

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Civile - Strutture

Tesi di Laurea Magistrale

L'influenza delle caratteristiche del
moto sismico sui parametri
meccanici ottimali dei dispositivi per
l'isolamento sismico degli elementi
non strutturali



Relatore
Prof. Ing. Paolo Castaldo

Laureando
Samuele Corino

Dicembre 2018

Indice

Introduzione	1
1 Protezione sismica	3
1.1 Cenni storici sismicità in Italia	3
1.2 Rischio Sismico	4
1.2.1 Pericolosità sismica	5
1.2.2 Vulnerabilità sismica	5
1.2.3 Esposizione sismica	7
1.2.4 Metodo Cornell	8
1.3 Classificazione sismica	10
1.4 Tamponature	13
1.4.1 Classificazione delle tamponature	14
1.4.2 Tipologie di tamponature in esame	16
2 Metodologie di controllo sismico	19
2.1 Isolamento sismico	20
2.2 Caratteristiche degli isolatori	21
2.3 Isolatore FPS	25
2.3.1 Proprietà dell'isolatore FPS	26
2.3.2 Modello matematico isolatore FPS	27
3 Dinamica dei sistemi SDOF e MDOF	31
3.1 Sistema SDOF	31
3.2 Equazione del moto: eccitazione sismica	33
3.3 Sistema MDOF	33
3.4 Modello MDOF multipiano o telaio Shear-type	34
3.5 Metodi di soluzione dell'equazione del moto	36
3.5.1 Soluzione classica	37
3.5.2 Integrale di Duhamel	38
3.5.3 Metodo del dominio di frequenza	38
3.5.4 Metodi numerici	39
4 Smorzamento	41
4.1 Stima del rapporto di smorzamento modale	41
4.2 Costruzione della matrice di smorzamento	42
4.3 Modello di Wilson	43

5	Software di analisi - <i>MathWorks-MatLab e Simulink</i>	45
5.1	Generalità	45
5.2	Descrizione degli script <i>Mathworks-Matlab</i> ® adottati	46
5.3	Modello <i>MathWorks Matlab-Simulink</i> ® per la soluzione dei modelli Shear-Type	47
5.4	Modello <i>MathWorks Matlab-Simulink</i> ® per l'analisi degli elementi non strutturali dotati di FPS	47
6	Analisi parametrica	51
6.1	Formulazione adimensionalizzata del problema	51
6.2	Elementi di statistica	55
6.3	Interpolazione dei dati	56
6.3.1	Regressione con legge di potenza	57
7	Ottimi di progettazione	59
7.1	Regolarità strutturale	59
7.1.1	Criteri di regolarità in pianta	59
7.1.2	Criteri di regolarità in elevazione	60
7.2	Calcolo matrice di rigidezza [K]	61
7.2.1	Matrice di rigidezza lineare [K _{lin}]	61
7.2.2	Matrice di rigidezza quadratica [K _{quadr}]	62
8	Caso studio	65
8.1	Caratteristiche e modelli considerati	65
8.2	Tipologie di terremoti considerati	66
8.3	Analisi dei telai Shear-Type	68
8.3.1	Sismi con IM non normalizzata	71
8.3.2	Sismi con IM normalizzata tramite lo spettro di risposta	72
8.3.3	Sismi con IM normalizzata tramite la PGA	74
8.4	Analisi del sistema isolato composto dall'isolatore FPS e dalla tamponatura	74
9	Risultati	79
9.1	Grafici inerenti all'analisi dei telai Shear-Type con IM non normalizzata	79
9.2	Grafici inerenti all'analisi dei telai Shear-Type con IM normalizzata tramite lo spettro di risposta	120
9.3	Grafici inerenti all'analisi dei telai Shear-Type con IM normalizzata tramite la PGA	161
9.4	Grafici inerenti all'analisi del sistema isolato	202
9.4.1	Grafici tridimensionali: spostamenti adimensionalizzati	203
9.4.2	Grafici bidimensionali ($\Pi_\mu ; \psi_s(\tau)$)	227
9.4.3	Grafici bidimensionali ($\frac{T_b}{T_g} ; \Pi_\mu^{Opt}$)	245
10	Conclusioni	269
	Bibliografia	274

Introduzione

Con il presente studio si vuole valutare l'affidabilità sismica in termini prestazionali, di elementi non strutturali isolati alla base tramite dispositivi attritivi a pendolo scorrevole (FPS: Friction Pendulum System) con la finalità di fornire abachi e metodologie di progetto sempre su base prestazionale e in particolare si vuole verificare se il parametro PGA/PGV (PGA: Peak Ground Acceleration; PGV: Peak Ground Velocity) è in grado di governare il sistema.

Questi sistemi utilizzano interfacce aventi superfici in acciaio-Teflon in grado di supportare il peso della struttura sovrastante, di fornire al sistema la capacità di centraggio delle forze e infine di donare al sistema la capacità di assorbire e dissipare l'energia addizionale. Tali sistemi sono stati oggetto di numerosi studi che hanno mostrato una certa aleatorietà nel comportamento dinamico dei dispositivi di isolamento FPS, dovuta essenzialmente alla dipendenza dal coefficiente d'attrito e da parametri non facilmente controllabili tra i quali la temperatura e la pressione apparente. [5, 11]

Nel presente lavoro di tesi, nel *Capitolo 1*, vengono descritti i principi che stanno alla base della protezione sismica degli edifici in relazione alla classificazione del rischio sismico del territorio italiano, e viene fatta una descrizione delle tamponature, considerate come elementi non strutturali, oggetto di studio.

Nel *Capitolo 2* si illustrano le metodologie di controllo sismico, in particolare l'isolamento sismico, soffermandosi principalmente sul sistema FPS (Friction Pendulum System) in modo tale da descriverne il funzionamento e il modello.

Nel *Capitolo 3* viene illustrata la teoria dei sistemi dinamici SDOF e MDOF (Single-Degree-of-Freedom, Multiple-Degrees-of-Freedom) e i principali metodi risolutivi dell'equazioni del moto.

Nel quarto capitolo, viene esposta la teoria dello smorzamento e il modello utilizzato in questo studio, il modello di Wilson.

Nel *Capitolo 5* si descrive il software di analisi e il linguaggio matematico utilizzato descrivendo i modelli numerici di integrazione.

Nel sesto capitolo viene illustrata l'analisi parametrica eseguita per il caso studio in esame, definendo la formulazione adimensionalizzata adottata.

Nel *Capitolo 7* si definiscono i criteri di progettazione considerati per le strutture in esame, in modo tale da descrivere le ipotesi di partenza dei modelli analizzati, come ad esempio la matrice di rigidezza considerata.

Nell'ottavo capitolo infine viene descritto il caso studio descrivendo le caratteristiche dei modelli, la tipologia di sismi in esame e le analisi effettuate. A seguire sono poi illustrati i risultati ottenuti e le relative conclusioni.

Capitolo 1

Protezione sismica

1.1 Cenni storici sismicità in Italia

L'Italia è un paese caratterizzato da una antica e lunga tradizione scritta; la conoscenza della sismicità è resa possibile dal grande numero di documenti e informazioni sugli effetti che nel passato i terremoti hanno provocato nelle diverse aree geografiche della nostra penisola. Per ognuna sappiamo quanti terremoti le hanno interessate, almeno nell'intervallo di tempo per il quale sono disponibili le informazioni, e quanto sono stati intensi. Questo è il primo passo verso la definizione della "pericolosità sismica", cioè la definizione di uno degli elementi necessari a valutare il rischio sismico di un territorio.

Il nostro Paese, negli ultimi 2500 anni, è stato interessato da più di 30.000 eventi sismici di media e forte intensità (superiore al IV-V grado della scala Mercalli), dei quali circa 560 di intensità uguale o superiore all'VIII grado (in media uno ogni 4 anni e mezzo). Solo nel XX secolo, ben 7 terremoti hanno avuto una magnitudo uguale o superiore a 6.5 (con effetti classificabili tra il X e XI grado Mercalli). L'Italia è dunque un paese ad elevata "sismicità", caratterizzato da aree nelle quali i terremoti avvengono spesso ma sono di bassa energia (ad esempio: Colli Albani a Sud di Roma, area vesuviana, area etnea), altre, invece, dove i terremoti avvengono più raramente ma sono di elevata energia (ad esempio appennino calabro e Sicilia orientale).

Considerando i terremoti fino al VI grado della scala Mercalli, che producono cioè solo danni lievi, a parte la Sardegna, tutto il territorio nazionale è stato almeno una volta interessato da una scossa di questa intensità. Se consideriamo eventi di intensità superiore, non sono mai stati interessati il Piemonte, parte della Lombardia e dell'Alto Adige, la costa tirrenica dalla Versilia al Fiume Volturno, quella adriatica a sud di Ancona (escluso il Gargano) ed il Salento.

La sismicità più elevata si concentra nella parte centro-meridionale della penisola - lungo la dorsale appenninica interessata da alcuni tra gli eventi più forti e distruttivi che la memoria storica ricordi. Nell'appennino centrale, ad esempio, i terremoti del 1349 e del 1703 hanno coinvolto territori estesi provocando danni anche nella città di Roma ed è ancora vivo, non solo in Abruzzo, il ricordo del terremoto che il 13 gennaio 1915 sconvolse la Marsica ed un vasto settore dell'Italia centrale. Nell'appennino meridionale, l'Irpinia è stata teatro, nel corso dei secoli, di alcuni dei più forti terremoti della storia sismica italiana, sino al più recente

del 23 novembre 1980, che ha lasciato sul territorio ferite ancora oggi facilmente riconoscibili.

In Calabria e Sicilia, le conseguenze di eventi sismici come quelli del 1783, del 1693 e del 28 dicembre 1908 - uno degli eventi più forti (magnitudo 7.2) mai registrati in Italia - sono di portata storica, avendo profondamente inciso sul tessuto sociale, sull'economia e sulla cultura delle aree interessate.[10]

1.2 Rischio Sismico

La sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio. Se conosciamo la frequenza e l'energia associate ai terremoti che caratterizzano un territorio, e attribuiamo un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definirne la pericolosità sismica. La pericolosità sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato.

Per magnitudo si intende la misura dell'energia liberata da un terremoto all'ipocentro. Viene calcolata a partire dall'ampiezza delle onde sismiche registrate dal sismografo, ed è riportata su una scala di valori logaritmica delle energie registrate, detta Scala Richter. Ciascun punto di magnitudo corrisponde ad un incremento di energia di circa 30 volte: l'energia sviluppata da un terremoto di Magnitudo 6 è circa 30 volte maggiore di quella prodotta da uno di Magnitudo 5, e circa 1000 volte maggiore di quella prodotta da un terremoto di Magnitudo 4. Questo discorso viene fatto per spiegare come un solo punto della scala Richter in esame possa in verità cambiare di molto i valori di energia che le strutture devono assorbire per evitare di subire danni e/o crollare.

Per questo motivo le conseguenze di un terremoto dipendono anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni alle azioni di una scossa sismica. La predisposizione di una costruzione al danneggiamento si definisce vulnerabilità. Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze. Infine, la maggiore o minore presenza di beni esposti al rischio, la possibilità cioè di subire un danno economico, ai beni culturali, la perdita di vite umane, è definita esposizione.

Il rischio sismico, determinato dalla combinazione della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione, è la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti). L'Italia ha una pericolosità sismica medio-alta (per frequenza e intensità dei fenomeni), una vulnerabilità molto elevata (per fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale, produttivo e dei servizi) e un'esposizione altissima (per densità abitativa e presenza di un patrimonio storico, artistico e monumentale unico al mondo). La nostra Penisola è dunque ad elevato rischio sismico, in termini di vittime, danni alle costruzioni e costi diretti e indiretti attesi a seguito di un terremoto. [7]

1.2.1 Pericolosità sismica

La pericolosità sismica di un territorio è rappresentata dalla frequenza e dalla forza dei terremoti che lo interessano, ovvero dalla sua sismicità. Viene definita come la probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi una soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (PGA) di nostro interesse.

In Italia abbiamo numerosi studi e documenti sulla sismicità della nostra Penisola, che costituiscono un patrimonio storico unico al mondo. Le prime considerazioni, spesso fantasiose, sull'origine dei terremoti e sulle caratteristiche sismiche del territorio italiano si rintracciano già nelle opere degli studiosi a partire dal XV secolo. Ma è solo nel XIX secolo, con lo sviluppo delle scienze sismologiche, che iniziano ad essere pubblicate ricerche sulle cause e sulla distribuzione geografica dei terremoti. La diffusione degli strumenti sismici dalla fine del XIX secolo e delle reti di monitoraggio nel XX secolo daranno l'impulso definitivo agli studi per la caratterizzazione sismica del territorio. Gli studi di pericolosità sismica sono stati impiegati, soprattutto negli ultimi anni, nelle analisi territoriali e regionali finalizzate a zonazioni (pericolosità di base per la classificazione sismica) o microzonazioni (pericolosità locale). In quest'ultimo caso, valutare la pericolosità significa individuare le aree a scala comunale che, in occasione di una scossa sismica, possono essere soggette a fenomeni di amplificazione e fornire indicazioni utili per la pianificazione urbanistica del territorio.

Gli studi di pericolosità possono essere utilizzati anche nelle analisi di sito, per localizzare opere critiche dal punto di vista della sicurezza, del rischio o dell'importanza strategica (centrali elettriche, installazioni militari, ospedali). Valutare la pericolosità significa, in questo caso, stabilire la probabilità di occorrenza di un terremoto di magnitudo (o PGA) superiore al valore di soglia stabilito dagli organi politici/decisionali, portando all'eventuale scelta di aree diverse.

L'approccio alla valutazione della pericolosità può essere di tipo deterministico oppure probabilistico. Il metodo deterministico si basa sullo studio dei danni osservati in occasione di eventi sismici che storicamente hanno interessato un sito, ricostruendo degli scenari di danno per stabilire la frequenza con cui si sono ripetute nel tempo scosse di uguale intensità. Tuttavia, poiché questo approccio richiede la disponibilità di informazioni complete sulla sismicità locale e sui risentimenti, nelle analisi viene generalmente preferito un approccio di tipo probabilistico. Attraverso questo approccio, la pericolosità è espressa come la probabilità che in un dato intervallo di tempo si verifichi un evento con assegnate caratteristiche. Il metodo probabilistico più utilizzato è quello di Cornell, che prevede vengano individuate nel territorio le zone responsabili degli eventi sismici (zone sismo genetiche), sia quantificato il loro grado di attività sismica e si calcolino gli effetti provocati da tali zone sul territorio in relazione alla distanza dall'epicentro. [7]

Qui di seguito in *figura 1.1* possiamo vedere una mappa della pericolosità sismica italiana realizzata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (*INGV*).

1.2.2 Vulnerabilità sismica

La vulnerabilità sismica è la propensione di una struttura a subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento sismico di una data intensità.

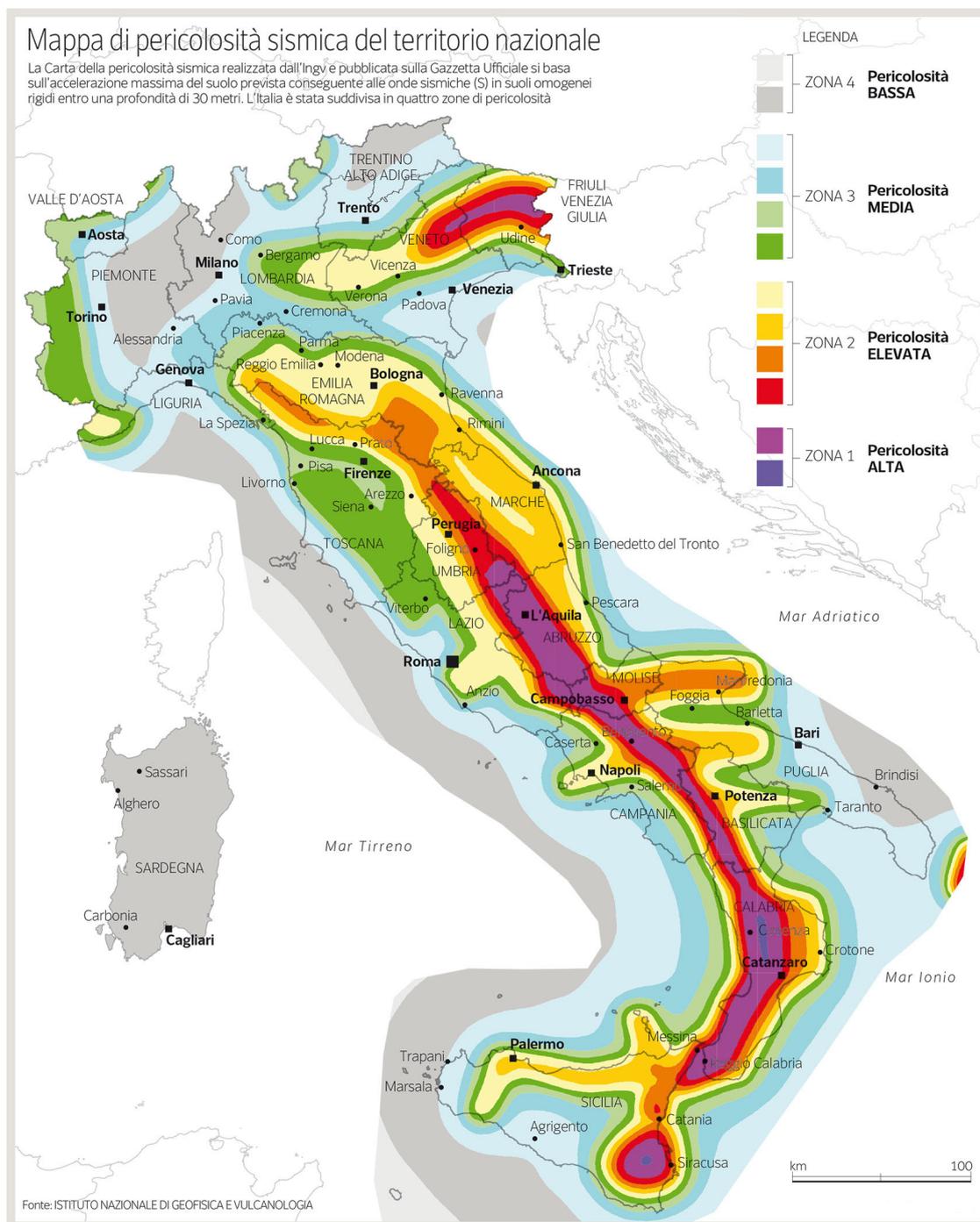


Figura 1.1: Mappa della pericolosità sismica in Italia (INGV).

Una delle cause principali di morte durante un terremoto è il crollo degli edifici. Per ridurre la perdita di vite umane, è necessario rendere sicure le strutture edilizie. Oggi, le norme per le costruzioni in zone sismiche prevedono che gli edifici non si danneggino per terremoti di bassa intensità, non abbiano danni strutturali per terremoti di media intensità e non crollino in occasione di terremoti forti, pur potendo subire gravi danni.

Un edificio può riportare danni strutturali agli elementi portanti (pilastri, travi)

e/o danni non strutturali agli elementi che non ne determinano l'instabilità (camini, cornicioni, tramezzi). Il tipo di danno dipende da: struttura dell'edificio, età, materiali, luogo di realizzazione, vicinanza con altre costruzioni e elementi non strutturali. Quando si verifica un terremoto, il terreno si muove orizzontalmente e/o verticalmente, sottoponendo un edificio a spinte in varie direzioni. L'edificio inizia così a oscillare, deformandosi. Se la struttura è duttile, e quindi capace di subire grandi deformazioni, potrà anche subire gravi danni, ma non crollerà. Il danno dipende inoltre dalla durata e dall'intensità del terremoto.

Dopo un terremoto, per valutare la vulnerabilità degli edifici è sufficiente rilevare i danni provocati, associandoli all'intensità della scossa. Più complessa è invece la valutazione della vulnerabilità degli edifici prima che si verifichi un evento sismico. Per questa sono stati messi a punto metodi di tipo statistico, meccanicistico, o giudizi di esperti.

I metodi di tipo statistico classificano gli edifici in funzione dei materiali e delle tecniche con cui sono costruiti, sulla base dei danni osservati in precedenti terremoti su edifici della stessa tipologia. Questa tecnica richiede dati di danneggiamento dei passati terremoti, non sempre disponibili, e non può essere utilizzata per valutare la vulnerabilità del singolo edificio, perché ha carattere statistico e non puntuale. I metodi di tipo meccanicistico utilizzano, invece, modelli teorici che riproducono le principali caratteristiche degli edifici da valutare, su cui vengono studiati i danni causati da terremoti simulati. Infine, alcuni metodi utilizzano i giudizi esperti per valutare il comportamento sismico e la vulnerabilità di predefinite tipologie strutturali, o per individuare i fattori che determinano il comportamento delle costruzioni e valutarne la loro influenza sulla vulnerabilità.

Per poter valutare la vulnerabilità degli edifici su tutto il territorio nazionale è necessario ricorrere a metodi statistici che utilizzino dati omogenei sulle caratteristiche degli stessi. Per il territorio italiano sono disponibili i dati dei censimenti Istat sulle abitazioni, che vengono utilizzati nell'applicazione di metodi statistici. [7]

1.2.3 Esposizione sismica

Il primo obiettivo di un programma generale di protezione dai terremoti è la salvaguardia della vita umana. Per questa ragione è molto importante valutare il numero delle persone coinvolte, decedute e/o ferite.

I motivi che causano la perdita di vite umane possono essere di diverso tipo: crollo di edifici, di ponti e altre costruzioni, ma anche incidenti stradali. A questi si aggiungono quelli legati a fenomeni innescati dal terremoto, come frane, liquefazione dei terreni, maremoti, incendi. Da alcune statistiche svolte sui principali terremoti nel mondo è stato rilevato che circa il 25 % dei morti causati da un terremoto sono dovuti a danni non strutturali degli edifici (caduta di tramezzi, vetrate, cornicioni, tegole, ecc.) e a fenomeni indotti dal terremoto.

Generalmente è possibile stimare, con un certo margine di errore e specialmente per i terremoti più forti, quante persone sono rimaste coinvolte, attraverso calcoli che si basano sul numero degli edifici crollati o danneggiati. Per poter fare queste stime sono necessarie alcune considerazioni su:

- il numero delle persone che abitano negli edifici;

- l'orario del terremoto;
- le possibilità di fuggire e/o proteggersi;
- il tipo di coinvolgimento delle persone (morte o ferite subite);
- la possibilità di morire anche successivamente alle attività di soccorso.

E' molto difficile stimare con precisione le conseguenze di un terremoto in termini di vite umane nei diversi momenti del giorno e dell'anno. Il numero di persone che risiedono in un'abitazione, infatti, varia da regione a regione, dalla città alla campagna e dipende dalle dimensioni del nucleo familiare. Inoltre, durante il giorno, il numero delle persone presenti in un edificio dipende dal suo utilizzo. Ad esempio, negli uffici, la presenza è massima nelle ore centrali del giorno ed è pressoché nulla durante la notte. In un'abitazione di città, invece, la presenza delle persone di sera e di notte è mediamente inferiore rispetto ad un'abitazione di campagna, perché esistono più attività, ludiche e lavorative, che si svolgono in quegli orari e spesso fuori casa. Il riferimento alla tipologia di edifici e ai relativi abitanti, comunque, può fornire una stima globale accettabile per terremoti violenti che interessino vaste aree.

Altro aspetto rilevante dell'esposizione è la presenza in Italia di un patrimonio culturale inestimabile, costituito dall'edificato corrente dei nostri centri storici, che ancora sfugge ad una quantificazione sistematica di consistenza e qualità. [7]

1.2.4 Metodo Cornell

È un metodo di valutazione della sismicità basato sulla localizzazione degli ipocentri, e si utilizza per calcolare la pericolosità sismica. Per utilizzarlo è necessario disporre di:

- un modello strutturale, che ricostruisce l'andamento delle strutture geologiche superficiali e profonde;
- una carta neotettonica, nella quale sono evidenziati i movimenti "recenti" della crosta terrestre (avvenuti negli ultimi milioni di anni);
- un catalogo dei terremoti, che consente di ricostruire la distribuzione spaziale e temporale degli eventi sismici;
- un modello di attenuazione, che consente di calcolare per ciascun sito l'entità dello scuotimento prodotto dai terremoti generati nelle aree circostanti.

Le fasi della valutazione della pericolosità sismica:

- (a) Individuazione delle zone sorgenti (zonazione sismogenetica). Conoscendo l'andamento delle strutture geologiche superficiali e profonde, i movimenti recenti, la distribuzione degli eventi sismici e la ricostruzione del tipo di movimento che ha dato origine al terremoto (meccanismi focali), è possibile individuare e delimitare delle aree omogenee dal punto di vista della sismicità (zone sismogenetiche). In tali aree sono definite le faglie maggiori (responsabili degli eventi di maggiore energia), le faglie minori (responsabili degli eventi

di minore energia) ed è definita la loro cinematica (ossia il tipo di movimento legato alla tettonica dell'area): compressiva (i blocchi si accavallano), distensiva (i blocchi si allontanano), con componenti di trascorrenza o trascorrente (il movimento dei blocchi è prevalentemente orizzontale).

- (b) Definizione di una legge di occorrenza per ciascuna zona. Per ogni zona sismogenetica vengono individuati gli eventi sismici del catalogo e viene determinata una relazione tra il numero di eventi e l'intensità (o magnitudo), nota come legge di occorrenza o legge di Gutenberg-Richter, dal nome degli studiosi che l'hanno formulata:

$$\log N(I) = a - bI \quad (1.1)$$

dove N è il numero di eventi, I l'intensità macrosismica, a e b delle costanti che dipendono dal territorio considerato. Generalmente la frequenza maggiore si ha per gli eventi di bassa magnitudo, per i quali il periodo di ritorno è breve. Tra una zona e l'altra può variare la pendenza della retta che esprime la relazione Gutenberg-Richter: la pendenza dipende, infatti, dal valore della costante b , che è caratteristica di ciascuna zona sismogenetica.

- (c) Definizione di una legge di attenuazione. Per il territorio considerato viene costruito un modello che rappresenta la variazione dell'intensità macrosismica (e quindi degli effetti che si osservano) con la distanza dall'epicentro. Generalmente gli effetti diminuiscono allontanandosi dall'area epicentrale; tuttavia, in presenza di particolari condizioni geologiche e morfologiche (condizioni locali) si possono avere fenomeni di amplificazione difficilmente rappresentabili attraverso un modello matematico. Ragionando a scala nazionale si stabilisce una relazione, valida per l'intero territorio, che meglio riproduce gli effetti realmente osservati in occasione di eventi sismici del passato.
- (d) Calcolo della pericolosità. Ogni zona viene assimilata ad una sorgente e per ciascun punto del territorio viene determinato il valore della pericolosità sommando il contributo della sismicità prodotta da ogni zona sismogenetica, tenendo conto della legge di attenuazione. I valori di pericolosità, associati a ciascun punto georeferenziato (cioè dotato di coordinate geografiche), si ottengono attraverso un programma automatico di calcolo che utilizza le informazioni descritte nei punti precedenti.
- (e) Realizzazione di una carta della pericolosità. Sulla base dei valori di pericolosità ottenuti utilizzando il programma di calcolo, si costruisce una carta della pericolosità sismica, che permette di individuare le zone dove, in un certo intervallo di tempo (convenzionalmente 50 anni), sono attesi i valori più elevati del parametro scelto per descriverla. I parametri utilizzati sono, generalmente: l'intensità macrosismica (I), l'accelerazione orizzontale di picco del terreno (PGA), la velocità orizzontale di picco del terreno (PGV), lo spostamento orizzontale di picco del terreno (PGD) o anche i corrispondenti spettri di risposta, parametri, questi ultimi, particolarmente utili alla definizione delle azioni sismiche ai fini della progettazione antisismica delle costruzioni. Nella mappa è rappresentato per tutti i comuni italiani il valore di accelerazione (PGA), che si verifica in media ogni 475 anni.

Le assunzioni, affinché il metodo sia valido, sono che i terremoti avvengano nel tempo in modo casuale e che la probabilità che si verifichino all'interno di una data area (zona sismogenetica) sia la stessa in ogni punto. I limiti del metodo di Cornell risiedono nei presupposti alla base dello stesso, ovvero: considerare i terremoti come eventi che avvengono in modo casuale; non tenere conto del tempo trascorso dall'ultimo evento (la probabilità che accada sarà maggiore quanto più tempo è trascorso); adottare un modello di attenuazione omogeneo e isotropo sul territorio (ovvero, non dipendente dalla morfologia del terreno e dalla direzione di propagazione delle onde). Inoltre la pericolosità è normalmente valutata rispetto a condizioni di sito ideale (roccia con superficie orizzontale) e quindi non si tiene conto delle condizioni locali, che possono modificare anche sensibilmente il livello dei danni. E' questo il futuro degli studi di pericolosità: integrare i dati relativi alla sismicità del territorio con le informazioni relative agli effetti locali, costruendo degli scenari di pericolosità il più possibile aderenti alla realtà [7].

1.3 Classificazione sismica

Per ridurre gli effetti del terremoto, l'azione dello Stato si è concentrata sulla classificazione del territorio, in base all'intensità e frequenza dei terremoti del passato, e sull'applicazione di speciali norme per le costruzioni nelle zone classificate sismiche. La legislazione antisismica italiana, allineata alle più moderne normative a livello internazionale prescrive norme tecniche in base alle quali un edificio debba sopportare senza gravi danni i terremoti meno forti e senza crollare i terremoti più forti, salvaguardando prima di tutto le vite umane.

Sino al 2003 il territorio nazionale era classificato in tre categorie sismiche a diversa severità. I Decreti Ministeriali emanati dal Ministero dei Lavori Pubblici tra il 1981 ed il 1984 avevano classificato complessivamente 2.965 comuni italiani su di un totale di 8.102, che corrispondono al 45% della superficie del territorio nazionale, nel quale risiede il 40% della popolazione. Nel 2003 sono stati emanati i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, basati sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, ossia sull'analisi della probabilità che il territorio venga interessato in un certo intervallo di tempo (generalmente 50 anni) da un evento che superi una determinata soglia di intensità o magnitudo. A tal fine è stata pubblicata l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003.

Il provvedimento detta i principi generali sulla base dei quali le Regioni, a cui lo Stato ha delegato l'adozione della classificazione sismica del territorio (Decreto Legislativo n. 112 del 1998 e Decreto del Presidente della Repubblica n. 380 del 2001 - "Testo Unico delle Norme per l'Edilizia"), hanno compilato l'elenco dei comuni con la relativa attribuzione ad una delle quattro zone, a pericolosità decrescente, nelle quali è stato riclassificato il territorio nazionale:

- **Zona 1** - È la zona più pericolosa. La probabilità che capiti un forte terremoto è alta.
- **Zona 2** - In questa zona forti terremoti sono possibili.

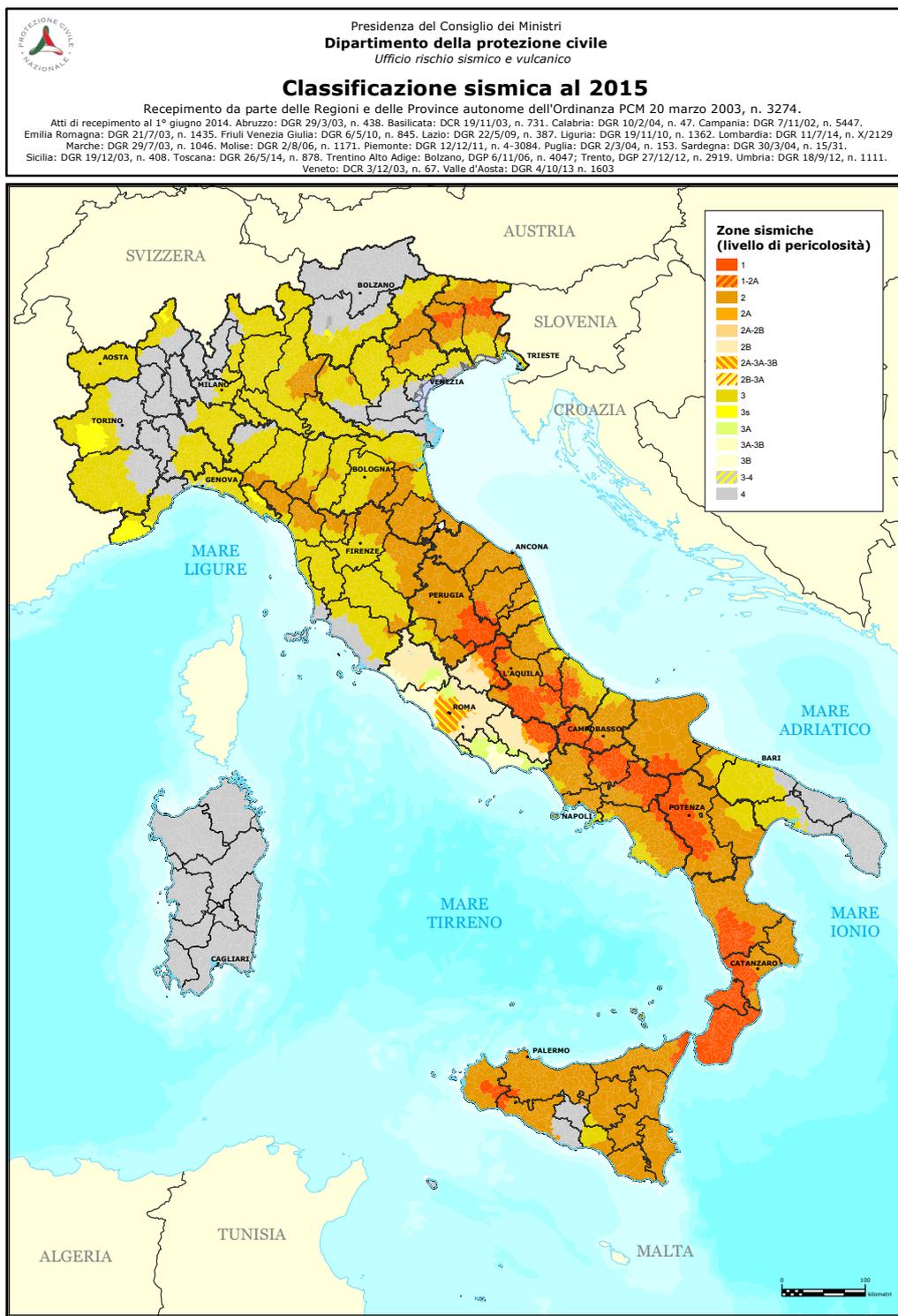


Figura 1.2: Classificazione sismica in Italia aggiornata all'anno 2015.

- **Zona 3** - In questa zona i forti terremoti sono meno probabili rispetto alla zona 1 e 2.

- **Zona 4** - È la zona meno pericolosa: la probabilità che capiti un terremoto è molto bassa.

Di fatto, sparisce il territorio “non classificato”, e viene introdotta la zona 4, nella quale è facoltà delle Regioni prescrivere l’obbligo della progettazione antisismica. A ciascuna zona, inoltre, viene attribuito un valore dell’azione sismica utile per la progettazione, espresso in termini di accelerazione massima su roccia (zona 1=0.35 g, zona 2=0.25 g, zona 3=0.15 g, zona 4=0.05 g). Nella *figura 1.2* si può vedere come il territorio italiano sia stato suddiviso nelle quattro zone appena descritte.

L’attuazione dell’ordinanza n.3274 del 2003 ha permesso di ridurre notevolmente la distanza fra la conoscenza scientifica consolidata e la sua traduzione in strumenti normativi e ha portato a progettare e realizzare costruzioni nuove, più sicure ed aperte all’uso di tecnologie innovative.

Le novità introdotte con l’ordinanza sono state pienamente recepite e ulteriormente affinate, grazie anche agli studi svolti dai centri di competenza (INGV, Reluis, Eucentre). Un aggiornamento dello studio di pericolosità di riferimento nazionale (Gruppo di Lavoro, 2004), previsto dall’Opcm 3274/03, è stato adottato con l’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006. Il nuovo studio di pericolosità, allegato all’Opcm n. 3519, ha fornito alle Regioni uno strumento aggiornato per la classificazione del proprio territorio, introducendo degli intervalli di accelerazione (a_g), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, da attribuire alle 4 zone sismiche.

In *tabella 1.1* viene mostrata la suddivisione delle zone sismiche in relazione all’accelerazione di picco su terreno rigido (OPCM 3519/06).

Tabella 1.1: Suddivisione zone sismiche rispetto l’accelerazione di picco a_g

Zona sismica	Intervallo di accelerazione
Zona 1	$a_g > 0,25$
Zona 2	$0,15 < a_g \leq 0,25$
Zona 3	$0,05 < a_g \leq 0,15$
Zona 4	$a_g \leq 0,05$

Nel rispetto degli indirizzi e criteri stabiliti a livello nazionale, alcune Regioni hanno classificato il territorio nelle quattro zone proposte, altre Regioni hanno classificato diversamente il proprio territorio, ad esempio adottando solo tre zone (zona 1, 2 e 3) e introducendo, in alcuni casi, delle sottozone per meglio adattare le norme alle caratteristiche di sismicità. Per il dettaglio e significato delle zonazioni di ciascuna Regione, si rimanda alle disposizioni normative regionali. Qualunque sia stata la scelta regionale, a ciascuna zona o sottozona è attribuito un valore di pericolosità di base, espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido (a_g). Tale valore di pericolosità di base non ha però influenza sulla progettazione.

Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008), infatti, hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva ai fini progettuali: per ciascuna zona – e quindi territorio comunale – precedentemente veniva fornito un valore di accelerazione di picco e quindi di spettro di

risposta elastico da utilizzare per il calcolo delle azioni sismiche. Dal 1 luglio 2009 con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, per ogni costruzione ci si deve riferire ad una accelerazione di riferimento "propria" individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini amministrativi comunali. La classificazione sismica (zona sismica di appartenenza del comune) rimane utile solo per la gestione della pianificazione e per il controllo del territorio da parte degli enti preposti (Regione, Genio civile, ecc.) [4].

1.4 Tamponature

La tamponatura o tamponamento è la parete portata di chiusura perimetrale di un fabbricato costruito con una struttura intelaiata tridimensionale (generalmente in acciaio o in calcestruzzo armato).

Pertanto la funzione portante è assicurata dal telaio strutturale e quella di separazione tra spazio interno e spazio esterno dalla tamponatura che va a riempire i riquadri dei telai esterni. La tamponatura ha come unica funzione statica quella di portare il proprio peso.

La tamponatura è una chiusura verticale esterna del tipo opaco. Nella categoria dei muri, in edilizia si differenzia dal tramezzo anch'esso non portante, ma che serve a separare due spazi interni e dal muro portante che oltre a svolgere le stesse funzioni della tamponatura, in particolare separazione e protezione igro-termica e acustica dello spazio interno, svolge anche funzioni statiche.

La tamponatura serve sostanzialmente a separare lo spazio architettonico esterno da quello interno, in un edificio retto da una struttura a telaio. Negli edifici per civile abitazione la tamponatura è di essenziale importanza per determinare la prestazione termica di un edificio, ovvero la sua capacità di contenere al suo interno il calore d'inverno e il fresco d'estate, o, più semplicemente, di limitare il più possibile lo scambio termico con l'esterno. Oggi è necessario rispettare delle leggi che impongono agli edifici un limite massimo ammissibile della prestazione termica: nel calcolo un ruolo molto importante lo ha proprio la tamponatura (negli edifici intelaiati in acciaio o cemento armato, che, comunque, sono di gran lunga i più diffusi) e, nel calcolo a norma di legge, si deve calcolare non solo lo spessore del muro, ma anche i diversi materiali utilizzati e il loro ordine preciso di sequenza. La tamponatura, al giorno d'oggi, può essere composta da molteplici materiali, grazie all'evoluzione delle tecniche edilizie che ci hanno portato moltissima innovazione. Fino a non molti anni fa la tamponatura pluristrato era essenzialmente composta da una doppia muratura di mattoni forati, quella esterna più spessa (circa 25 cm) e quella interna più snella (circa 8 cm), separati da un'intercapedine non ventilata d'aria di spessore pari a 4 cm, il tutto finito con intonaco interno ed esterno per uno spessore finale di 40 cm. La camera d'aria è sempre un validissimo strumento per rendere i muri di tamponatura estremamente efficaci contro lo scambio termico tra interno ed esterno, a patto che essi non superino i 5 cm di spessore, infatti al di sopra di tale spessore l'aria è in grado di produrre dei moti convettivi interni alla parete che facilitano lo scambio termico vanificando così la presenza stessa

dell'intercapedine e, anzi, sono deleteri anche per l'umidità, che così può essere trasmessa dal muro esterno al muro interno. Per migliorare la coibenza termica spesso, in sostituzione dell'intercapedine d'aria si dispone all'interno del tampono pluristrato, uno strato di materiale coibente, ad esempio lana di vetro o lana di roccia, di circa 4 cm. Attualmente il modo più semplice ed economico per realizzare tamponature è quella monostrato utilizzando blocchetti forati di laterizio alveolato o di calcestruzzo alveolato di ampio spessore, che, però, molto spesso non sono sufficienti a rispettare i severi canoni di legge. Non esiste, tuttavia, il modo migliore in assoluto di fare una tamponatura: molte ditte diverse propongono il loro sistema e ogni metodologia può essere più o meno valida. Il fattore di scelta è sempre il costo in relazione con la destinazione d'uso e in relazione al costo complessivo del fabbricato [17].

1.4.1 Classificazione delle tamponature

Le tamponature possono essere classificate in vari modi secondo il rapporto con la struttura oppure secondo la loro composizione (materiali, strati, ecc.), ma non esiste un vero e proprio codice di classificazione preciso o comunemente noto. Genericamente, in base agli strati di cui sono formate si hanno:

- **tamponature monostrato o a corpo unico:** formate da un unico blocco in laterizio o in calcestruzzo alveolare e da intonaco interno ed esterno;

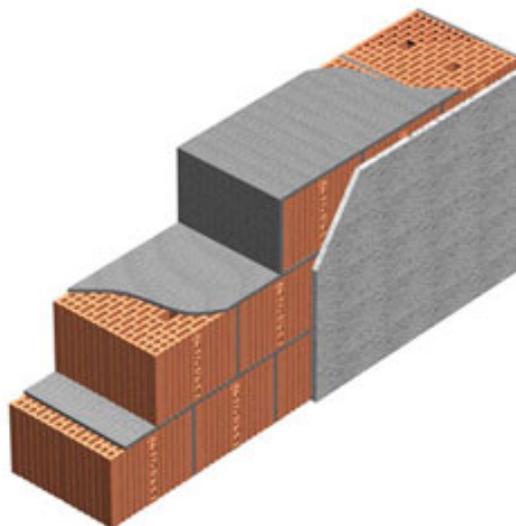


Figura 1.3: Esempio di tamponatura monostrato (Fonte: Consorzio POROTON)

- **tamponature pluristrato o a sandwich o a corpo multiplo:** Le pareti a corpo multiplo garantiscono il massimo bilanciamento delle qualità richieste alla parete stessa attraverso una più o meno spinta specializzazione delle funzioni che ogni singolo strato componente deve assolvere. Proprio per tale specializzazione alcuni strati assolvono principalmente la funzione meccanica, altri la coibenza termica (e presentano scarsa resistenza meccanica) altri infine sono inesistenti come materiali (lame d'aria). Gli schemi fondamentali di associazione sono: strato d'aria fra due strati resistenti (es. murature in blocchi

di laterizio o di calcestruzzo alveolare, forati e/o pieni); strato coibente (es. lana di vetro, lana di roccia) tra due strati resistenti; strato d'aria e strato coibente fra due strati resistenti. La parete viene poi finita con l'intonaco interno ed esterno, quest'ultimo solo nel caso in cui una delle due murature non sia a faccia vista. Nel caso in cui la parete sia oggetto di fenomeni di condensa interna, che determina tra l'altro una diminuzione del potere coibente e il danneggiamento del materiale isolante, si dispone anche uno strato interno impermeabile denominato barriera al vapore (membrana di materiale impermeabile come la carta bitumata, l'alluminio, ecc.) a protezione del coibente termico;

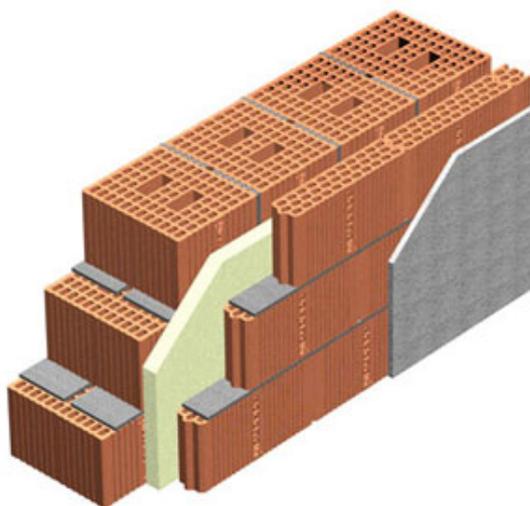


Figura 1.4: Esempio di tamponatura pluristrato (Fonte:Consorzio POROTON)

- **tamponature ventilate:** in essa avviene la microventilazione che ha l'obiettivo di garantire le stesse condizioni di costanza nel tempo impedendo la filtrazione dell'acqua mediante uno spessore tra le due pareti d'aria. Inoltre vengono creati dei fori nel mattone stesso eliminando lo spessore del giunto di malta tra i due marcapiani.

Nel caso in cui la classificazione viene fatta seguendo il rapporto della tamponatura con la struttura portante, si hanno:

- **tamponature interrotte:** quelle che chiudono "a filo" esterno della struttura;
- **tamponature passanti:** quelle che passano davanti al lato esterno delle strutture sia orizzontali che trasversali;
- **tamponature semipassanti:** (solo nel caso di murature pluristrato) nelle quali uno strato esterno passa davanti alla struttura mentre uno strato interno si poggia su questa e viene quindi interrotto [17].

1.4.2 Tipologie di tamponature in esame

In questo lavoro di tesi si sono considerate due tipologie di tamponatura, in *figura 1.5* è mostrata la tamponatura monostrato presa in considerazione composta dall'intonaco interno, dal blocco di laterizio di spessore pari a 30 cm e infine da uno strato di isolante termico esterno.

