]
set format1 "%7.3f\t%7.3f"
while {[gets $disp line] >= 0} {
    gets $force line1
    if {[length $line] == 4 && [length $line1] == 7} {
        if {[lindex $line1] == 0.} {} else {
            puts $fileId [format $format1 [lindex $line 2] [expr [lindex $line1 1]/1000.]] } } else { break }
    }
}
# -----
puts ""
}

```



```
#PROPRIETA' DELLE PILE -----
set bpil 2000.; #dimensione "b" della sezione della pila [mm]
set hpil 2000.; #dimensione "h" della sezione della pila [mm]
set Apil [expr $bpil*$hpil]; #area della sezione della pila [mm2]
set lpil [expr $bpil*$hpil*$hpil*$hpil/12]; # [mm4]
set lpil [expr $hpil*$bpil*$bpil*$bpil/12]; # [mm4]
set Jpil [expr 0.141*$bpil*$hpil*$hpil*$hpil]; # [mm4] !!!!!!!!!!!!! 0.141 SOLO SE QUADRATA !!!!!
set Epil 30960.; #modulo elastico del calcestruzzo[N/mm2]
set Gpil [expr $Epil/2.4]; # [N/mm2]
```

```
#PROPRIETA' DEI DISPOSITIVI E DELLA SOVRASTRUTTURA -----
```

```
# Definisco i pesi
set Wsism 150.; #peso sismico impalcato[N/mm]
set Wpila [expr $Apil*0.000025]; #peso pila [N/mm]
```

```
set Ws1 [expr $Wsism*($L1/2)];# [N]
set Ws2 [expr $Wsism*($L4/2)];# [N]
```

```
set W1 [expr $Wsism*($L1/2+$L2/2)];# [N]
set W2 [expr $Wsism*($L2/2+$L3/2)];# [N]
set W3 [expr $Wsism*($L3/2+$L4/2)];# [N]
```

```
set Wp1 [expr $Wpila*$P1];# [N]
set Wp2 [expr $Wpila*$P2];# [N]
set Wp3 [expr $Wpila*$P3];# [N]
```

```
puts "Wtot: [expr $W1+$W2+$W3+$Ws1+$Ws2]"
```

```
# Definisco le masse
set ms1 [expr $Ws1/$g]; #massa spalla sx[kg]
set ms2 [expr $Ws2/$g]; #massa spalla dx [kg]
```

```
set m1 [expr $W1/$g]; #massa impalcato [kg]
set m2 [expr $W2/$g]; #massa impalcato [kg]
set m3 [expr $W3/$g]; #massa impalcato [kg]
```

```
set mp1 [expr $Wp1/$g]; #massa pila 1 [kg]
set mp2 [expr $Wp2/$g]; #massa pila 2 [kg]
set mp3 [expr $Wp3/$g]; #massa pila 3 [kg]
```

```
# Definisco i parametri degli isolatori
set R 3700.; #raggio di Curvatura [mm]
set kv 2.1e9; #rigidezza Verticale Isolatore [N/mm]
set hb 200.; #altezza Isolatore [mm]
set f 0.055; #coefficiente d'Attrito [-]
set ko 20000.; #rigidezza Iniziale [N/mm]
```

```
# Definisco le Coordinate dei Nodi
# nID Xi Yi Zi -mass massaDX massaDY massaDZ massaRX massaRY massaRZ
node 1 0.0 0.0 0.0
node 2 $L1 0.0 [expr -$P1]
node 3 [expr $L1+$L2] 0.0 [expr -$P2]
node 4 [expr $L1+$L2+$L3] 0.0 [expr -$P3]
node 5 [expr $L1+$L2+$L3+$L4] 0.0 0.0
node 6 0.0 0.0 $hb -mass $ms1 $ms1 $ms1 0.0 0.0 0.0
node 7 $L1 0.0 $hb -mass $m1 $m1 $m1 0.0 0.0 0.0
node 8 [expr $L1+$L2] 0.0 $hb -mass $m2 $m2 $m2 0.0 0.0 0.0
node 9 [expr $L1+$L2+$L3] 0.0 $hb -mass $m3 $m3 $m3 0.0 0.0 0.0
node 10 [expr $L1+$L2+$L3+$L4] 0.0 $hb -mass $ms2 $ms2 $ms2 0.0 0.0 0.0
node 11 $L1 0.0 0.0 -mass $mp1 $mp1 $mp1 0.0 0.0 0.0
node 12 [expr $L1+$L2] 0.0 0.0 -mass $mp2 $mp2 $mp2 0.0 0.0 0.0
node 13 [expr $L1+$L2+$L3] 0.0 0.0 -mass $mp3 $mp3 $mp3 0.0 0.0 0.0
```

```
# Definisco i vincoli trasmessi dalle spalle e dalle fondazioni delle pile
# tag DX DY DZ RX RY RZ
fix 1 1 1 1 1 1 1; #spalla1
fix 2 1 1 1 1 1 1; #basepila1
fix 3 1 1 1 1 1 1; #basepila2
fix 4 1 1 1 1 1 1; #basepila3
fix 5 1 1 1 1 1 1; #spalla2
fix 6 0 0 0 1 1 1;
fix 7 0 0 0 1 1 1;
fix 8 0 0 0 1 1 1;
```

```

fix 9 0 0 0 1 1 1 ;
fix 10 0 0 0 1 1 1 ;
fix 11 0 0 0 1 1 1 ;
fix 12 0 0 0 1 1 1 ;
fix 13 0 0 0 1 1 1 ;

# Definisco le caratteristiche del materiale per gli isolatori
uniaxialMaterial Elastic 1 $kv ;#rigidezza assiale
uniaxialMaterial Elastic 2 0. ; #rigidezza torsionale [è già stata vincolata!!]

# Definisco le trasformazioni lineari
geomTransf Linear 1 0 1 0 ; #pile
geomTransf Linear 2 0 -1 0 ; #impalcato

# Definisco gli elementi pila
# -----
element elasticBeamColumn 1 2 11 $Apil $Epil $Gpil $Jpil $Iypil $Izpil 1 ;
element elasticBeamColumn 2 3 12 $Apil $Epil $Gpil $Jpil $Iypil $Izpil 1 ;
element elasticBeamColumn 3 4 13 $Apil $Epil $Gpil $Jpil $Iypil $Izpil 1 ;

# Definisco gli elementi rappresentanti l'impalcato
# -----
element elasticBeamColumn 21 6 7 $Aimp $Eimp $Gimp $Jimp $Iyimp $Izimp 2
element elasticBeamColumn 22 7 8 $Aimp $Eimp $Gimp $Jimp $Iyimp $Izimp 2
element elasticBeamColumn 23 8 9 $Aimp $Eimp $Gimp $Jimp $Iyimp $Izimp 2
element elasticBeamColumn 24 9 10 $Aimp $Eimp $Gimp $Jimp $Iyimp $Izimp 2

# -----
# Creo gli elementi dispositivi "friction pendulum"

# Definisco il modello di attrito per i dispositivi "friction pendulum"
# -----
# frictionModel Coulomb tag mu
# frictionModel Coulomb 1 $f

# frictionModel VDependent tag muSlow muFast transRate
# frictionModel VDependent 1 [expr $f/2.5] $f 0.01
# puts "muSlow:[expr $f/2.5] muFast:$f transRate:0.01"

# frictionModel VPDependent tag muSlow muFast A deltaMu alpha transRate
frictionModel VPDependent 1 [expr $f/2.5] [expr $f*5.] [expr 2.*3.14*$R*($R-pow((pow($R,2.)-pow(180,2.)),0.5))] [expr 4.*$f] 0.07 0.01
puts "muSlow:[expr $f/2.5] muFast:[expr $f*5.] A:[expr 2.*3.14*$R*($R-pow((pow($R,2.)-pow(180,2.)),0.5))] deltaMu:[expr 4.*$f] alpha:0.07
transRate:0.01 ";

#element singleFPBearing $eleTag $iNode $jNode $frnMdlTag $Reff $kNit -P $matTag -T $matTag -My $matTag -Mz $matTag <-orient <$x1 $x2 $x3>
$y1 $y2 $y3>
element singleFPBearing 34 1 6 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
element singleFPBearing 31 11 7 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
element singleFPBearing 32 12 8 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
element singleFPBearing 33 13 9 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0
element singleFPBearing 35 5 10 1 $R $ko -P 1 -T 2 -My 2 -Mz 2 -orient 1 0 0

puts ""
puts ""