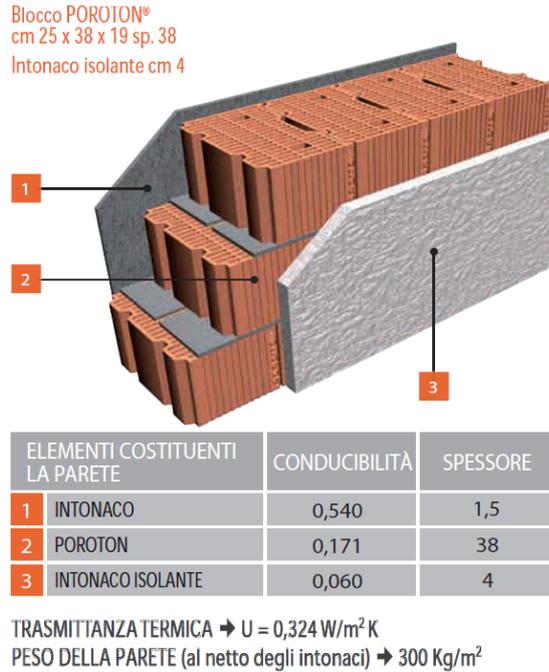
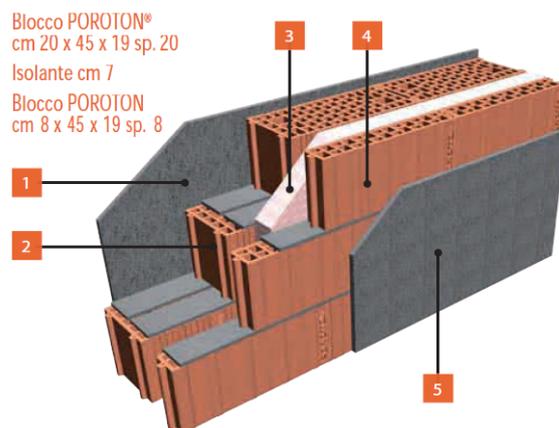


Figura 1.5: Tamponatura monostrato in esame (Fonte: Consorzio POROTON)

Come si può osservare dalla *figura 1.5* il peso della parete risulta essere pari a $W_{tamp,1} = 300 \text{ kg/m}^2$, questo valore nelle successive applicazioni e analisi viene trasformato nell'unità di misura: $\frac{N \cdot s^2}{m}$, tramite la seguente relazione che tiene conto anche del fatto che le strutture analizzate in questo lavoro hanno un'altezza di interpiano pari a $h_{interp} = 3,5 \text{ m}$ e inoltre la massa delle tamponature viene considerata al metro lineare pertanto la lunghezza è pari a 1 m:

$$M_{Tamp,1} = \frac{W_{tamp,1} \left[\frac{Kg}{m^2} \right] h_{interp} [m] 1 [m]}{g \left[\frac{m}{s^2} \right]} = \frac{300 \left[\frac{Kg}{m^2} \right] 3,5 [m] 1 [m]}{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} \approx 107 \left[\frac{N \cdot s^2}{m} \right] \quad (1.2)$$

La seconda tipologia di tamponatura presa in esame è una tamponatura pluristrato, mostrata in *figura 1.6*, composta dall'intonaco interno, da un primo strato di blocchi in laterizio di spessore pari a 20 cm, da uno strato di isolante, da un secondo strato di blocchi in laterizio aventi spessore di 7 cm e infine da uno strato di intonaco esterno.



ELEMENTI COSTITUENTI LA PARETE	CONDUCIBILITÀ	SPESSORE
1 INTONACO	0,540	1,5
2 POROTON	0,224	20
3 ISOLANTE	0,036	7
4 POROTON	0,216	8
5 INTONACO	0,930	1,5

TRASMITTANZA TERMICA → $U = 0,236 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

PESO DELLA PARETE (al netto degli intonaci) → 240 Kg/m^2

Figura 1.6: Tamponatura pluristrato in esame (Fonte: Consorzio POROTON)

Come si può notare il peso di questa seconda tipologia di tamponatura in esame è minore della precedente ed è pari a $W_{tamp,2} = 240 \text{ kg/m}^2$, pertanto considerando le stesse condizioni e ipotesi della precedente tipologia si è calcolata la massa in $\frac{N \cdot s^2}{m}$:

$$M_{Tamp,2} = \frac{W_{tamp,2} \left[\frac{Kg}{m^2} \right] h_{interp} [m] 1 [m]}{g \left[\frac{m}{s^2} \right]} = \frac{240 \left[\frac{Kg}{m^2} \right] 3,5 [m] 1 [m]}{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} \approx 86 \left[\frac{N \cdot s^2}{m} \right] \quad (1.3)$$

Capitolo 2

Metodologie di controllo sismico

Un problema sempre più di attualità è la protezione delle strutture durante gli eventi sismici, soprattutto in luoghi e nazioni ad elevato rischio sismico tra le quali vi è l'Italia. Pertanto la ricerca in questo settore è sempre molto attiva soprattutto nel trovare nuove tecniche innovative che possano migliorare le attuali tecniche conosciute e consolidate. Nell'ultimo decennio la ricerca di strategie "non convenzionali" di protezione sismica ha fatto registrare straordinari avanzamenti. E' possibile riconoscere che gran parte dei diversi approcci innovativi proposti, presenta una comune linea di pensiero che si potrebbe definire del "controllo delle vibrazioni" in quanto la sua filosofia consiste principalmente nell'intento di regolare "artificialmente", e cioè con organi non propriamente strutturali, la risposta dinamica delle costruzioni al fine di ridurre le vibrazioni indotte dal vento o dal sisma. Il vasto filone del controllo delle vibrazioni contiene quattro approcci distinti:

- **controllo attivo;**
- **controllo passivo;**
- **controllo ibrido;**
- **controllo semi-attivo.**

L'isolamento sismico, la dissipazione supplementare di energia e lo smorzamento di massa rappresentano i fondamentali sistemi passivi. Il controllo attivo consiste in dispositivi collegati elettricamente e/o meccanicamente alla struttura che si attivano nel momento in cui si verifica un determinato evento sismico che supera un certo valore di soglia preimpostato nel dispositivo. Tali dispositivi una volta attivati impongono sulla struttura delle forze dinamiche contrarie a quelle applicate dal sisma in modo tale da ridurre il più possibile i danni strutturali. Il controllo ibrido è una combinazione tra il controllo attivo e il controllo passivo, per esempio l'applicazione di un sistema di regolazione attivo ad un sistema già dotato di controllo passivo da luogo al cosiddetto controllo ibrido con il vantaggio che, a parità di prestazioni, forze ed energie di regolazione sono generalmente più ridotte di quelle necessarie alla regolazione di un sistema privo di controllo passivo. Più

recentemente è stata introdotta la strategia del controllo semi-attivo che consiste nel regolare i parametri principali del sistema in tempo reale senza introdurre nel sistema ulteriori aliquote di energia di controllo.[12]

Il controllo passivo si basa su due concetti principali che sono:

- l'isolamento sismico;
- la dissipazione dell'energia.

In particolare i dispositivi che si basano sul concetto di isolamento sismico vengono detti isolatori e in genere si dispongono alla base della struttura, mentre i dispositivi che si basano sul concetto di dissipazione dell'energia sismica vengono detti dissipatori e in genere sono dispositivi che vengono applicati ai vari piani della struttura in esame.

Da un punto di vista energetico la differenza tra gli isolatori e i dissipatori è notevole per il fatto che vanno a ridurre in modo differente l'energia trasmessa dal sisma, E_{sisma} , che si può scrivere come:

$$E_{sisma} = E_C + E_E + E_D \quad (2.1)$$

dove:

- E_C è l'energia cinetica;
- E_E è l'energia di deformazione elastica;
- E_D è l'energia dissipata dalla struttura.

La differenza risiede nel fatto che gli isolatori all'interno di una struttura cercano di ridurre l'energia trasmessa dal sisma alla struttura, quindi riducono E_{sisma} , mentre i dissipatori lavorano sulla parte dell'energia che viene dissipata dalla struttura ovvero E_D . In particolare i dissipatori assorbono la gran parte di E_D in modo tale da ridurre l'energia dissipata dalla struttura:

$$E_D = E_{Dd} + E_{Ds} \quad (2.2)$$

dove:

- E_{Dd} è l'energia assorbita dai dissipatori;
- E_{Ds} è l'energia rimanente dissipata dalla struttura.

l'obiettivo è di ridurre al minimo E_{Ds} che è l'energia responsabile del danno strutturale.

2.1 Isolamento sismico

La tecnica dell'isolamento sismico consiste principalmente nel ridurre la trasmissione del moto del suolo alla struttura in elevazione mediante l'interposizione, tra le fondazioni e la sovrastruttura, di speciali dispositivi di vincolo, detti isolatori. Da un punto di vista fisico in un sistema fisso alla base l'eccitazione è direttamente

applicata alla struttura mentre nei sistemi isolati alla base l'azione è filtrata dal livello isolante che agisce come controllore regolando la trasmissione dell'eccitazione alla sovrastruttura. Gli obiettivi del controllo sono essenzialmente quelli di modulare allo stesso istante le accelerazioni assolute e gli spostamenti relativi. Il controllo delle accelerazioni assolute riduce gli effetti sismici sugli oggetti contenuti nella costruzione mentre la minimizzazione degli spostamenti relativi riduce i danni alla costruzione stessa. L'obiettivo principale dell'isolamento sismico alla base consiste, allora, nella massima riduzione della risposta sismica della sovrastruttura col vincolo di limitare lo spostamento relativo tra suolo e piano di isolamento. La condizione di vincolo deriva dalla necessità di contenere l'impegno deformativo negli organi di isolamento nei limiti ammissibili.[12]

Il funzionamento dell'isolamento sismico può essere attribuito a due effetti fra loro distinti:

- **azione filtrante** delle armoniche con frequenza contenuta nel campo dove gli eventi sismici attesi possiedono il maggior contenuto di energia;
- **azione di dislocazione** della deformabilità tagliante all'esterno della sovrastruttura negli organi di isolamento.

Il problema centrale della risposta sismica dei sistemi isolati è dato dal fatto che l'azione filtrante è applicata ad un segnale di natura aleatoria in quanto aleatorio è il contenuto in frequenza dell'energia dell'eccitazione sismica attesa. Poiché le eccitazioni sismiche sono generalmente caratterizzate da forte aleatorietà, un isolamento sismico alquanto spinto, in presenza di eccitazioni con componenti prevalenti a bassa frequenza, può comportare il rischio di raggiungere i limiti di collasso dei dispositivi di appoggio.

L'azione di dislocazione della deformabilità tagliante è invece legata alle caratteristiche dell'accoppiamento dinamico tra struttura in elevazione ed isolatori. Si intuisce che, se le caratteristiche del moto sismico dovessero essere sfavorevoli per il sistema isolato, ne deriverebbe per gli organi di isolamento l'insidia di una gravosa deformazione tagliante.[12]

2.2 Caratteristiche degli isolatori

Come descritto in [1] vengono oggi riconosciuti quattro obiettivi da perseguire con un sistema di isolamento:

1. Proteggere tutta o parte della costruzione, mantenendo la risposta strutturale in campo elastico;
2. Spostare il periodo principale di vibrazione a valori convenienti in termini di domanda di accelerazione e di spostamento;
3. Incrementare la capacità dissipativa, riducendo conseguentemente la domanda di spostamento;
4. Regolarizzare la risposta, correggendo la rigidità e la resistenza di parti della struttura.

Agli obiettivi brevemente elencati, vengono normalmente associati alcuni parametri che caratterizzano l'effettivo utilizzo e le prestazioni di ciascun apparecchio di isolamento come descritto in [1], quali ad esempio:

- (a) **Capacità di sostenere i carichi verticali.** In alcuni casi il carico verticale applicabile dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato e determina le dimensioni planimetriche necessarie. Nel caso degli isolatori a scorrimento, le dimensioni delle superfici a contatto possono invece influenzare il valore dell'attrito, che tende a diminuire al crescere della pressione e quindi per superfici di contatto inferiori. Talvolta questa proprietà è stata utilizzata per correggere il valore del coefficiente di attrito.
- (b) **Capacità di spostamento (Δ_m).** Nel caso degli isolatori a scorrimento la capacità di spostamento condiziona fortemente le capacità dissipative (lo smorzamento equivalente diminuisce all'aumentare della forza corrispondente allo spostamento massimo rispetto a quella che innesca il movimento: $V_i = W\mu$) e la tendenza al ri-centramento (che varia in modo opposto).
- (c) **Taglio (V_m) corrispondente al massimo spostamento (Δ_m).** È il parametro fondamentale al fine di applicare principi di gerarchia delle resistenze e proteggere gli elementi della struttura isolata. Nel caso degli isolatori a scorrimento può essere appropriato considerare un valore più alto, influenzato dall'attrito di primo distacco nel momento in cui riparte il movimento dopo una serie di cicli con accelerazione inferiore a quella necessaria a superare la forza di attrito, ovvero al momento del cambio di segno della velocità.
- (d) **Rigidezza secante (K_e).** Si tratta del parametro che influenza direttamente il periodo di vibrazione equivalente e conseguentemente la corrispondenza tra spostamento e taglio per diversi livelli di prestazione. Vanno quindi considerati più valori di rigidezza secante, il più basso dei quali, corrispondente al più alto valore di periodo di vibrazione equivalente, coincide con la capacità di spostamento del sistema. In un contesto di progetto agli spostamenti, la rigidezza di progetto risulta dal periodo corrispondente allo spostamento di progetto nello spettro in spostamento del moto al terreno per la prestazione considerata. In realtà, la definizione di un periodo di vibrazione di un isolatore a scorrimento appare piuttosto inusuale. Infatti in tutti i cicli con ampiezza insufficiente per indurre il moto relativo il periodo dell'isolatore è teoricamente infinito, mentre quando il moto si innesta il periodo corrispondente alla rigidezza tangente è molto basso e corrisponde a quello di un pendolo con pari raggio di curvatura. L'unica ragione per definire una rigidezza ed un periodo secante corrispondenti ad una certa prestazione dipende dall'efficacia di un approccio agli spostamenti per la progettazione del sistema di isolamento.
- (e) **Smorzamento equivalente.** Si tratta del parametro più conciso per esprimere la capacità di dissipazione energetica del dispositivo, che si traduce in una riduzione della domanda di spostamento. In un contesto di progettazione agli spostamenti si fa riferimento ad una formulazione derivata dalla proposta descritta in [9] basata sull'equivalenza dell'energia dissipata nei cicli

forza–spostamento con quella di una ipotetica risposta lineare con smorzamento viscoso proporzionale alla velocità. La formulazione risultante è del tipo seguente (dove ξ_h è lo smorzamento viscoso equivalente al ciclo isteretico, A_h l'area contenuta nel ciclo tipico, V_m e Δ_m i valori massimi di forza e spostamento all'estremità del ciclo):

$$\xi_h = \frac{A_h}{2\pi V_m \Delta_m} \quad (2.3)$$

Tale formulazione risulta più comprensibile in riferimento alla *figura 2.1*.

- (f) **Capacità di ri-centramento.** Nella progettazione e valutazione di strutture non isolate, lo spostamento residuo è giustamente considerato un parametro fondamentale per la stima del danno e degli eventuali provvedimenti da adottare per interventi di riparazione e di adeguamento. Il concetto è stato ovviamente esteso, forse in modo meno motivato, al caso dell'isolamento, privilegiando sistemi che fossero in grado di ridurre lo spostamento residuo. In realtà, il concetto appare meno fondato, poiché si suppone che successivamente ad un evento sismico rilevante si proceda comunque al riposizionamento della struttura per mezzo di un appropriato sistema di martinetti, da prevedere in sede di progettazione. In generale, escludendo forme particolari dei cicli di isteresi, di cui si discuterà più avanti, si ha una maggiore tendenza al ri-centramento per cicli di isteresi meno ampi, che comportano minore dissipazione energetica e conseguentemente spostamenti massimi maggiori. In altre parole, si scambia una possibile riduzione dello spostamento residuo con un incremento della capacità di spostamento richiesta all'isolatore. Occorre peraltro notare che una forte tendenza al ri-centramento può essere ottenuta dalla casualità del segno dei cicli del moto: se ad un certo valore di spostamento occorre una maggiore accelerazione per aumentare lo spostamento ed una minore accelerazione per indurre un moto verso l'origine, la sequenza dei cicli di carico tenderà sempre a ridurre lo spostamento.
- (g) **Comportamento ad alta domanda di spostamento.** Un problema ricorrente nella progettazione di un isolatore riguarda il suo comportamento in merito al raggiungimento della capacità di spostamento del sistema. Ovviamente, se il sistema è provvisto di un fermo, il taglio alla base cresce improvvisamente e la struttura superiore, non più protetta può danneggiarsi e crollare. Possono in realtà verificarsi altri casi:
- la struttura ha riserve di capacità di spostamento e si danneggia in modo limitato;
 - gli isolatori non hanno fermo e sono in grado di assorbire ulteriore spostamenti senza danni immediati (è il caso ad esempio di un isolatore in gomma che eccede il limite imposto di deformazione a taglio, o di un isolatore a scorrimento il cui dispositivo sferico scorrevole esce in modo limitato dalla sede);
 - la forma del ciclo dell'isolatore presenta un incrudimento in prossimità del massimo spostamento, per cui si ha una progressiva crescita del taglio, ma una riduzione della possibilità di movimento relativo all'isolatore.

(h) **Effetti di variazioni del carico verticale, della temperatura, invecchiamento ecc.** È evidente che una ulteriore lunga serie di parametri devono essere presi in considerazione, alcuni dei quali molto importanti ai fini della risposta reale. Nel caso di isolatori a scorrimento appare particolarmente importante considerare:

- l'influenza della variazione del carico verticale sul coefficiente di attrito (talvolta la superficie di contatto viene aumentata non per problemi di azioni verticali, ma per ridurre la sollecitazione e conseguentemente ottenere un incremento del coefficiente di attrito – si noti comunque che la variazione dell'azione assiale ha effetti sulla risposta anche quando il coefficiente di attrito non varia);
- l'effetto dell'incremento della temperatura del materiale di scorrimento, risultante dalla necessità di disperdere l'energia prodotta dal taglio di scorrimento moltiplicato per la distanza che viene percorsa. Nel passato, l'uso di materiali particolarmente sensibili alla temperatura ha indotto ad aumentare la superficie di contatto, peraltro in tal modo inducendo anche un incremento del coefficiente di attrito.

Alcuni dei parametri discussi e dei loro effetti sui cicli forza–spostamento, sono illustrati in *figura 2.1*, dove sono riportate le tipiche curve di due isolatori ad attrito su superficie curva.

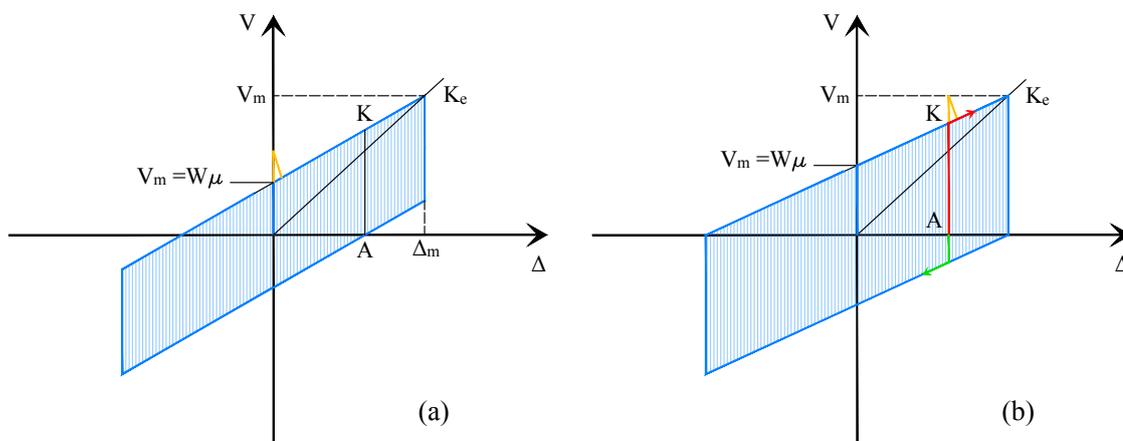


Figura 2.1: Esempi di cicli forza–spostamento per isolatori a scorrimento su superficie curva.

Nella *figura 2.1a* il coefficiente di attrito è più basso ed il raggio di curvatura della superficie di scorrimento più alto. Ciò corrisponde a cicli in cui il valore del taglio che induce scorrimento è pari ad un terzo del valore del taglio corrispondente allo spostamento massimo. Inoltre spostamenti residui più grandi di quello corrispondente al punto A non sono possibili, poiché l'isolatore tornerebbe al punto A per il solo effetto del carico verticale applicato. Nella *figura 2.1b* il valore del taglio che induce scorrimento è pari ad un mezzo del valore del taglio corrispondente allo spostamento massimo di conseguenza l'area del ciclo è più grande. In questo

caso però si può notare che se l'isolatore si trova nel punto A per incrementare lo spostamento è necessaria una forza tre volte più grande di quella che, cambiata di segno, indurrebbe uno spostamento verso l'origine. Ciò comporta un effetto di ri-centramento connesso alla casualità del segno dei cicli successivi.

2.3 Isolatore FPS

Il sistema FPS è l'acronimo inglese per Friction Pendulum System, ovvero sistema di isolamento a scorrimento a pendolo. Essi sono costituiti generalmente da superfici curve sferiche a basso coefficiente di attrito sulle quali è libero di scorrere un dispositivo sferico, in grado di dissipare energia durante l'evento sismico, tale dispositivo inoltre deve essere in grado di supportare l'intero peso degli elementi strutturali sovrastanti. Queste superfici curve, che scorrono l'una sull'altra e da cui scaturisce una forza di attrito, limitano l'azione laterale trasmessa dal moto sismico alla sovrastruttura, inoltre hanno una funzione ricentrante, la quale consente di far tornare in posizione il dispositivo dopo un evento sismico. Così facendo il sistema consente di ottenere una dilatazione del periodo naturale della struttura lontano dalle frequenze predominanti del sisma attraverso il moto pendolare, e permette di dissipare l'energia sismica in ingresso attraverso il comportamento attritivo delle superfici di scorrimento. Nelle *figure 2.2 e 2.3* si possono vedere le raffigurazioni di tale sistema sia tramite un'immagine tridimensionale che in sezione.

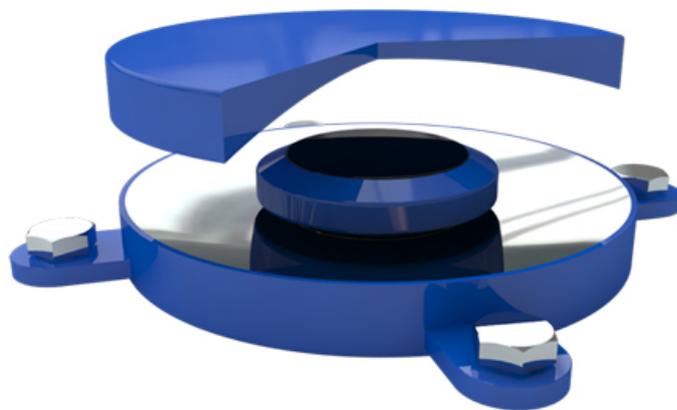


Figura 2.2: Esempio di isolatore FPS a singola faccia di scorrimento in 3D

Vi sono varie tipologie di dispositivi in commercio ma essenzialmente si suddividono in:

1. Sistemi FPS a singola faccia di scorrimento;
2. Sistemi FPS a doppia faccia di scorrimento;
3. Sistemi FPS a tripla faccia di scorrimento;

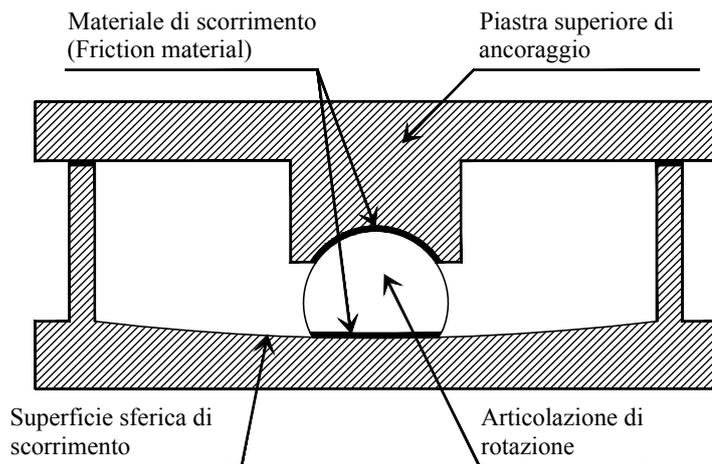


Figura 2.3: Esempio di isolatore FPS a singola faccia di scorrimento in sezione

Il materiale utilizzato per la realizzazione di tali dispositivi è in genere l'acciaio inox mentre le superfici di scorrimento sono generalmente costituite dal teflon che fornisce la capacità di attrito al sistema, la quale è in grado di dissipare l'energia addizionale trasmessa dal sisma. Inoltre questo materiale è caratterizzato da un basso coefficiente d'attrito e una marcata insensibilità alle variazioni di temperatura, in modo tale da preservare le sue funzioni anche in luoghi con alti sbalzi termici [6].

Tale dispositivo negli ultimi trent'anni ha avuto svariate applicazioni in diversi ambiti tra cui applicazioni nell'industria aerospaziale e militare, sistema di isolamento di ponti, sistemi di attuazione, equipaggiamento per gru e così via.

2.3.1 Proprietà dell'isolatore FPS

Come per tutti i sistemi di isolamento sismico l'intenzione dell'isolamento è sostanzialmente quella di ridurre la forza sismica agente sulla struttura in esame introducendo capacità elastica e di assorbimento dell'energia. Gli isolatori FPS producono questi effetti ma hanno anche altre proprietà uniche che sono:

- (a) Periodo di vibrazione è indipendente dalla massa supportata.
- (b) La loro forza laterale è direttamente proporzionale al peso che supportano e, in questo modo, la forza del sistema di isolamento si sviluppa sempre verso il centro di massa della struttura supportata. Questa proprietà minimizza i moti torsionali.
- (c) Forniscono rigidità rispetto ai carichi dovuti al vento e a piccoli eventi sismici. Questo è possibile grazie all'attrito presente all'interno del dispositivo che non permette il moto finché non si supera il limite statico d'attrito.
- (d) Hanno un'alta capacità e stabilità di carico verticale. Grazie alla loro particolare costruzione non esibiscono effetti del secondo ordine ($P-\Delta$) per grossi spostamenti. Inoltre il cilindro chiuso dell'isolatore fornisce un vincolo allo

spostamento laterale, superato il quale si ha la rottura o il malfunzionamento dell'isolatore.

- (e) La loro capacità di flessibilità-elasticità non è interconnessa con la capacità di assorbimento dell'energia. La prima è completamente controllata dalla geometria del dispositivo, in particolare dal raggio R di curvatura, mentre la seconda è controllata dal coefficiente d'attrito dell'interfaccia di scorrimento. Questa proprietà permette l'ottimizzazione nel progetto e nella realizzazione di tali dispositivi (Optimum Design)[6].

2.3.2 Modello matematico isolatore FPS

Il principio base del comportamento di un sistema FPS è raffigurato nelle *figure 2.4 e 2.5* nelle quali si può notare che il moto di una struttura, supportata da tali dispositivi, è identico al moto di un pendolo con l'aggiunta dell'effetto benefico dell'attrito dovuto alle facce di scorrimento del dispositivo.

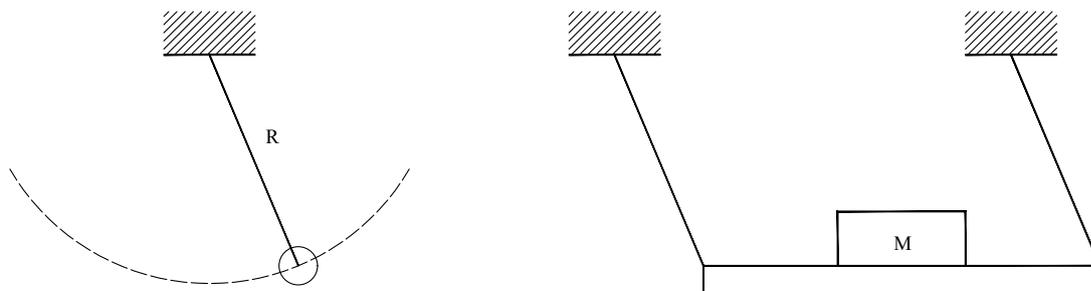


Figura 2.4: Moto del pendolo

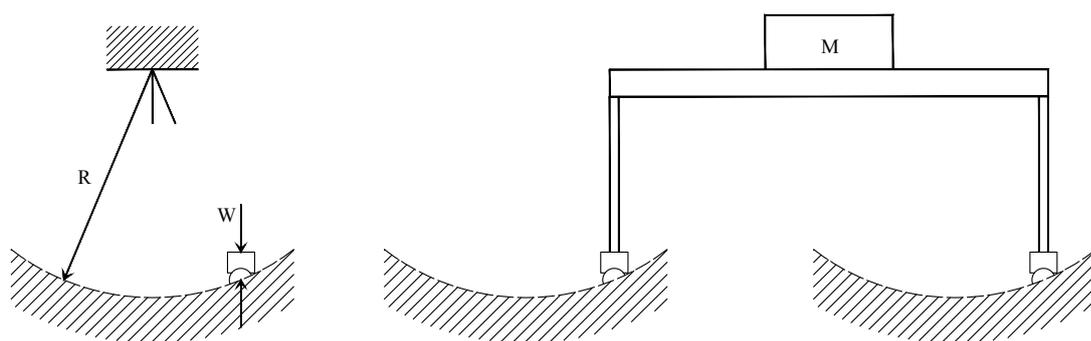


Figura 2.5: Moto di una struttura appoggiata su dispositivi FPS

La forza necessaria per produrre spostamento in un dispositivo FPS consiste in una combinazione tra la forza di ri-centramento, che aumenta man mano che ci si sposta dal centro del dispositivo, e la forza di attrito che proviene dalle superfici di scorrimento. La relazione tra forze e spostamenti si basa sul modello descritto

nella *figura 2.6* dove il dispositivo FPS è considerato nella sua posizione deformata sotto l'azione della forza laterale F .

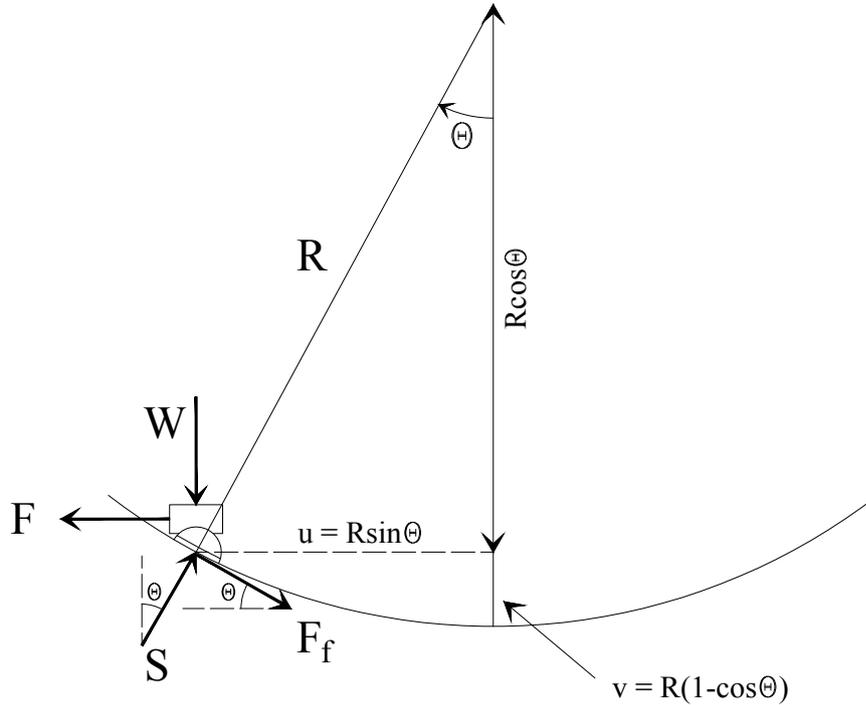


Figura 2.6: Modello sistema FPS

Le componenti verticali e orizzontali degli spostamenti sono date dalle seguenti formule :

$$u = R \sin \Theta \quad (2.4)$$

$$v = R(1 - \cos \Theta) \quad (2.5)$$

dove R è il raggio di curvatura della superficie sferica di scorrimento del dispositivo. Dalle equazioni di equilibrio in direzione sia verticale che orizzontale si ottengono le seguenti equazioni:

$$W - S \cos \Theta + F_f \sin \Theta = 0 \quad (2.6)$$

$$F - S \sin \Theta - F_f \cos \Theta = 0 \quad (2.7)$$

dove W è il peso proprio supportato dal dispositivo e F_f è la forza di attrito della superficie di scorrimento sferica. La soluzione delle equazioni 2.6 e 2.7 risulta essere:

$$F = W \tan \Theta + \frac{F_f}{\cos \Theta} \quad (2.8)$$

Il termine $W \tan \Theta$ rappresenta la forma generale della forza di ripristino, mentre il termine $\frac{F_f}{\cos \Theta}$ rappresenta il contributo della forza d'attrito.

La rigidezza del dispositivo FPS è rappresentata dal rapporto tra la forza di ripristino F e lo spostamento u :

$$K = \frac{F}{u} = \frac{W}{R \cos \Theta} \quad (2.9)$$

Pertanto la forza necessaria per avere uno spostamento u in direzione orizzontale sotto la condizione generale di angolo Θ non piccolo, è data da:

$$F = \frac{W}{R \cos \Theta} u + \frac{F_f}{\cos \Theta} \quad (2.10)$$

Per piccoli valori dell'angolo Θ , $\cos \Theta \approx 1$, quindi le equazioni 2.9 e 2.10 diventano rispettivamente:

$$K = \frac{W}{R} \quad (2.11)$$

$$F = \frac{W}{R} u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (2.12)$$

nelle quali la forza di attrito F_f è stata sostituita dal prodotto tra il coefficiente di attrito μ e il peso proprio W . Inoltre \dot{u} rappresenta la componente orizzontale della velocità. Quest'ultime equazioni (2.11, 2.12) sono valide per qualsiasi scopo pratico. Gli isolatori FPS sono tipicamente progettati per spostamenti $u < 0,2R$, pertanto l'errore dovuto alla linearizzazione delle equazioni 2.9 e 2.10 è trascurabile. Tornando ora all'equazione 2.11 il periodo di oscillazione libera del sistema FPS si può ricavare tramite l'equazione:

$$T = 2\pi \left(\frac{W}{Kg} \right)^{1/2} = 2\pi \left(\frac{R}{g} \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Come possiamo notare il periodo è indipendente dalla massa della struttura ma dipende soltanto dalla sua geometria, quindi il periodo non cambia se il peso della struttura dovesse cambiare.

Inoltre l'equazione 2.12 dimostra che la forza laterale F risulta essere direttamente proporzionale al peso supportato W , pertanto come risultato di questa significativa proprietà, il centro di rigidità laterale nei sistemi FPS coincide con il centro delle masse della struttura. Questa proprietà rende gli isolatori FPS particolarmente efficaci nel minimizzare moti torsionali avversi in strutture asimmetriche [6].

Capitolo 3

Dinamica dei sistemi SDOF e MDOF

3.1 Sistema SDOF

L'acronimo SDOF (Single-Degree-of-Freedom), indica un sistema oscillante a singolo grado di libertà e consiste in una massa m , in un telaio privo di massa ma che fornisce rigidità al sistema e infine in uno smorzatore viscoso in grado di dissipare l'energia delle vibrazioni. Tale sistema può essere considerato come un'idealizzazione di una struttura a un piano, dove ogni elemento strutturale (travi, colonne, muri, etc...) contribuisce alla massa inerziale m , alla rigidità elastica e alla capacità di dissipazione e smorzamento della struttura. Nel sistema idealizzato queste proprietà vengono concentrate in tre elementi singoli diversi: componente di massa, componente di rigidità e componente dello smorzamento.

Il numero di spostamenti indipendenti, necessari per definire la posizione spostata di tutte le masse relative al sistema rispetto alla loro posizione d'origine, stabilisce il numero di gradi di libertà (*Degree-of-Freedom*) per l'analisi dinamica.

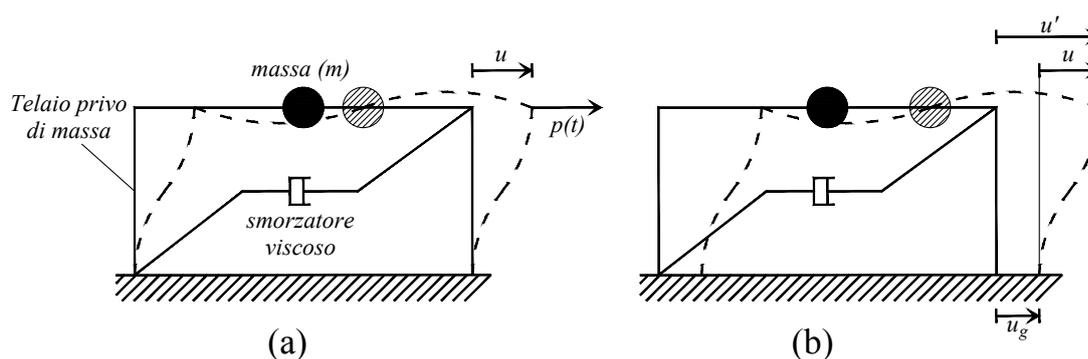


Figura 3.1: Sistema SDOF: a) forza applicata, b) moto indotto da un sisma.

Considerando la *figura 3.1* la struttura rappresentata è costretta a muoversi solo nella direzione dell'eccitazione $p(t)$, pertanto il problema statico risulta a tre gradi di libertà che sono: lo spostamento laterale e le due rotazioni ai giunti, in questo modo si riesce a determinare la rigidità del sistema. Al contrario la struttura ha

un solo grado di libertà per quanto riguarda l'analisi dinamica ed è rappresentato dallo spostamento laterale. Questo è possibile solo se il modello di riferimento considerato è quello in *figura 3.1* dove la massa è concentrata sul piano. Per questo motivo tale sistema viene chiamato *Single-Degree-of-Freedom*. [3]

Considerando m come massa totale del sistema, k come la rigidezza totale del sistema e c come il coefficiente di smorzamento viscoso dello smorzatore, allora l'equazione del moto che governa il sistema si può scrivere come:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \quad (3.1)$$

Questa equazione governa il moto della struttura idealizzata assumendo come ipotesi che sia in campo elastico lineare e soggetta a una forza esterna dinamica $p(t)$. Nel caso in cui non fosse più in campo elastico lineare ma in campo inelastico l'equazione diventerebbe:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = p(t) \quad (3.2)$$

dove $f_s(u, \dot{u})$ è la forza resistente inelastica.

Abbiamo introdotto il sistema SDOF idealizzandolo come una struttura a un piano ma in verità il classico sistema SDOF, che risulta del tutto identico al sistema di *figura 3.1*, è un sistema Massa-Molla-Smorzatore rappresentato di seguito:

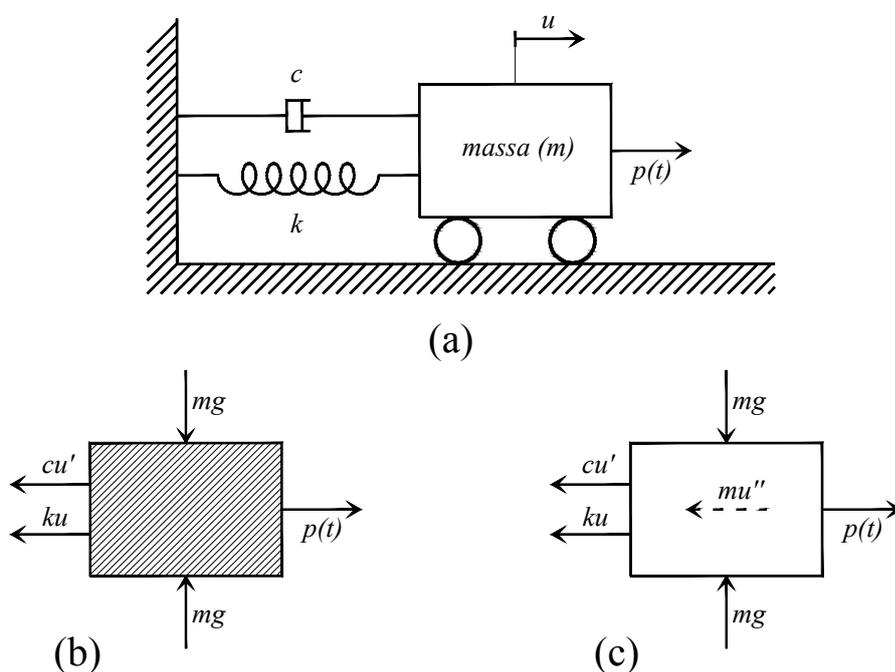


Figura 3.2: Sistema Massa-Molla-Smorzatore

Tale sistema, essendo equivalente al modello idealizzato precedentemente, è governato dalle stesse equazioni del moto viste in precedenza, ovvero *le equazioni 3.1, 3.2*.

3.2 Equazione del moto: eccitazione sismica

Nelle regioni sismiche il principale problema per la dinamica delle strutture è capire il comportamento della struttura sotto l'effetto dinamico indotto dal sisma, che agisce alla base della struttura. Lo spostamento alla base è indicato con u_g , lo spostamento totale o assoluto della massa m è indicato con u' mentre lo spostamento relativo tra la massa e la base è indicato con u . In riferimento alla *figura 3.1b*, ad ogni istante di tempo questi spostamenti sono in relazione tramite la seguente equazione:

$$u'(t) = u(t) + u_g(t) \quad (3.3)$$

pertanto l'equazione del moto per i sistemi elastici diventa:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (3.4)$$

mentre per i sistemi inelastici:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g \quad (3.5)$$

Mettendo in relazione le equazioni 3.1 e 3.2 con le equazioni 3.4 e 3.5 si può notare come le equazioni del moto sono praticamente le stesse, quindi lo spostamento relativo $u(t)$ della struttura dovuto all'accelerazione del suolo $\ddot{u}_g(t)$ sarà identico allo spostamento $u(t)$ della struttura se la sua base risulta stazionaria e se la forza esterna è pari a $-m\ddot{u}_g$ (*figura 3.3*). Quindi la forza effettiva del sisma può essere scritta come:

$$p_{eff}(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.6)$$

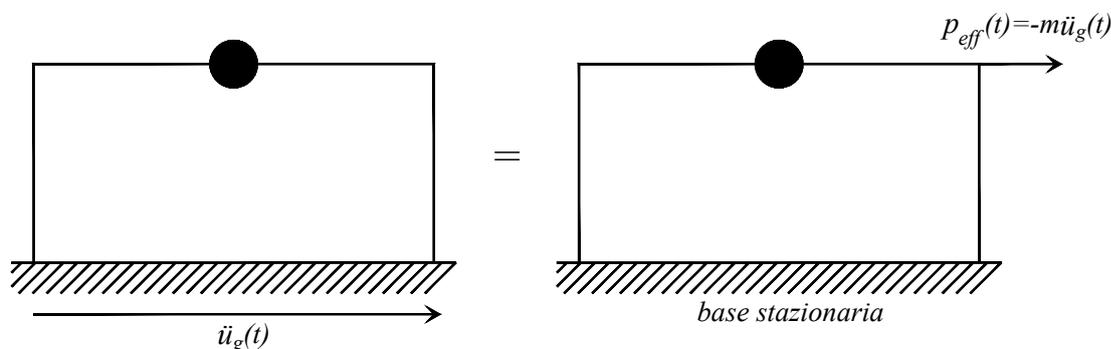


Figura 3.3: Forza sismica effettiva

3.3 Sistema MDOF

Con l'acronimo MDOF, si intende un sistema a più gradi di libertà cioè un *Multiple-Degree-of-Freedom system*, tali sistemi sono la sovrapposizione di tanti sistemi SDOF, infatti, un tipico esempio di sistema MDOF può essere una struttura multipiano dove ogni piano è un piccolo sistema SDOF ovviamente interagente con l'intera struttura. Il sistema MDOF più semplice possibile è quello rappresentato in *figura 3.4*, cioè un telaio a due piani soggetto alle forze esterne $p_1(t)$ e $p_2(t)$.

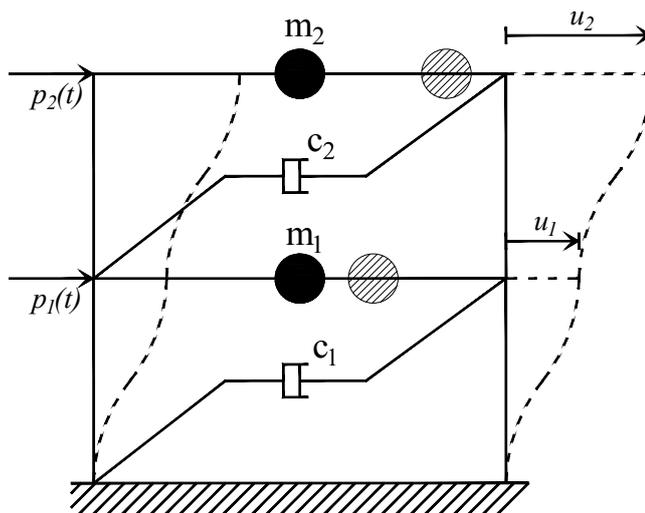


Figura 3.4: Telaio a due piani.

In questa idealizzazione le travi e i piani vengono considerati infinitamente rigidi per quanto riguarda la flessione, inoltre numerosi altri fattori vengono trascurati tra cui: la deformazione assiale di travi e colonne e l'effetto dello sforzo assiale sulle rigidezza delle colonne. Sebbene questa idealizzazione può sembrare poco realistica è molto utile per illustrare l'equazione del moto di un sistema MDOF pertanto, utilizzando di nuovo la seconda legge di Newton, possiamo scrivere:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

che in forma compatta può essere riscritta nel modo seguente:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}\} + [\mathbf{K}]\{u\} = \{P(t)\} \quad (3.8)$$

dove con $[\mathbf{M}]$ si definisce la matrice delle masse, con $[\mathbf{C}]$ la matrice di smorzamento e con $[\mathbf{K}]$ la matrice di rigidezza del sistema.

Tale modello come già mostrato in precedenza può essere associato al più classico modello Massa-Molla-Smorzatore solamente che stavolta si modifica come mostrato in *figura 3.5*.

3.4 Modello MDOF multipiano o telaio Shear-type

Vediamo ora un modello che si è utilizzato nel nostro studio, si tratta di un modello MDOF nominato telaio Shear-type ed è un modello di telaio multipiano che in seguito a un'azione sismica del suolo oscilla parallelamente ad esso. Questo comportamento è dovuto essenzialmente al fatto che tale modello è caratterizzato da travi (o traversi) supporti indeformabili, cioè considerati infinitamente rigidi, in cui si considera concentrata la massa m del sistema e da pilastri (o piedritti) flessibili, di rigidezza k e di massa trascurabile rispetto ai traversi. Questo modello viene utilizzato al fine di semplificare il lavoro computazionale nelle verifiche a taglio.

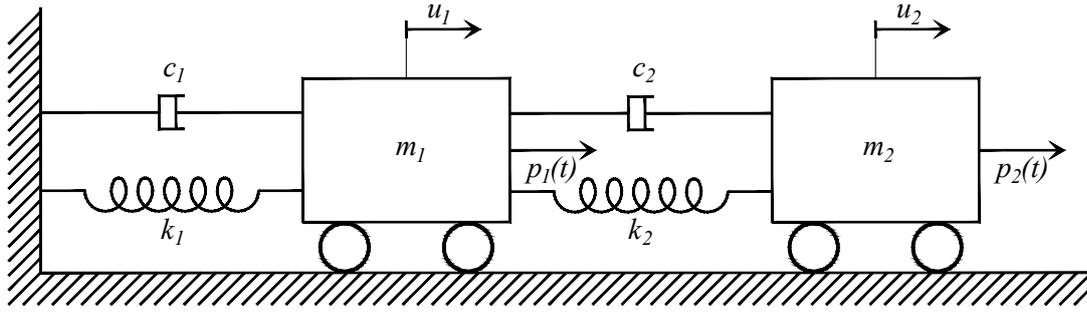


Figura 3.5: Sistema Massa-Molla-Smorzatore per una struttura a due gradi di libertà.