# Definisco i carichi verticali gravitazionali -----
pattern Plain 1 Linear {

load 6 0 0. [expr -1*$Ws1] 0. 0. 0. ;
load 7 0 0. [expr -1*$W1] 0. 0. 0. ;
load 8 0 0. [expr -1*$W2] 0. 0. 0. ;
load 9 0 0. [expr -1*$W3] 0. 0. 0. ;
load 10 0 0. [expr -1*$Ws2] 0. 0. 0. ;
load 11 0 0. [expr -1*$Wp1] 0. 0. 0. ;
load 12 0 0. [expr -1*$Wp2] 0. 0. 0. ;
load 13 0 0. [expr -1*$Wp3] 0. 0. 0. ;
}
# Parametri analisi statica
set Tol 1.0e-8; #tolleranza di convergenza
constraints Plain; #modalità di gestione condizioni di vincolo
numberer Plain; #modalità di gestione numerazione nodi
system BandGeneral; #modalità di gestione e risoluzione del sistema di equazioni nell'analisi
test NormDisplnCr $Tol 6 ; #test di convergenza

```

```

algorithm Newton;                #definizione algoritmo: Newton
set NstepGravity 10;            #step di applicazione dei carichi statici
set DGravity [expr 1./$NstepGravity]; #primo incremento di carico;
integrator LoadControl $DGravity; #determina lo step temporale successivo per l'analisi
analysis Static;                #definisco il tipo di analisi: Statica
analyze $NstepGravity;          #applico i carichi statici

puts "Gravity Analysis Completed"

# Mantengo i carichi statici gravitazionali costanti e resetto il contatore temporale
loadConst -time 0.0

# Definisco i risultati da registrare -----
#Spalla Sx
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/FDisp1,$i,.txt -time -ele 34 globalForce;
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/DDisp1,$i,.txt -time -ele 34 deformations;
#Dispositivo Pila 1
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/FDisp2,$i,.txt -time -ele 31 globalForce;
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/DDisp2,$i,.txt -time -ele 31 deformations;
#Dispositivo Pila 2
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/FDisp3,$i,.txt -time -ele 32 globalForce;
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/DDisp3,$i,.txt -time -ele 32 deformations;
#Dispositivo Pila 3
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/FDisp4,$i,.txt -time -ele 33 globalForce;
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/DDisp4,$i,.txt -time -ele 33 deformations;
#Spalla Dx
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/FDisp5,$i,.txt -time -ele 35 globalForce;
recorder Element -file Comb$A1,$A2,$A3/DDisp5,$i,.txt -time -ele 35 deformations;

# Analisi Dinamica-----
# Analisi dinamica uniforme (accelerazione uniforme applicata a tutti i nodi vincolati)
set GMdirection 2;                #direzione accelerazione orizzontale
set GMdirectionvert 3;            #direzione accelerazione verticale
set GMfile "$i.txt";              #file INPUT accelerazione orizzontale
set GMfilevert "v.txt";          #file INPUT accelerazione verticale
set GMfact 1.;                    #fattore di scala accelerazione

# Definisco i parametri degli INPUT per dell'analisi dinamica
set DtAnalysis 0.01;              #time-step "Dt" per l'analisi dinamica
set TmaxAnalysis $TA;             #durata massima dell'analisi dinamica (dipende dall'accelerogramma di INPUT)

# Parametri per l'analisi dinamica
constraints Transformation;        #modalità di gestione condizioni di vincolo
numberer RCM;                      #modalità di gestione numerazione nodi
system SparseGeneral -piv;         #modalità di gestione e risoluzione del sistema di equazioni nell'analisi

# Definisco i parametri del test di convergenza
set Tol 1.e-8;                      #tolleranza test di convergenza
set maxNumIter 10;                  #numero massimo di iterazioni permesse per arrivare a convergenza
set printFlag 0;                    #funzione di stampa informazioni sulla convergenza
set TestType EnergyIncr;            #tipo test di convergenza
test $TestType $Tol $maxNumIter $printFlag;

set algorithmType ModifiedNewton;    #definizione algoritmo: Newton modificato
algorithm $algorithmType;