Come possiamo notare nella *figura 3.1* ogni piano del telaio è caratterizzato da una propria massa (m_i), da una propria rigidezza (k_i) e infine da un proprio smorzamento (c_i). Conseguentemente a tali ipotesi il momento che si genera nel generico pilastro ha uno schema a farfalla ed è nullo in mezzeria del pilastro, mentre il taglio è costante lungo tutta la lunghezza del pilastro. Inoltre lo spostamento relativo ad ogni piano è uguale per ogni pilastro facente parte dello stesso piano.

Volendo ora descrivere il modello da un punto di vista matematico l'equazione matriciale estesa che lo descrive è la seguente:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & & \\ \vdots & & \ddots & \\ & & & m_i \\ & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{u}_1 + \ddot{u}_g \\ \ddot{u}_2 + \ddot{u}_g \\ \vdots \\ \ddot{u}_i + \ddot{u}_g \\ \vdots \\ \ddot{u}_m + \ddot{u}_g \end{pmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \\ \vdots & & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & 0 \\ 0 & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \cdots & 0 & c_{n-1} & c_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{u}_i \\ \vdots \\ \dot{u}_m \end{pmatrix} + \quad (3.9) \\
 & + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \\ \vdots & & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & k_{n-1} & k_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Dove :

$$\bullet \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & & 0 \\ 0 & m_2 & & & \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ & & & m_i & \\ & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & & 0 & & m_n \end{bmatrix}$$

è la matrice delle masse $[\mathbf{M}]$

$$\bullet \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \cdots & & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & -c_i & c_i + c_{i+1} & -c_{i+1} & 0 \\ & & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \cdots & & 0 & c_{n-1} & c_n \end{bmatrix}$$

è la matrice degli smorzamenti $[\mathbf{C}]$

$$\bullet \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \cdots & & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & -k_i & k_i + k_{i+1} & -k_{i+1} & 0 \\ & & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \cdots & & 0 & k_{n-1} & k_n \end{bmatrix}$$

è la matrice delle rigidezze $[\mathbf{K}]$

Riscrivendo tale equazione in forma compatta si ottiene:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{u}\} + [\mathbf{K}]\{u\} = -[\mathbf{M}]\{\ddot{u}_g\} \quad (3.10)$$

Dove :

- $\{\ddot{u}\}$ è il vettore che contiene le accelerazioni di ogni piano del telaio Shear-type in esame;
- $\{\dot{u}\}$ è il vettore che contiene le velocità di ogni piano del telaio Shear-type in esame;
- $\{u\}$ è il vettore che contiene gli spostamenti di ogni piano del telaio Shear-type in esame come mostrato nella *figura 3.6*;
- $\{\ddot{u}_g\}$ è il vettore che contiene l'accelerazione del suolo.

3.5 Metodi di soluzione dell'equazione del moto

I metodi di soluzione dell'equazione del moto sono gli stessi sia per i sistemi SDOF che per i sistemi MDOF, ciò che cambia è semplicemente la dimensione del sistema, pertanto nei sistemi MDOF si parla di matrici e vettori mentre in un sistema

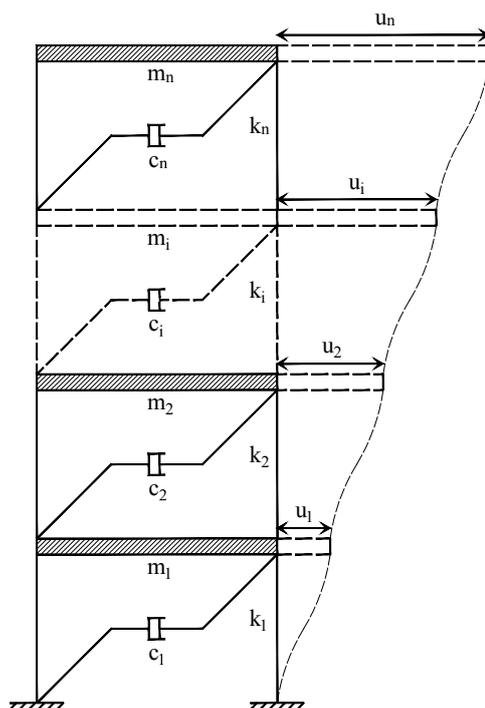


Figura 3.6: Esempio di telaio shear-type 2D in una struttura multipiano

SDOF tutta la trattazione è ridotta a un singolo grado di libertà. Considerando che l'equazione del moto dei sistemi SDOF lineari soggetti a forza esterna (*equazione 3.1*) è un'equazione differenziale di secondo grado, per definire il problema in modo completo lo spostamento iniziale $u(0)$ e la velocità iniziale $\dot{u}(0)$ devono essere specificati. Dal momento che inizialmente la struttura è ferma sia lo spostamento iniziale che la velocità vengono di solito imposti pari a zero [3]. Fatte queste premesse si riportano alcuni dei principali metodi di soluzione dell'equazione del moto.

3.5.1 Soluzione classica

La soluzione completa dell'equazione differenziale lineare dell'equazione del moto consiste nella somma tra la soluzione complementare $u_c(t)$ e la soluzione particolare $u_p(t)$, quindi:

$$u(t) = u_c(t) + u_p(t) \quad (3.11)$$

Dato che l'equazione è del secondo ordine dovranno essere coinvolte due costanti di integrazione, che compariranno nella soluzione complementare e saranno calcolate tramite le condizioni iniziali imposte. Il metodo classico è il principale metodo risolutivo per le equazioni differenziali di secondo grado e sarà utilizzato per la soluzione di equazioni differenziali di vibrazioni libere, e per eccitazioni che possono essere descritte analiticamente in forma chiusa come forze armoniche, pulsanti o a step.

3.5.2 Integrale di Duhamel

Un altro approccio ben conosciuto nella soluzione di equazioni differenziali, come l'equazione del moto di un sistema SDOF, è basato sulla rappresentazione della forza applicata come una serie di piccoli impulsi infinitesimali. La risposta del sistema a una forza esterna al sistema $p(t)$, al tempo t è ottenuta aggiungendo le risposte di tutti gli impulsi fino all'istante considerato. Applicando questo metodo si arriva alla soluzione seguente per un sistema SDOF non smorzato:

$$u(t) = \frac{1}{m\omega_n} \int_0^t p(\tau) \sin[\omega_n(t - \tau)] d\tau \quad (3.12)$$

dove:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.13)$$

Implicite in questo risultato vi sono le condizioni iniziali, inoltre tale soluzione è conosciuta come *l'integrale di Duhamel* ed è una particolare forma del più ampio integrale di convoluzione.

L'integrale di Duhamel fornisce una importante alternativa alla soluzione classica se la forza applicata $p(t)$ è definita analiticamente da una funzione semplice che permette la soluzione dell'integrale. Per eccitazioni complesse che sono descritte solo da valori numerici di $p(t)$ a istanti discreti, l'integrale di Duhamel può essere valutato tramite metodi numerici.

3.5.3 Metodo del dominio di frequenza

Le trasformate di Laplace e Fourier forniscono uno strumento potente per la risoluzione delle equazioni differenziali, in particolare l'equazione del moto di un sistema SDOF. Poiché i due metodi di trasformazione hanno un concetto molto simile, in questa trattazione menzioniamo solo la trasformata di Fourier che conduce al metodo del dominio in frequenza per l'analisi dinamica. La trasformata di Fourier $P(\omega)$ della funzione di eccitazione $p(t)$ è definita da:

$$P(\omega) = F[p(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.14)$$

La trasformata di Fourier $U(\omega)$ della soluzione $u(t)$ dell'equazione differenziale è data da:

$$U(\omega) = H(\omega)P(\omega) \quad (3.15)$$

dove la funzione complessa di risposta in frequenza $H(\omega)$ descrive la risposta del sistema all'eccitazione armonica. Infine la soluzione $u(t)$ è data dall'equazione inversa della trasformata di Fourier $U(\omega)$:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega)P(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (3.16)$$

Per valutare l'integrale dell'equazione 3.14 è sufficiente una integrazione diretta mentre per la valutazione dell'integrale presente nell'equazione 3.16 è necessaria una integrazione al contorno nel piano complesso. Tuttavia si possono ottenere

soluzioni in forma chiusa solo se la funzione $p(t)$ è una funzione semplice, infatti, prima dell'avvento dei supercomputer in grado di risolvere numerosi calcoli a elevata velocità, questo metodo era accessibile solo per alcune funzioni di $p(t)$. Questo metodo è ora utilizzabile per l'analisi dinamica di sistemi lineari con eccitazioni complesse $p(t)$ o $\ddot{u}_g(t)$ che sono descritte numericamente. In alcune situazioni gli integrali visti prima vengono valutati tramite metodi numerici tramite il metodo discreto della trasformata di Fourier usando la cosiddetta "Trasformata veloce di Fourier" sviluppata nel 1965.

Questo metodo è rappresentato dall'equazioni 3.14 e 3.16, la prima fornisce l'ampiezza $P(\omega)$ di tutte le componenti armoniche che formano l'eccitazione $p(t)$, la seconda può essere interpretata come valutazione della risposta armonica del sistema a ogni componente dell'eccitazione. Queste risposte una volta sovrapposte forniscono la risposta complessiva $u(t)$ del sistema. Il metodo di risposta in frequenza, che è una alternativa al metodo di risposta nel tempo rappresentato dall'integrale di Duhamel, è particolarmente potente e utile per l'analisi dinamica di strutture interagenti con domini illimitati, per esempio strutture che hanno un effetto di interazione con il suolo sottostante oppure strutture che interagiscono con grandi sistemi fluidi come le dighe [3].

3.5.4 Metodi numerici

I precedenti tre metodi descritti sono limitati alla soluzione di sistemi lineari elastici e non prendono in considerazione il comportamento inelastico delle strutture che si verifica durante i terremoti solo se le vibrazioni sono particolarmente intense. Questo approccio consiste in metodi numerici a step successivi, che risultano molto utili nella valutazione della risposta di sistemi lineari all'eccitazione $p(t)$ quando quest'ultima risulta troppo complicata da risolvere analiticamente. Due esempi sono il metodo di Newmark e il metodo delle differenze finite.

Metodo numerico TR-BDF2

Il metodo TR-BDF2 è il metodo numerico che viene utilizzato nel programma *MathWorks-Simulink* durante le simulazioni e le analisi effettuate in questo studio. È un metodo one-step a due stadi, di cui il primo si rifà al metodo trapezoidale mentre il secondo al metodo BDF2. I due stadi sono manipolati e aggiustati in modo tale che entrambi utilizzino la stessa matrice Jacobiana. Questo metodo è stato poi reinterpretato come un metodo one-step, diagonale, implicito di Runge Kutta con due stadi interni, chiamato con l'acronimo "DIRK method" come descritto in [8]. Tale metodo gode delle seguenti proprietà :

- bisogna valutare solo due stadi impliciti;
- la matrice Jacobiana è la stessa per entrambi gli stadi;
- ha incorporato una integrazione del terzo ordine che permette di avere un economico stimatore degli errori;
- è un metodo fortemente stabile;
- tutti gli stadi sono valutati entro lo step temporale;

- è dotato di un algoritmo di interpolazione cubico di Hermite per output molto densi, che rende continua di classe C^1 la funzione di output.

Capitolo 4

Smorzamento

Lo smorzamento è definito come una grandezza fisica che decresce nel tempo. Il termine è applicabile a una larga parte di fenomeni, ed è particolarmente utilizzato nel campo dei fenomeni periodici, dalle radiazioni elettromagnetiche alle oscillazioni meccaniche, quest'ultime inerenti al nostro caso studio. Per quanto riguarda lo smorzamento delle oscillazioni meccaniche non è possibile ricavare il valore del coefficiente direttamente dalle dimensioni della struttura o dal numero di componenti che la compongono, o ancora dalle proprietà di smorzamento dei materiali usati nella costruzione. Per questo motivo lo smorzamento è generalmente specificato tramite valori numerici durante l'analisi modale della struttura in esame, questo approccio è generalmente sufficiente per l'analisi di strutture lineari con smorzamento classico. Tuttavia sono necessari particolari modelli, che presuppongono la costruzione di determinate matrici di smorzamento, per l'analisi modale di strutture con uno smorzamento non classico o strutture non-lineari [3].

4.1 Stima del rapporto di smorzamento modale

Non è sempre fattibile determinare le proprietà di una struttura come il periodo di vibrazione principale o le proprietà smorzanti, ma se bisogna valutarne la sicurezza sismica allora idealmente noi siamo obbligati a conoscerne le proprietà sismiche, incluso il suo smorzamento, anche per mezzo di numerosi studi sperimentali. Tuttavia tali studi raramente vengono condotti sulle strutture per mancanza di disponibilità economica e di tempo. Per una nuova struttura ovviamente non possono essere misurate ma si impongono tramite le normative vigenti. Sebbene i ricercatori abbiano accumulato, nel corso degli anni, una quantità di dati enorme sull'argomento bisogna comunque usare tali dati con discrezione poichè alcuni di essi non sono direttamente applicabili nell'analisi sismica e nella progettazione. Dati utili per la stima dello smorzamento sono difficili e lenti da reperire perchè sono relativamente poche le strutture in cui sono installati accelerografi permanenti pronti a registrare ogni movimento quando un sisma arriva, e inoltre i terremoti di alta intensità avvengono raramente. L'idea è quella di avere dati sullo smorzamento, di strutture di tipo diverso e costruite con materiali diversi, determinati tramite la registrazione del moto durante l'avvenimento dei sismi, in modo tale da poter stimare con maggior accuratezza lo smorzamento su base sperimentale.

Grazie ai numerosi esperimenti e dati raccolti nella *tabella 4.1* si possono vedere i coefficienti di smorzamento raccomandati per la progettazione delle strutture.

Tabella 4.1: Valori raccomandati di smorzamento sismico.

Livello di stress	Tipo e condizione della struttura	Smorzamento sismico (%)
Stress lavorativo, non più grande di 1/2 della tensione di snervamento	Acciaio saldato, calcestruzzo pre-compresso, cemento armato ben rinforzato.	2-3
	Cemento armato con considerevoli crack.	3-5
	Acciaio rivettato o imbullonato, strutture in legno con giunti inchiodati o imbullonati.	5-7
Alla tensione di snervamento o leggermente al di sotto	Acciaio saldato, calcestruzzo pre-compresso senza perdite di pre-compressione.	5-7
	Cemento armato precompresso senza rilasci di precompressione.	7-10
	Cemento armato	7-10
	Acciaio rivettato o imbullonato, strutture in legno con giunti imbullonati.	10-15
	Strutture in legno con giunti inchiodati.	15-20

Questi valori possono essere utilizzati direttamente nell'analisi dinamica delle strutture con smorzamento classico. Per questi sistemi le equazioni del moto, una volta trasformate nei modi naturali di vibrazione, diventano disaccoppiate e i valori di smorzamento stimati entrano direttamente con i loro valori in ogni equazione modale [3].

4.2 Costruzione della matrice di smorzamento

La matrice di smorzamento deve essere definita quando l'analisi modale classica non è applicabile al problema in esame, come per esempio nelle strutture aventi uno smorzamento non classico, sebbene il nostro interesse rimanga limitato alla risposta lineare elastica della struttura. Inoltre l'analisi modale classica non è applicabile ai sistemi non-lineari anche se lo smorzamento è nella forma classica. Uno dei più importanti problemi non-lineari di grande interesse per noi, è la risposta delle strutture oltre il loro range elastico durante un terremoto.

Tale matrice di smorzamento non può essere calcolata tramite la dimensione strutturale o la dimensione degli elementi strutturali o le proprietà intrinseche dei materiali utilizzati. Pertanto la matrice di smorzamento deve essere determinata tramite i suoi rapporti di smorzamento modale, che tengono conto di tutti i meccanismi di dissipazione dell'energia presenti all'interno della struttura. Tali valori sono stati stimati nel corso degli anni tramite la raccolta di numerosi dati e sono riportati nella *tabella 4.1*.

4.3 Modello di Wilson

Per quanto riguarda questo studio si è usata una procedura alternativa per determinare la matrice di smorzamento classica utilizzando i valori stimati nella *tabella 4.1*. Tale procedura si basa sulla seguente equazione:

$$[\Phi]^T [c] [\Phi] = [C] \quad (4.1)$$

dove $[C]$ è una matrice diagonale avente come n-esimo elemento diagonale il seguente smorzamento modale generalizzato:

$$C_n = \zeta_n (2M_n \omega_n) \quad (4.2)$$

dove ζ_n indica lo smorzamento stimato tramite la *tabella 4.1*, descritta precedentemente. Sapendo il valore di ζ_n , tramite l'equazione 4.2, è possibile calcolare la matrice diagonale $[C]$. Una volta nota $[C]$, tramite la seguente formula inversa è possibile ricavare la matrice $[c]$:

$$[c] = [\Phi^T]^{-1} [C] [\Phi]^{-1} \quad (4.3)$$

Questo metodo può sembrare inefficiente poiché richiede l'inversione di due matrici aventi ordine N , pari al numero di gradi di libertà del sistema. In verità la matrice inversa delle matrici $[\Phi^T]$ e $[\Phi]$ ha un costo computazionale relativamente basso, grazie alla proprietà di ortogonalità dei modi. Partendo quindi dalla seguente equazione:

$$[\Phi]^T [m] [\Phi] = [M] \quad (4.4)$$

si può vedere che:

$$[\Phi]^{-1} = [M]^{-1} [\Phi]^T [m] \quad (4.5)$$

$$[\Phi^T]^{-1} = [m] [\Phi] [M]^{-1} \quad (4.6)$$

grazie al fatto che $[M]$ è una matrice diagonale delle masse modali generalizzate M_n , quindi è possibile calcolare la matrice $[M]^{-1}$ immediatamente dal momento che è una matrice diagonale con elementi pari a $\frac{1}{M_n}$ tramite le formule 4.5 e 4.6. Sostituendo le equazioni 4.5 e 4.6 nell'equazione 4.3 si ottiene:

$$[c] = ([m] [\Phi] [M]^{-1}) [C] ([M]^{-1} [\Phi]^T m) \quad (4.7)$$

Finchè le matrici $[M]$ e $[C]$ rimangono diagonali, tale espressione può essere espressa come:

$$[c] = [m] \left(\sum_{n=1}^N \frac{2\zeta_n \omega_n}{M_n} \phi_n \phi_n^T \right) [m] \quad (4.8)$$

L'n-esimo termine di questa sommatoria rappresenta il contributo dell'n-esimo modo di vibrare, avente il proprio smorzamento ζ_n all'interno della matrice di smorzamento $[c]$, se questo termine non è considerato il termine risultante c implicherà uno smorzamento nullo per l'n-esimo modo di vibrare. Si considerano sempre solo i primi modi di vibrare poiché sono quelli che danno il maggior contributo ai fini del comportamento della struttura, mentre gli ultimi modi di vibrare hanno un peso trascurabile. Tale procedura non genera problemi numerici di non-convergenza se viene usato un metodo di integrazione incondizionatamente stabile per risolvere l'equazione del moto [3].

Capitolo 5

Software di analisi - *Math Works-MatLab e Simulink*

5.1 Generalità

In questo studio si è fatto uso del software *Math Works-MATLAB* per effettuare le analisi sismiche delle strutture analizzate nel caso studio. *Math Works-MATLAB* (abbreviazione di Matrix Laboratory) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto tramite il linguaggio informatico C, che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla *Math Works*. *Math Works-MATLAB* consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi. *Math Works-MATLAB* è usato da milioni di persone nell'industria e nelle università per via dei suoi numerosi strumenti a supporto dei più disparati campi di studio applicati e funziona su diversi sistemi operativi, tra cui Windows, Mac OS, GNU/Linux e Unix [16].

Un software strettamente collegato a *Math Works-MATLAB* è *Math Works-Simulink*, sviluppato dall'omonima casa statunitense. *Math Works-Simulink* è un programma per la modellazione, la simulazione e l'analisi di sistemi dinamici descritti da equazioni differenziali, mediante funzioni di trasferimento, sistemi in forma di stato, e così via. Permette la simulazione di sistemi complessi di ordine elevato, con non-linearità e segnali di riferimento complessi. La simulazione avviene in due passi:

- **Descrizione del sistema mediante schema a blocchi**, *Math Works-Simulink* contiene una libreria di blocchi che descrivono elementi algebrici e dinamici elementari (funzioni di trasferimento, guadagno, saturazioni, funzioni matematiche), l'utente quindi compone lo schema a blocchi del sistema da simulare mediante l'interconnessione dei blocchi elementari.
- **Simulazione del sistema**, consiste nell'integrazione numerica delle equazioni differenziali, in un certo intervallo di tempo.

5.2 Descrizione degli script *Mathworks-Matlab*® adottati

Nel presente studio è stato scritto uno script Matlab per ogni struttura analizzata, in particolare si possono notare alcune parti dello script nella *figura 5.1 (a)*, *(b)*, *(c)*. Si può notare come il linguaggio utilizzato da *MathWorks-MATLAB* sia il linguaggio C, che è un linguaggio informatico di natura procedurale e per questo motivo i programmi scritti in questo linguaggio sono composti da espressioni matematiche e da istruzioni raggruppate in procedure e/o cicli (for,while... etc).

```

load('Sismi_Far_Field.mat')
load('PGV_Far_Field.mat')

Tg = 2*pi./wg ; % Periodi sismi Far-Field %
fg = 1./Tg ; % Frequenze naturali sismi Far- Field %

Ts = 1; % Periodo T1 (modo 1) della struttura %
ws = 2*pi/Ts; % pulsazione naturale (modo 1) della struttura %
c_1 = 0.075; % Considero il valore relativo ai telai spaziali in c.a. oppure in acciaio con controventi eccentrici %
H_strut = (Ts/c_1)^(4/3); % altezza struttura secondo l'ipotesi di regolarità in altezza %
H_strut_Int = round(H_strut,0); % altezza struttura intera %
h_piano = 3.5;
n_piani = round(H_strut_Int/h_piano,0);% n° di piani della struttura considerata %

if n_piani == 0
    n_piani = 1;
end

for i=1:45
    PGA_Sismi(i,1) = max(abs(acc(:,i))*9.81);
end
for i=1:45
    PGA_PGV (i,1) = PGA_Sismi(i,1)/PGV_Sismi(i,1);
    PGV_PGA (i,1) = PGV_Sismi(i,1)/PGA_Sismi(i,1);
end

Tit = 'Struttura - 10';
% Analisi Numerica Sismi con K Lin e C alla Wilson %
M = M;
K = K_Lin;
C = C_Lin_Wil;
Tit4 = 'K = Funz. Lineare';
for i=1:45
    Tt = numstep(1,i)*dt(1,i);
    segnale = acc(:,i).*9.81;
    tsegnale = [0:dt(1,i):7183*dt(1,i)];
    sim Analisi_Num10.mdl
    u=u'; v=v'; a=a';
    assignin('base', T_Sisma(i,1), Tt);
    assignin('base', Ut_AN_kL_Wil(i,1), u);
    assignin('base', Vt_AN_kL_Wil(i,1), v);
    assignin('base', At_AN_kL_Wil(i,1), a);
    for ii=1:n_piani
        Umax_Lin_Wil(ii,i) = max(abs(u(ii,:)));
        Vmax_Lin_Wil(ii,i) = max(abs(v(ii,:)));
        Amax_Lin_Wil(ii,i) = max(abs(a(ii,:)));
    end
    clear Tempo segnale tsegnale Tt;
end

```

(a)

```

for i=1:n_piani
    U_medio_Lin_Wil(i,1) = mean(Umax_Lin_Wil(i,:));
    V_medio_Lin_Wil(i,1) = mean(Vmax_Lin_Wil(i,:));
    A_medio_Lin_Wil(i,1) = mean(Amax_Lin_Wil(i,:));
end
for i=1:n_piani
    U_medio15_Lin_Wil(i,1) = mean(Umax_Lin_Wil(i,1:15));
    V_medio15_Lin_Wil(i,1) = mean(Vmax_Lin_Wil(i,1:15));
    A_medio15_Lin_Wil(i,1) = mean(Amax_Lin_Wil(i,1:15));
end
for i=1:n_piani
    U_medio30_Lin_Wil(i,1) = mean(Umax_Lin_Wil(i,16:30));
    V_medio30_Lin_Wil(i,1) = mean(Vmax_Lin_Wil(i,16:30));
    A_medio30_Lin_Wil(i,1) = mean(Amax_Lin_Wil(i,16:30));
end
for i=1:n_piani
    U_medio45_Lin_Wil(i,1) = mean(Umax_Lin_Wil(i,31:45));
    V_medio45_Lin_Wil(i,1) = mean(Vmax_Lin_Wil(i,31:45));
    A_medio45_Lin_Wil(i,1) = mean(Amax_Lin_Wil(i,31:45));
end
for i=1:n_piani
    PA_PV_L_medio(i,1) = A_medio_Lin_Wil(i,1)/V_medio_Lin_Wil(i,1);
    PA_PV_L_15(i,1) = A_medio15_Lin_Wil(i,1)/V_medio15_Lin_Wil(i,1);
    PA_PV_L_30(i,1) = A_medio30_Lin_Wil(i,1)/V_medio30_Lin_Wil(i,1);
    PA_PV_L_45(i,1) = A_medio45_Lin_Wil(i,1)/V_medio45_Lin_Wil(i,1);
    PV_PA_L_medio(i,1) = V_medio_Lin_Wil(i,1)/A_medio_Lin_Wil(i,1);
    PV_PA_L_15(i,1) = V_medio15_Lin_Wil(i,1)/A_medio15_Lin_Wil(i,1);
    PV_PA_L_30(i,1) = V_medio30_Lin_Wil(i,1)/A_medio30_Lin_Wil(i,1);

```

(b)

(c)

Figura 5.1: Esempi di Script Matlab.

All'interno di questi script Matlab vengono richiamati i modelli Simulink per la soluzione dell'equazioni differenziali del moto dei modelli Shear-Type in esame, che sono un modello analitico delle strutture in esame, tali modelli Simulink vengono descritti in seguito.

5.3 Modello *MathWorks Matlab-Simulink*® per la soluzione dei modelli Shear-Type

In questo studio per la soluzione della equazione del moto (*Equazione 3.10*) dei sistemi SDOF e MDOF Shear-Type presi in esame, si sono utilizzati gli schemi a blocchi presenti in *MathWorks-Simulink*, i quali vengono mostrati nelle *figure 5.2, 5.3, 5.4*. Il metodo di risoluzione utilizzato per risolvere le equazioni differenziali è un metodo numerico chiamato TR-BDF2, descritto precedentemente nel *capitolo 3.5.4*.

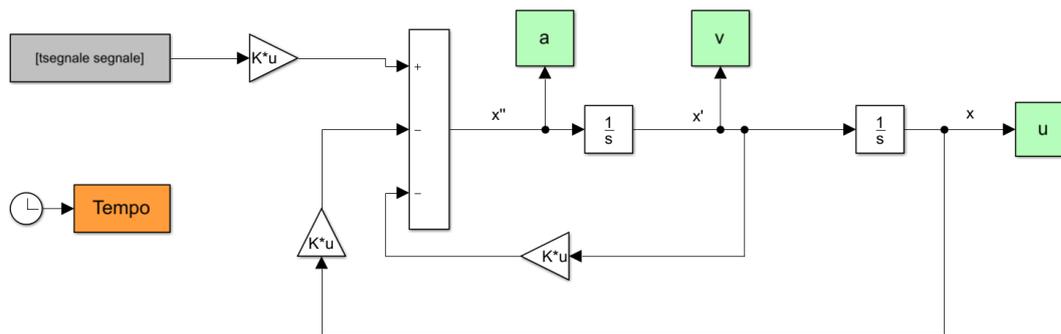


Figura 5.2: Modello a blocchi Simulink per la soluzione dei telai Shear-Type.

La *figura 5.1* illustra il modello a blocchi in *MathWorks-Simulink*, adottato per la soluzione dell'equazione del moto di tutti i modelli Shear-Type presenti nel caso studio. Si può notare che come dati di input si hanno le seguenti grandezze:

- **segnale**, che rappresenta il vettore delle accelerazioni del sisma in esame, quindi il suo accelerogramma;
- **tsegnale**, che rappresenta il vettore dei tempi di campionamento delle accelerazioni (step).

In tale diagramma si possono osservare: i blocchi triangolari, che servono per moltiplicare accelerazioni, velocità e spostamenti per le matrici di massa, smorzamento e di rigidità ($[M]$, $[C]$, $[K]$), presenti nell'equazione del moto (*Equazione 3.10*); i blocchi quadrati bianchi, che sono degli operatori che permettono di integrare e risolvere l'equazione differenziale, tramite il metodo numerico impostato; e infine i blocchi verdi, che sono gli output, che il programma restituisce, una volta trovata la soluzione, in questo caso saranno appunto le accelerazioni, le velocità e gli spostamenti nel tempo di ogni piano del telaio Shear-Type in esame.

5.4 Modello *MathWorks Matlab-Simulink*® per l'analisi degli elementi non strutturali dotati di FPS

Nel presente lavoro di tesi si è voluto analizzare il comportamento sismico degli elementi non strutturali, e in particolare come elementi non strutturali sono

state considerate le tamponature, le quali sono state isolate tramite l'utilizzo dei dispositivi di isolamento FPS, descritti nel *capitolo 2.3*.

La *figura 5.3* mostra appunto il modello *MathWorks-Simulink* utilizzato per la soluzione dell'equazione del moto del sistema caratterizzato dalla tamponatura e dall'isolatore FPS. Si può notare come lo schema a blocchi risulti più complesso, questo è dovuto alla presenza dell'isolatore FPS che comporta una non linearità nel modello dovuta essenzialmente alla presenza dell'attrito.

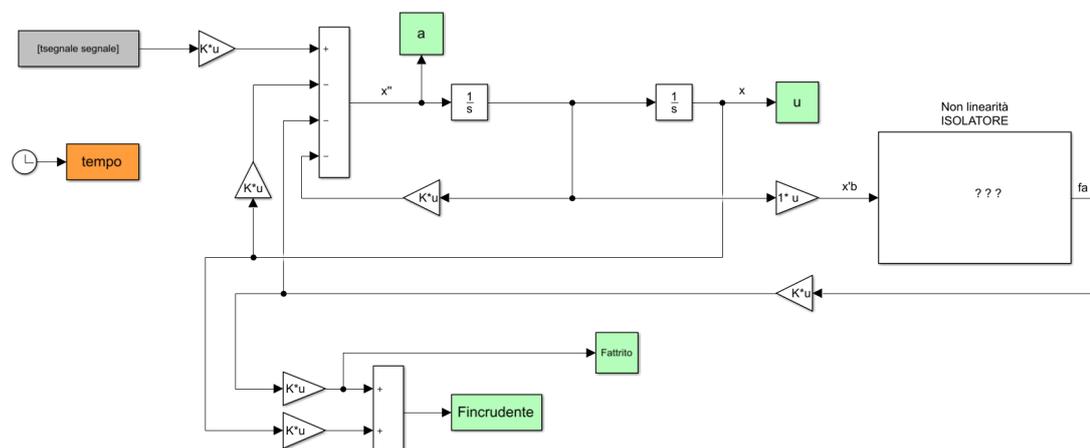


Figura 5.3: Modello a blocchi Simulink per l'analisi degli elementi non strutturali dotati di FPS.

Questa non linearità viene gestita tramite il blocco "Isolatore", che si può vedere nella *figura 5.3*, il quale presenta al suo interno una serie di operazioni che permettono il calcolo della forza di attrito presente nel dispositivo di isolamento.

Queste operazioni vengono descritte nella *figura 5.3*, dove si può vedere in che modo viene modellato il sistema FPS, in particolare tale blocco ha come dati di input i seguenti coefficienti:

- α , coefficiente sperimentale per interfacce di scorrimento teflon-acciaio;
- μ_{max} , rappresenta il massimo valore del coefficiente di attrito dell'isolatore alle grandi velocità;
- μ_{min} , rappresenta il minimo valore del coefficiente di attrito cioè a velocità nulla.

Oltre i coefficienti appena descritti come dato di input riceve la velocità nel tempo (\dot{u}), e tramite una serie di operatori matematici è in grado di calcolarsi la forza di attrito descritta dalla seguente formula:

$$\mu(\dot{u}) = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min})e^{-\alpha|\dot{u}|} \quad (5.1)$$

Una volta calcolata la forza di attrito tramite l'inserimento dei parametri appena descritti è possibile inserirla all'interno dell'equazione del moto e risolverla, nuovamente, tramite il metodo numerico TR-BDF2. Anche in questo caso i dati di input saranno le seguenti grandezze:

- **segnale**, che rappresenta il vettore delle accelerazioni del sisma in esame, quindi il suo accelerogramma;
- **tsegnale**, che rappresenta il vettore dei tempi di campionamento delle accelerazioni (step).

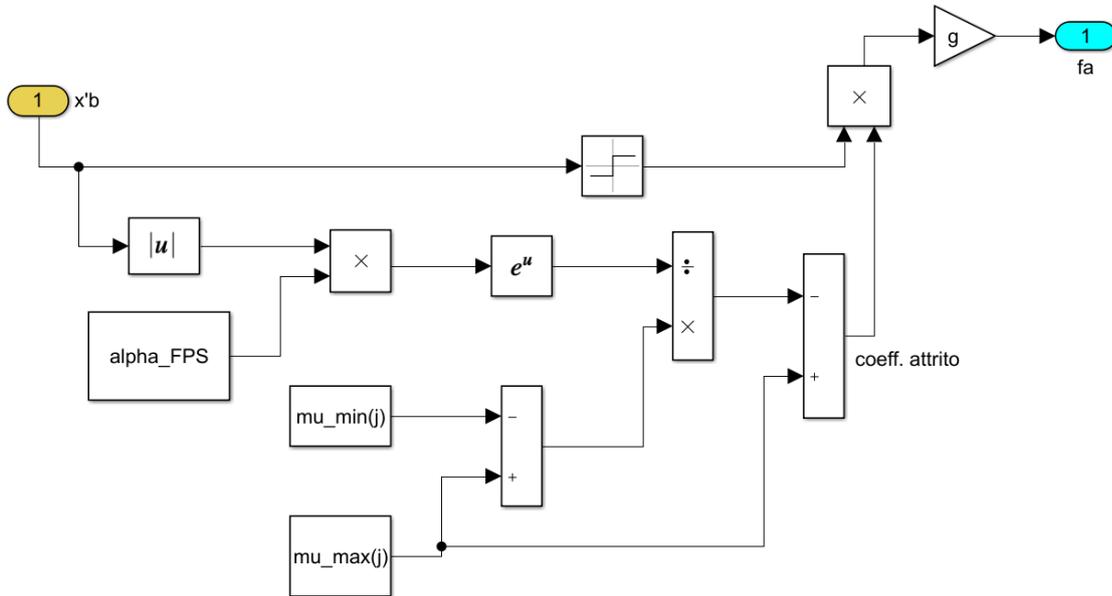


Figura 5.4: Blocco "Isolatore FPS" Simulink all'interno del modello.

Come possiamo vedere dalla *figura 5.3* i dati di output (in verde) cambiano rispetto lo schema in *figura 5.2*, in questo caso sono:

- l'accelerazione del sistema caratterizzato dalla tamponatura e dall'isolatore FPS;
- lo spostamento del sistema caratterizzato dalla tampinatura e dall'isolatore FPS;
- la forza di attrito;
- la forza incrudente.

Capitolo 6

Analisi parametrica

In questo capitolo viene descritta l'analisi parametrica che è stata effettuata per analizzare il sistema composto dalla tamponatura e dall'isolatore FPS, in particolare è stata adottata una formulazione alternativa per investigare l'influenza delle caratteristiche del moto del suolo in relazione con le proprietà ottimali dell'isolatore FPS. Per questo motivo lo scopo della trattazione prevede un parametro del moto del suolo addizionale che è pari al rapporto tra PGA/PGV , cioè il rapporto tra il picco al suolo dell'accelerazione rispetto al picco al suolo della velocità. Questo rapporto come mostrato in diversi studi è utilizzato per rappresentare sinteticamente l'importanza del moto del suolo in termini di contenuto in frequenza e durata.[2]

6.1 Formulazione adimensionalizzata del problema

Nella *figura 6.1* è mostrato lo schema 1dof, cioè a un grado di libertà, che è stato utilizzato e considerato nei calcoli, in particolare si è considerata la massa (m_{tamp}) di un metro lineare di tamponatura alta quanto l'interpiano (3,5 m) e al di sotto di essa si è posizionato un isolatore FPS. Come mostrato nel *Capitolo 1*, le tipologie di tamponature considerate nel lavoro di tesi sono state due monostrato e pluristrato, quindi i calcoli sono stati eseguiti per entrambe le tipologie in esame, pur mantenendo lo stesso schema di modello, l'unico dato a cambiare è stata la massa della tamponatura, m_{tamp} .

L'equazione del moto che governa il modello descritto nella *figura 6.1* sotto l'azione orizzontale del suolo $\ddot{u}_g(t)$ è espressa dalla seguente equazione differenziale:

$$m_{tamp}\ddot{u}_b(t) + f_b(t) + c_b\dot{u}_b(t) = -m_{tamp}\ddot{u}_g(t) \quad (6.1)$$

dove $f_b(t)$ esprime la forza di resistenza dell'isolatore FPS a singola faccia di scorrimento, ed ha la seguente espressione:

$$f_b(t) = k_b u_b(t) + \mu(\dot{u}_b) m_{tamp} g Z(t) \quad (6.2)$$

Gli altri termini all'interno delle espressioni appena descritte hanno i seguenti significati:

- m_{tamp} è la massa della tamponatura in esame;

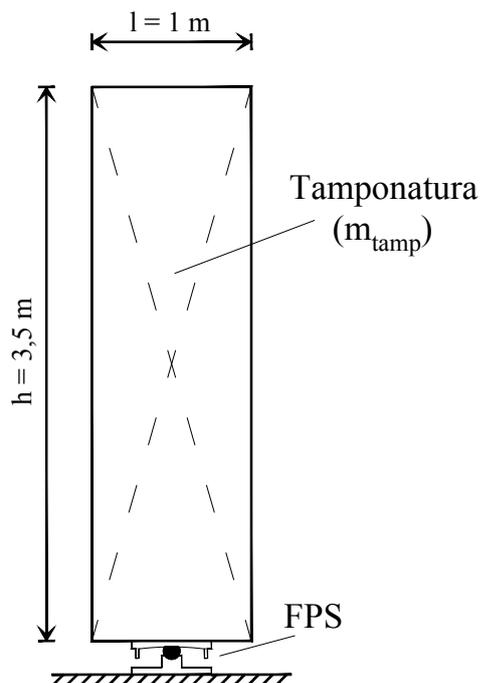


Figura 6.1: Sistema di isolamento FPS per le tamponature in esame.

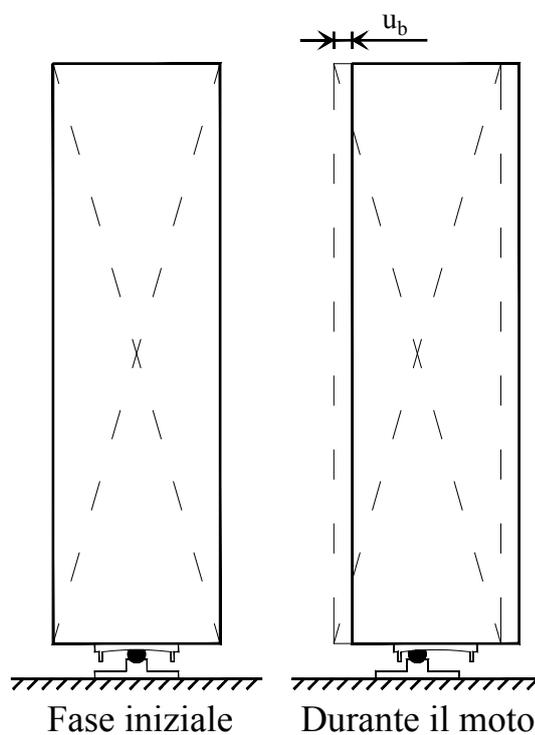


Figura 6.2: Sistema di isolamento FPS soggetto all'impulso orizzontale del sisma.

- $\ddot{u}_b(t)$ rappresenta l'accelerazione nel tempo dell'isolatore FPS;
- c_b rappresenta il coefficiente di smorzamento dell'isolatore FPS;
- $\dot{u}_b(t)$ è la velocità nel tempo dell'isolatore FPS;
- $\ddot{u}_g(t)$ rappresenta l'accelerazione nel tempo del sisma in esame;
- k_b è la rigidità dell'isolatore FPS;
- u_b è lo spostamento del sistema FPS-Tamponatura mostrato anche in *figura 6.2*;
- $\mu(\dot{u}_b)$ rappresenta il coefficiente d'attrito della superficie di scorrimento dell'isolatore FPS, il quale dipende dalla velocità \dot{u}_b ;
- g è la costante di gravità;
- $Z(t) = \text{sgn}(\dot{u}_b)$ rappresenta la funzione segno della variabile velocità dell'isolatore FPS.

La rigidità dell'isolatore FPS, riprendendo *l'equazione 2.13* e sapendo che la frequenza angolare dell'isolatore FPS si calcola tramite l'espressione $w_b = \frac{2\pi}{T_b}$, la si può esprimere tramite la seguente formula derivata:

$$k_b = w_b^2 m_{tamp} = \frac{m_{tamp} g}{R} \quad (6.3)$$

dove R , indica il raggio di curvatura dell'isolatore FPS a singola faccia di scorrimento. Numerosi studi [2, 5, 11] attestano che le superfici di scorrimento composte da interfacce di teflon-acciaio obbediscono alla seguente equazione:

$$\mu(\dot{u}_b) = \mu_{max} - (\mu_{max} - \mu_{min}) e^{-\alpha |\dot{u}_b|} \quad (6.4)$$

dove:

- μ_{max} , rappresenta il massimo valore del coefficiente d'attrito alle alte velocità;
- μ_{min} , rappresenta il valore del coefficiente d'attrito a velocità zero.

Per semplificare la trattazione si assumono le seguenti ipotesi valide per le superfici teflon-acciaio:

- $\mu_{max} = 3\mu_{min}$
- $\alpha = 30$.

L'equazione del moto descritta nella *espressione 6.1* risulta non adimensionalizzata pertanto per poterla trasformare nella forma adimensionalizzata si introduce il concetto di scala del tempo e scala delle lunghezze.[2] La scala del tempo viene assunta pari $1/w_g$ dove $w_g = \frac{2\pi}{T_g}$, è la frequenza angolare del moto del suolo e T_g indica il periodo proprio del moto del suolo in esame. Il valore T_g può anche indicare il periodo proprio di un determinato piano di una struttura in esame che per l'eventuale tamponatura facente parte di quel piano rappresenta il periodo proprio

del moto del suolo. La scala della lunghezza viene considerata pari al rapporto $\frac{a_0}{\omega_g^2}$, dove a_0 è la misura dell'intensità sismica sotto forma di accelerazione, nella trattazione si identifica tale valore con la misura della Intensity Measure (IM) che viene imposta unitaria. Per questo motivo l'accelerazione $\ddot{u}_g(t)$ del suolo può essere espressa tramite la seguente relazione:

$$\ddot{u}_g(t) = a_0 \lambda(t) \quad (6.5)$$

dove $\lambda(t)$, è una funzione adimensionale che descrive l'input sismico sotto forma di time-history. Una ulteriore premessa utile per descrivere il processo di adimensionalizzazione utilizzato, è l'introduzione dello smorzamento relativo dell'isolatore FPS, che viene definito tramite la seguente relazione:

$$\xi_b = \frac{c_b}{2 m_{tamp} \omega_b} \quad (6.6)$$

Inoltre dalla *equazione 6.3* si ricava la seguente relazione utile nel seguito della trattazione:

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m_{tamp}} \quad (6.7)$$

Grazie alle precedenti premesse si riportano i passaggi matematici necessari per adimensionalizzare l'equazione del moto (*Equazione 6.1*), che scritta per esteso risulta avere la seguente forma:

$$m_{tamp} \ddot{u}_b(t) + c_b \dot{u}_b(t) + k_b u_b(t) + \mu(\dot{u}_b) m_{tamp} g \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -m_{tamp} \ddot{u}_g(t) \quad (6.8)$$

$$\ddot{u}_b(t) + \frac{c_b}{m_{tamp}} \dot{u}_b(t) + \frac{k_b}{m_{tamp}} u_b(t) + \mu(\dot{u}_b) g \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -\ddot{u}_g(t) \quad (6.9)$$

$$\ddot{u}_b(t) + \frac{c_b}{m_{tamp}} \dot{u}_b(t) + \omega_b^2 u_b(t) + \mu(\dot{u}_b) g \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -a_0 \lambda(\tau) \quad (6.10)$$

$$\ddot{u}_b(t) + \frac{\omega_b}{\omega_b} \frac{c_b}{m_{tamp}} \dot{u}_b(t) + \omega_b^2 u_b(t) + \mu(\dot{u}_b) g \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -a_0 \lambda(\tau) \quad (6.11)$$

$$\ddot{u}_b(t) + 2 \xi_b \omega_b \dot{u}_b(t) + \omega_b^2 u_b(t) + \mu(\dot{u}_b) g \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -a_0 \lambda(\tau) \quad (6.12)$$

$$\frac{\ddot{u}_b(t)}{a_0} + \frac{2 \xi_b \omega_b}{a_0} \dot{u}_b(t) + \frac{\omega_b^2}{a_0} u_b(t) + \frac{\mu(\dot{u}_b) g}{a_0} \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -\lambda(\tau) \quad (6.13)$$

$$\frac{\ddot{u}_b(t)}{a_0} + \frac{\omega_g}{\omega_g} \frac{2 \xi_b \omega_b}{a_0} \dot{u}_b(t) + \frac{\omega_g^2}{\omega_g^2} \frac{\omega_b^2}{a_0} u_b(t) + \frac{\mu(\dot{u}_b) g}{a_0} \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -\lambda(\tau) \quad (6.14)$$

I passaggi appena mostrati sono solo accorgimenti matematici utili per identificare l'equazione del moto adimensionalizzata del problema. Successivamente si introducono i seguenti parametri non-dimensionali, normalizzati secondo la scala delle lunghezze, per quanto riguarda gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni:

$$\psi_s(\tau) = \frac{\omega_g^2 u_b}{a_0} \quad (6.15)$$

$$\dot{\psi}_s(\tau) = \frac{\omega_g \dot{u}_b}{a_0} \quad (6.16)$$

$$\ddot{\psi}_s(\tau) = \frac{\ddot{u}_b}{a_0} \quad (6.17)$$

Sostituendoli nella *equazione 6.14* si ottiene l'equazione del moto adimensionalizzata del problema analizzato:

$$\ddot{\psi}_s(\tau) + 2 \xi_b \frac{\omega_b}{\omega_g} \dot{\psi}_s(\tau) + \frac{\omega_b^2}{\omega_g^2} \psi_s(\tau) + \frac{\mu(\dot{u}_b) g}{a_0} \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -\lambda(\tau) \quad (6.18)$$

Questa equazione rivela che vi sono ulteriori parametri non-dimensionali che governano il sistema in esame controllando la risposta non-dimensionale dell'input sismico $\lambda(\tau)$ che si sta analizzando come descritto in [2], tali parametri sono:

$$\Pi_{\omega_g} = \frac{\omega_b}{\omega_g} = \frac{T_b}{T_g} \quad (6.19)$$

che rappresenta il rapporto tra la frequenza angolare dell'isolatore e la frequenza angolare del sisma in esame.

$$\Pi_{\xi_b} = \xi_b \quad (6.20)$$

che rappresenta lo smorzamento viscoso inerente all'isolatore FPS.

$$\Pi_{\mu}(\dot{\psi}_s) = \frac{\mu(\dot{u}_b) g}{a_0} \quad (6.21)$$

che misura la rigidezza dell'isolatore FPS, data dal coefficiente di attrito $\mu(\dot{u}_b)$, relativo all'intensità sismica considerata. Poichè tale parametro dipende dalla risposta attraverso la velocità \dot{u}_b , spesso si utilizza al suo posto il seguente parametro semplificato:

$$\Pi_{\mu}^* = \frac{\mu_{max} g}{a_0} \quad (6.22)$$

Infine si può riscrivere l'equazione del moto come segue, sostituendo i parametri adimensionali appena descritti:

$$\ddot{\psi}_s(\tau) + 2 \Pi_{\xi_b} \Pi_{\omega_g} \dot{\psi}_s(\tau) + \Pi_{\omega_g}^2 \psi_s + \Pi_{\mu}(\dot{\psi}_s) \operatorname{sgn}(\dot{u}_b) = -\lambda(\tau) \quad (6.23)$$

6.2 Elementi di statistica

Le statistiche affrontate in questa sezione sono state usate per l'interpretazione dei dati di spostamenti, velocità e accelerazioni delle analisi sui telai Shear-Type in esame e sul sistema isolato composto dall'isolatore FPS e dalla tamponatura, i quali verranno affrontati in questo lavoro di tesi. In particolare si utilizzano:

- la deviazione standard s di un insieme di n dati x_1, x_2, \dots, x_n :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6.24)$$

- il percentile campionario p_k di un campione di dati, che è definito come: "Sia k un numero intero compreso tra $0 \leq k \leq 100$. Assegnato un insieme di dati numerici, ne esiste sempre uno che è contemporaneamente maggiore o uguale di almeno il k per cento dei dati, e minore o uguale di almeno il $100-k$ per cento dei dati. Se il dato con queste caratteristiche è unico, esso è per definizione il percentile k -esimo p_k dell'insieme dei dati considerato. Se invece non è unico, allora sono esattamente due, e in questo caso il percentile k -esimo è definito come la loro media aritmetica". [13]

Quindi per trovare il percentile k -esimo p_k , di un campione di numerosità n bisogna scoprire quello o quei dati tali per cui, stabilito p il rapporto tra $\frac{k}{100}$:

1. almeno np tra tutti i dati del campione siano minori o uguali al valore del percentile;
2. almeno $n(1-p)$ tra tutti i dati dell'insieme siano maggiori o uguali al valore del percentile.