# Definisco parametri dell'integratore
set NewmarkGamma 0.5;                #parametro gamma dell'integratore di Newmark
set NewmarkBeta 0.25;                #parametro beta dell'integratore di Newmark
integrator Newmark $NewmarkGamma $NewmarkBeta

analysis Transient;                  #definisco il tipo di analisi: Transitoria

# Definisco smorzamento-----
# Definisco parametri di smorzamento di tipo Rayleigh from $xDamp
# D=$alphaM*M + $betaKcurr*Kcurrent + $betaKcomm*KlastCommit + $beatKinit*$Kinitial
set xDamp 0.02;                      #2% percentuale di smorzamento
set lambda [eigen 1];                 #valore del primo modo mode 1
set omega [expr pow($lambda,0.5)];
set alphaM 0.;                        #M-prop. smorzamento; D = alphaM*M
set betaKcurr 0.;                     #K-proporzionale smorzamento; +beatKcurr*KCurrent
set betaKcomm [expr 2.*$xDamp/($omega)]; #K-prop. parametro di smorzamento; +betaKcomm*KlastCommitt
set betaKinit 0.;                     #smorzamento riferito alla rigidezza iniziale +beatKinit*Kini
# Definisco lo smorzamento

```

```

rayleigh $alphaM $betaKcurr $betaKinit $betaKcomm; # Applico smorzamento di tipo Rayleigh

# Inizio l'analisi dinamica -----
# Accelerazione uniforme: INPUT
set IDloadTag 8000; #IDaccelerazione orizzontale
set IDloadtagvert 7000; #IDaccelerazione verticale
set dt 0.01; #step temporale accelerazione di INPUT
set GMfatt 1000.0; #coefficiente di scala dati di INPUT
set AccelSeries "Series -dt $dt -filePath $GMfile -factor $GMfatt"; #informazioni sulla serie orizzontale
set AccelSeriesvert "Series -dt $dt -filePath $GMfilevert -factor $GMfatt"; #informazioni sulla serie verticale
pattern UniformExcitation $IDloadTag $GMdirection -accel $AccelSeries ; #creo accelerazione orizzontale uniforme
pattern UniformExcitation $IDloadtagvert $GMdirectionvert -accel $AccelSeriesvert ; #creo accelerazione verticale uniforme

# Definisco dei cicli che permettano di ridurre lo step di integrazione nel caso il modello non arrivi a convergenza con lo step d'integrazione di
partenza
set dtAna $dt; #step temporale di calcolo
set dtMin 1.0e-5; #step temporale minimo
set dtMax $dtAna; #step temporale massimo

set ok 0;
set tFinal $TA
set tCurrent [getTime]

record

while {$ok == 0 && $tCurrent < $tFinal} {

    set ok [analyze 1 $dtAna]

    if {$ok != 0} {
        if {[expr $dtAna/2.0] >= $dtMin} {
            set dtAna [expr $dtAna/2.0]
            puts [format "\nReducing time step size (dtNew = %1.6e)" $dtAna]
            set ok 0
        }
    } else {
        if {[expr $dtAna*2.0] <= $dtMax} {
            set dtAna [expr $dtAna*2.0]
            puts [format "\nIncreasing time step size (dtNew = %1.6e)" $dtAna]
        }
    }

    set tCurrent [getTime]
}

if {$ok != 0} {
    puts [format "\nModel failed (time = %1.3e)" $tCurrent]
} else {
    puts [format "\nResponse-history analysis completed"]
}

puts "Analysis of Combination ([expr $A1*$P];[expr $A2*$P];[expr $A3*$P]) Completed !"

# -----
# Definisco un postprogramma per agevolare la lettura dei risultati
# -----

set disp1 [open "Comb$A1,$A2,$A3/DDisp1,$i,.txt"]
set force1 [open "Comb$A1,$A2,$A3/FDisp1,$i,.txt"]
set lineNumber 0
set filename "Comb$A1,$A2,$A3/DispForce1,$i,.txt"
set fileld [open $filename "w"]
set format1 "%10.3f\t%10.3f"
while {[gets $disp1 line] >= 0} {
    gets $force1 line1
    if {[length $line] == 7 && [length $line1] == 13} {
        puts $fileld [format $format1 [lindex $line 3] [expr [lindex $line1 8]/1000.]] } else { break }
    }
}

set disp2 [open "Comb$A1,$A2,$A3/DDisp2,$i,.txt"]
set force2 [open "Comb$A1,$A2,$A3/FDisp2,$i,.txt"]
set lineNumber 0
set filename "Comb$A1,$A2,$A3/DispForce2,$i,.txt"
set fileld [open $filename "w"]

```