In particolare in questo lavoro sono stati presi in considerazione tre valori di percentile e sono il 16° percentile ($p_{16}(\%)$), il 50° percentile ($p_{50}(\%)$) l'84° percentile ($p_{84}(\%)$), che vengono calcolati rispettivamente con le seguenti formule:

$$p_{50}(\%) = m = \left[\prod_{i=1}^n x_i \right]^{\frac{1}{n}} \quad (6.25)$$

$$p_{16}(\%) = m e^{-s} \quad (6.26)$$

$$p_{84}(\%) = m e^s \quad (6.27)$$

Come si può notare il 50° percentile ($p_{50}(\%)$) è la media geometrica del campione di dati analizzato.

6.3 Interpolazione dei dati

Con il termine interpolazione si intende il processo di curve fitting, che è il processo di costruzione di una curva o di una funzione matematica, che abbia la migliore corrispondenza ad una serie di punti assegnati, possibilmente soggetti a limitazioni.

Il curve fitting può implicare sia l'interpolazione, dove è richiesta un'esatta corrispondenza con i punti dati, o lo spianamento, dove viene costruita una funzione piana che combaci approssimativamente con i dati. Un argomento correlato è l'analisi di regressione, che si focalizza maggiormente su problemi di inferenza statistica così come è presente un'incertezza riguardo al fatto che una curva coincida con i dati osservati che presentino errori casuali. Le curve approssimanti possono essere usate come aiuto per visualizzare i dati, per rappresentare i valori di una funzione dove non sono disponibili i dati, e per riassumere le relazioni tra due o più variabili.

L'estrapolazione si riferisce all'uso di una curva approssimante lungo il range dei dati osservati, ed è soggetta ad un grado maggiore di incertezza in quanto può indicare il metodo usato per costruire la curva tanto quanto indichi i dati osservati.[15]

6.3.1 Regressione con legge di potenza

L'analisi della regressione è una tecnica usata per analizzare una serie di dati che consistono in una variabile dipendente e una o più variabili indipendenti. Lo scopo è stimare un'eventuale relazione funzionale esistente tra la variabile dipendente e le variabili indipendenti. La variabile dipendente nell'equazione di regressione è una funzione delle variabili indipendenti più un termine d'errore. Quest'ultimo è una variabile casuale e rappresenta una variazione non controllabile e imprevedibile nella variabile dipendente. I parametri sono stimati in modo da descrivere al meglio i dati. Il metodo più comunemente utilizzato per ottenere le migliori stime è il metodo dei "minimi quadrati", ma sono utilizzati anche altri metodi.

Il data modeling può essere usato senza alcuna conoscenza dei processi sottostanti che hanno generato i dati; in questo caso il modello è un modello empirico. Inoltre, nella modellizzazione, non è richiesta la conoscenza della distribuzione di probabilità degli errori. L'analisi della regressione richiede ipotesi riguardanti la distribuzione di probabilità degli errori. Test statistici vengono effettuati sulla base di tali ipotesi.

L'analisi della regressione può essere usata per effettuare previsioni (ad esempio per prevedere dati futuri di una serie temporale), inferenza statistica, per testare ipotesi o per modellare delle relazioni di dipendenza. Questi usi della regressione dipendono fortemente dal fatto che le assunzioni di partenza siano verificate.

Una volta costruito un modello di regressione, è importante confermare la bontà di adattamento del modello e la significatività statistica dei parametri stimati. I controlli della bontà di adattamento comunemente usati includono l'indice R-square, analisi dei residui e test di ipotesi.[14]

Per quanto riguarda questo studio l'analisi di regressione utilizzata è un'analisi con legge di potenza; in particolare viene utilizzata nell'interpolazione dei valori ottimali d'attrito dell'isolatore FPS. La legge di modello proposta dal software *MathWorks-MATLAB* per la regressione con legge di potenza a un singolo termine è:

$$y = ax^b \quad (6.28)$$

dove a, b sono i coefficienti della regressione.

Inoltre viene valutata la bontà dell'interpolazione tramite il parametro R-square, che è un parametro che misura quanto successo abbia l'adattamento dell'interpolazione utilizzata rispetto alla variazione dei dati. In altre parole, il parametro R-square rappresenta il quadrato della correlazione tra i valori di risposta e i valori di risposta stimati. Viene anche chiamato il quadrato del coefficiente di correlazione multipla e/o il coefficiente di determinazione multipla e ha la seguente espressione:

$$R - square = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (6.29)$$

dove:

- il parametro SST è chiamato la somma dei quadrati rispetto alla media ed è definito come :

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (6.30)$$

- il termine SSR indica la somma dei quadrati della regressione e viene definito dalla seguente espressione:

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (6.31)$$

- il termine SSE misura la deviazione totale dei valori di risposta del fitting rispetto ai valori di risposta. Viene anche chiamato la somma dei quadrati dei residui ed è solitamente definito tramite la seguente relazione:

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6.32)$$

Il termine R – *square* può assumere qualsiasi valore compreso tra 0 e 1, più tale valore è vicino a 1 più il modello rappresenta una porzione maggiore della varianza dei dati, quindi più la bontà dell'approssimazione risulta maggiore. Ad esempio, un valore R – *square* di 0,8234 significa che il fitting rappresenta l'82,34% della variazione totale nei dati sulla media.

Se si aumenta il numero di coefficienti del fitting nel modello, il termine R – *square* aumenterà anche se il fitting potrebbe non migliorare in senso pratico.

Si nota che è possibile ottenere un R – *square* negativo per le equazioni che non contengono un termine costante. Poiché l' R – *square* è definito come la proporzione della varianza rappresentata dal fitting, se il fitting è in realtà peggiore di una semplice linea orizzontale, il termine R – *square* risulta negativo. In questo caso, l' R – *square* non può essere interpretato come il quadrato di una correlazione. Tali situazioni indicano che un termine costante dovrebbe essere aggiunto al modello.

Capitolo 7

Ottimi di progettazione

7.1 Regolarità strutturale

In questo lavoro di tesi un'ipotesi molto importante nello svolgimento dello studio è stata sicuramente l'ipotesi di regolarità in elevazione degli edifici in esame. Come descritto nella norma UNI ENV 1998-1-2-1997, ai fini della progettazione in zona sismica, gli edifici sono divisi in regolari e non-regolari. Questa distinzione si riflette sui seguenti aspetti della progettazione sismica:

- **il modello strutturale**, il quale può essere sia semplicemente piano che spaziale;
- **il metodo di analisi**, che può essere modale semplificata piuttosto che multimodale;
- **il valore del coefficiente di comportamento q** , che può essere diminuito sulla base della non-regolarità in elevazione.

In base alla regolarità in pianta e in elevazione che si ha nel proprio modello possono essere concesse dalla norma determinate semplificazioni che vengono riportate nella *tabella 7.1*.

Tabella 7.1: Effetti della regolarità strutturali sul progetto antisismico.

Regolarità		Semplificazioni concesse		Coefficiente di comportamento
Pianta	Elevazione	Modello	Analisi	
Si	Si	Piano	Semplificata	Val. di riferimento
Si	No	Piano	Multimodale	Diminuito
No	Si	Spaziale	Multimodale	Val. di riferimento
No	No	Spaziale	Multimodale	Diminuito

7.1.1 Criteri di regolarità in pianta

Per quanto riguarda la regolarità in pianta un edificio deve soddisfare i seguenti requisiti normativi:

1. La struttura dell'edificio deve essere approssimativamente simmetrica in pianta rispetto a due direzioni ortogonali per quanto riguarda la rigidezza laterale e la distribuzione della massa.
2. La configurazione della pianta deve essere compatta, non deve cioè presentare forme ad H, I, X, ecc. La dimensione totale delle rientranze in una direzione non deve superare il 25% di tutto lo sviluppo in pianta del perimetro esterno dell'edificio nella direzione corrispondente.
3. La rigidezza degli impalcati nel loro piano deve essere sufficientemente grande se paragonata a quella laterale degli elementi strutturali verticali affinché la deformazione dei primi non influenzi la distribuzione delle forze tra i secondi.
4. In presenza della distribuzione delle forze sismiche data da:

$$F_i = F_b \frac{s_i W_i}{\sum s_j W_j} \quad (7.1)$$

dove F_i , è la forza orizzontale agente all' i -esimo piano; F_b è la forza di taglio alla base; s_i e s_j sono gli spostamenti delle masse m_i e m_j nel periodo fondamentale di vibrazione; infine W_i e W_j sono i pesi delle masse m_i e m_j . Tali forze vengono applicate con l'eccentricità accidentale prevista dalla formula:

$$e_{1i} = \pm 0,05 L_i \quad (7.2)$$

dove e_{1i} indica l'eccentricità accidentale e L_i è la dimensione dell'impalcato perpendicolare rispetto l'azione sismica. Sotto queste ipotesi lo spostamento massimo di un piano qualsiasi nella direzione della forzante (forza sismica) non deve superare per più di un 20% lo spostamento medio degli impalcati.

7.1.2 Criteri di regolarità in elevazione

Per quanto riguarda la regolarità in elevazione le strutture devono soddisfare i seguenti criteri normativi come descritto nella norma UNI ENV 1998-1-2-1997:

1. Tutte le strutture di controvento, come nuclei irrigidenti, pareti e telai, si devono sviluppare senza interruzioni dalle fondazioni fino alla sommità dell'edificio o fino alla sommità della rispettiva parte allorché fossero presenti arretramenti a differenti altezze.
2. Sia la rigidezza laterale che la massa di ogni piano deve rimanere costante o ridursi gradualmente, senza brusche variazioni, dalla base alla sommità.
3. In edifici intelaiati il rapporto, tra la resistenza di un certo impalcato e quella richiesta dalla analisi, non deve variare troppo tra piani successivi.
4. Allorché fossero presenti degli arretramenti, si devono applicare le seguenti disposizioni:
 - (a) nel caso di arretramenti gradualmente che conservino la simmetria assiale, l'arretramento ad un certo piano in una data direzione non deve essere maggiore del 20% della dimensione in pianta del piano precedente nella medesima direzione come mostrato nelle *figure 7.1a,b*;

- (b) nel caso di un unico arretramento entro il 15%, partendo dal basso, dell'altezza totale del sistema strutturale principale, esso non deve essere maggiore del 50% della dimensione in pianta del piano precedente come mostrato in *figura 7.1c*. In tal caso, la prima parte della struttura che cade nel perimetro descritto dagli impalcati dopo l'arretramento deve essere progettata in modo da sopportare almeno il 75% delle forze orizzontali di taglio che si svilupperebbero in tale zona in un analogo edificio senza la base allargata.
- (c) nel caso in cui gli arretramenti non conservassero la simmetria, la somma degli arretramenti di tutti i piani in una data direzione non deve essere maggiore del 30% della corrispondente dimensione in pianta del primo piano ed i singoli arretramenti non devono essere maggiori del 10% della dimensione in pianta del piano precedente come mostrato in *figura 7.1d*.

Per quanto riguarda il caso studio in esame si sono considerate le ipotesi di strutture regolari sia in pianta che in elevazione, in modo tale da poter utilizzare modelli piani e analisi semplificate.

7.2 Calcolo matrice di rigidezza [K]

Durante il lavoro di tesi si sono utilizzate due diverse matrici di rigidezza nella soluzione delle strutture in esame, in particolare la prima matrice di rigidezza che si è considerata è di tipo lineare, cioè presenta un andamento lineare all'aumentare dei piani e dell'altezza della struttura, la seconda è di tipo quadratico, cioè segue una legge quadratica all'aumentare dei piani e dell'altezza della struttura.

7.2.1 Matrice di rigidezza lineare [K_{lin}]

Una volta stabilita la massa di ogni piano delle strutture Shear-Type in esame, che nel nostro caso studio è stato considerato pari a $m = 1000 \frac{Ns^2}{m}$, è possibile tramite le formule inverse del problema agli autovalori descritte in seguito ricavare i valori dei singoli elementi che compongono la matrice [K_{lin}].

$$d = \left(\det \begin{bmatrix} k - w_s^2 m & -k & 0 & \cdots & 0 \\ -k & 2k - w_s^2 m & \ddots & & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & -k_n \\ 0 & \cdots & 0 & -k_n & 2k_n - w_s^2 m \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (7.3)$$

dove w_s^2 è il quadrato della pulsazione naturale della struttura considerata.

$$[K_{lin}] = \begin{bmatrix} k & -k & 0 & \cdots & 0 \\ -k & 2k & \ddots & & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & -k_n \\ 0 & \cdots & 0 & -k_n & 2k_n \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

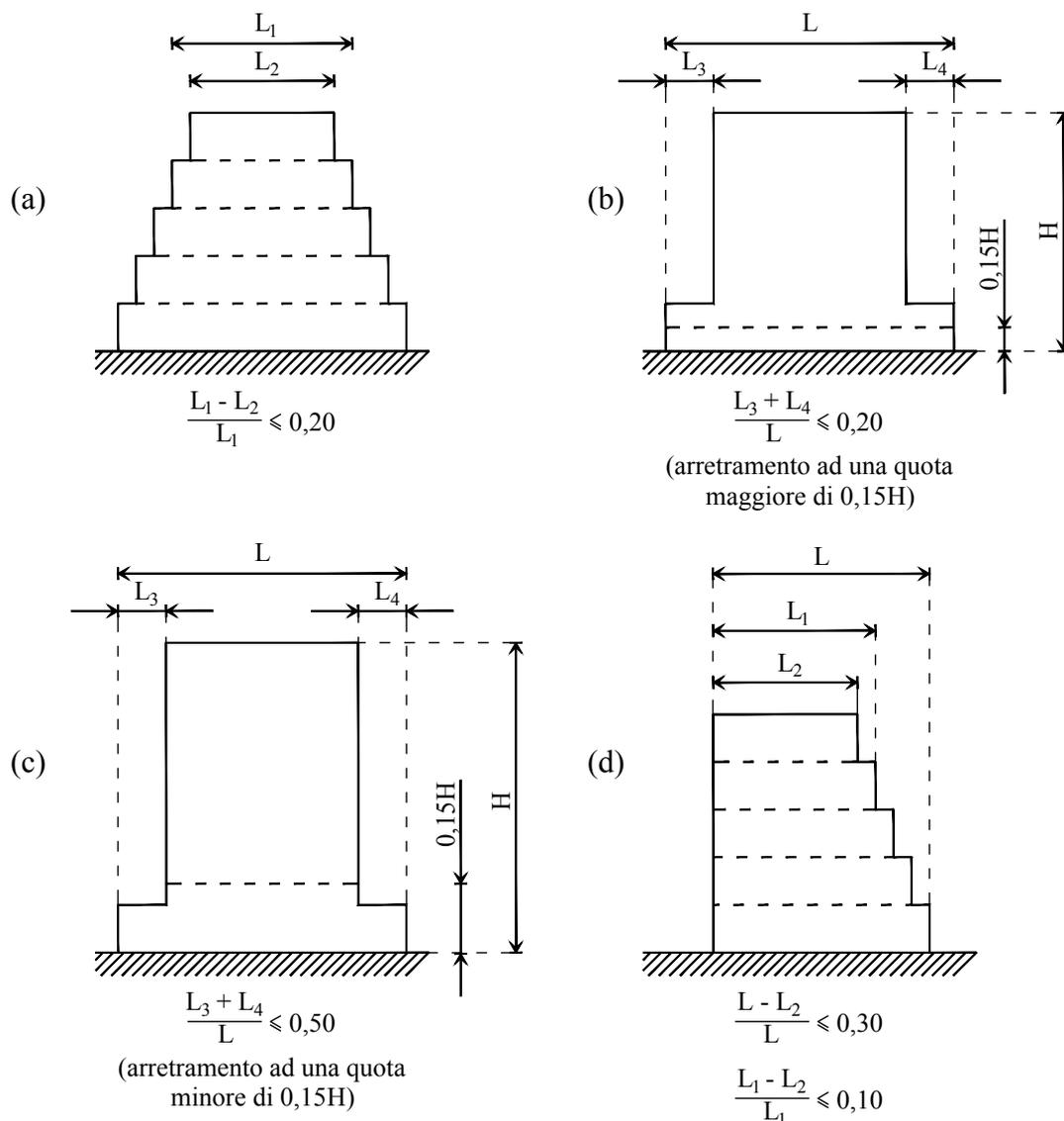


Figura 7.1: Schemi regolarità in elevazione.

Attraverso l'equazione 7.3 si ricavano i possibili valori di k , dopodichè si andrà a prendere il massimo di quei valori e tramite l'equazione 7.4 è possibile ricavare la matrice di rigidezza lineare $[K_{lin}]$ della nostra struttura in esame. La matrice risulterà essere una matrice tridiagonale e avrà la dimensione pari al numero di piani del telaio in esame.

7.2.2 Matrice di rigidezza quadratica $[K_{quadr}]$

Come già accennato precedentemente in questo lavoro di tesi si è utilizzata una seconda matrice di rigidezza, avente una legge di interpolazione quadratica. Da un punto di vista fisico è più corretto visto che man mano che la struttura sale in altezza la rigidezza diminuisce, infatti ciò avviene anche nella realtà dove le sezioni dei pilastri e delle travi all'ultimo piano avranno una sezione minore rispetto alle

travi e ai pilastri del piano più basso. Questo principio costruttivo è dovuto al fatto che i piani superiori devono reggere e sostenere meno peso. Nella *figura 7.2* viene rappresentata la legge quadratica sperimentale utilizzata che è espressa dalla seguente relazione:

$$\frac{k_i}{k_1} = 1,023 - 0,018x - 0,009x^2 \quad (7.5)$$

dove:

- k_i è l' i -esimo elemento della matrice di rigidezza $[K_{quadr}]$;
- k_1 è il primo elemento sulla diagonale della matrice di rigidezza $[K_{quadr}]$;
- x , è la variabile che in questo caso indica il numero di piani della struttura considerata.

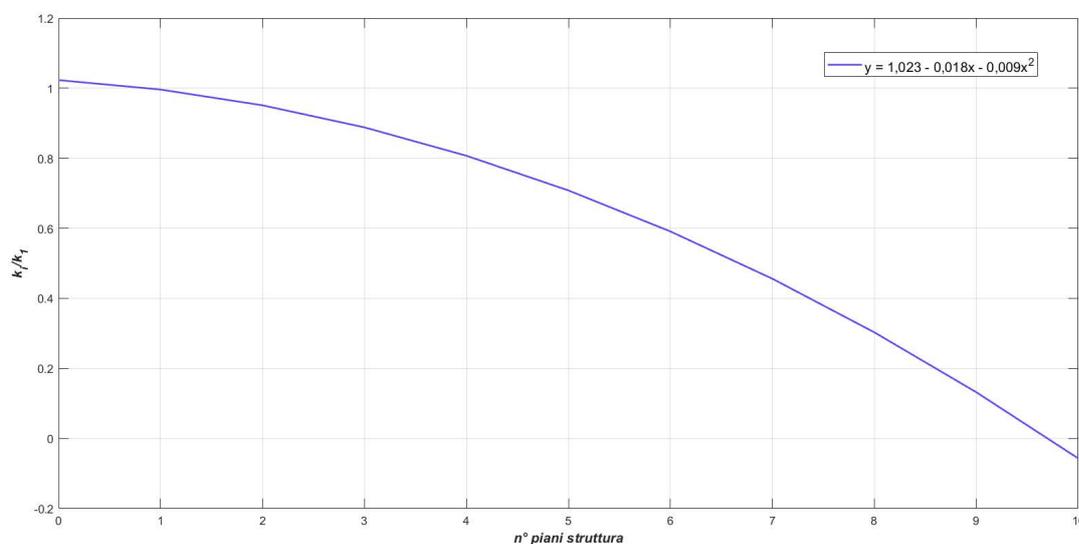


Figura 7.2: Legge di interpolazione quadratica utilizzata.

La trattazione per ricavare la matrice di rigidezza $[K_{quadr}]$ risulta essere uguale alla trattazione utilizzata per il calcolo della matrice di rigidezza $[K_{lin}]$, quello che cambia è la composizione degli elementi al suo interno. Si indica con $f_k(i)$ la legge di interpolazione quadratica all' i -esimo step (o piano) considerato:

$$f_k(i) = (1,023 - 0,018x_i - 0,009x_i^2)k_1^* \quad (7.6)$$

La matrice di rigidezza $[K_{quadr}]$ è quindi composta da:

$$[K_{quadr}] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & \cdots & 0 \\ -k_1 & k_2 & -k_2 & & \\ 0 & -k_2 & k_3 & -k_3 & \vdots \\ & & -k_3 & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & -k_n \\ 0 & \cdots & 0 & & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

dove:

- $k_1 = k_1^*$;
- $k_2 = k_1 + f_k(2)$;
- $k_3 = f_k(2) + f_k(3)$
- $k_4 = f_k(3) + f_k(4)$
- $k_n = f_k(n - 1) + f_k(n)$

Per poter ricavare la matrice bisogna calcolarsi il valore di k_1^* , dal quale dipendono tutti gli elementi della matrice appena descritta, pertanto si utilizzerà di nuovo la trattazione inversa descritta già nel calcolo della matrice di rigidezza lineare $[K_{lin}]$ ma stavolta si terrà conto anche dell'interpolazione quadratica presente all'interno degli elementi pertanto si ottiene:

$$d = \left(\det \begin{bmatrix} k_1 - w_s^2 m & -k_1 & 0 & \dots & 0 \\ -k_1 & k_2 - w_s^2 m & -k_2 & & \\ 0 & -k_2 & k_3 - w_s^2 m & -k_3 & \vdots \\ & & -k_3 & \ddots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \ddots & -k_n \\ 0 & \dots & 0 & & -k_n & k_n - w_s^2 m \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (7.8)$$

Dalla soluzione dell'equazione 7.8 si ottengono i valori della variabile k_1^* , anche in questo caso si prende il massimo valore e si ricava la matrice di rigidezza quadratica $[K_{quadr}]$ descritta nella formula 7.7.

Capitolo 8

Caso studio

8.1 Caratteristiche e modelli considerati

Il presente studio vuole esaminare l'influenza del moto del suolo sull'isolatore FPS, impiegato come sistema di isolamento di elementi non strutturali, come ad esempio possono essere le tamponature. Lo scopo è quello di capire quali possano essere le proprietà meccaniche ottimali per i dispositivi di isolamento FPS. La valutazione di queste proprietà è stata effettuata considerando una formulazione non-dimensionale che ha implicato l'assunzione del rapporto tra PGA (Peak Ground Acceleration) e PGV (Peak Ground Velocity) come parametro del moto del suolo. In tale studio sono stati considerati dieci modelli 2D Shear-Type, rappresentanti dieci strutture diverse aventi periodi fondamentali di vibrazione differenti e prestabiliti. I periodi considerati vanno da $T_s = 0,1s$ per la prima struttura, $T_s = 0,2s$ per la seconda struttura, $T_s = 0,3s$ per la terza struttura, fino ad arrivare alla decima struttura con un periodo $T_s = 1s$. Una volta stabilito il periodo proprio di ogni struttura è possibile, così come viene descritto nella normativa UNI ENV-1998-1-2-1997 Appendice C, ricavare l'altezza dell'edificio in esame tramite la formula inversa:

$$T_s = C_t H^{3/4} \Rightarrow H = \left(\frac{T_s}{C_t} \right)^{4/3} \quad (8.1)$$

dove :

- C_t , è un coefficiente adimensionale che tiene conto del tipo di telaio utilizzato e ha come valori:
 - $C_t = 0,085$, per telai spaziali di acciaio a nodi rigidi;
 - $C_t = 0,075$, per telai spaziali di cemento armato a nodi rigidi e per controventi eccentrici;
 - $C_t = 0,050$, per tutte le altre strutture.
- H , è l'altezza dell'edificio espressa in metri (m).

L'equazione 8.1 è valida sotto l'ipotesi di edifici regolari in altezza, e per edifici con un'altezza fino a 80 m, pertanto è possibile utilizzarla nel nostro caso studio, nel quale viene utilizzato il coefficiente $C_t = 0,075$ dal momento che le strutture considerate sono in cemento armato. In questo modo sapendo il periodo proprio (T_s)

di ogni struttura è stato possibile ricavare l'altezza (H) e, avendo posto un'altezza interpiano $h_{piano} = 3,5m$, il numero di piani di ogni struttura. In alcuni casi l'altezza della struttura risultava minore dell'altezza interpiano, in questi casi abbiamo comunque considerato un piano nel modello Shear-Type. Fatte queste premesse i dieci modelli Shear-Type che vengono analizzati nel nostro caso studio sono rappresentati nelle *figure 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5* e possiamo dire che rappresentano le strutture intelaiate esistenti in cemento armato più diffuse e di maggior rilevanza per l'analisi. Come si può notare tramite l'equazione 8.1, le altezze delle nostre strutture risultano decimali e indicate con il termine H_{cal} , cioè altezze di calcolo, tali altezze sono state approssimate in modo tale da avere un numero intero di piani e pertanto le altezze effettive delle strutture risultano essere indicate tramite il termine H_{eff} , mostrato nelle *figure 8.1, 8.2, 8.3, 8.4 e 8.5*.

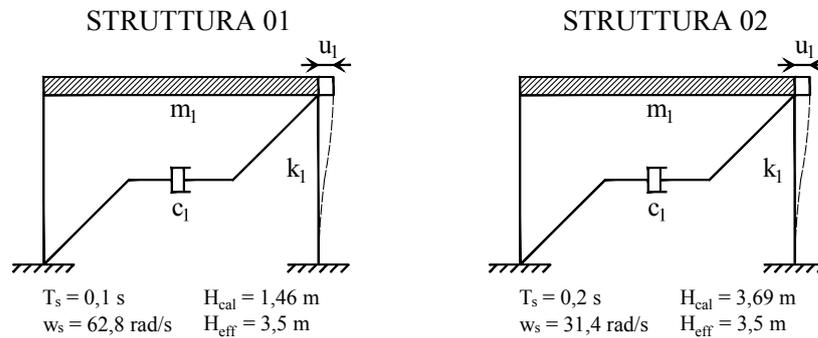


Figura 8.1: Modelli Shear-Type Strutture 01-02.

8.2 Tipologie di terremoti considerati

Nel lavoro di tesi per poter investigare l'influenza del moto del suolo sulle proprietà ottimali d'attrito da inserire nel sistema di isolamento FPS, sono state considerate due diverse famiglie di terremoti, rappresentanti rispettivamente i sismi Far-Field e i sismi Near-Fault. Queste due categorie di terremoti si differenziano sia per la loro distanza dall'epicentro del terremoto come mostrato nella *figura 8.6*, sia per i loro effetti sulle costruzioni esistenti. Infatti le onde sismiche hanno caratteristiche diverse in base alla quantità di terreno che devono attraversare e, a parità di altri fattori, le onde che giungono in superficie ad una modesta distanza epicentrale (Near-Fault, fino a 25 km) producono effetti di entità superiore rispetto alle onde che giungono ad elevata distanza epicentrale (Far-Field, oltre 150 km).

Le onde sismiche si attenuano all'aumentare della distanza epicentrale, infatti, se nelle vicinanze dell'epicentro si possono avere gravi danni sulle costruzioni, con l'aumentare della distanza, si riscontra una diminuzione dei danni sulle costruzioni come mostrato in *figura 8.7*; la legge che regola questa diminuzione prende il nome di legge di attenuazione e, nel corso degli anni, numerosi autori ne hanno proposto diverse interpretazioni.

In questo lavoro di tesi inoltre i sismi Far-Field sono stati suddivisi in tre set in base al proprio rapporto $PGA(g)/PGV$, per poter valutare ulteriormente gli effetti provocati da sismi di entità diversa:

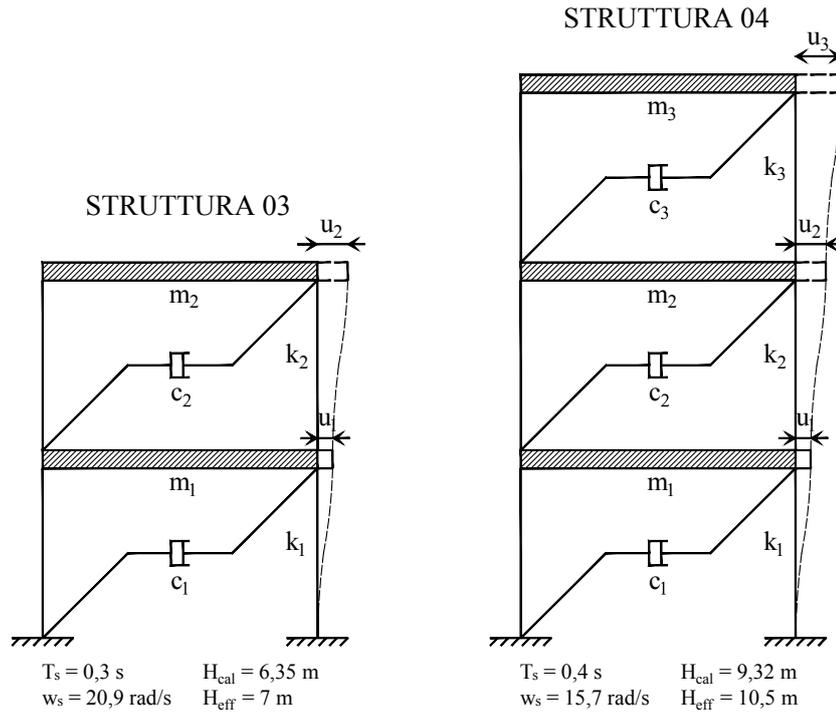


Figura 8.2: Modelli Shear-Type Strutture 03-04.

- 1°set, rapporto $PGA(g)/PGV > 1,2$;
- 2°set, rapporto $0,8 < PGA(g)/PGV < 1,2$;
- 3°set, rapporto $PGA(g)/PGV < 0,8$.

Vengono elencati nelle *tabelle 8.1, 8.2 e 8.3* i tre set di sismi Far-Field appena citati con le proprie caratteristiche, mentre nella *tabella 8.4* vengono invece elencati i sismi Near-Fault considerati.

Tabella 8.1: Tabella Sismi Far-Field corrispondenti a valori alti di PGA/PGV [$PGA(g)/PGV > 1,2$]

Nome	Data	Magn.	Sito	Dist. Epic.(km)	PGA(g)	PGV(m/s)	PGA(g)/PGV
Parkfield California	27/06/1966	5.6	Temblor No. 2	7	0.269	0.145	1.86
Parkfield California	27/06/1966	5.6	Cholame, Shandon No. 5	5	0.434	0.255	1.70
San Francisco California	22/03/1957	5.25	Golden Gate Park	11	0.105	0.046	2.28
San Francisco California	23/03/1957	5.25	State Bldg., S.F.	17	0.085	0.051	1.67
Helena Montana	31/10/1935	6	Carroll College	8	0.146	0.072	2.03
Lytle Creek	12/09/1970	5.4	Wrightwood, California	15	0.198	0.096	2.06
Oroville California	01/08/1975	5.7	Seismogr. Station Oroville	13	0.084	0.044	1.91
San Fernando California	09/02/1971	6.4	Pacomia Dam	4	1.075	0.577	1.86
San Fernando California	09/02/1971	6.4	Lake Hughes, Station 4	26	0.146	0.085	1.72
Nahanni N.W.T. Canada	23/12/1985	6.9	Site 1, Iverson	7.5	1.101	0.462	2.38
Central Honshu Japan	26/02/1971	5.5	Yoneyama Bridge	27	0.151	0.059	2.56
Near E. Coast of Honshu Japan	11/05/1972	5.8	Kushiro Central Wharf	33	0.146	0.060	2.43
Honshu Japan	05/04/1966	5.4	Hoshina-A	4	0.270	0.111	2.43
Monte Negro Yugoslavia	09/04/1979	5.4	Albatros Hotel, Ulcinj	12.5	0.042	0.016	2.63
Banja Luka Yugoslavia	13/08/1981	6.1	Seism. Station, Banja Luka	8.5	0.074	0.032	2.31

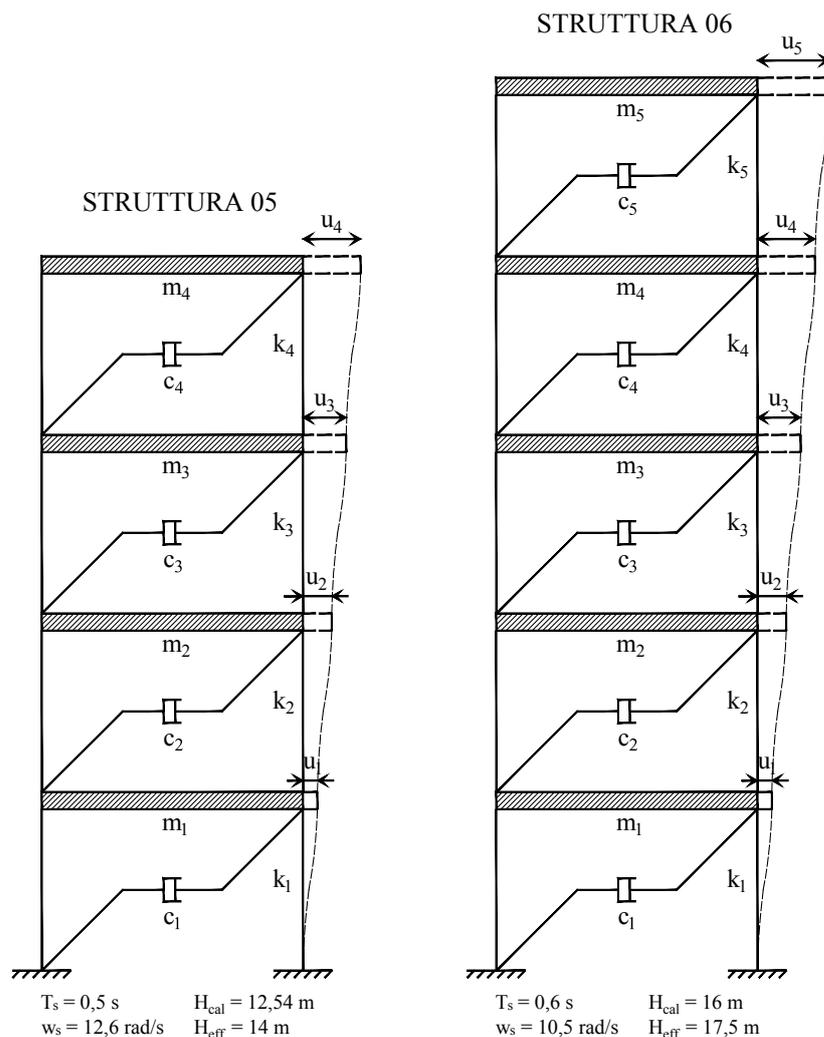


Figura 8.3: Modelli Shear-Type Strutture 05-06.

Tabella 8.2: Tabella Sismi Far-Field corrispondenti a valori intermedi di PGA/PGV [$0,8 < \text{PGA}(\text{g})/\text{PGV} < 1,2$]

Nome	Data	Magn.	Sito	Dist. Epic.(km)	PGA(g)	PGV(m/s)	PGA(g)/PGV
Imperial Valley California	18/05/1940	6.6	El Centro	8	0.348	0.334	1.04
Kern County California	21/07/1952	7.6	Taft Lincoln School Tunnel	56	0.179	0.177	1.01
Kern County California	21/07/1952	7.6	Taft Lincoln School Tunnel	56	0.156	0.157	0.99
Borrego Mtn. California	08/04/1968	6.5	San Onofre SCE Power Plant	122	0.046	0.042	1.10
Borrego Mtn. California	08/04/1968	6.5	San Onofre SCE Power Plant	122	0.041	0.037	1.11
San Fernando California	09/02/1971	6.4	3838 Lankershim Blvd., L.A.	24	0.150	0.149	1.01
San Fernando California	09/02/1971	6.4	Hollywood Storage P.E. Lot, L.A.	35	0.211	0.211	1.00
San Fernando California	09/02/1971	6.4	3407 6th Street, L.A.	39	0.165	0.166	0.99
San Fernando California	09/02/1971	6.4	Griffith Park Observatory, L.A.	31	0.180	0.205	0.88
San Fernando California	09/02/1971	6.4	234 Figueroa St., L.A.	41	0.199	0.167	1.19
Near E. Coast of Honshu Japan	16/11/1974	6.1	Kashima Harbor Works	38	0.070	0.072	0.97
Near E. Coast of Honshu Japan	02/08/1971	7	Kushiro Central Wharf	196	0.078	0.068	1.15
Monte Negro Yugoslavia	15/04/1979	7	Albatros Hotel, Ulcinj	17	0.171	0.194	0.88
Mexico Earthq.	19/09/1985	8.1	El Suchil, Guerrero Array	230	0.105	0.116	0.91
Mexico Earthq.	19/09/1985	8.1	La Villita, Guerrero Array	44	0.123	0.105	1.17

8.3 Analisi dei telai Shear-Type

L'analisi dei telai Shear-Type, identificanti le strutture in esame, sono state eseguite considerando le due matrici di rigidità lineare e quadratica, $[K_{lin}]$ e $[K_{quadr}]$,

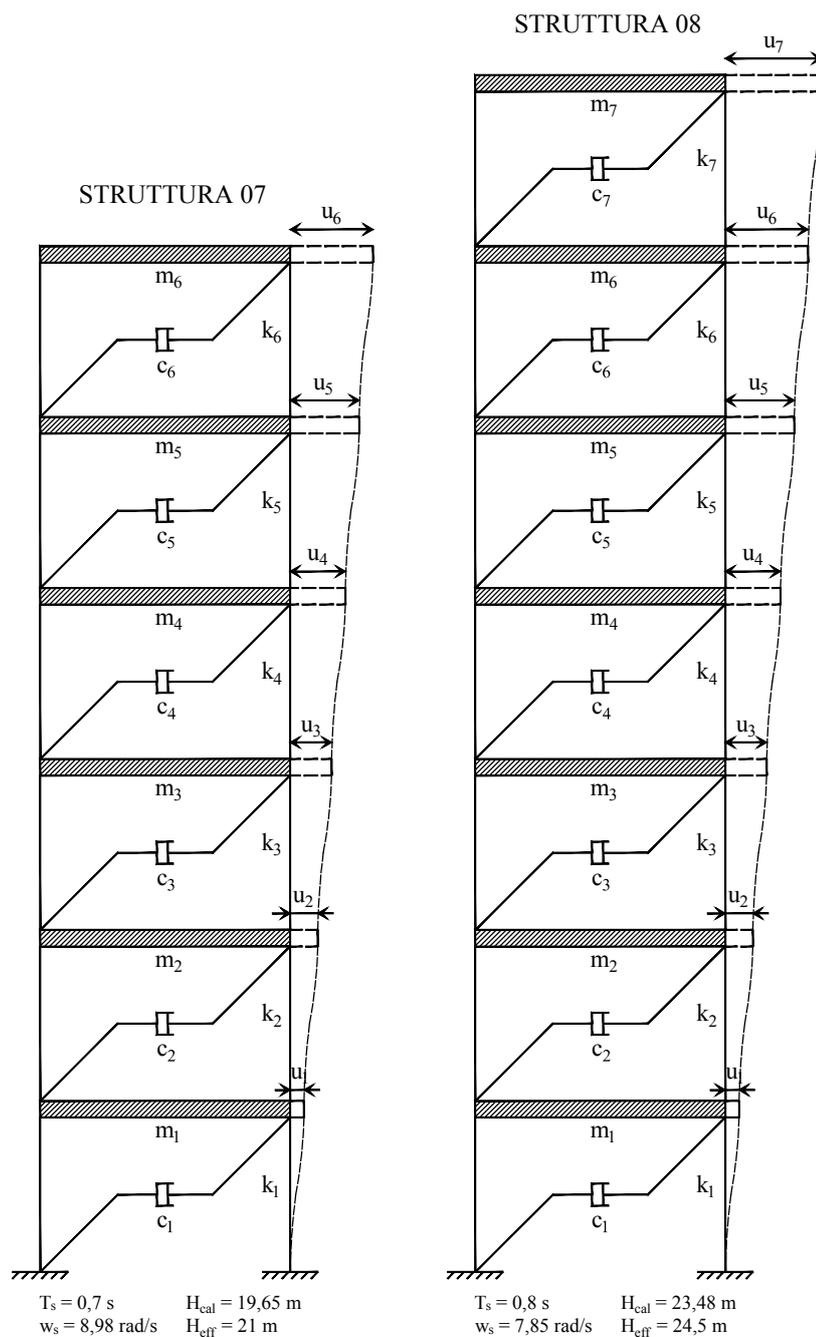


Figura 8.4: Modelli Shear-Type Strutture 07-08.

descritte nel *capitolo 7.2*, e la matrice di smorzamento $[C]$ secondo il modello di Wilson, descritto nel *capitolo 4.3*. L'analisi è stata eseguita per tutti i Sismi in esame, suddivisi come descritto nelle *tabelle 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4*, sia con Intensity Measure (IM) non normalizzata, sia con Intensity Measure (IM) normalizzata e pari a 1. Per quanto riguarda l' IM normalizzata si fa riferimento a due normalizzazioni, la prima secondo lo spettro di risposta e la seconda rispetto la PGA (Peak Ground Acceleration).

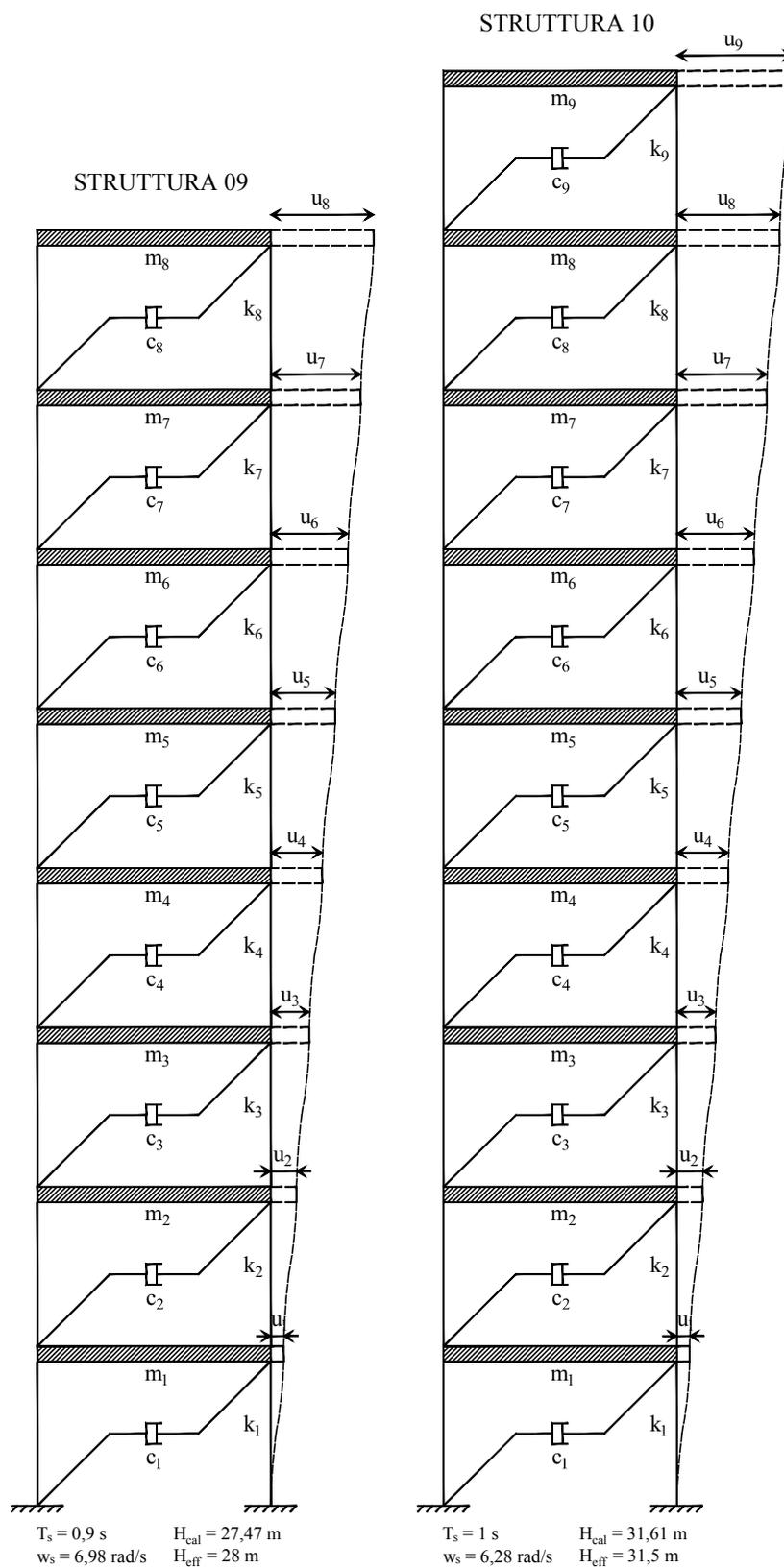


Figura 8.5: Modelli Shear-Type Struttura 09-10.

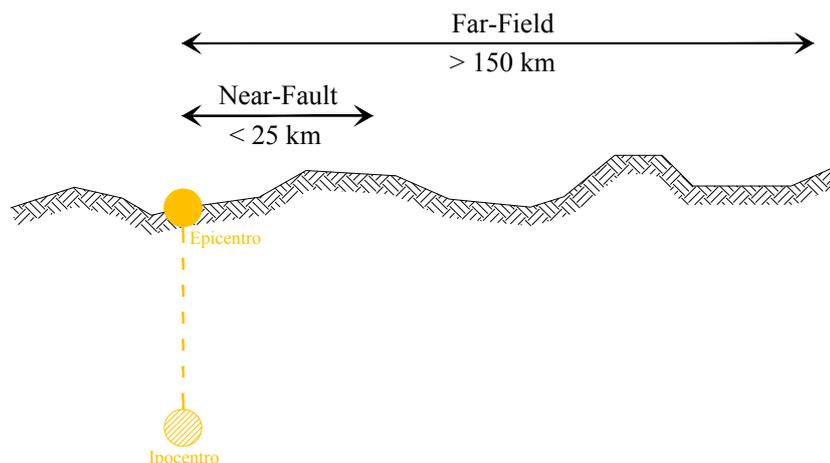


Figura 8.6: Distanze epicentrali sismi FF e NF.

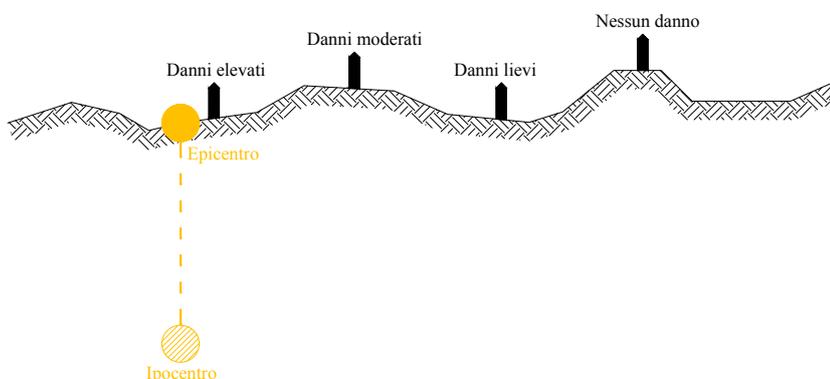


Figura 8.7: Attenuazione delle onde sismiche con l'aumento della distanza.

Tabella 8.3: Tabella Sismi Far-Field corrispondenti a valori bassi di PGA/PGV [PGA(g)/PGV < 0,8]

Nome	Data	Magn.	Sito	Dist. Epic.(km)	PGA(g)	PGV(m/s)	PGA(g)/PGV
Long Beach California	10/03/1933	6.3	Subway Terminal, L.A.	59	0.097	0.237	0.41
Long Beach California	10/03/1933	6.3	Subway Terminal, .A.	59	0.064	0.173	0.37
Lower Calif.	30/12/1934	6.5	El Centro	58	0.160	0.209	0.77
San Fernando California	09/02/1971	6.4	2500 Wilshire Blvd., L.A.	40	0.101	0.193	0.52
San Fernando California	09/02/1971	6.4	3550 Wilshire Blvd., L.A.	39	0.132	0.216	0.61
San Fernando California	09/02/1971	6.4	222 Figueroa St., L.A.	41	0.129	0.186	0.69
San Fernando California	09/02/1971	6.4	3470 Wilshire Blvd., L.A.	39	0.114	0.186	0.61
San Fernando California	09/02/1971	6.4	4680 Wilshire Blvd., L.A.	38	0.117	0.215	0.54
San Fernando California	09/02/1971	6.4	445 Figueroa St., L.A.	41	0.119	0.173	0.69
San Fernando California	09/02/1971	6.4	Hollywood Storage L.A.	32	0.106	0.170	0.62
Near E. Coast of Honshu Japan	16/05/1968	7.9	Muroran Harbor	290	0.226	0.334	0.68
Near E. Coast of Honshu Japan	17/06/1973	7.4	Kushiro Central Wharf	112	0.205	0.275	0.75
Mexico Earthq.	19/09/1985	8.1	Zihuatenejo, Guerrero Array	135	0.103	0.159	0.65
Mexico Earthq.	19/09/1985	8.1	Teacalco, Cuerrero Array	333	0.052	0.074	0.70
Mexico Earthq.	19/09/1985	8.1	Mesa Vibradora C.U., Mexico City	379	0.040	0.110	0.36

8.3.1 Sismi con IM non normalizzata

L'Intensity Measure (*IM*) nel contesto riguardante la *Performance-Based Earthquake Engineering* (PBEE) denota l'intensità sismica di un determinato evento sismico. Tale valore per un dato sito è affetto da numerose variabili come la distanza dall'epicentro, la magnitudo e le condizioni locali del sito, che includono il tipo di terreno, la velocità di propagazione, il coefficiente di amplificazione e altri

Tabella 8.4: Tabella Sismi Near-Fault.

Nome	Data	Magn.	Sito	Dist.	Epic.(km)	PGA(g)	PGV(m/s)	PGA(g)/PGV
Imperial Valley-06	1979	6.53	Subway Terminal, L.A.	7.31		0.180	0.545	0.33
Imperial Valley-06	1979	6.53	Subway Terminal, L.A.	0.07		0.378	1.150	0.33
Imperial Valley-06	1979	6.53	El Centro	7.05		0.357	0.779	0.46
Imperial Valley-06	1979	6.53	El Centro	3.95		0.375	0.915	0.41
Imperial Valley-06	1979	6.53	El Centro	1.35		0.442	1.119	0.39
Imperial Valley-06	1979	6.53	El Centro	0.56		0.462	1.088	0.42
Imperial Valley-06	1979	6.53	El Centro	3.86		0.468	0.486	0.96
Imperial Valley-06	1979	6.53	El Centro	5.09		0.417	0.596	0.70
Morgan Hill	1984	6.19	El Centro	0.53		0.814	0.623	1.31
Loma Prieta	1989	6.93	El Centro	9.96		0.294	0.308	0.95
Loma Prieta	1989	6.93	El Centro	3.88		0.944	0.970	0.97
Landers	1992	7.28	El Centro	2.19		0.704	1.406	0.50
Landers	1992	7.28	El Centro	23.62		0.236	0.566	0.42
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	5.43		0.617	0.674	0.92
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	5.43		0.518	0.674	0.77
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	5.92		0.724	1.203	0.60
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	5.48		0.426	0.878	0.49
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	6.50		0.870	1.672	0.52
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	5.35		0.594	1.303	0.46
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	5.19		0.828	1.136	0.73
Northridge-01	1994	6.69	El Centro	5.30		0.733	1.227	0.60
Kobe, Japan	1995	6.90	El Centro	0.96		0.854	0.963	0.89
Kobe, Japan	1995	6.90	El Centro	0.27		0.645	0.726	0.89
Kocaeli, Turkey	1999	7.51	El Centro	10.92		0.241	0.512	0.47
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	El Centro	3.14		0.664	0.777	0.85
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	El Centro	9.96		0.383	0.753	0.51
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	El Centro	3.78		0.286	0.461	0.62
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	El Centro	0.66		0.375	1.655	0.23
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	El Centro	5.97		0.224	0.409	0.55
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	El Centro	5.30		0.157	0.604	0.26
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	3470 WilshireBlvd, L.A.	0.32		0.564	1.846	0.31
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	4680 WilshireBlvd, L.A.	0.91		0.331	0.886	0.37
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	445 Figueroa St., L.A.	2.76		0.310	0.678	0.46
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Hollywood Storage, L.A.	5.18		0.235	0.578	0.41
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Murooran Harbour	7.00		0.127	0.437	0.29
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Kushiro Central Wharf	2.13		0.212	0.684	0.31
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Zihuatenejo, Guarrero Array	1.51		0.295	1.090	0.27
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Teacalco, Cuerrero Array	6.10		0.133	0.621	0.21
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Teacalco, Cuerrero Array	9.35		0.224	0.424	0.53
Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	Mesa Vibradora C.U., Mexico City	9.96		0.303	0.676	0.45

parametri. In questa analisi l'IM considerata, non venendo normalizzata secondo un dato valore prestabilito, risulta essere quella propria del terremoto e del sito in esame.

8.3.2 Sismi con IM normalizzata tramite lo spettro di risposta

L'analisi in questo caso è stata effettuata normalizzando i sismi secondo lo spettro di risposta, i dati di input sono:

- T_s , periodo proprio della struttura;
- $w_s = \frac{2\pi}{T_s}$, la pulsazione propria della struttura in esame;
- $\xi_s = 0,05$, lo smorzamento della struttura pari al 5%;
- $\{\ddot{u}_g\}_i$, vettore delle accelerazioni del sisma i-esimo in esame;
- dt_i , tempo di campionamento (step) dell'i-esimo sisma in esame.

Le condizioni iniziali considerate sono:

- $PSA = 0$, che indica l'accelerazione di picco spettrale (Peak Spectrum Acceleration) inizialmente viene considerata nulla;
- $u_0 = 0$;
- $\dot{u}_0 = 0$;
- $\ddot{u}_0 = -\ddot{u}_{g,i}(1) - 2\xi_s w_s \dot{u}_0 - w_s^2 u_0$, dove $-\ddot{u}_{g,i}(1)$ indica il primo termine del vettore delle accelerazioni dell' i -esimo sisma.

Una volta impostate le condizioni iniziali tramite un ciclo *FOR* all'interno dello script di Matlab si sono calcolate le variazioni di spostamento, velocità e accelerazione tramite le seguenti formule:

$$A = w_s^2 + \frac{4}{dt_i} \xi_s w_s + \frac{4}{dt_i^2} \quad (8.2)$$

$$B = 4 \left(\xi_s w_s + \frac{4}{dt_i^2} \right) \quad (8.3)$$

$$du_i = \frac{[(-\ddot{u}_{g,i}(i) - \ddot{u}_{g,i}(i-1)) + B\dot{u}_{i-1} + 2\ddot{u}_{i-1}]}{A} \quad (8.4)$$

$$d\dot{u}_i = \frac{2du_i}{dt_i} - 2\dot{u}_{i-1} \quad (8.5)$$

$$d\ddot{u}_i = 4 \frac{(du_i - \dot{u}_{i-1} dt_i)}{dt_i^2} - 2\ddot{u}_{i-1} \quad (8.6)$$

dove i termini A e B sono due costanti di integrazione. Una volta calcolate le variazioni degli spostamenti, delle velocità e delle accelerazioni di ogni sisma considerato è possibile ricavare gli spostamenti, le velocità e le accelerazioni normalizzate:

$$u_i = u_{i-1} + du_i \quad (8.7)$$

$$\dot{u}_i = \dot{u}_{i-1} + d\dot{u}_i \quad (8.8)$$

$$\ddot{u}_i = \ddot{u}_{i-1} + d\ddot{u}_i \quad (8.9)$$

Infine si ricava la *PSA* (Peak Spectrum Acceleration) di ogni sisma tramite la seguente relazione:

$$PSA_i = \max(PSA = 0; |u| w_s^2) \quad (8.10)$$

Una volta ricavato la *PSA* di ogni sisma in esame, si normalizza il suo accelerogramma secondo il valore prefissato di Intensity Measure che in questo studio è stato fissato pari a $IM = 1$, questa operazione la si esegue tramite la formula seguente:

$$\{\ddot{u}_{g,PSA_i}\}_i = \frac{\{\ddot{u}_g\}_i IM}{PSA_i} \quad (8.11)$$

dove $\{\ddot{u}_{g,PSA_i}\}_i$, rappresenta il vettore delle accelerazioni, normalizzate secondo lo spettro di risposta, con IM unitaria dell' i -esimo sisma considerato.

8.3.3 Sismi con IM normalizzata tramite la PGA

L'analisi in questo caso è stata effettuata normalizzando gli accelerogrammi in esame rispetto alla PGA (Peak Ground Acceleration), avente come descritto in precedenza una Intensity Measure unitaria ($IM = 1$). Tale normalizzazione è caratterizzata dalle seguenti relazioni:

$$PGA_i = \max(|\{\ddot{u}_g\}_i|) \quad (8.12)$$

$$\{\ddot{u}_{g,PGA_i}\}_i = \frac{\{\ddot{u}_g\}_i IM}{PGA_i} \quad (8.13)$$

dove l'equazione 8.12 permette di ricavare la PGA di ogni sisma considerato, mentre l'equazione 8.13, analoga all'equazione 8.11, permette di calcolare il vettore delle accelerazioni, normalizzate secondo la PGA, con IM unitaria dell'i-esimo sisma considerato.

8.4 Analisi del sistema isolato composto dall'isolatore FPS e dalla tamponatura

L'analisi del sistema isolato è stata effettuata considerando il modello mostrato in figura 8.8, che mostra un metro lineare di tamponatura isolata tramite un dispositivo FPS posizionato alla base.

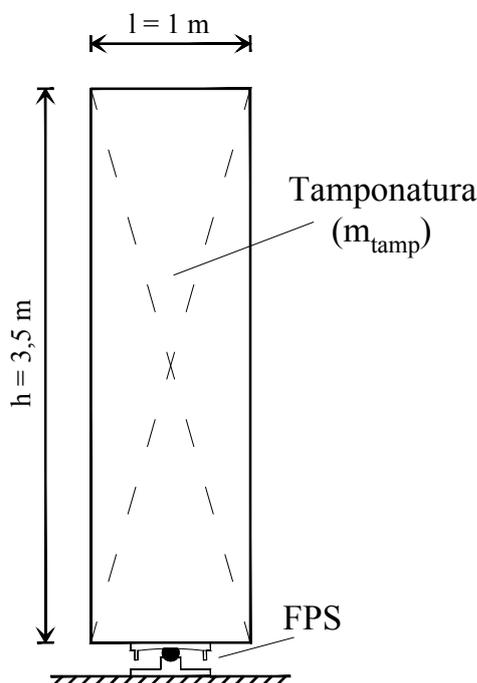


Figura 8.8: Modello sistema isolato.

L'analisi è stata effettuata, per entrambe le tipologie di tamponatura considerate, tramite il modello *MATLAB-Simulink* descritto nella sezione 5.4 e tramite

la formulazione adimensionalizzata del problema descritta nella *sezione 6.1*; considerando i tre set di sismi FF (Far-Field) sia in modo separato che insieme, i sismi NF (Near-Fault) e infine considerando la totalità dei sismi in esame (Caratteristiche dei sismi riportate nelle *Tabelle 8.1, 8.2, 8.3, 8.4*). Tramite questa analisi si ricavano gli spostamenti adimensionalizzati del sistema isolato denominati con $\psi_s(\tau)$ in funzione del rapporto tra il periodo dell'isolatore rispetto al periodo del moto del suolo $\frac{T_b}{T_g}$, e del parametro adimensionalizzato Π_μ , che misura la rigidezza dell'isolatore per mezzo del coefficiente di attrito. In particolare vengono assunti i seguenti vettori, all'interno dello scrip di Matlab, per analizzare i due parametri descritti in precedenza :

- $\frac{T_b}{T_g} = [0,1 ; 0,5 : 0,5 : 4 ; 6 : 2 : 16]$, quindi è un vettore composto dal valore 0,1, in seguito ha un passo di 0,5 tra i valori 0,5 e 4 e infine un passo di 2 tra i valori 6 e 16; per un totale di 15 valori complessivi.
- $\Pi_\mu = [0 : 0,005 : 0,5 ; 0,55 : 0,05 : 2]$, è un vettore che ha inizialmente un passo di 0,005 tra i valori 0 e 0,5, mentre ha un passo di 0,05 tra i valori 0,55 e 2; per un totale di 131 valori.

Per ogni valore di $\frac{T_b}{T_g}$, assunto come valore fisso, l'analisi è stata effettuata per ogni valore del parametro Π_μ , in modo tale da avere le risposte massime degli spostamenti adimensionalizzati $\psi_s(\tau)$ in una matrice di dimensioni [15x131]. Nella *sezione 9.4* vengono riportati i grafici in 3D che rappresentano i risultati inerenti all'analisi appena descritta, nei quali l'output sarà una superficie essendo l'analisi dipendente dai due parametri descritti in precedenza. Una volta che si sono ottenuti tali grafici tridimensionali, lo scopo dello studio è stato quello di ottenere i valori ottimali di attrito dell'isolatore FPS. Pertanto andando a sezionare i grafici tridimensionali tramite dei piani verticali aventi il rapporto $\frac{T_b}{T_g}$ costante, si sono ottenuti i grafici bidimensionali ($\Pi_\mu ; \psi_s(\tau)$), dove per ogni valore del rapporto $\frac{T_b}{T_g}$ è rappresentata una curva per un totale di quindici curve.

Successivamente si è impostato un valore di soglia per ogni grafico ($\Pi_\mu ; \psi_s(\tau)$) in modo tale da trovare il punto di minore pendenza di ogni curva al suo interno, tramite la seguente espressione:

$$(\psi_s^{i+1} - \psi_s^i) \leq s \quad (8.14)$$

dove s è il valore di soglia impostato. Tutti i punti trovati sono poi stati interpolati tramite la regressione con legge di potenza descritta nella *sezione 6.3.1* in modo da massimizzare il parametro $R - square$ della regressione, in questo modo è stato possibile trovare la legge che descrive il coefficiente di attrito ottimale adimensionalizzato Π_μ^{Opt} . In seguito si sono ricavati i grafici ($\frac{T_b}{T_g} ; \Pi_\mu^{Opt}$) tramite l'intersezione tra la curva di regressione e le curve aventi il rapporto $\frac{T_b}{T_g}$ costante, tali grafici consentono di ricavare immediatamente il coefficiente di attrito ottimale del dispositivo FPS sapendo il rapporto tra il periodo naturale dell'isolatore FPS e il periodo di vibrazione del suolo, quest'ultimo nel nostro caso è rappresentato dal periodo di vibrazione di ogni piano dei telai Shear-Type esaminati. Vengono riportati di seguito i valori di soglia e i parametri R-square dei grafici ($\Pi_\mu ; \psi_s(\tau)$):

Tabella 8.5: Tabella Sismi Far-Field: valori di soglia e parametro R-square

Tipologia terremoti	Statistica	Tamponatura	Soglia (s)	R-square
Sismi FF	Val. Medio	Monostrato	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,83948
Sismi FF	Val. Medio	Pluristrato	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,89301
Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Monostrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,85993
Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Pluristrato	$0,5 \cdot 10^{-5}$	0,83514
Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Monostrato	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,88848
Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Pluristrato	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,92351
Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Monostrato	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,70311
Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Pluristrato	$1,4 \cdot 10^{-5}$	0,77857

Tabella 8.6: Tabella 1°set Sismi Far-Field: valori di soglia e parametro R-square

Tipologia terremoti	Statistica	Tamponatura	Soglia (s)	R-square
1°set Sismi FF	Val. Medio	Monostrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,85133
1°set Sismi FF	Val. Medio	Pluristrato	$0,7 \cdot 10^{-5}$	0,82656
1°set Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Monostrato	$0,4 \cdot 10^{-5}$	0,81696
1°set Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Pluristrato	$0,5 \cdot 10^{-5}$	0,83918
1°set Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Monostrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,85310
1°set Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Pluristrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,89704
1°set Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Monostrato	$0,9 \cdot 10^{-5}$	0,72587
1°set Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Pluristrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,75856

Tabella 8.7: Tabella 2°set Sismi Far-Field: valori di soglia e parametro R-square

Tipologia terremoti	Statistica	Tamponatura	Soglia (s)	R-square
2°set Sismi FF	Val. Medio	Monostrato	$1,7 \cdot 10^{-5}$	0,84710
2°set Sismi FF	Val. Medio	Pluristrato	$2,1 \cdot 10^{-5}$	0,74660
2°set Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Monostrato	$0,72 \cdot 10^{-5}$	0,70318
2°set Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Pluristrato	$0,94 \cdot 10^{-5}$	0,70175
2°set Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Monostrato	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,70844
2°set Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Pluristrato	$1,9 \cdot 10^{-5}$	0,71047
2°set Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Monostrato	$2,9 \cdot 10^{-5}$	0,74522
2°set Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Pluristrato	$3,6 \cdot 10^{-5}$	0,75413

Tabella 8.8: Tabella 3°set Sismi Far-Field: valori di soglia e parametro R-square

Tipologia terremoti	Statistica	Tamponatura	Soglia (s)	R-square
3°set Sismi FF	Val. Medio	Monostrato	$0,4 \cdot 10^{-5}$	0,71312
3°set Sismi FF	Val. Medio	Pluristrato	$0,5 \cdot 10^{-5}$	0,74501
3°set Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Monostrato	$0,4 \cdot 10^{-5}$	0,76483
3°set Sismi FF	$P_{16}(\%)$	Pluristrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,77330
3°set Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Monostrato	$0,7 \cdot 10^{-5}$	0,74540
3°set Sismi FF	$P_{50}(\%)$	Pluristrato	$0,5 \cdot 10^{-5}$	0,77261
3°set Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Monostrato	$0,38 \cdot 10^{-5}$	0,70515
3°set Sismi FF	$P_{84}(\%)$	Pluristrato	$0,4 \cdot 10^{-5}$	0,84195

Tabella 8.9: Tabella Sismi Near-Fault: valori di soglia e parametro R-square

Tipologia terremoti	Statistica	Tamponatura	Soglia (s)	R-square
Sismi NF	Val. Medio	Monostrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,87430
Sismi NF	Val. Medio	Pluristrato	$0,9 \cdot 10^{-5}$	0,87732
Sismi NF	$P_{16}(\%)$	Monostrato	$0,51 \cdot 10^{-5}$	0,70674
Sismi NF	$P_{16}(\%)$	Pluristrato	$0,61 \cdot 10^{-5}$	0,70298
Sismi NF	$P_{50}(\%)$	Monostrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,74388
Sismi NF	$P_{50}(\%)$	Pluristrato	$0,7 \cdot 10^{-5}$	0,73570
Sismi NF	$P_{84}(\%)$	Monostrato	$0,7 \cdot 10^{-5}$	0,95636
Sismi NF	$P_{84}(\%)$	Pluristrato	$1,0 \cdot 10^{-5}$	0,88882

Tabella 8.10: Tabella Sismi FF (Far-Field) + NF (Near-Fault): valori di soglia e parametro R-square

Tipologia terremoti	Statistica	Tamponatura	Soglia (s)	R-square
Sismi FF + NF	Val. Medio	Monostrato	$0,9 \cdot 10^{-5}$	0,89372
Sismi FF + NF	Val. Medio	Pluristrato	$0,9 \cdot 10^{-5}$	0,93003
Sismi FF + NF	$P_{16}(\%)$	Monostrato	$0,6 \cdot 10^{-5}$	0,86907
Sismi FF + NF	$P_{16}(\%)$	Pluristrato	$0,7 \cdot 10^{-5}$	0,88039
Sismi FF + NF	$P_{50}(\%)$	Monostrato	$0,9 \cdot 10^{-5}$	0,94104
Sismi FF + NF	$P_{50}(\%)$	Pluristrato	$0,8 \cdot 10^{-5}$	0,94987
Sismi FF + NF	$P_{84}(\%)$	Monostrato	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,88099
Sismi FF + NF	$P_{84}(\%)$	Pluristrato	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,91644

Capitolo 9

Risultati

9.1 Grafici inerenti all'analisi dei telai Shear-Type con IM non normalizzata

Si riportano i grafici inerenti all'analisi delle strutture Shear-Type effettuate sia per i tre set di sismi Far-Field (FF), sia per i sismi Near-Fault (NF), sia per entrambe le tipologie di sismi, considerando una IM non normalizzata. Un'ulteriore suddivisione è stata effettuata considerando prima la matrice di rigidezza $[K_{lin}]$ e successivamente la matrice di rigidezza quadratica $[K_{quadr}]$, questo per tutte le combinazioni di sismi considerate. Inoltre i valori rappresentati nei grafici corrispondono ai valori statistici e di dispersione descritti nell'analisi parametrica del problema, in particolare vengono rappresentati il sedicesimo percentile ($p_{16}(\%)$), il cinquantesimo percentile ($p_{50}(\%)$) e infine l'ottantaquattresimo percentile ($p_{84}(\%)$). Per ogni struttura sono state costruite due tipologie di grafici:

- **Tipologia 1**, grafici con $2\pi \frac{PA}{PV} - 2\pi \frac{PGA}{PGV} [\frac{rad}{s}]$ sull'asse delle ascisse e il n^o piani sull'asse delle ordinate;
- **Tipologia 2**, grafici con $\frac{PV}{PA} - \frac{PGV}{PGA} [s]$ sull'asse delle ascisse e il n^o piani sull'asse delle ordinate;