```

set format1 "%10.3f\t%10.3f"
while {[gets $disp2 line] >= 0} {
    gets $force2 line1
    if {[length $line] == 7 && [length $line1] == 13} {
        puts $fileld [format $format1 [lindex $line 3] [expr [lindex $line1 8]/1000.]] } else { break }
    }

set disp3 [open "Comb$A1,$A2,$A3/DDisp3,$i,.txt"]
set force3 [open "Comb$A1,$A2,$A3/FDisp3,$i,.txt"]
set lineNumber 0
set filename "Comb$A1,$A2,$A3/DispForce3,$i,.txt"
set fileld [open $filename "w"]
set format1 "%10.3f\t%10.3f"
while {[gets $disp3 line] >= 0} {
    gets $force3 line1
    if {[length $line] == 7 && [length $line1] == 13} {
        puts $fileld [format $format1 [lindex $line 3] [expr [lindex $line1 8]/1000.]] } else { break }
    }

set disp4 [open "Comb$A1,$A2,$A3/DDisp4,$i,.txt"]
set force4 [open "Comb$A1,$A2,$A3/FDisp4,$i,.txt"]
set lineNumber 0
set filename "Comb$A1,$A2,$A3/DispForce4,$i,.txt"
set fileld [open $filename "w"]
set format1 "%10.3f\t%10.3f"
while {[gets $disp4 line] >= 0} {
    gets $force4 line1
    if {[length $line] == 7 && [length $line1] == 13} {
        puts $fileld [format $format1 [lindex $line 3] [expr [lindex $line1 8]/1000.]] } else { break }
    }

set disp5 [open "Comb$A1,$A2,$A3/DDisp5,$i,.txt"]
set force5 [open "Comb$A1,$A2,$A3/FDisp5,$i,.txt"]
set lineNumber 0
set filename "Comb$A1,$A2,$A3/DispForce5,$i,.txt"
set fileld [open $filename "w"]
set format1 "%10.3f\t%10.3f"
while {[gets $disp5 line] >= 0} {
    gets $force5 line1
    if {[length $line] == 7 && [length $line1] == 13} {
        puts $fileld [format $format1 [lindex $line 3] [expr [lindex $line1 8]/1000.]] } else { break }
    }
}
puts ""
puts ""
wipe
puts ""
puts "Accelerazione $i conclusa"
}
}
}
}
# -----
source percan3.tcl; #postprogramma per cancellare dati inutili
# -----

```

Riferimenti

Normativa

- EN 15129 (2009) – Antiseismic Devices. Brussels: Comité Européen de Normalisation (CEN).
- D.M. 14.01.2008 – “Nuove norme Tecniche per le Costruzioni”.
- Circ. 02.02.2009 – Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al decreto ministeriale 14.01.2008.
- Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici.
- Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 2: Ponti.
- AASHTO 2010 – “Guide Specifications for Seismic Isolation Design”
- AASHTO 2012 – “Bridge Design Specifications”

Articoli accademici

- S. Lissia, C. Casarotti, A. Pavese, F. Dacarro, “Experimental Response of Full Scale Curved Surface Sliders Equipped with High Dissipation Sliding Material”, WCEE2012
- M.C. Constantinou, P. Tsopeles, A. Kasalanati, E. Wolff (1999), “Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings”, Technical Rep. No. MCEER-99-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- G.Bondonet, A. Filiatrault, (1997) “Frictional Response of PTFE Sliding Bearings at high frequencies”, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2(4), 139-148.
- Nagarajaiah, S., Reinhorn, A., and Constantinou, M. (1991). “Nonlinear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures.” J. Struct. Eng., 117(7), 2035–2054.
- McKenna, F., Fenves, G., and Scott, M. (2006). “Computer Program OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation, Pacific Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley, CA”. (<http://opensees.berkeley.edu>).
- INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING (Volume 3, N° 3, 2013)
- MCEER/ATC-49 “Recommended LRFD Guidelines for the Seismic Design of Highway Bridges”