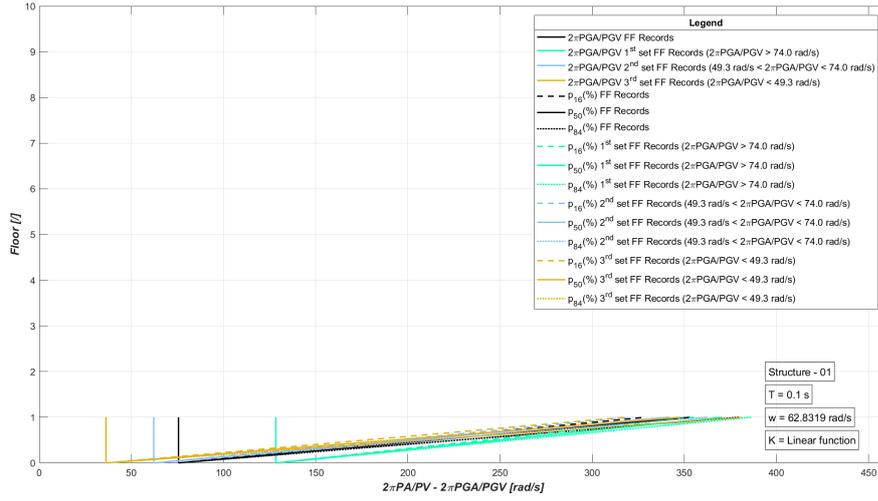


Figura 9.1: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

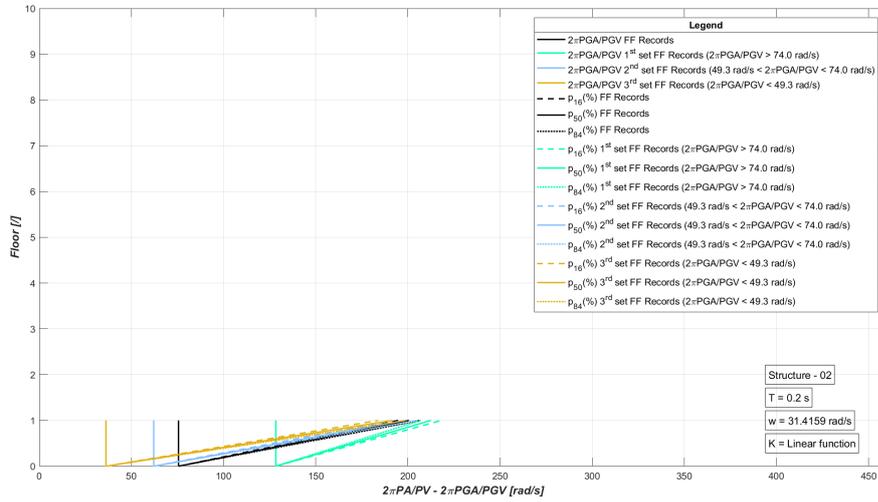


Figura 9.2: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

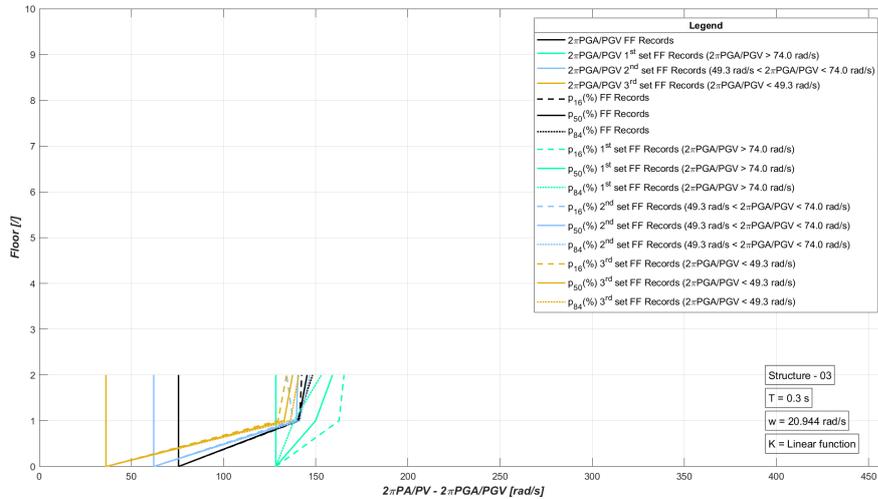


Figura 9.3: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

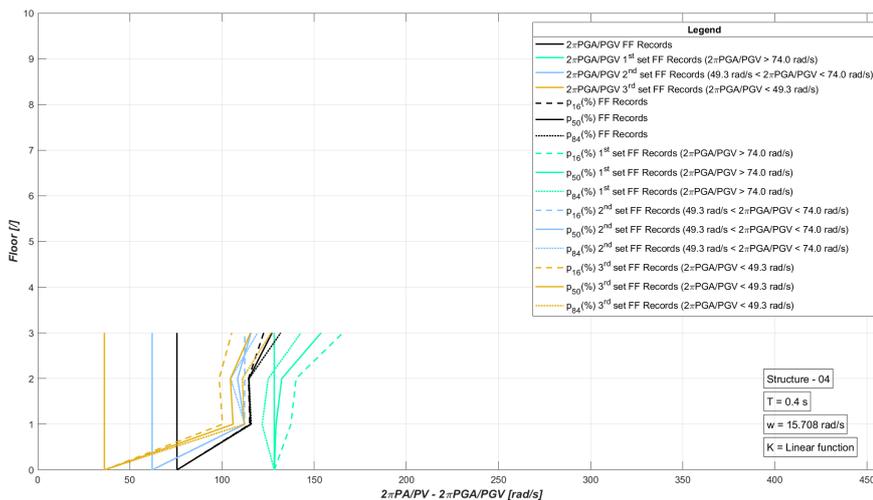


Figura 9.4: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

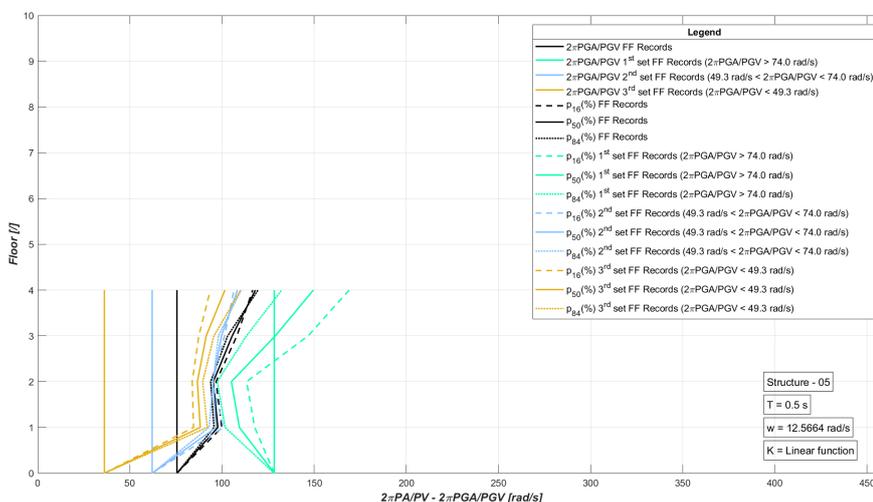


Figura 9.5: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

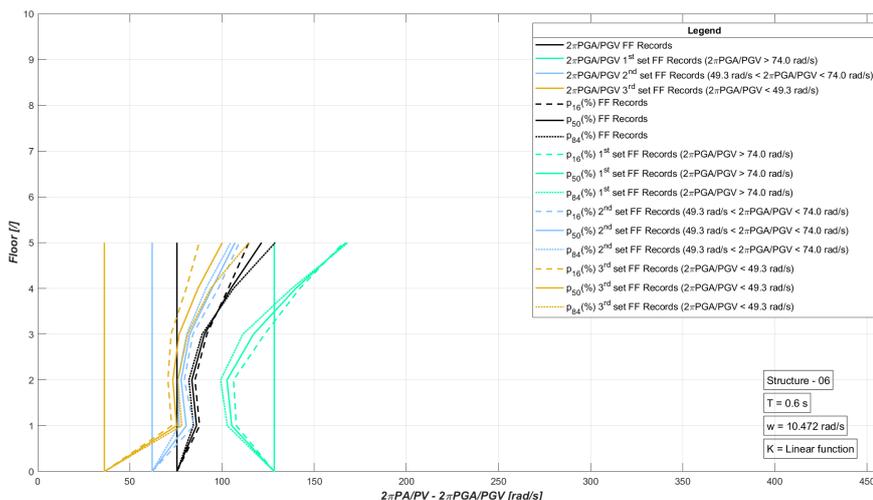


Figura 9.6: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

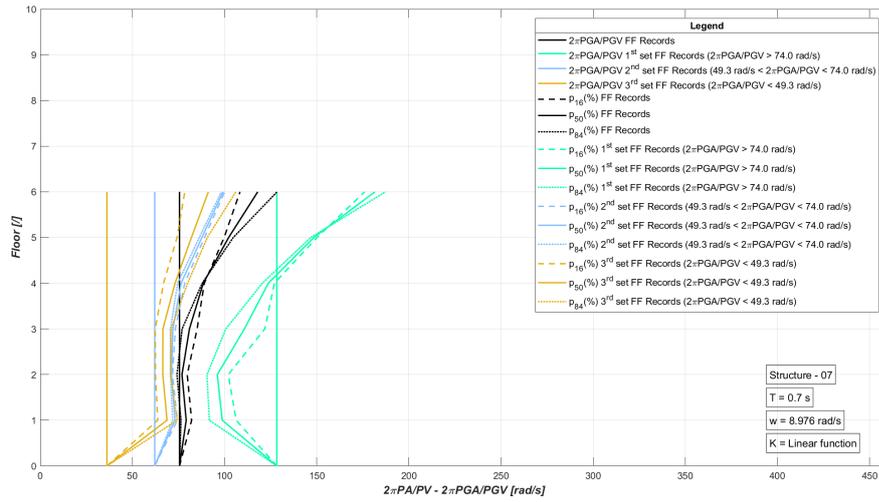


Figura 9.7: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

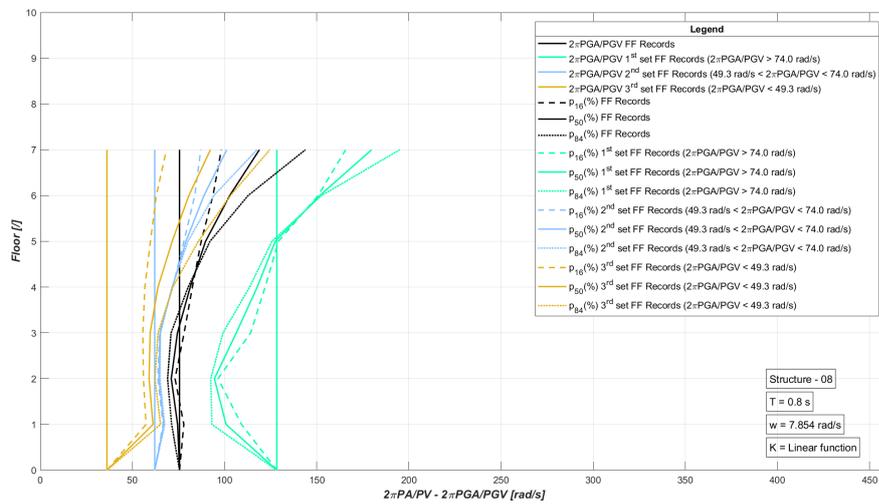


Figura 9.8: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

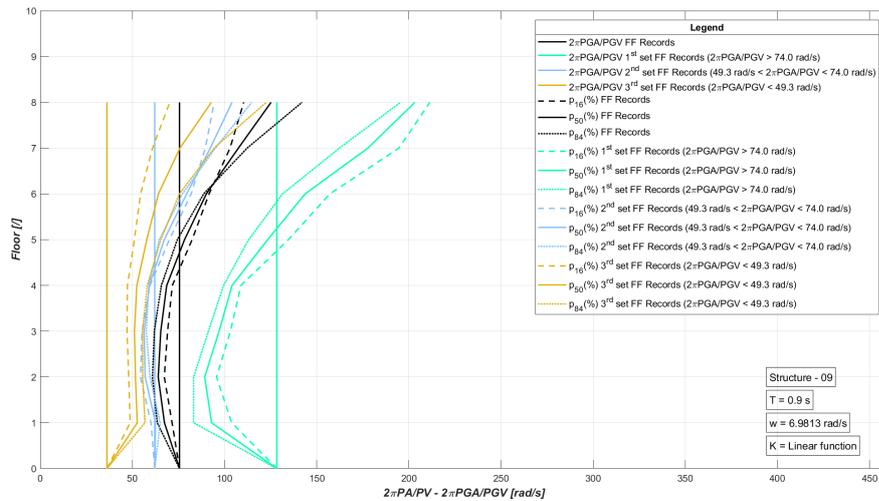


Figura 9.9: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

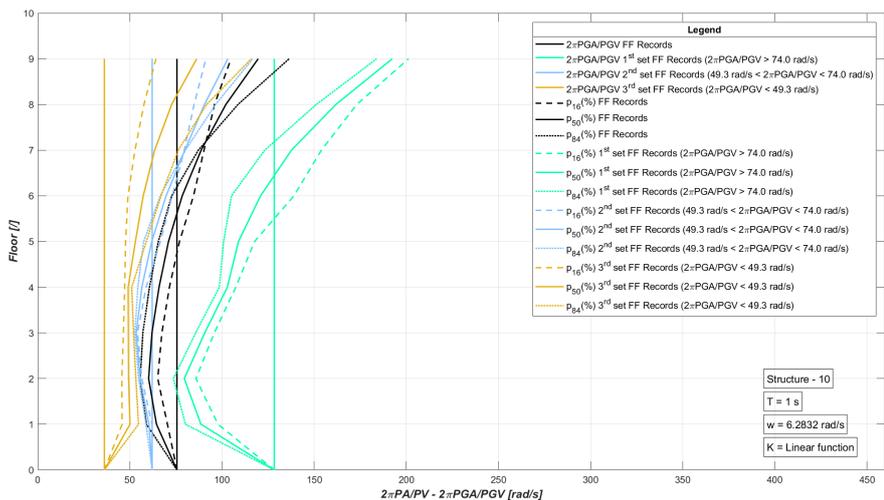


Figura 9.10: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

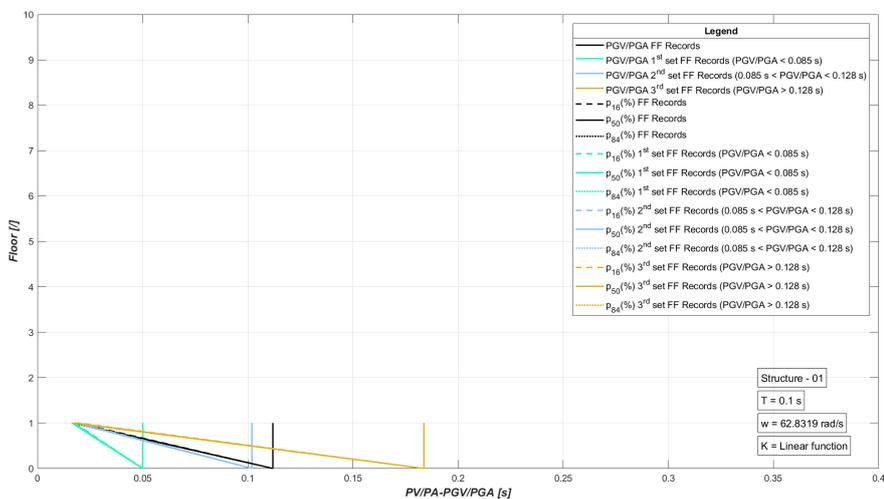


Figura 9.11: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

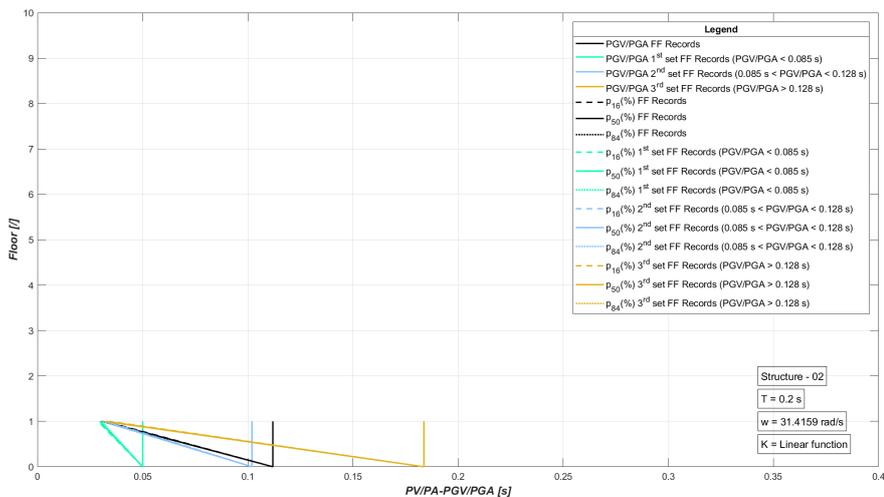


Figura 9.12: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

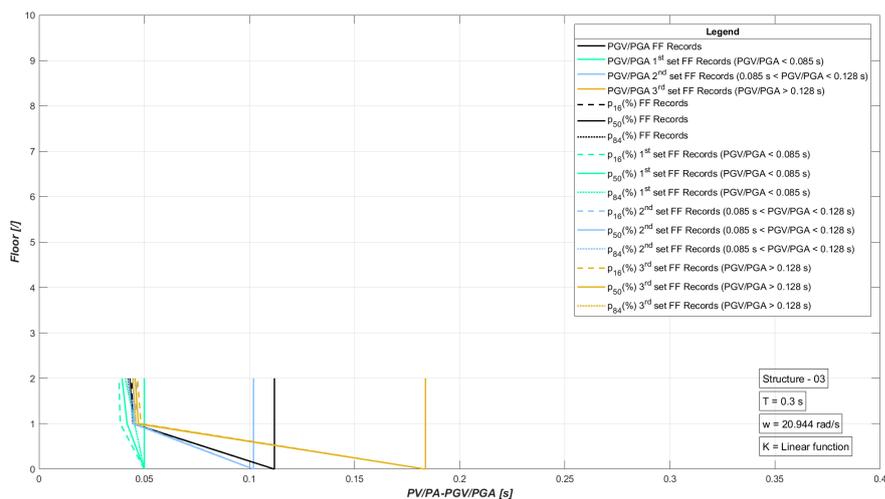


Figura 9.13: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

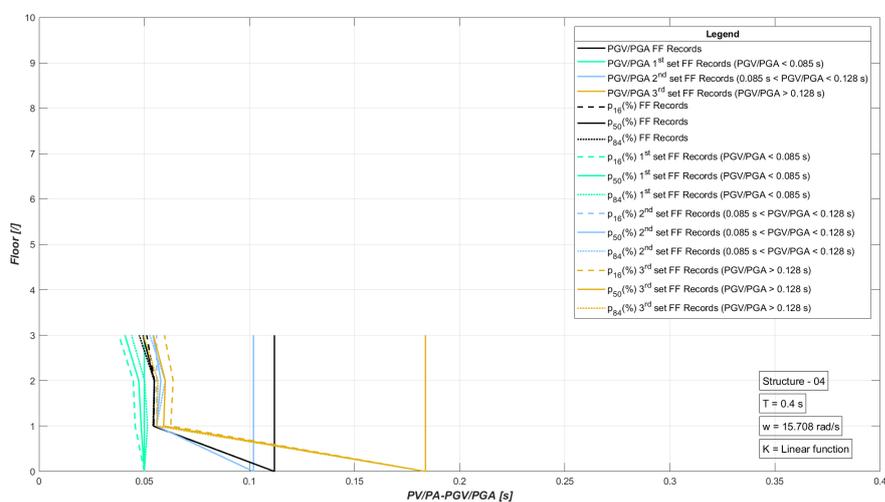


Figura 9.14: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

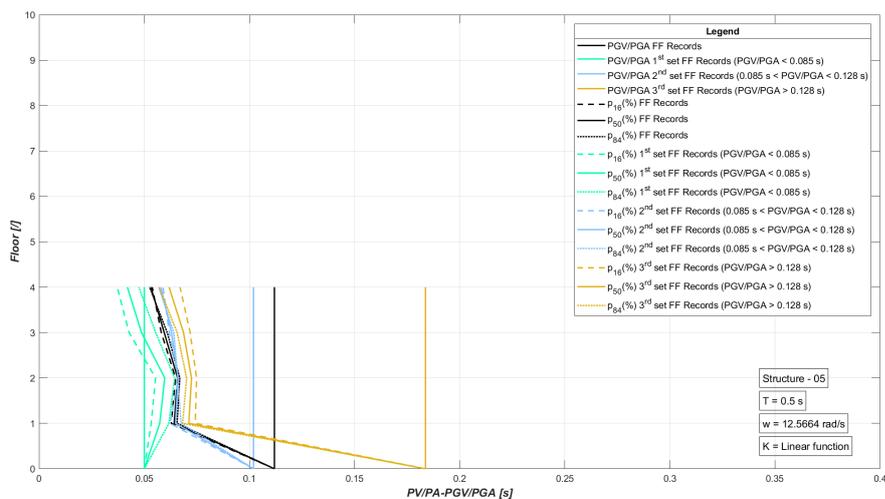


Figura 9.15: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

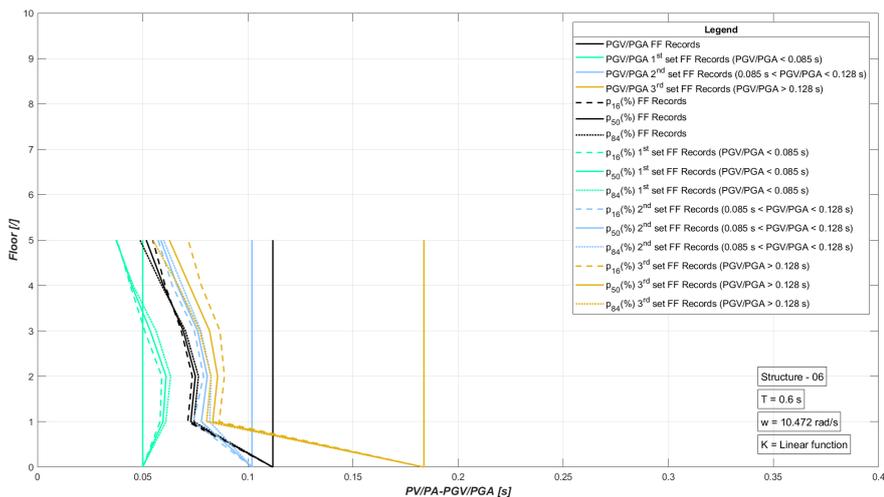


Figura 9.16: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

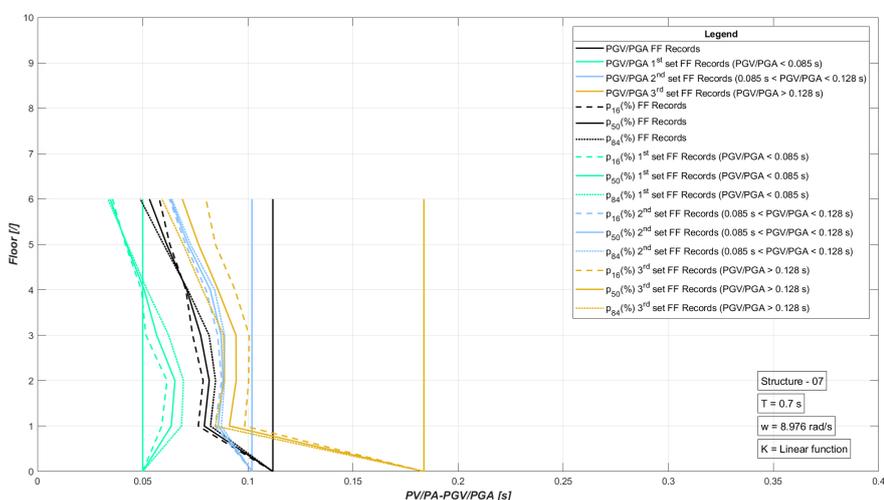


Figura 9.17: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

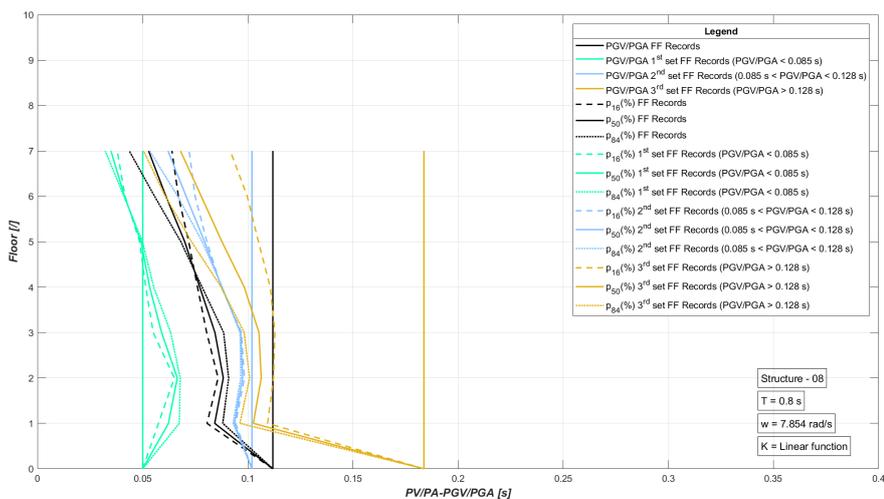


Figura 9.18: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

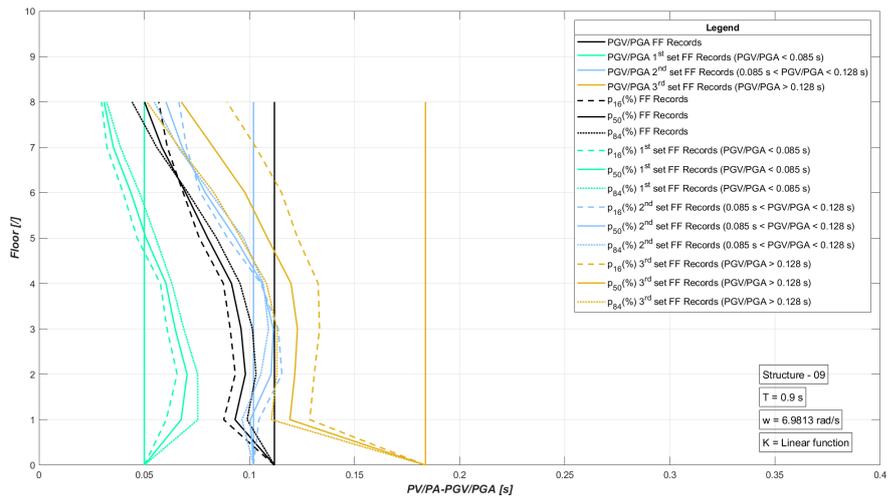


Figura 9.19: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

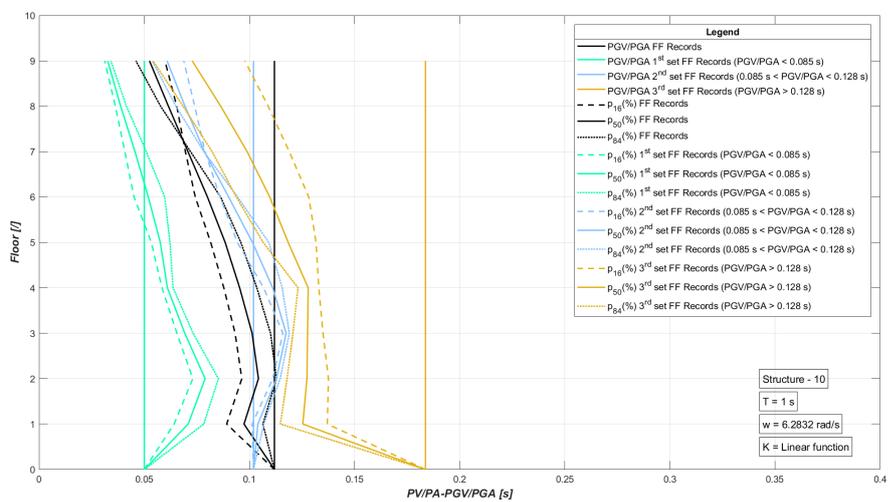


Figura 9.20: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

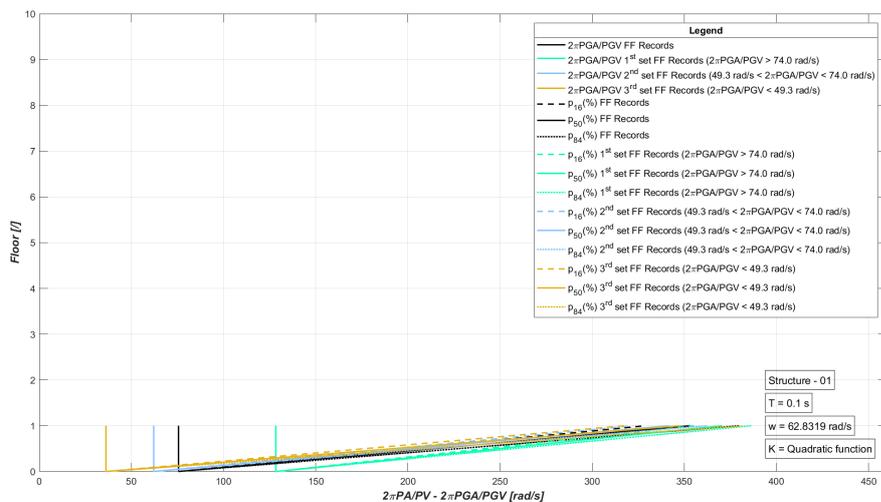


Figura 9.21: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

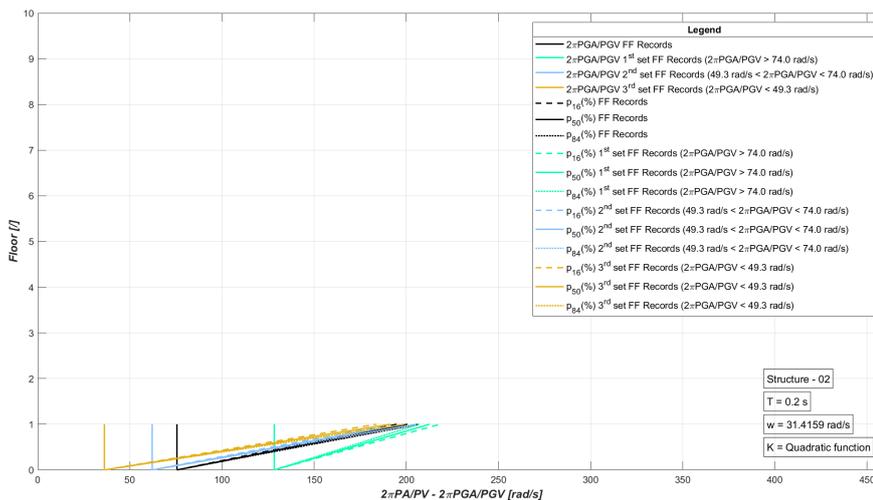


Figura 9.22: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 02.

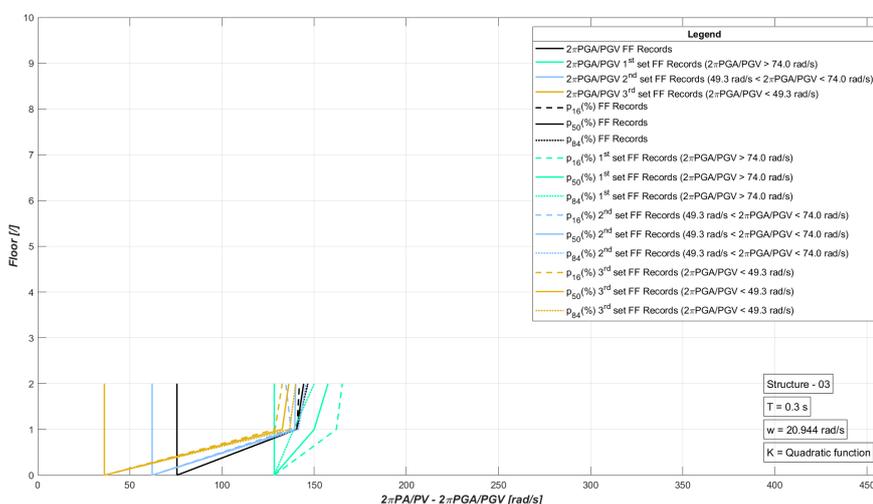


Figura 9.23: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 03.

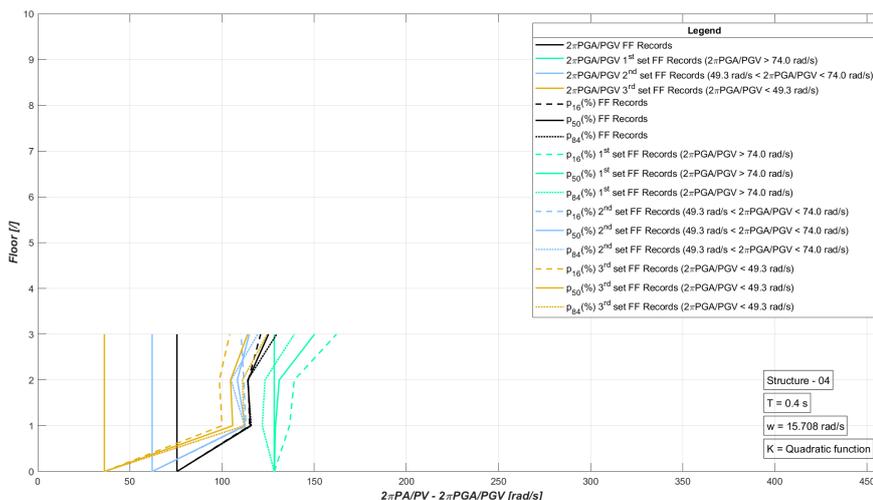


Figura 9.24: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

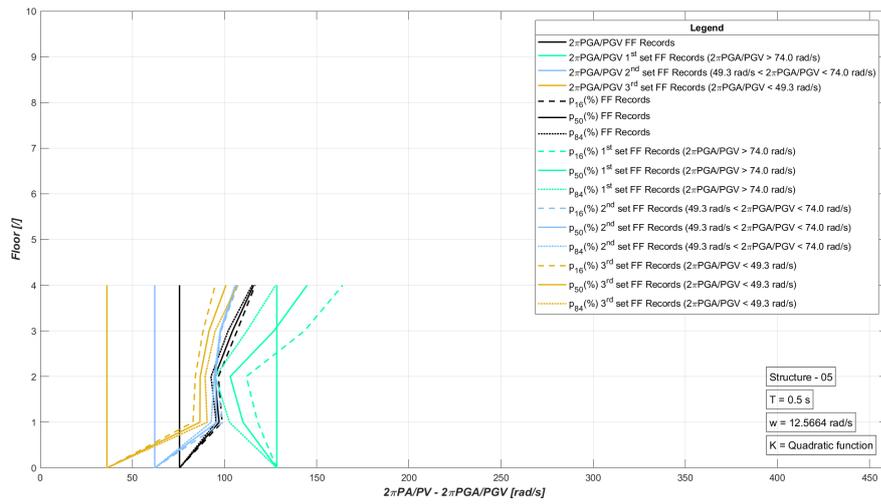


Figura 9.25: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

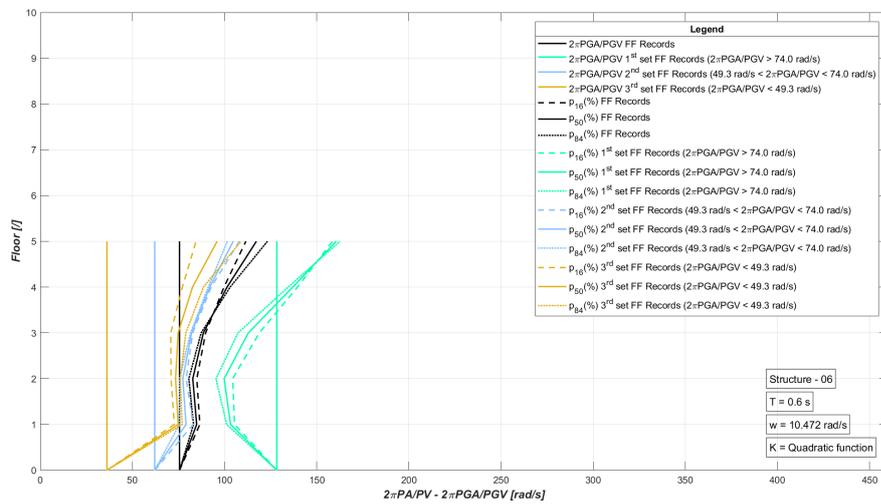


Figura 9.26: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

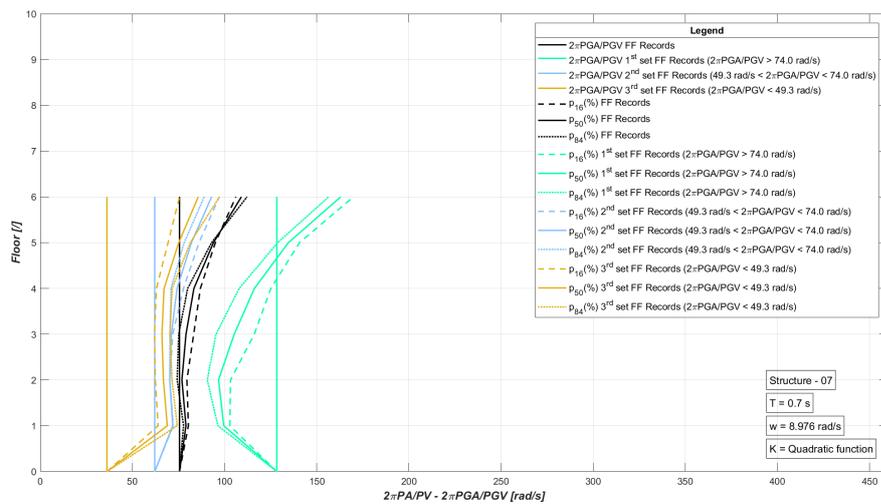


Figura 9.27: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

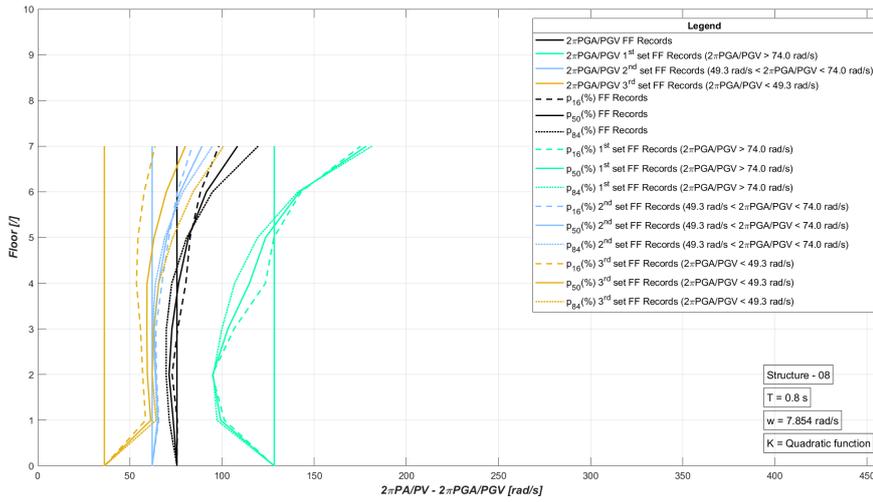


Figura 9.28: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

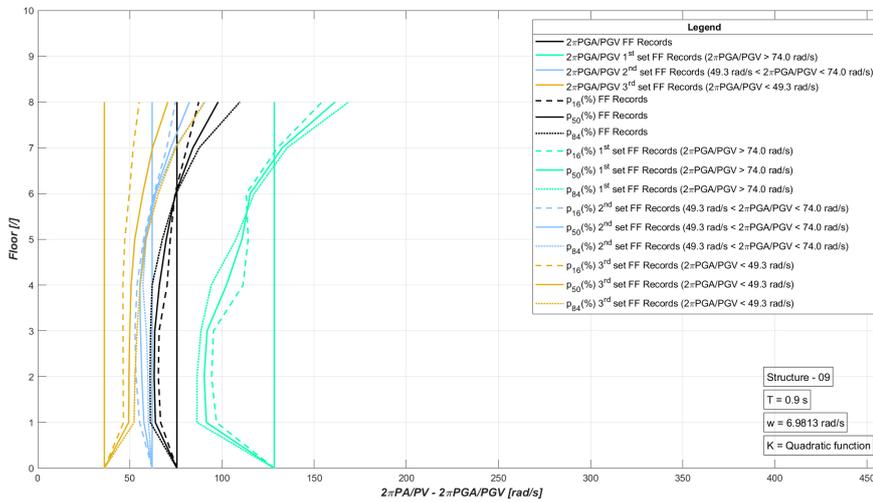


Figura 9.29: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

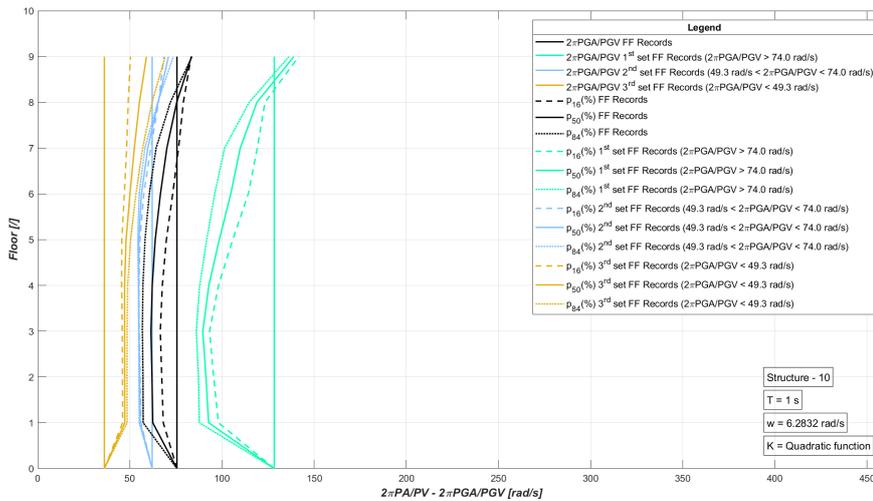


Figura 9.30: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

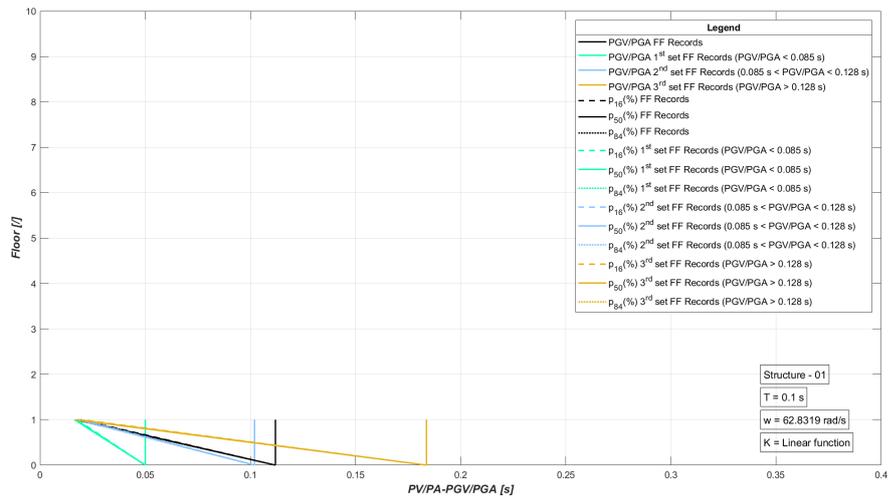


Figura 9.31: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

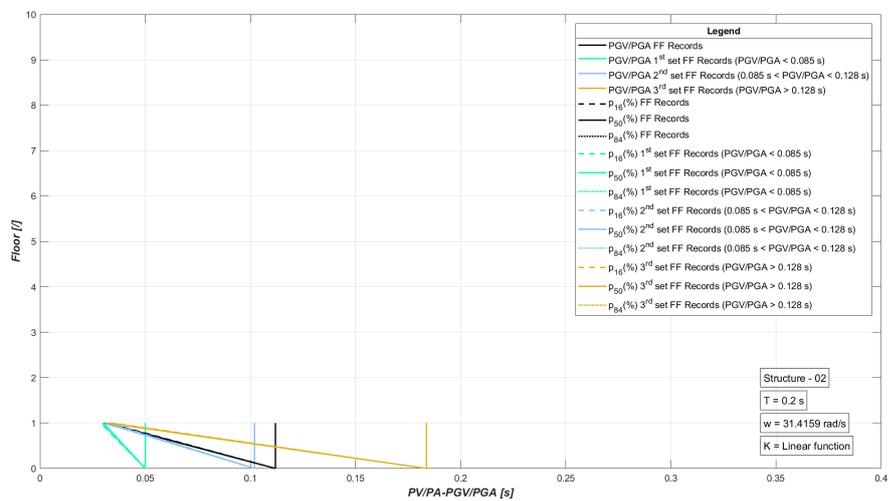


Figura 9.32: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

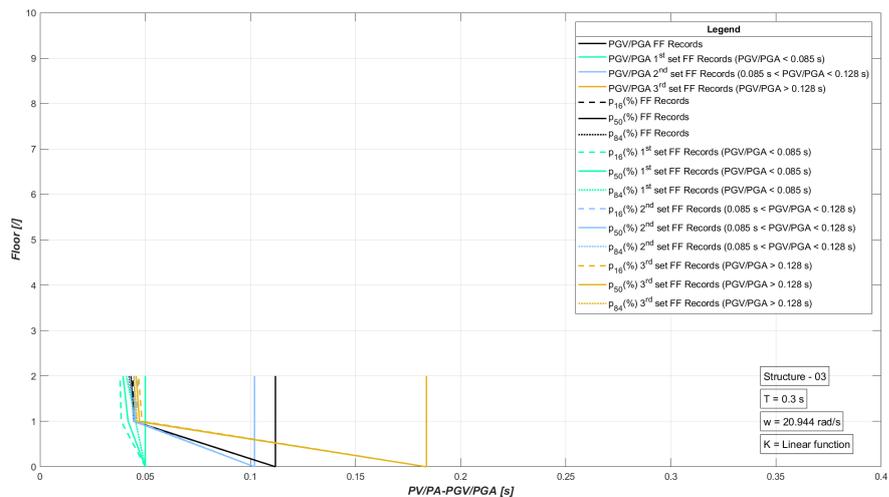


Figura 9.33: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

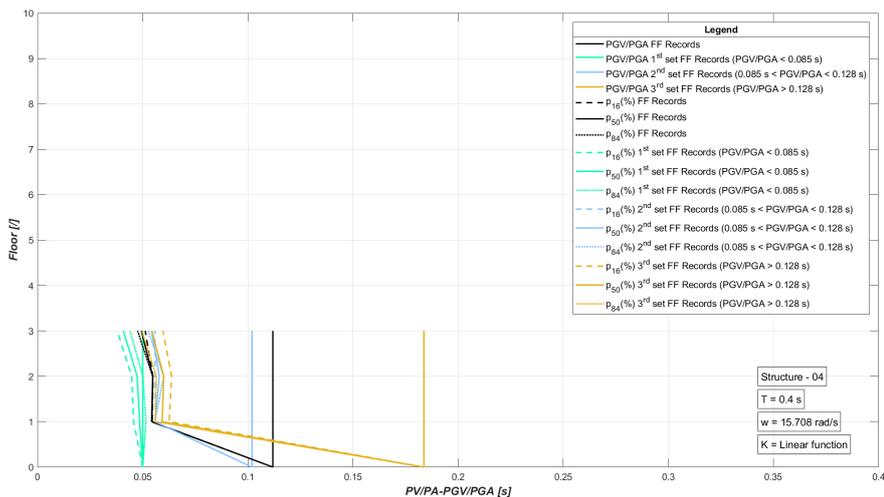


Figura 9.34: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

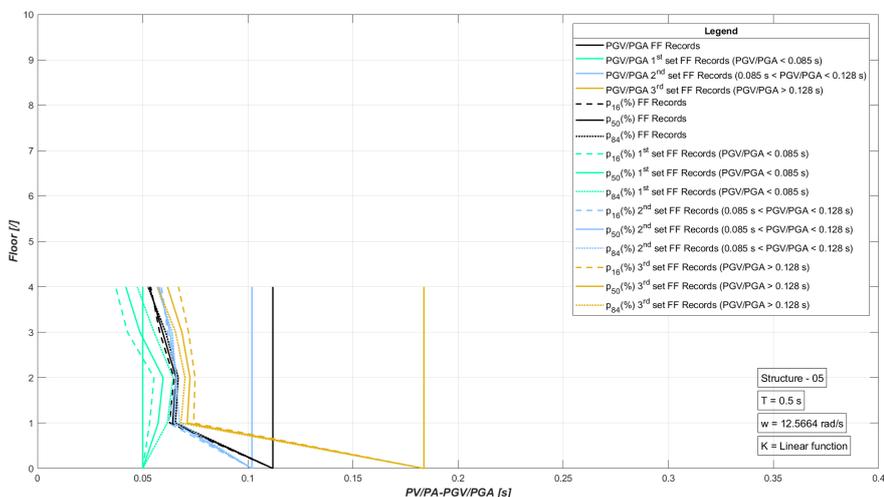


Figura 9.35: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

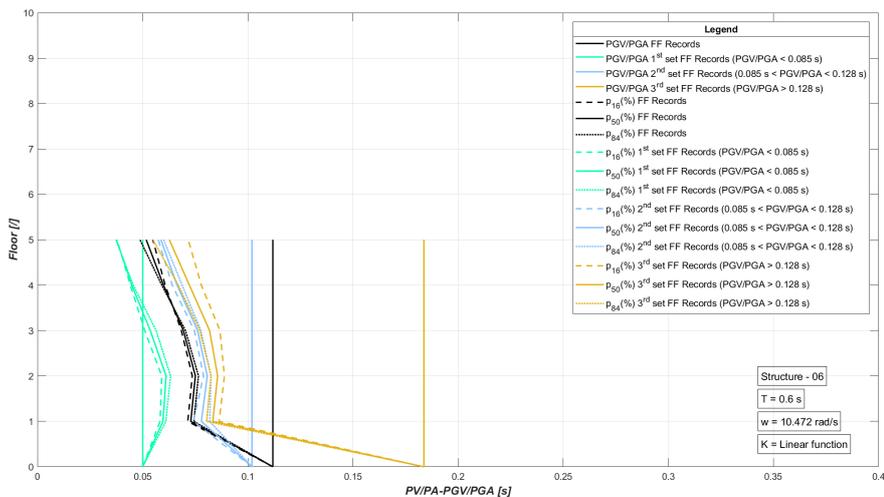


Figura 9.36: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

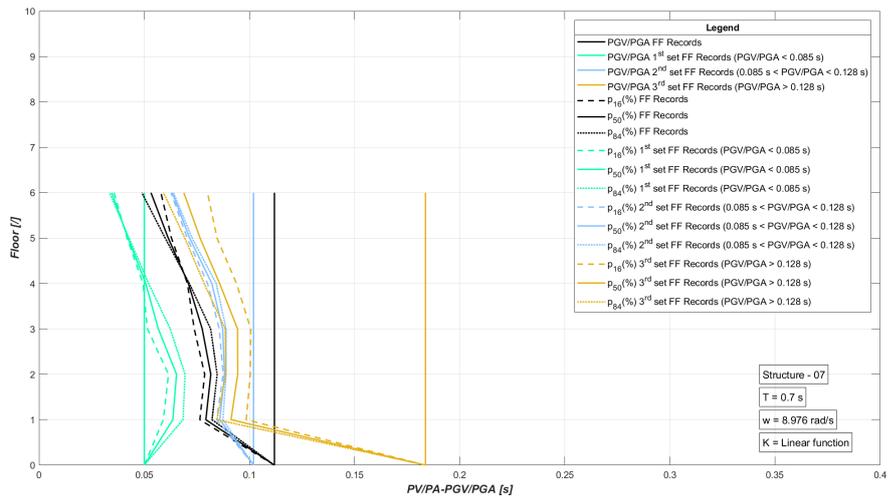


Figura 9.37: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

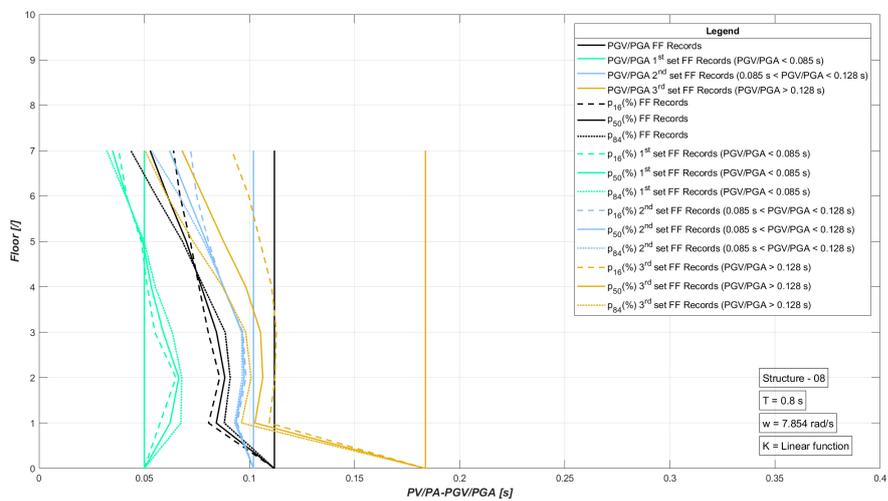


Figura 9.38: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

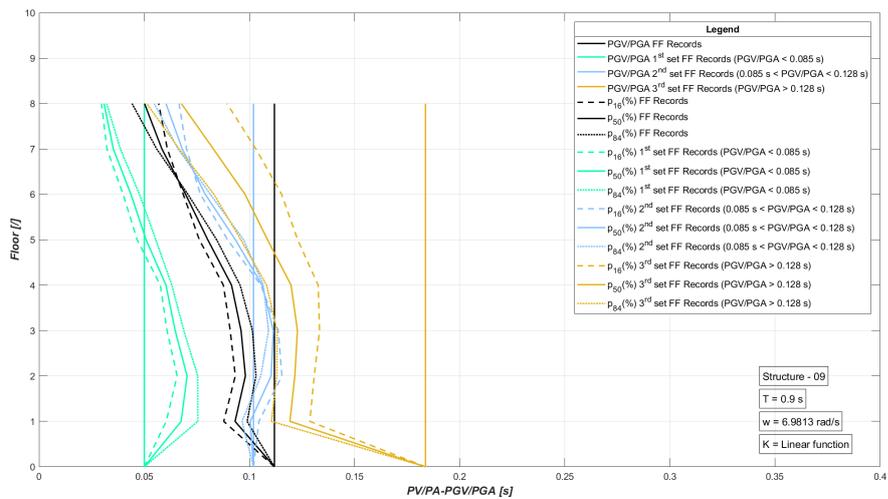


Figura 9.39: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 09.

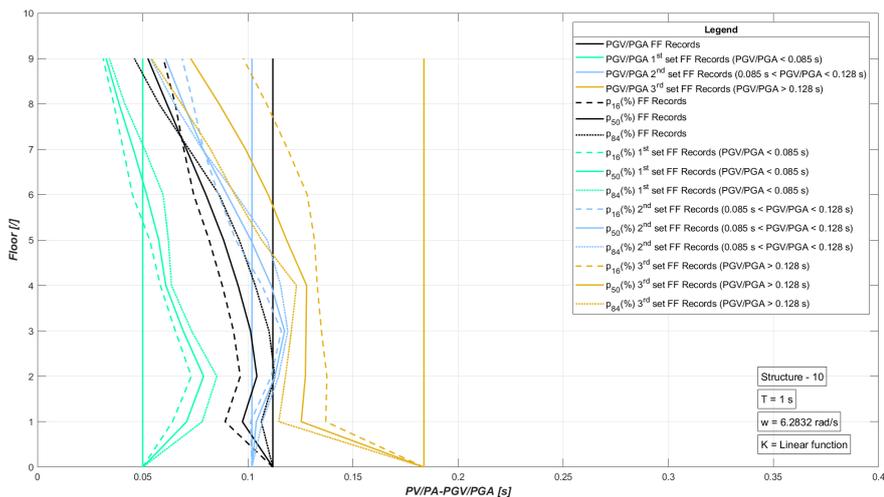


Figura 9.40: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

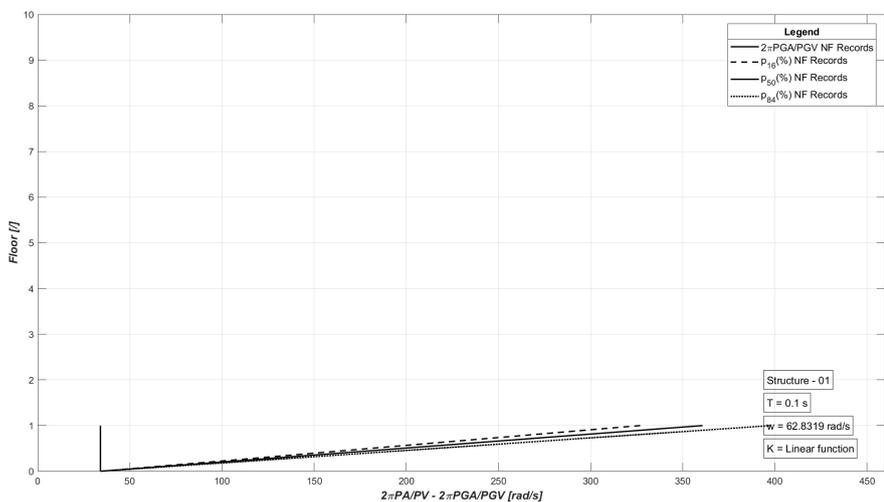


Figura 9.41: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

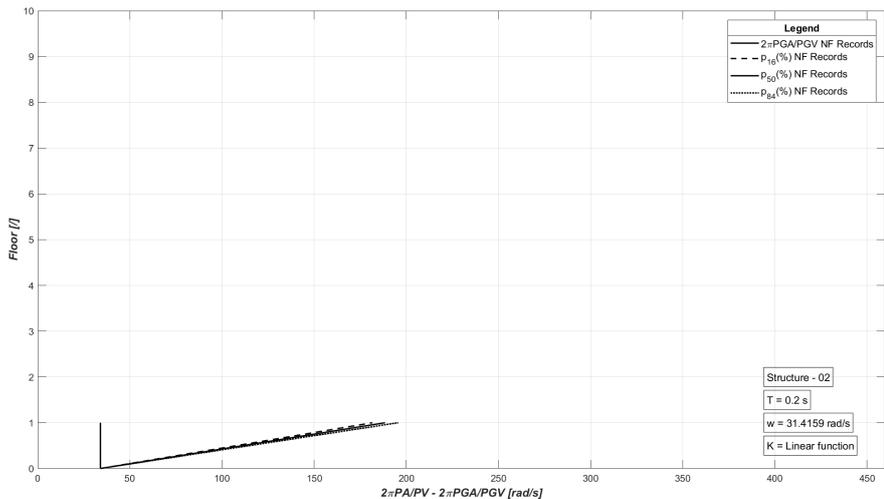


Figura 9.42: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

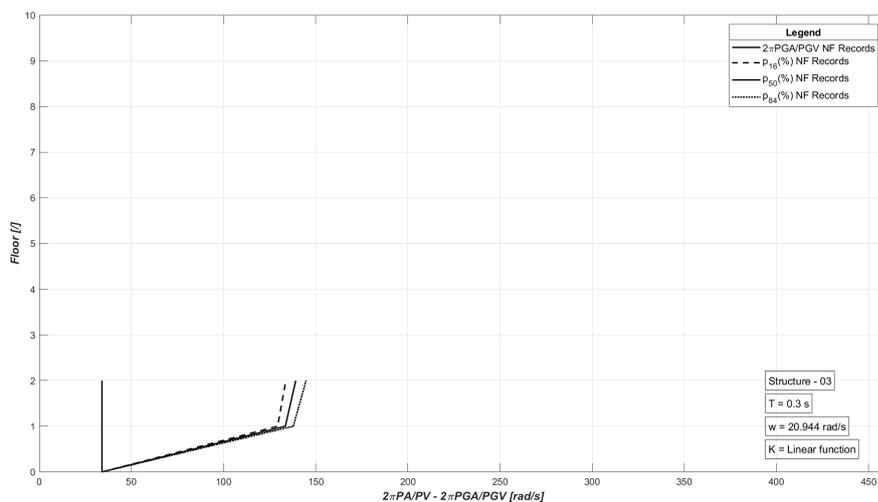


Figura 9.43: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

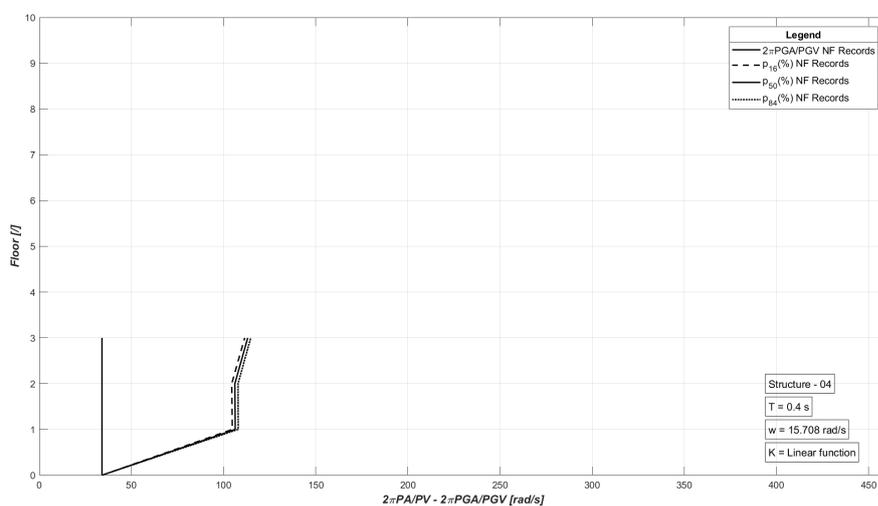


Figura 9.44: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

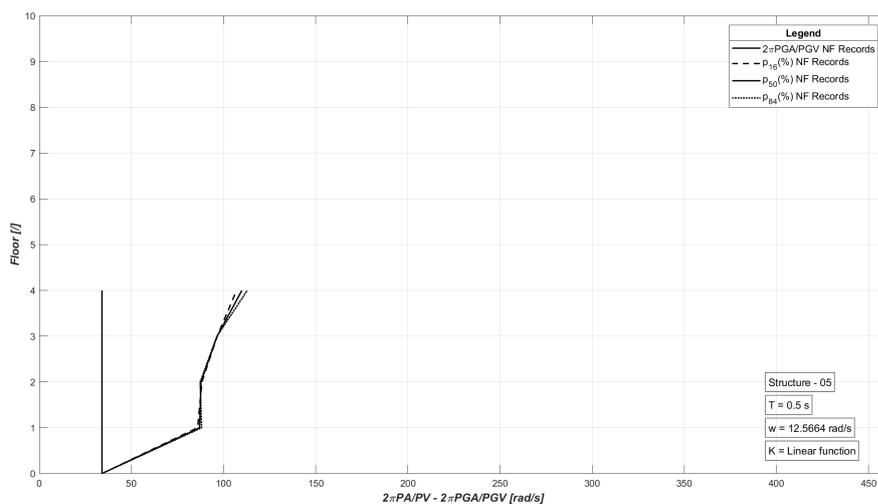


Figura 9.45: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

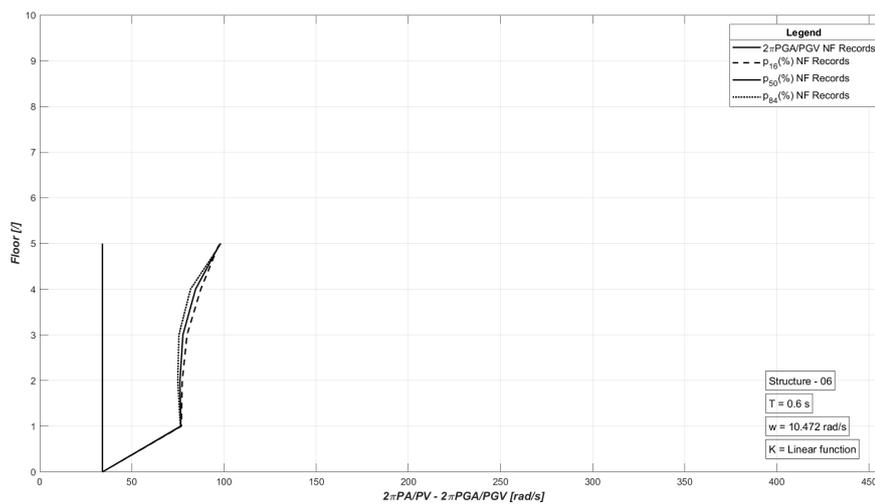


Figura 9.46: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

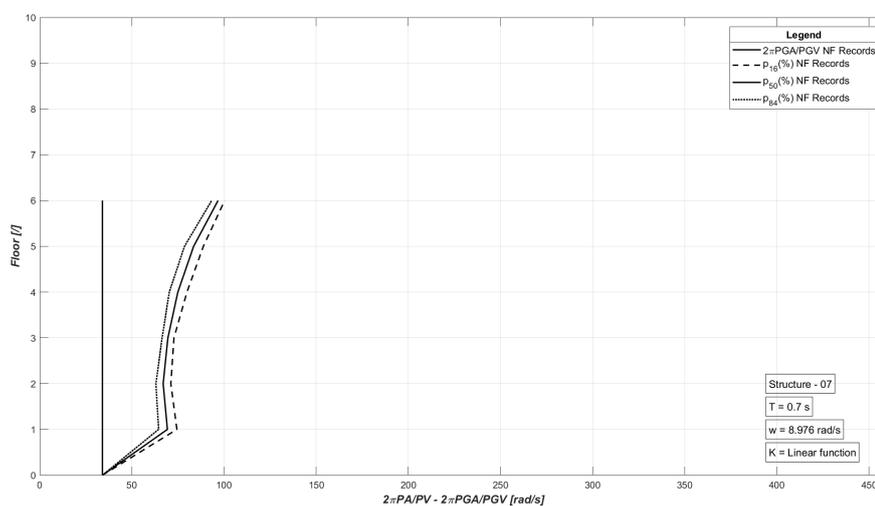


Figura 9.47: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

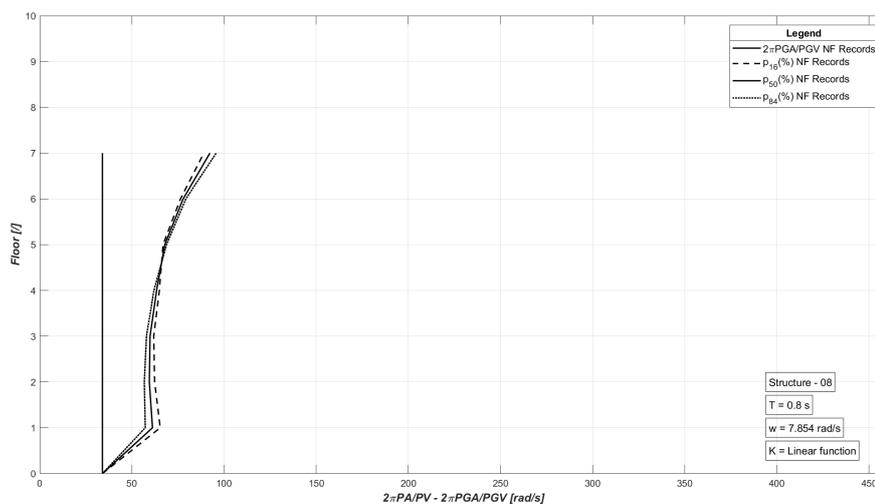


Figura 9.48: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

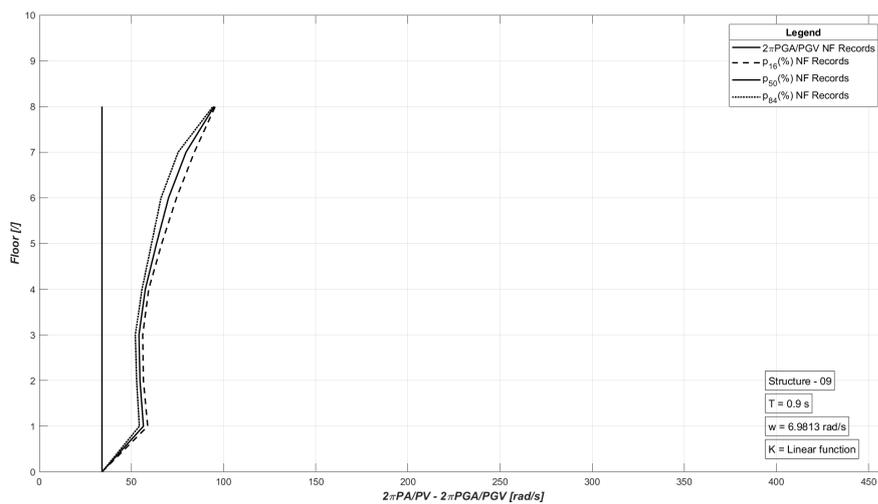


Figura 9.49: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

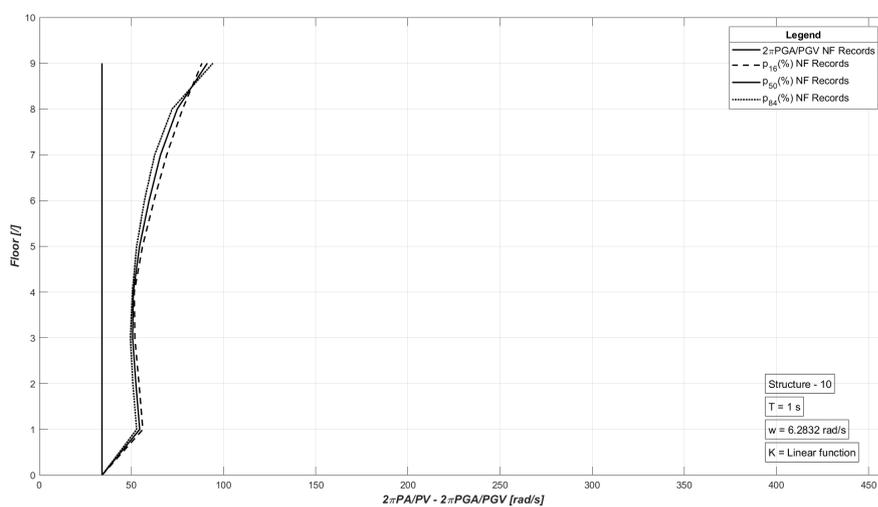


Figura 9.50: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

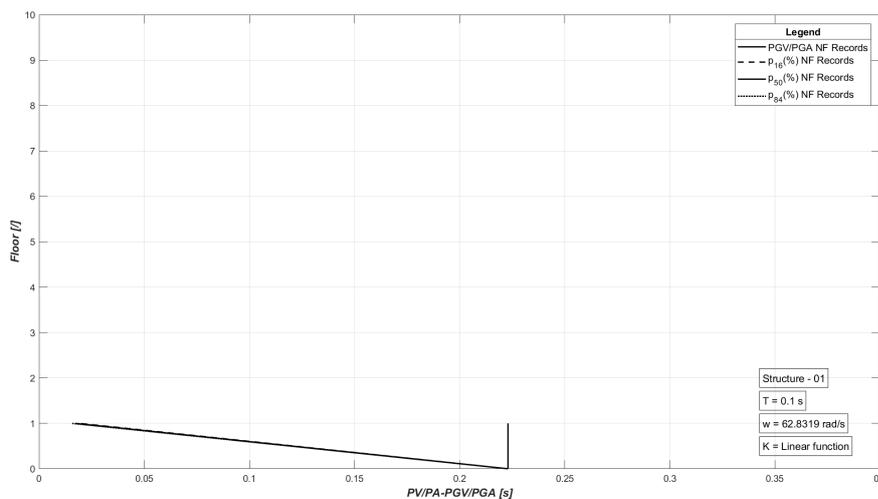


Figura 9.51: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

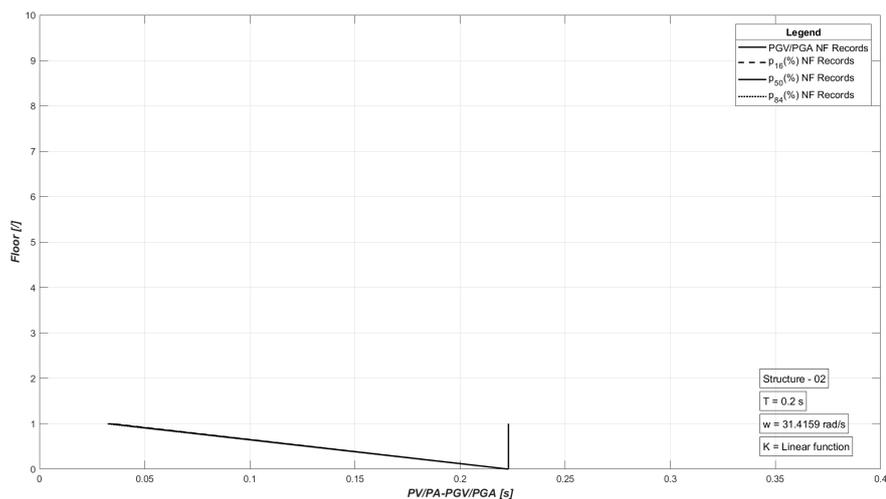


Figura 9.52: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

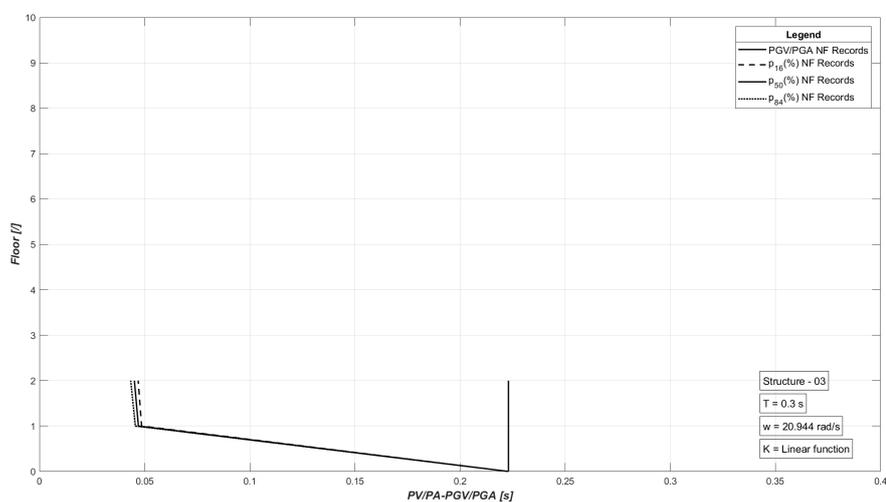


Figura 9.53: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

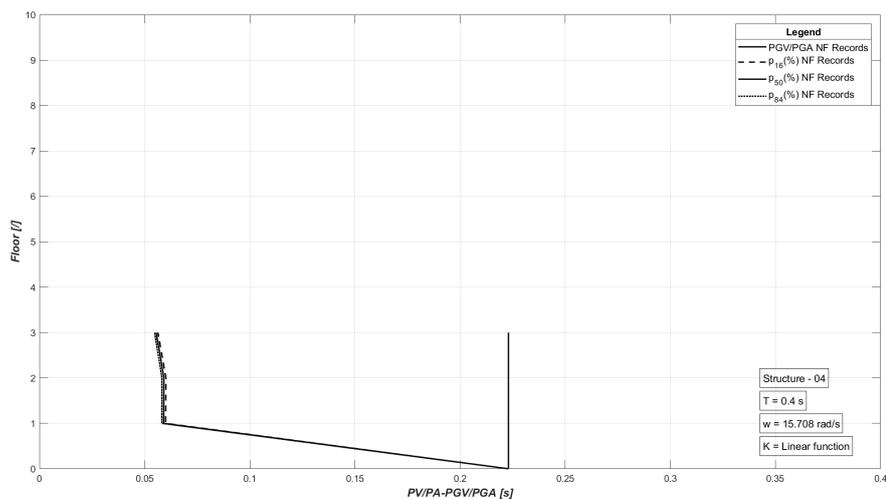


Figura 9.54: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

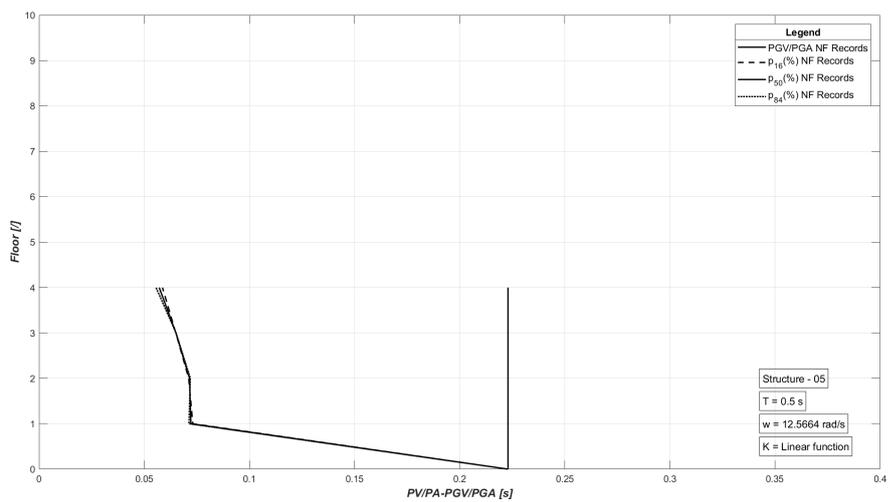


Figura 9.55: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

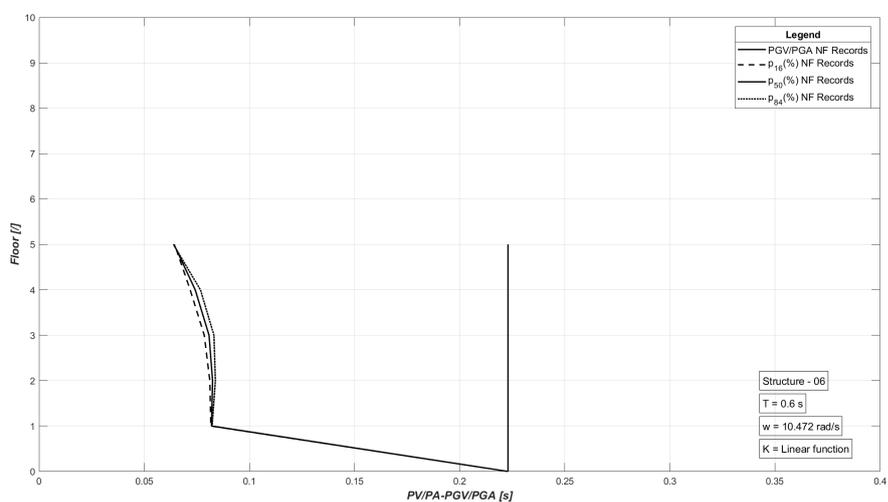


Figura 9.56: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

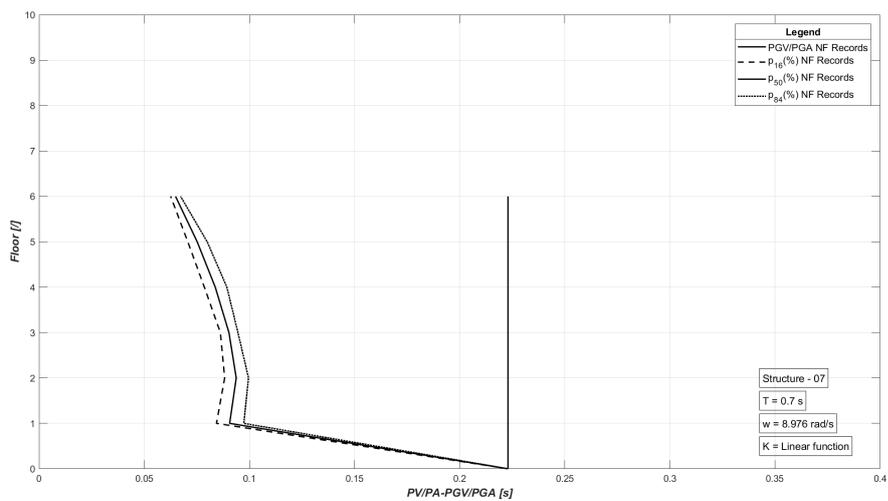


Figura 9.57: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

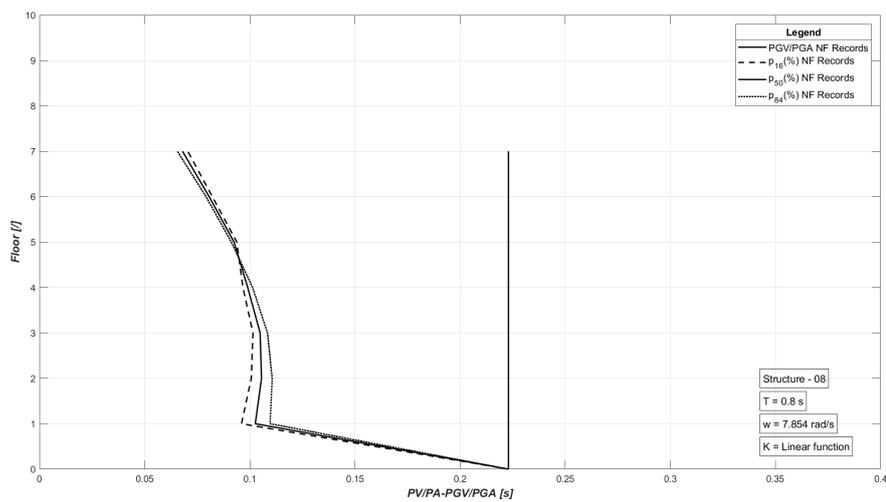


Figura 9.58: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

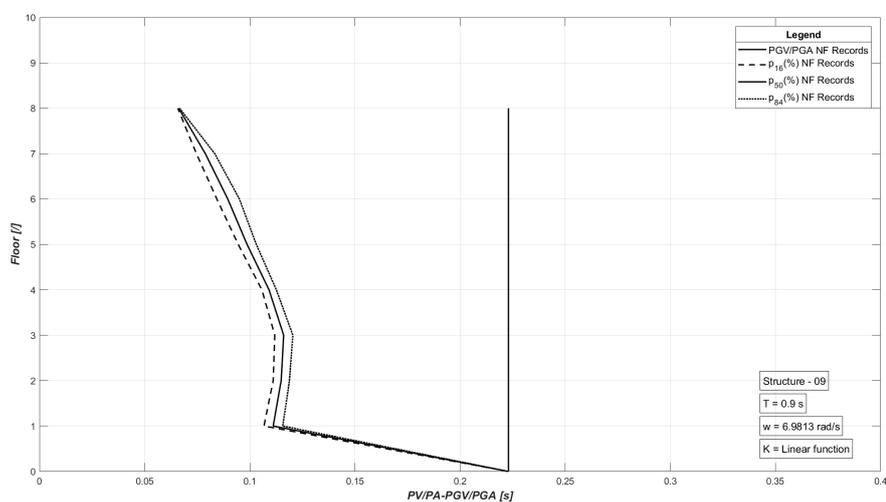


Figura 9.59: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

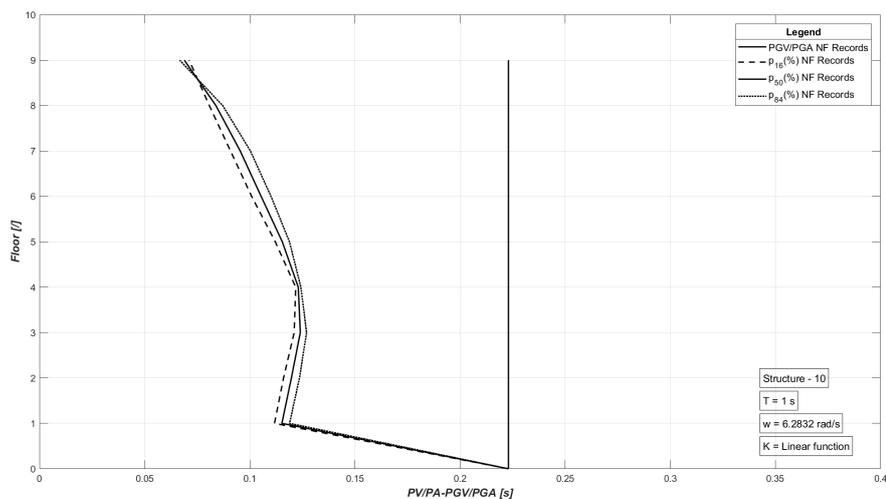


Figura 9.60: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

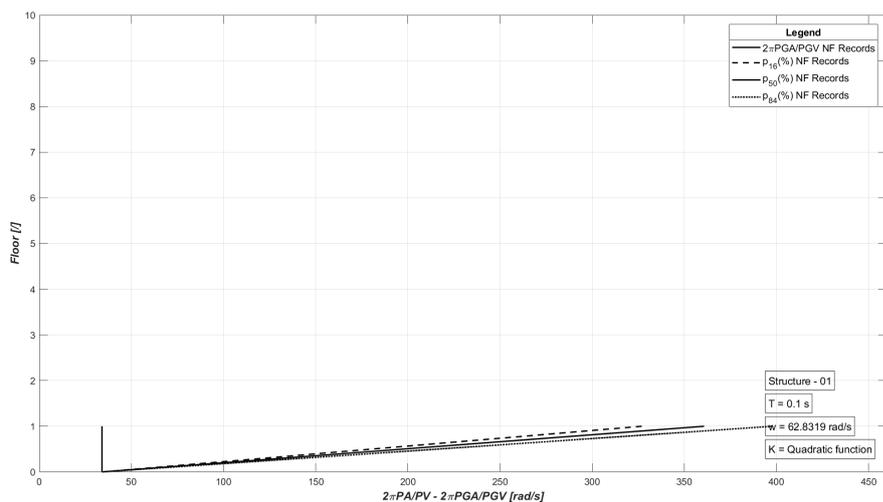


Figura 9.61: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

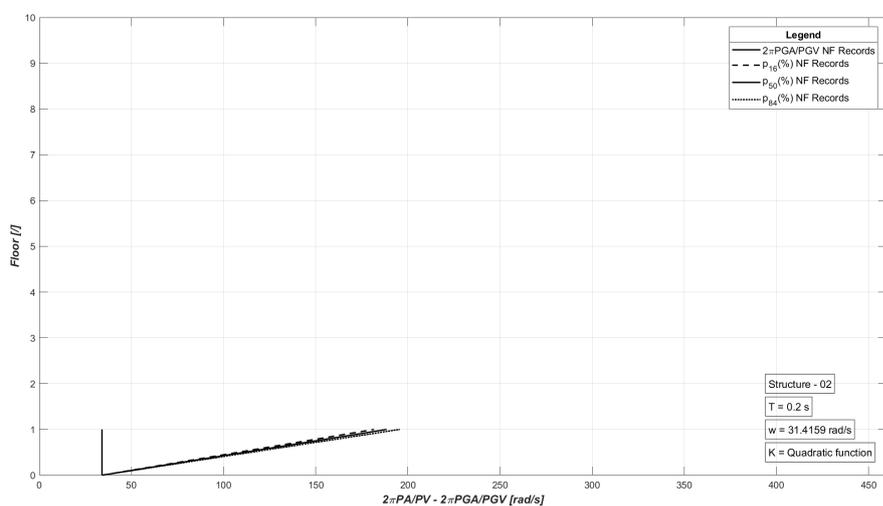


Figura 9.62: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

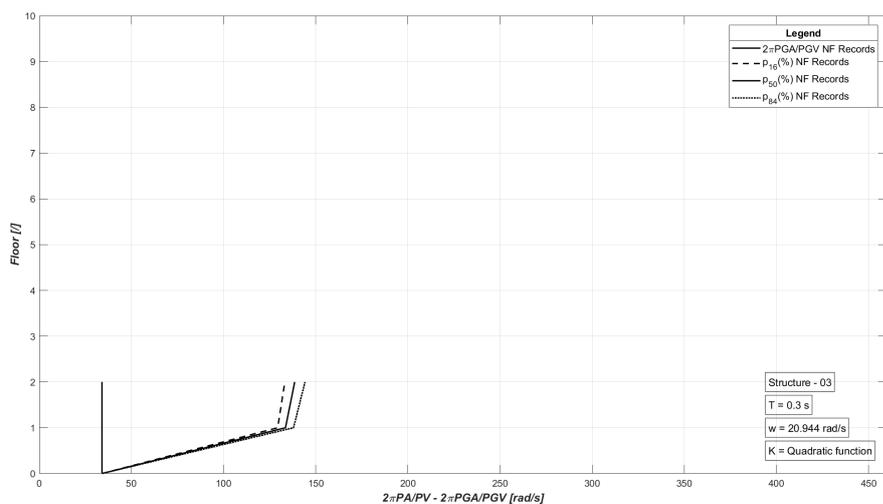


Figura 9.63: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

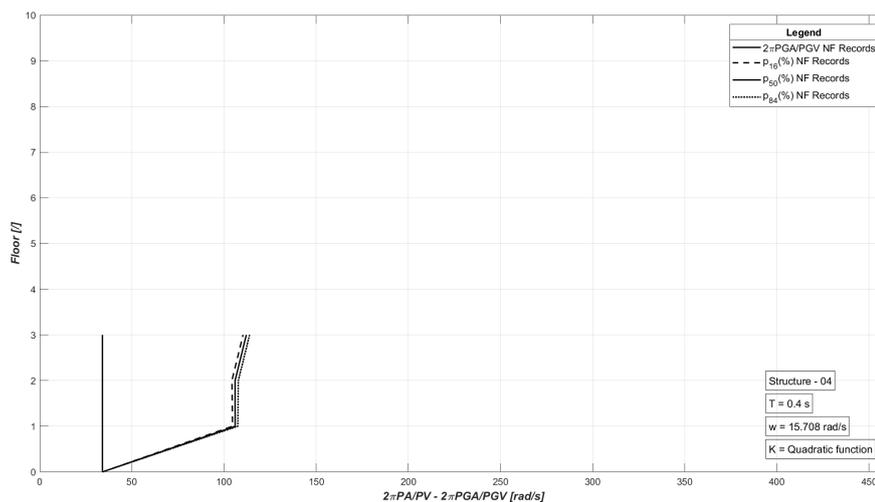


Figura 9.64: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

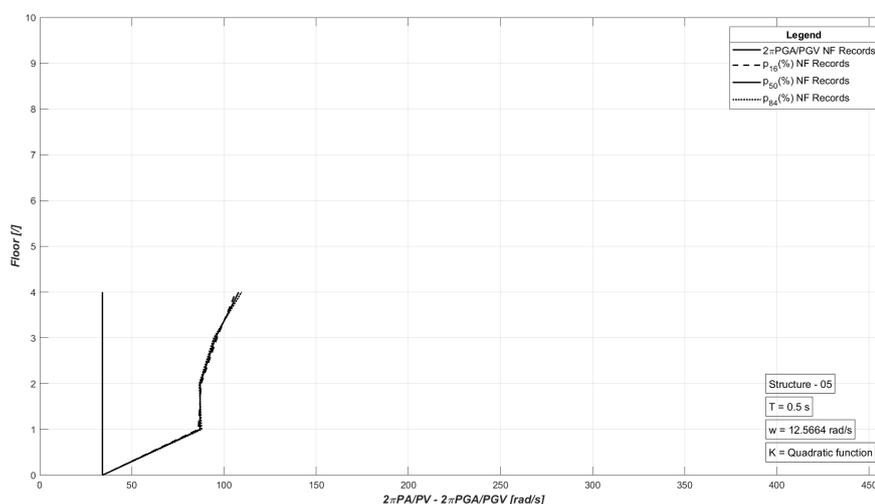


Figura 9.65: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

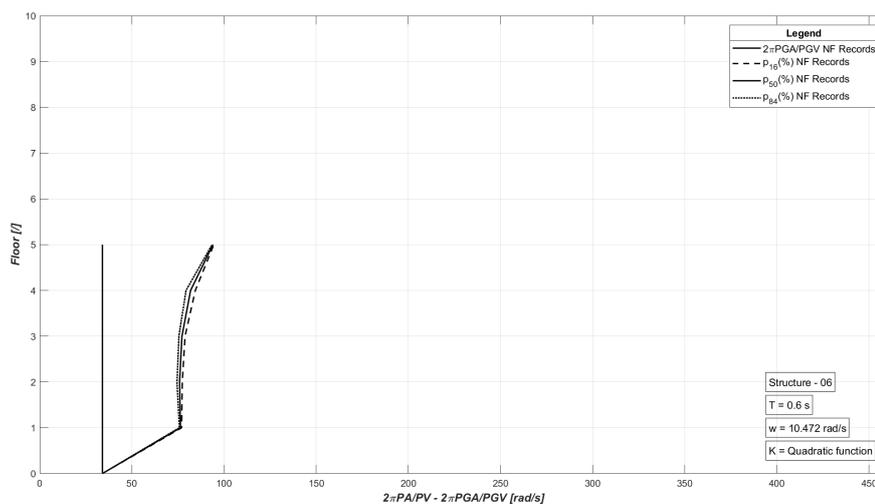


Figura 9.66: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

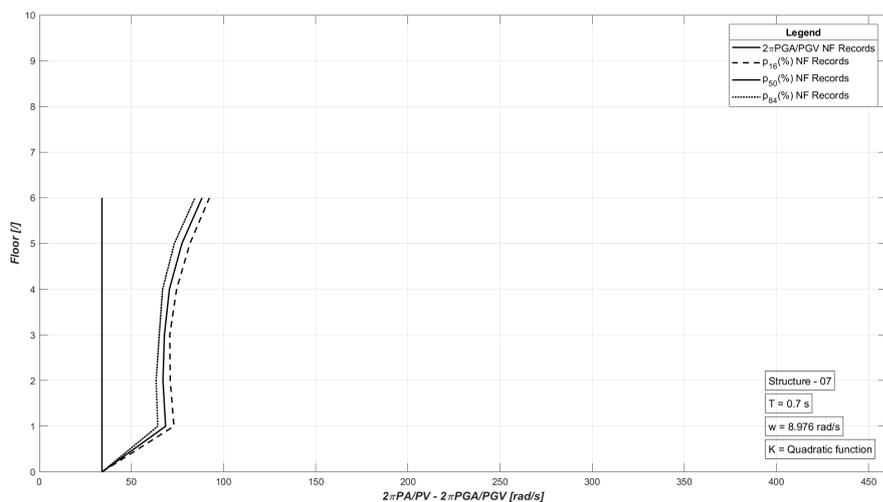


Figura 9.67: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

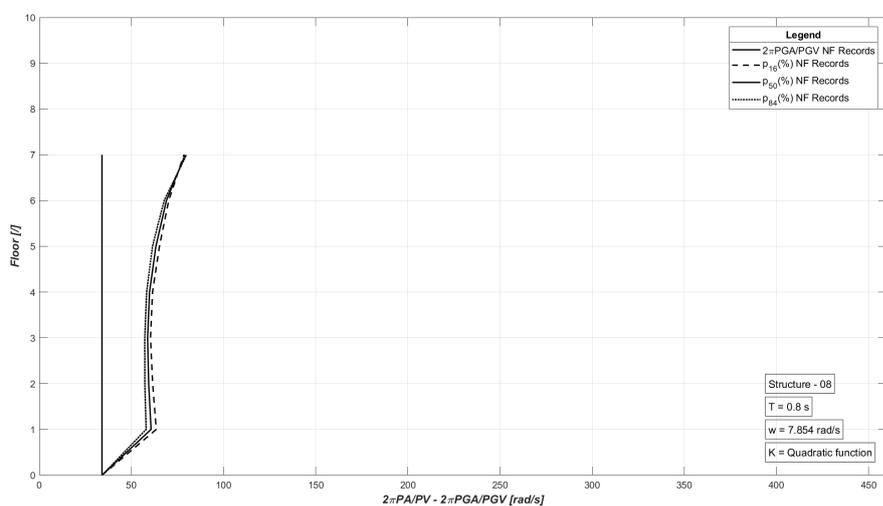


Figura 9.68: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

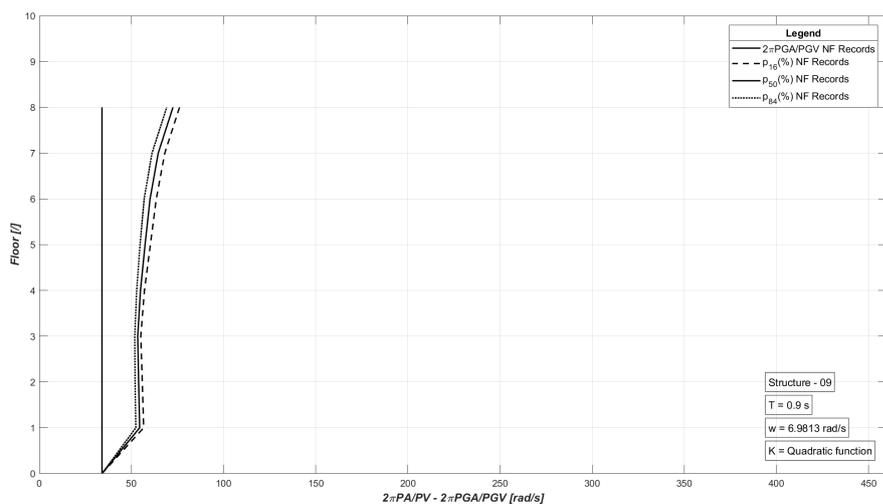


Figura 9.69: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 09.

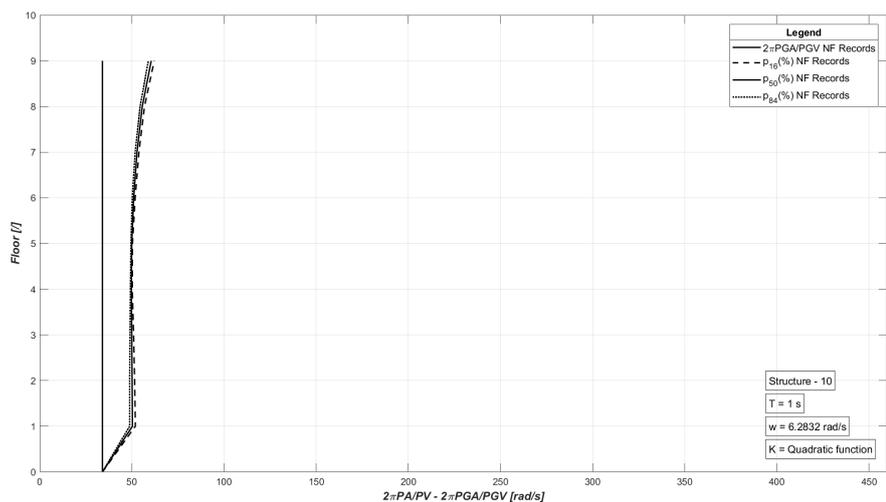


Figura 9.70: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

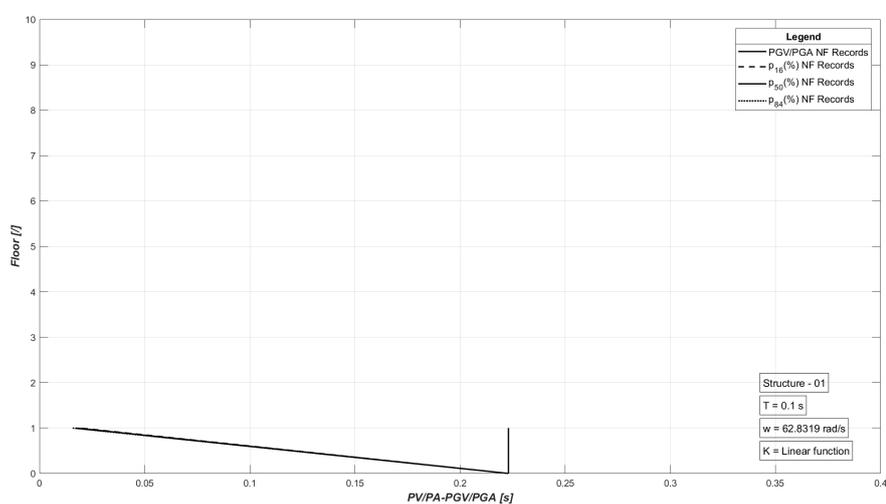


Figura 9.71: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

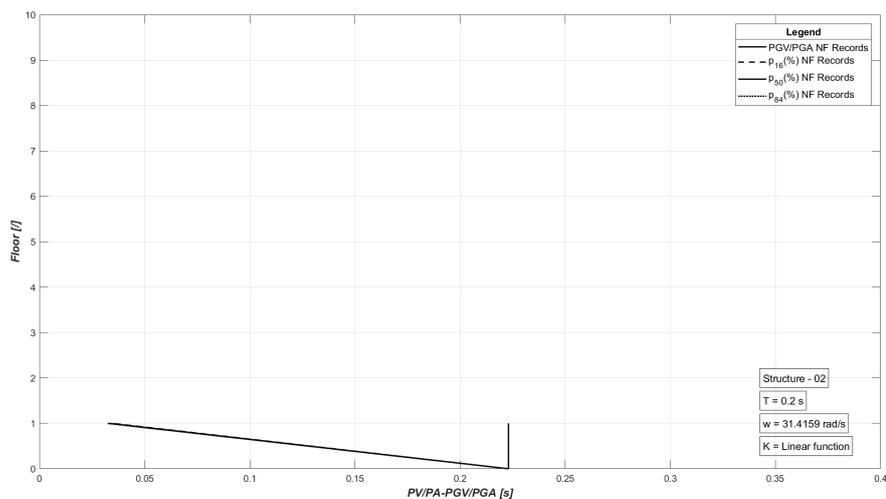


Figura 9.72: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 02.

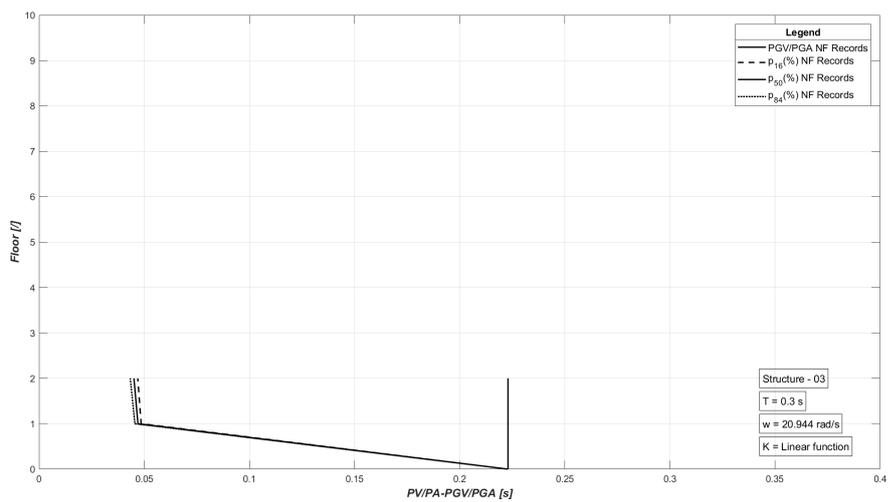


Figura 9.73: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 03.

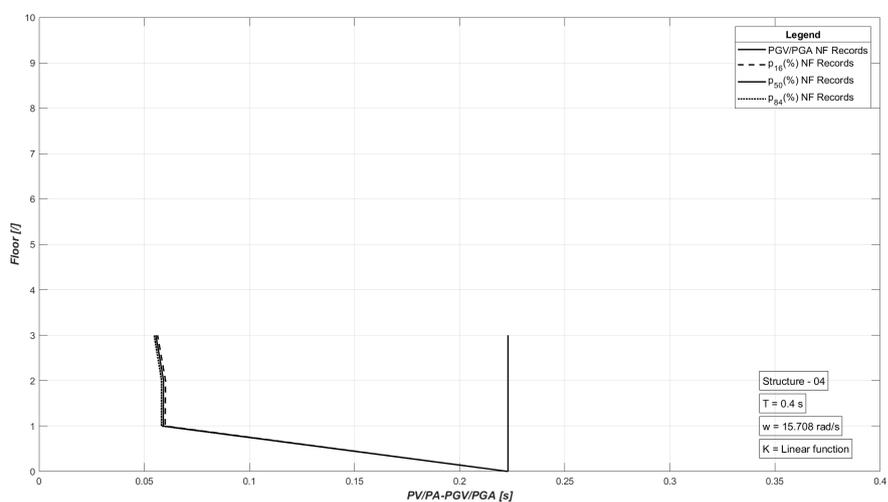


Figura 9.74: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

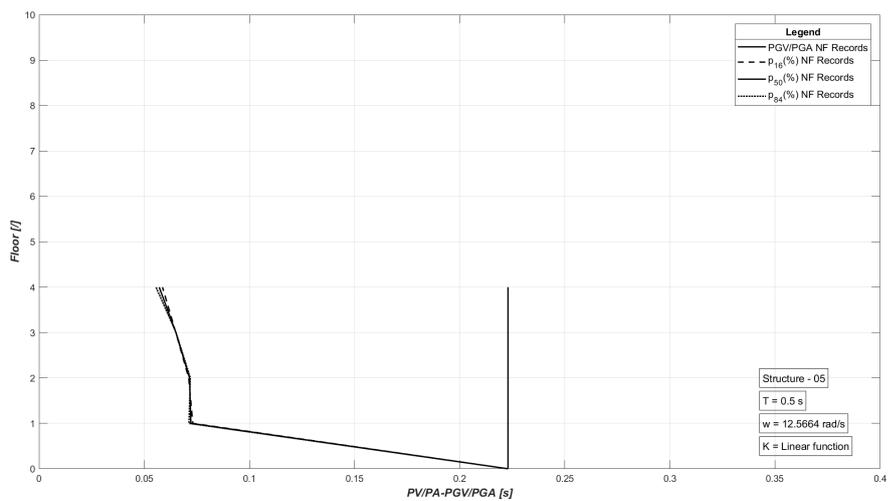


Figura 9.75: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

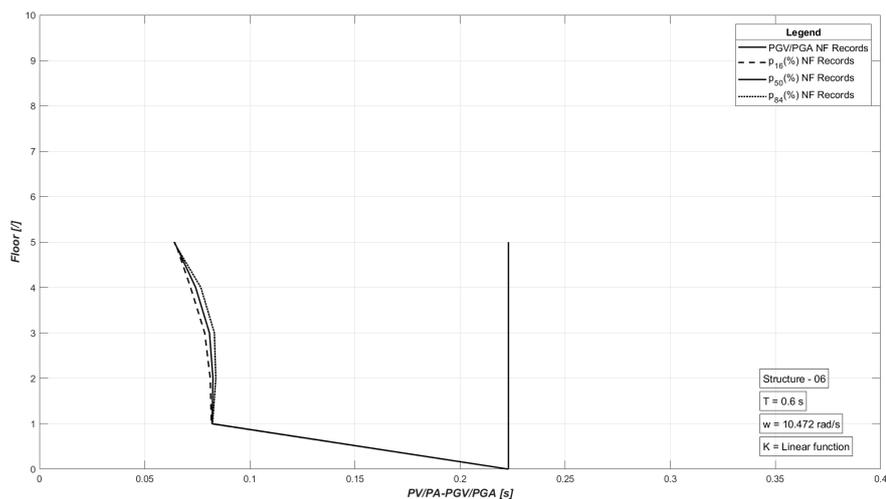


Figura 9.76: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

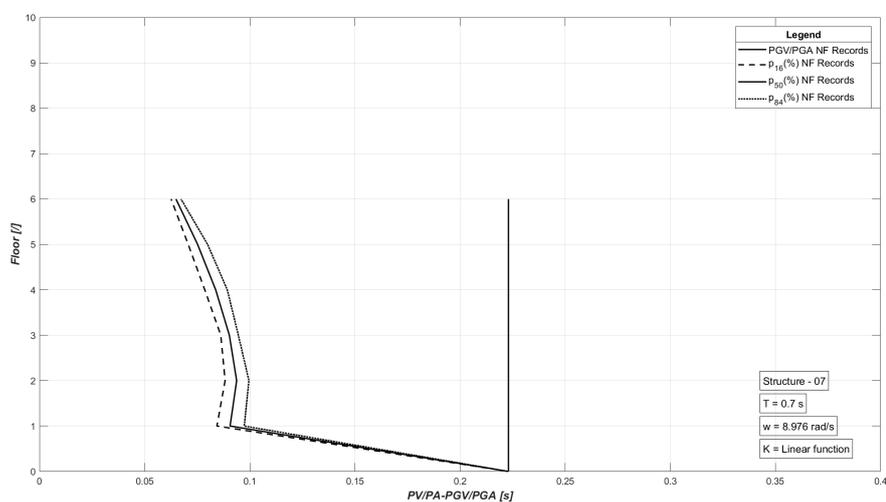


Figura 9.77: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 07.

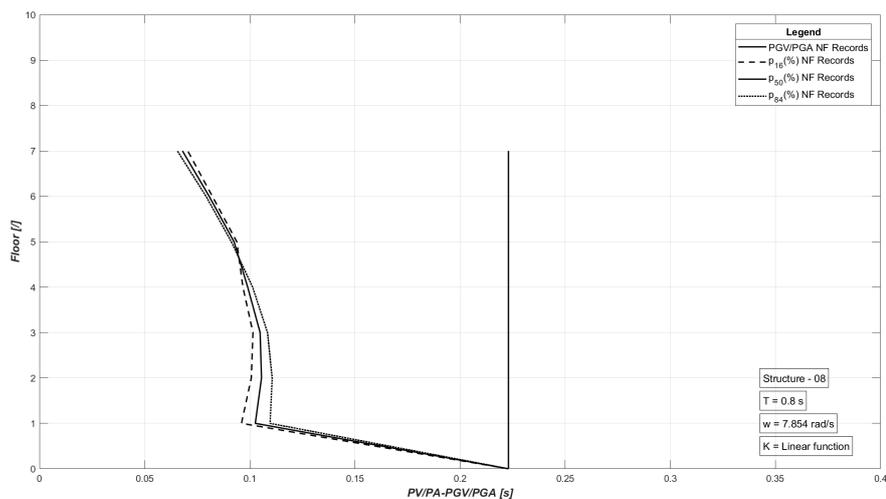


Figura 9.78: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

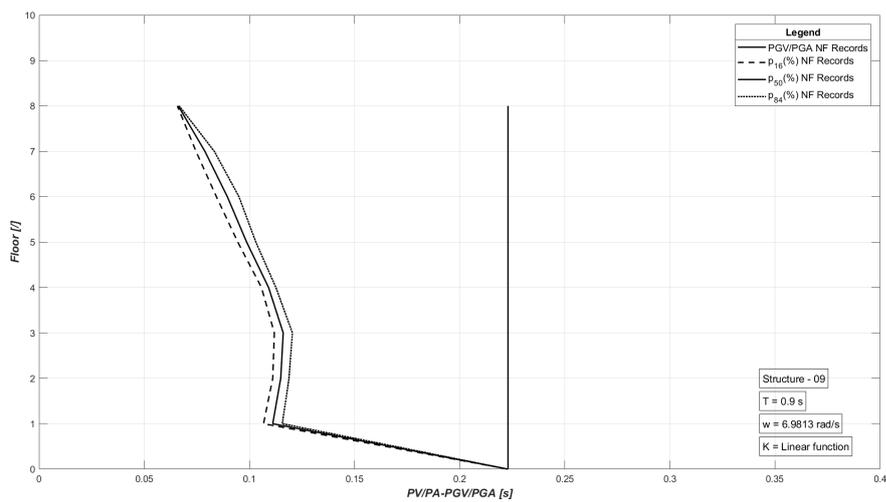


Figura 9.79: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 09.

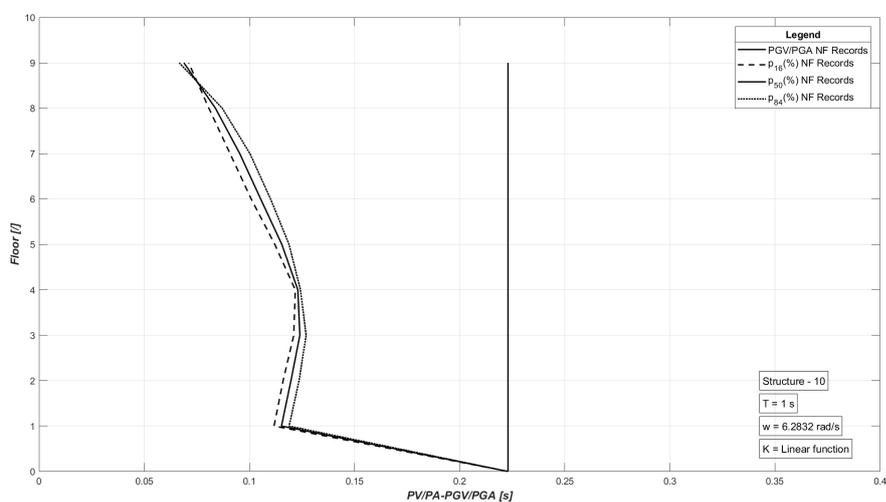


Figura 9.80: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 10.

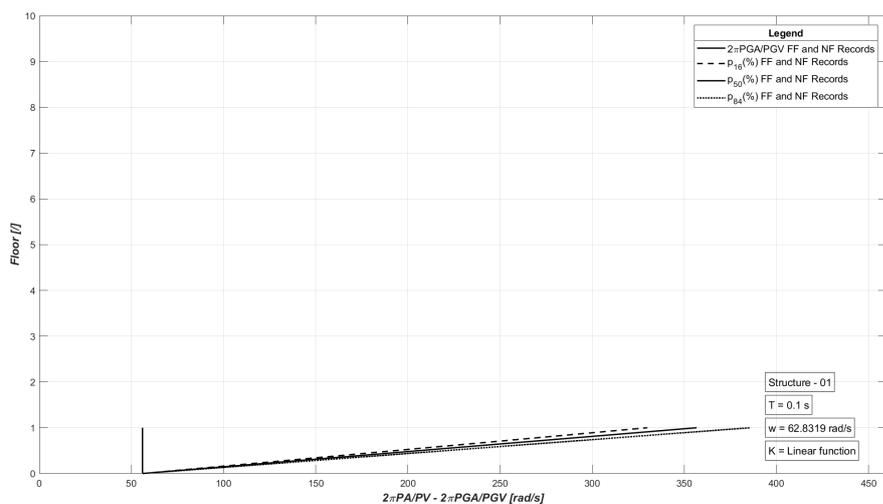


Figura 9.81: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

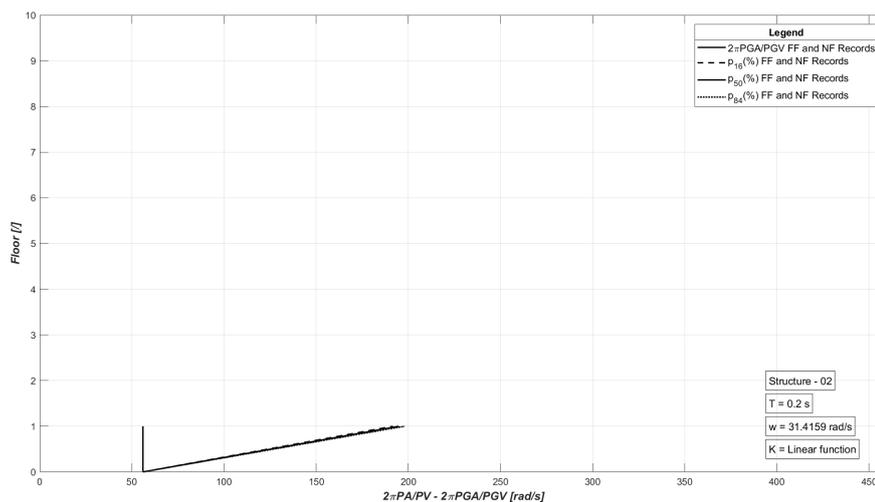


Figura 9.82: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

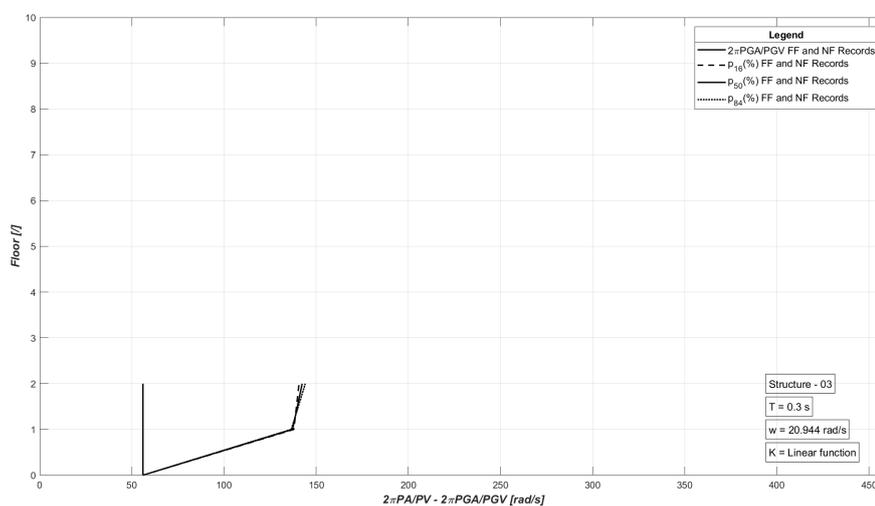


Figura 9.83: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

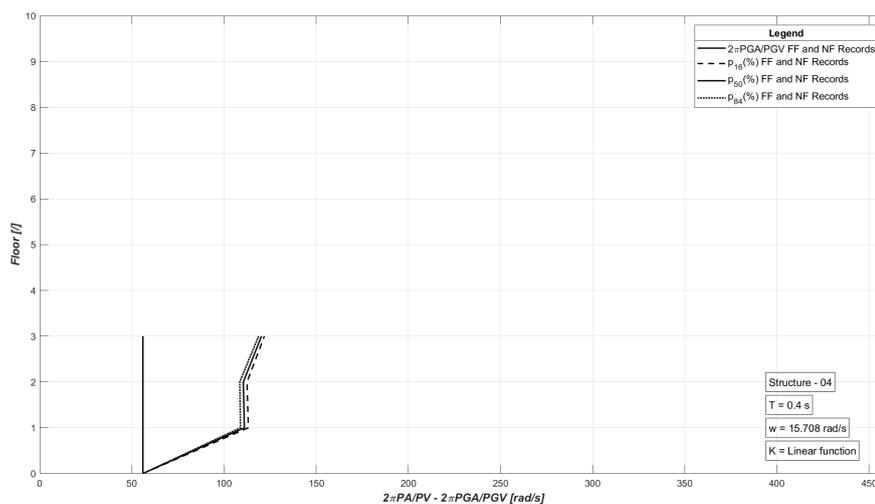


Figura 9.84: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

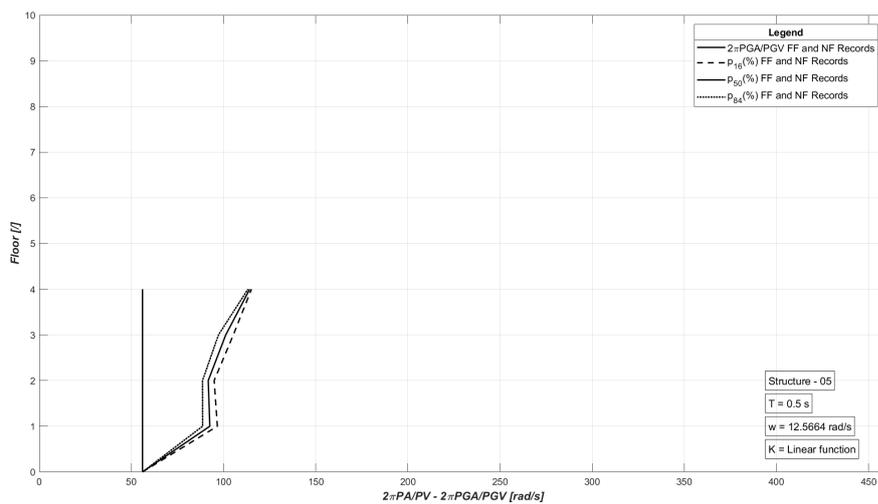


Figura 9.85: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

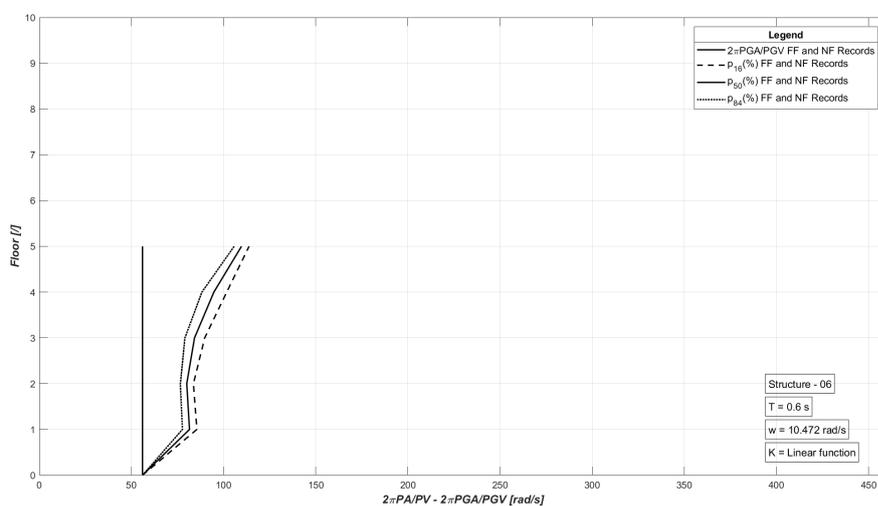


Figura 9.86: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

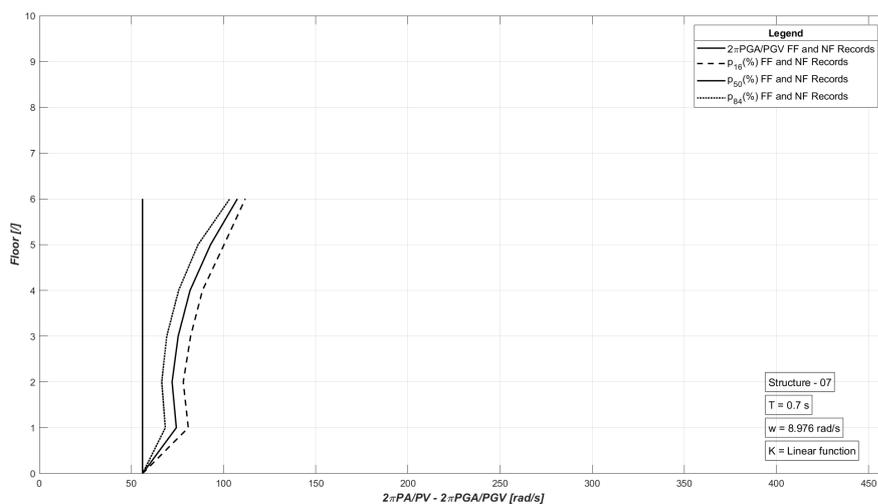


Figura 9.87: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

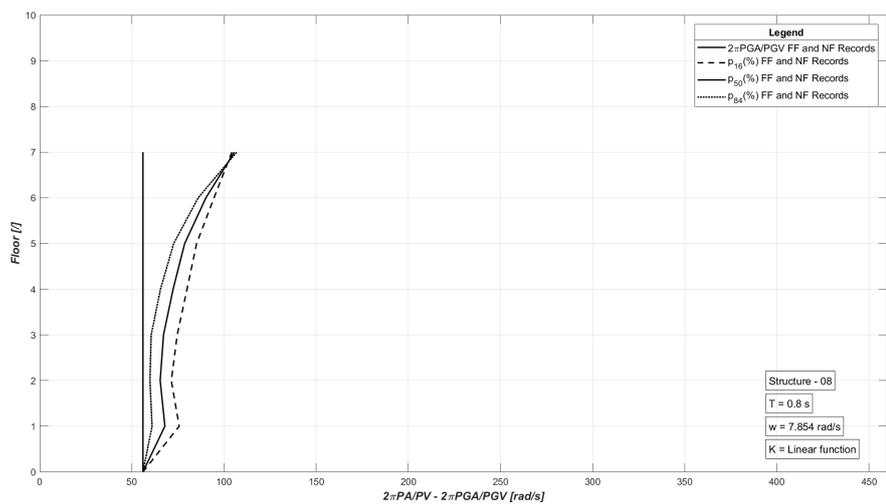


Figura 9.88: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

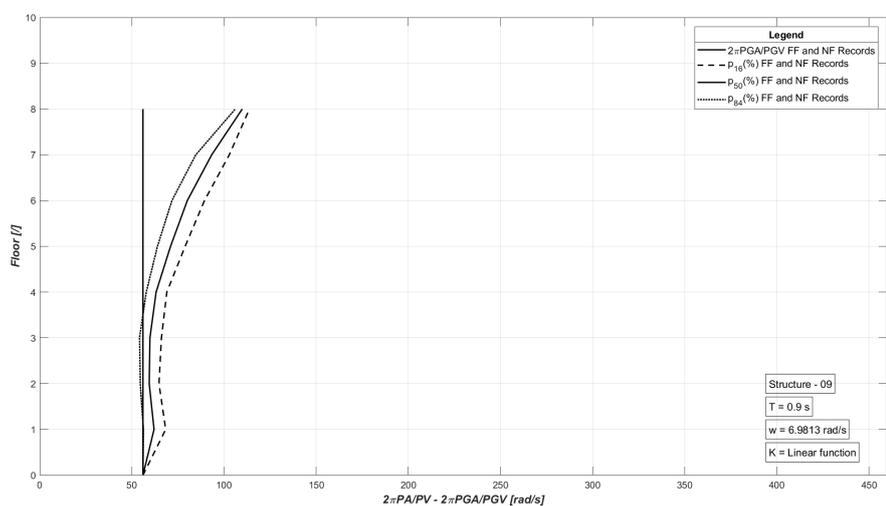


Figura 9.89: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

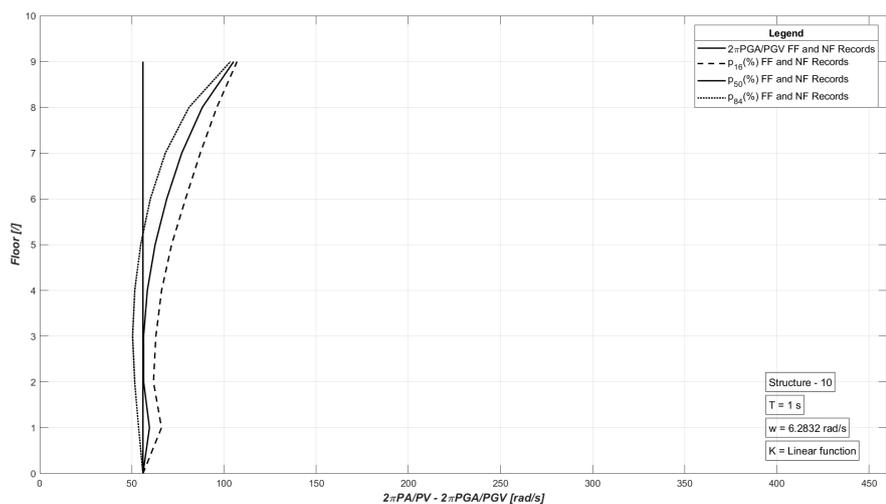


Figura 9.90: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

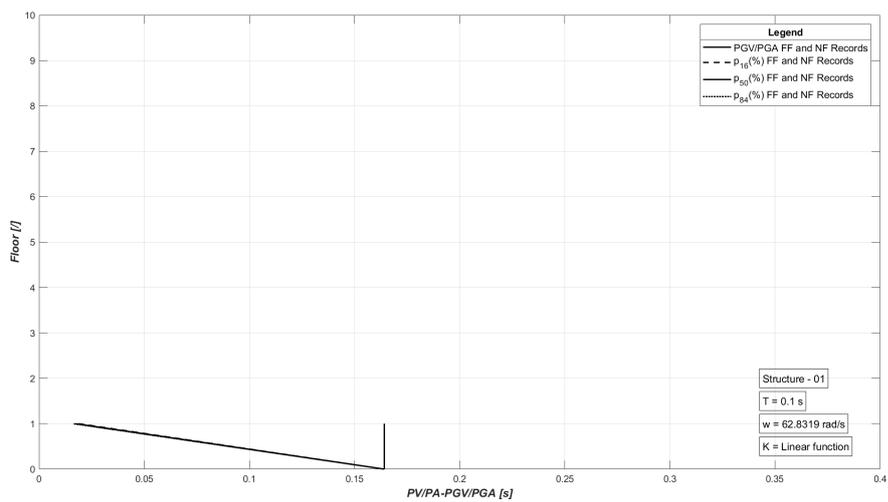


Figura 9.91: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

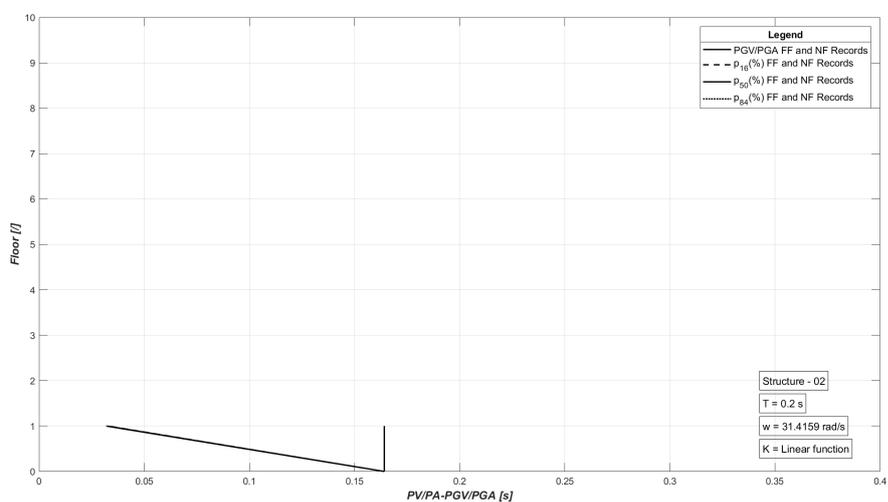


Figura 9.92: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

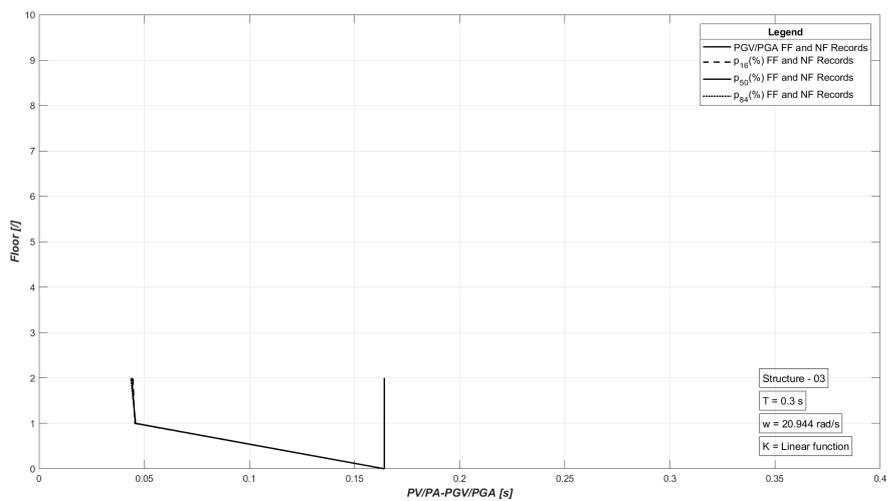


Figura 9.93: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

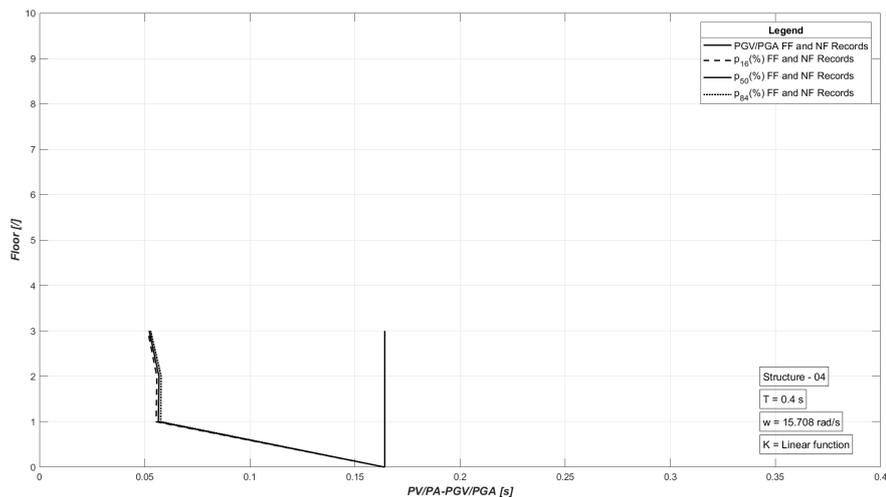


Figura 9.94: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

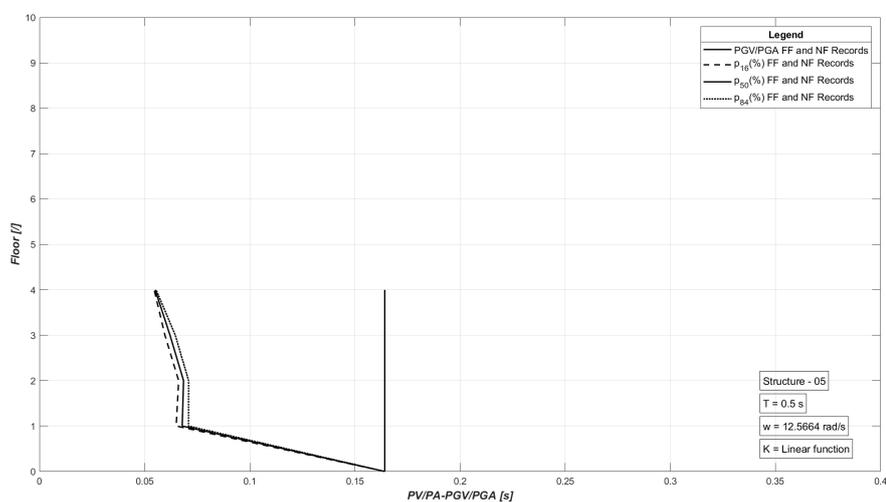


Figura 9.95: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

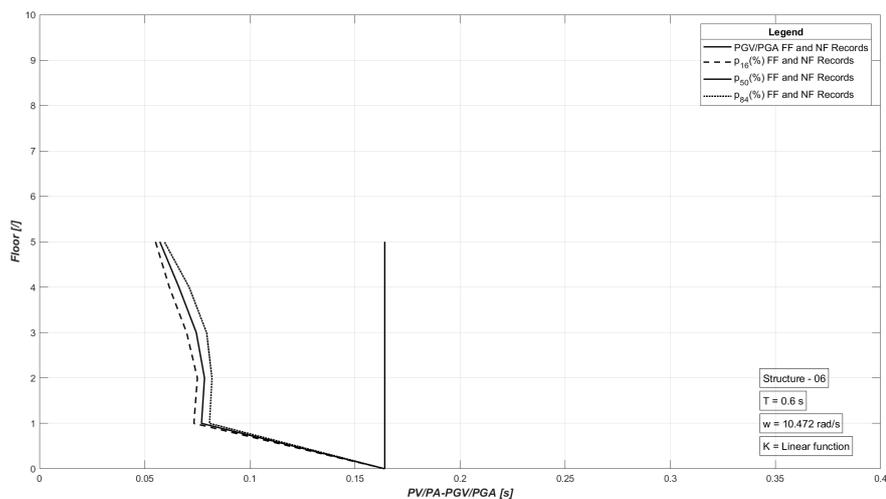


Figura 9.96: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

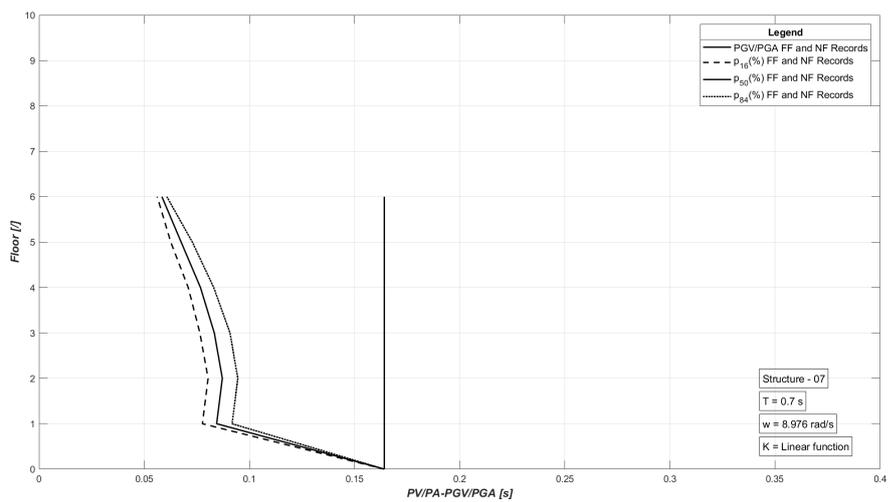


Figura 9.97: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

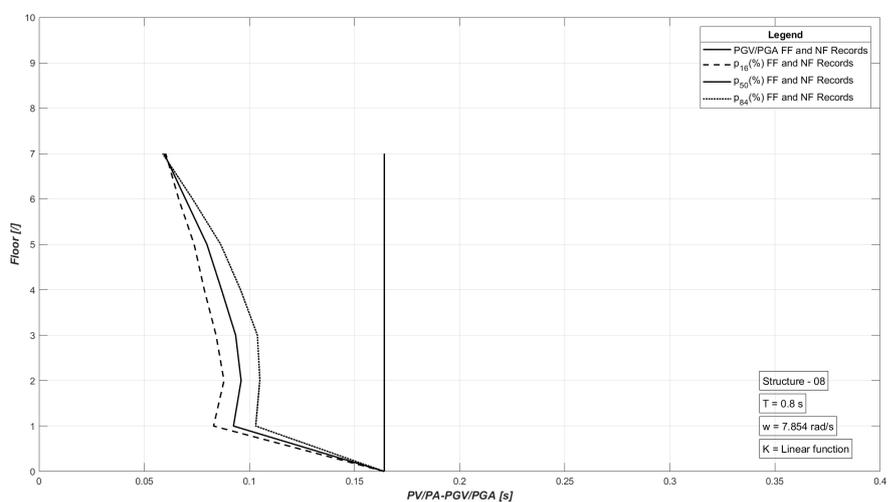


Figura 9.98: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

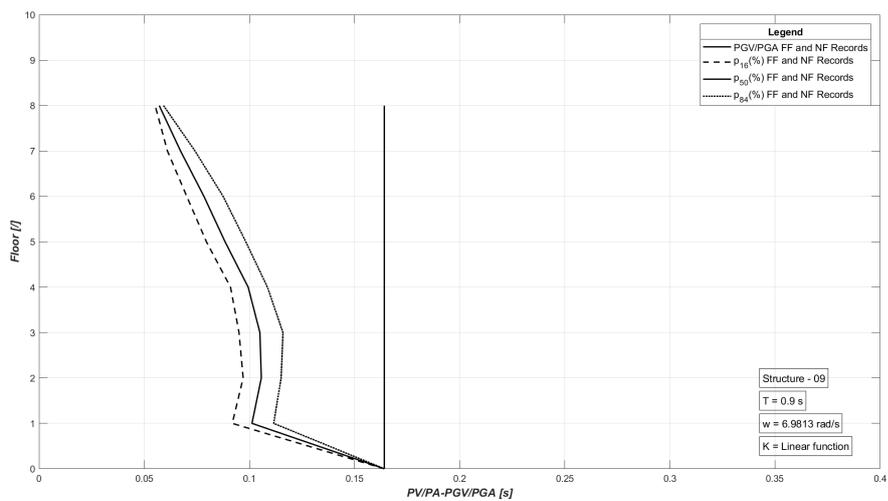


Figura 9.99: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

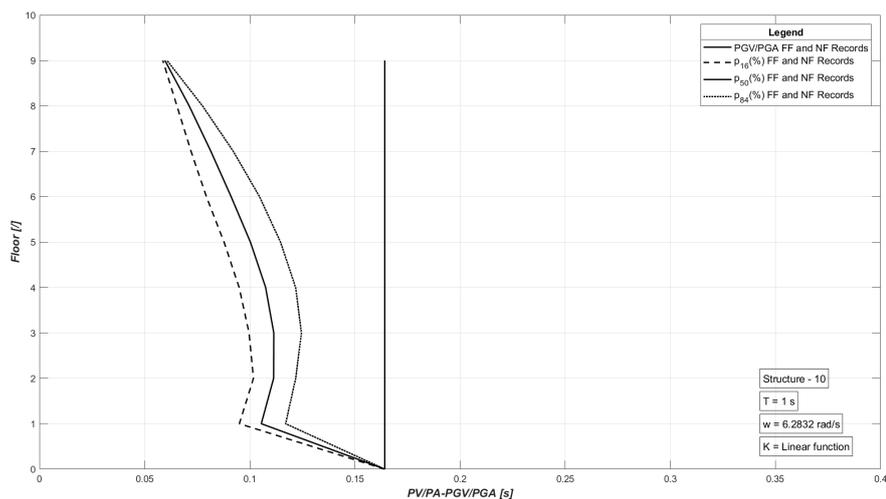


Figura 9.100: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

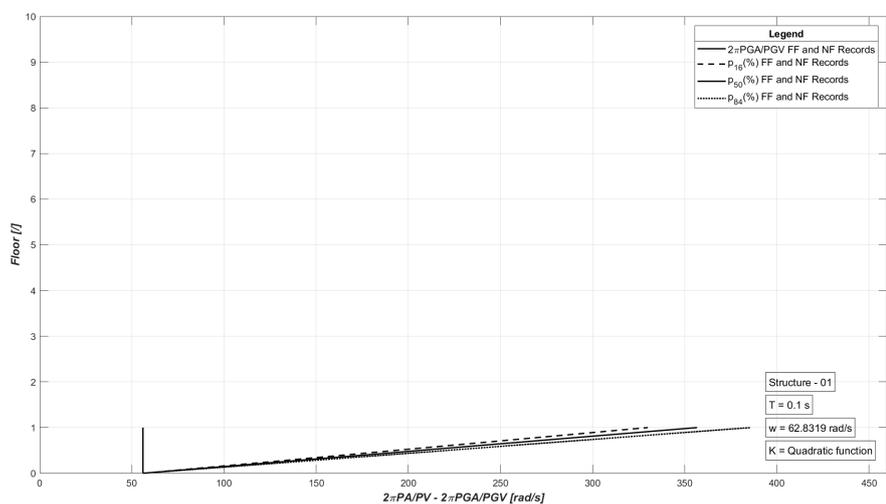


Figura 9.101: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

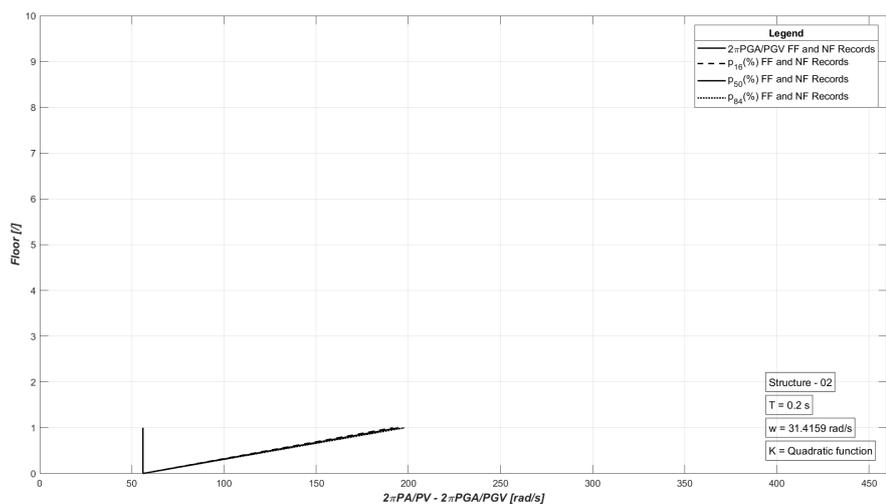


Figura 9.102: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

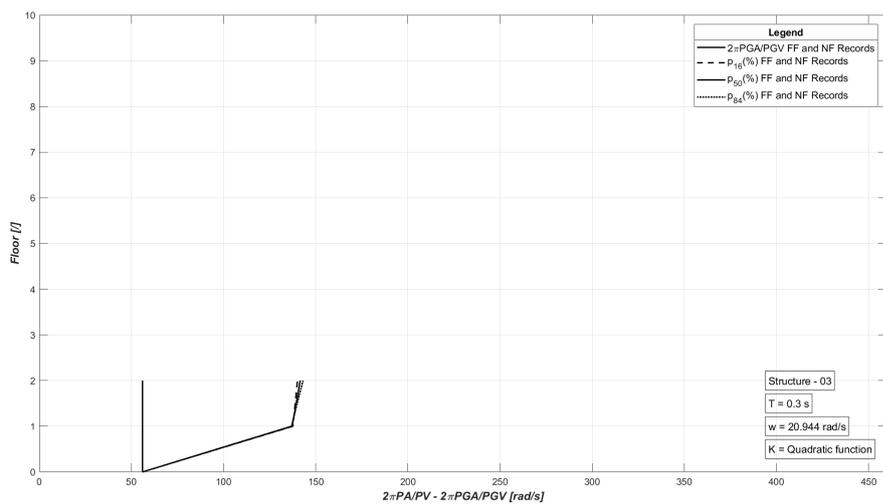


Figura 9.103: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

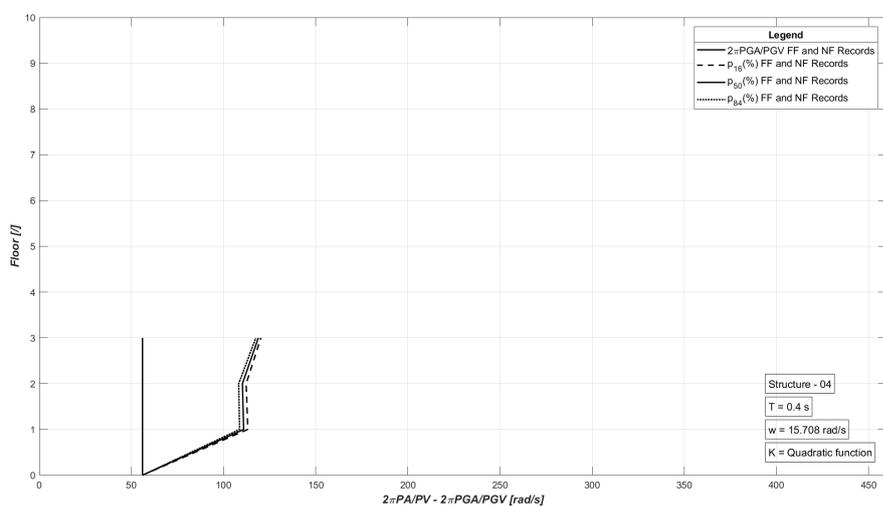


Figura 9.104: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

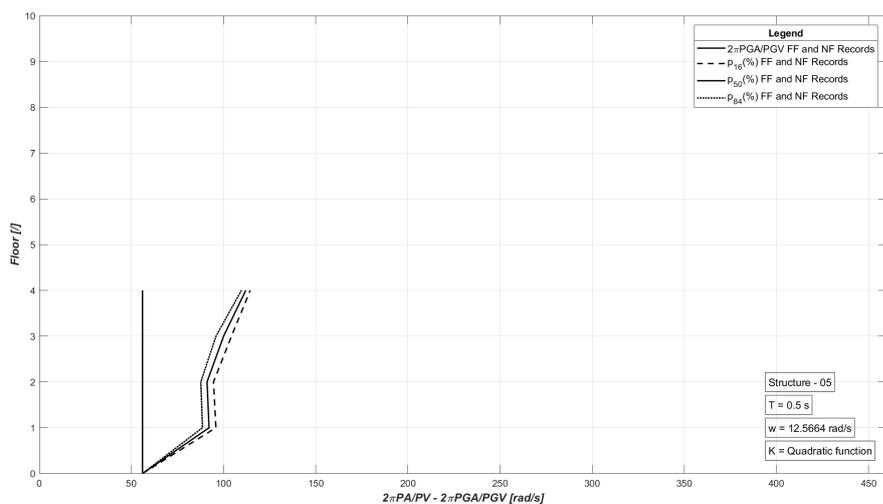


Figura 9.105: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

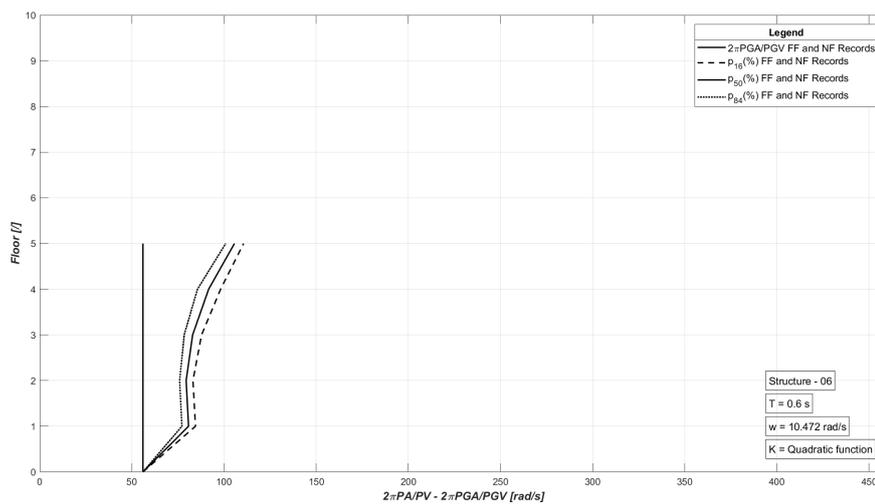


Figura 9.106: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

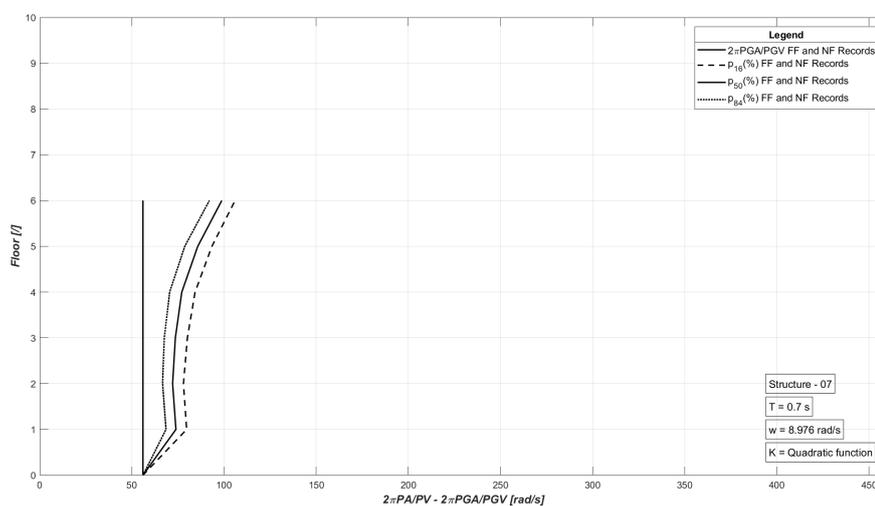


Figura 9.107: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

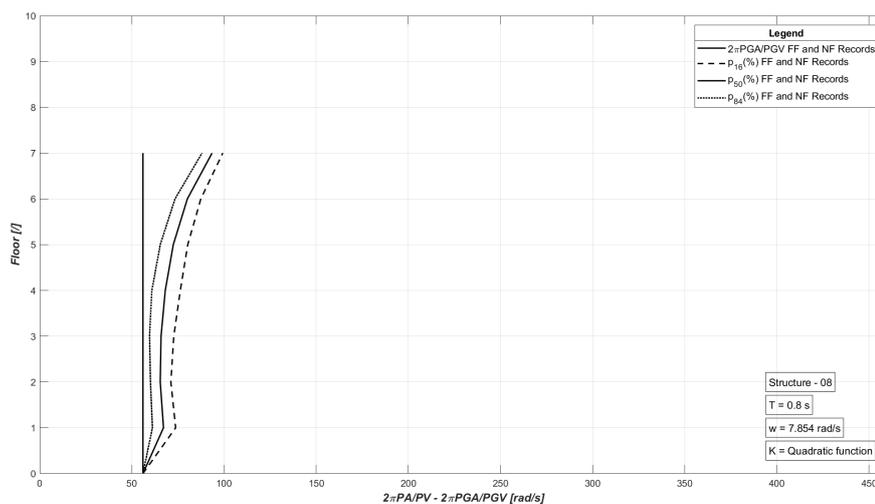


Figura 9.108: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

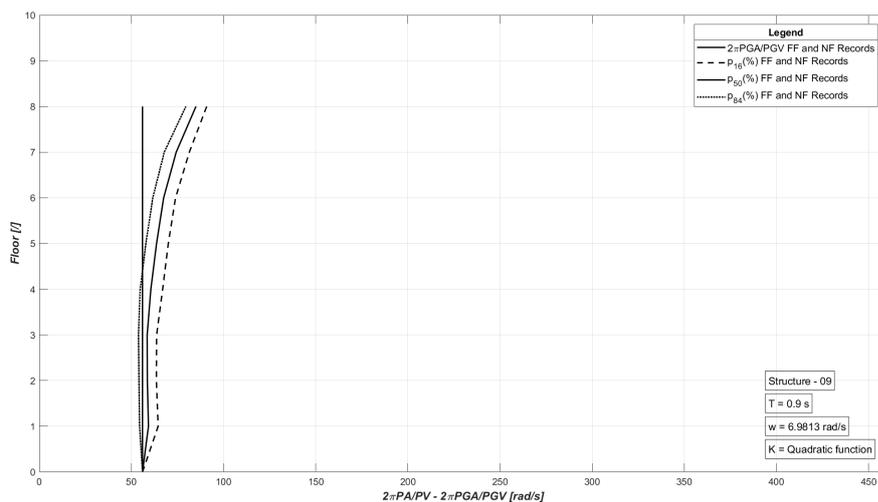


Figura 9.109: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

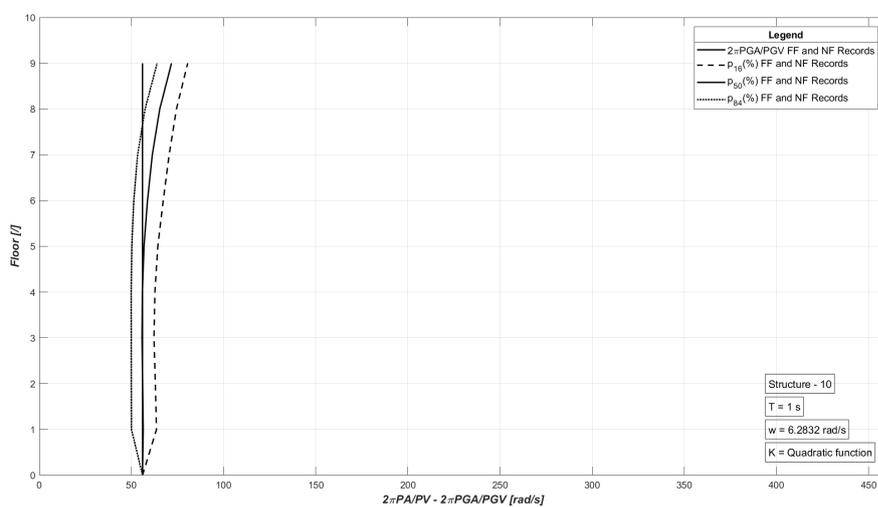


Figura 9.110: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

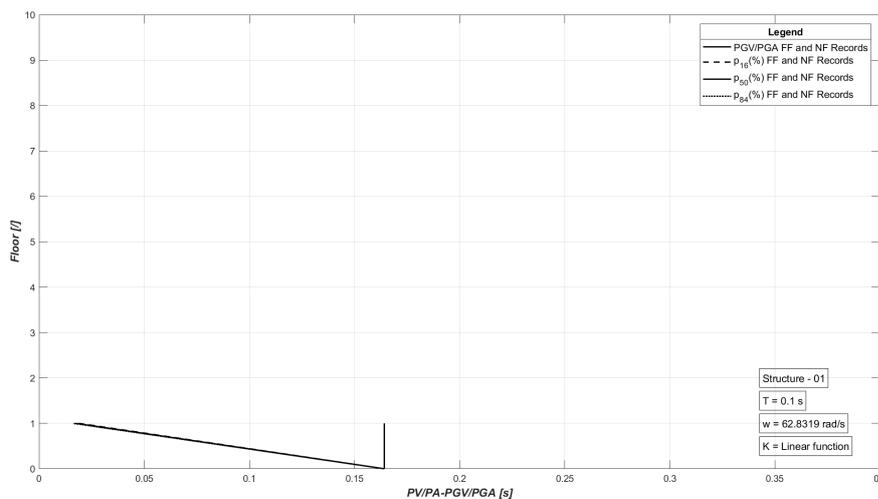


Figura 9.111: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

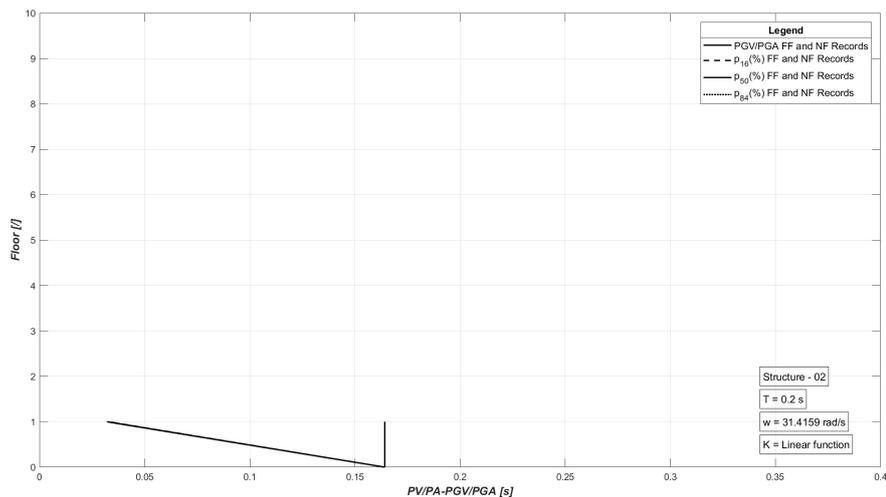


Figura 9.112: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

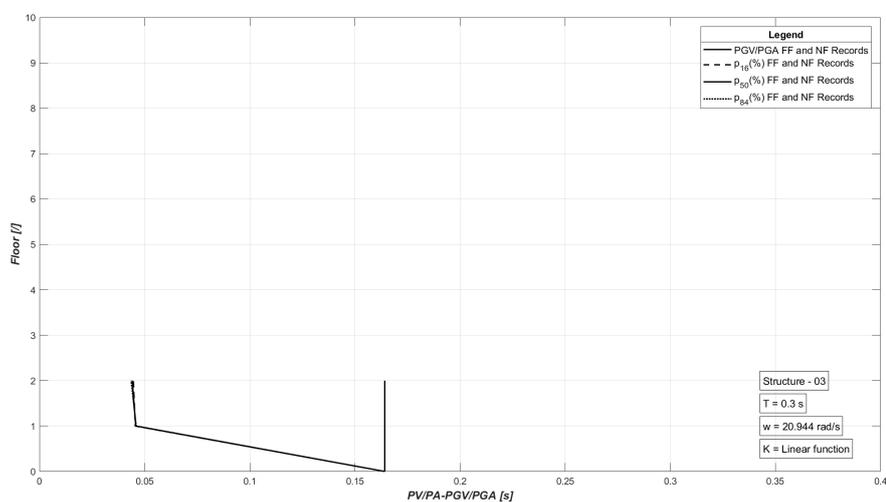


Figura 9.113: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

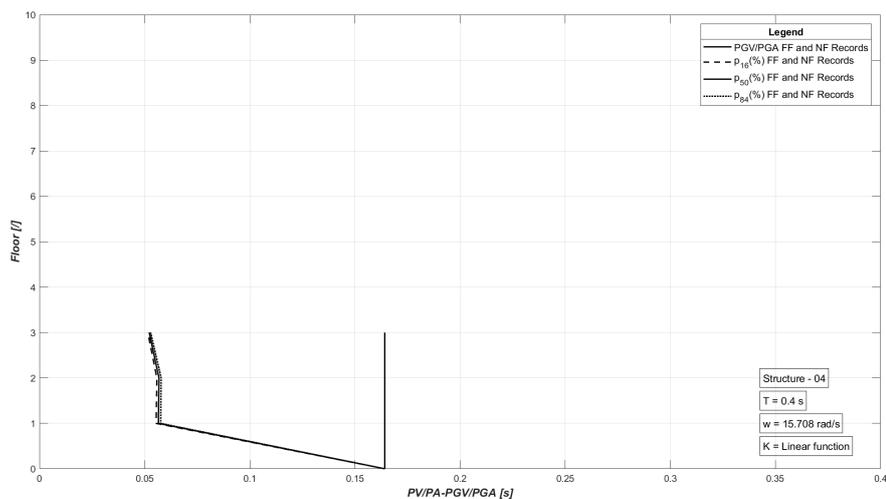


Figura 9.114: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

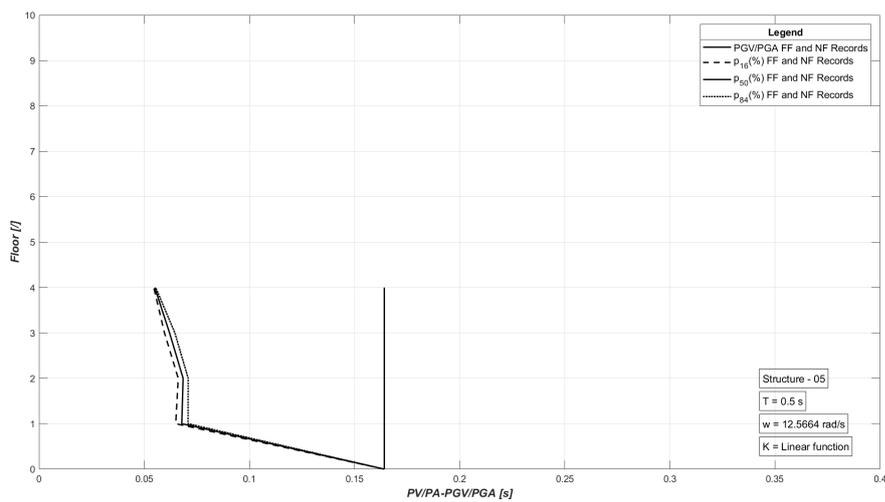


Figura 9.115: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

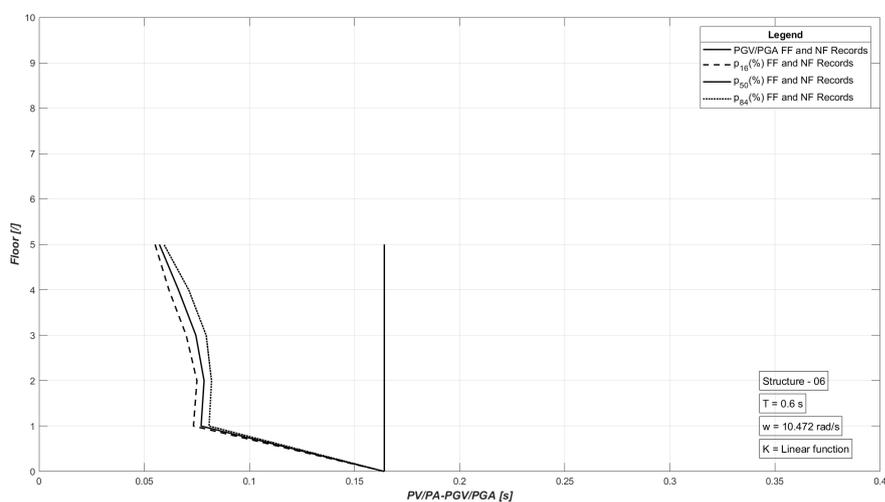


Figura 9.116: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

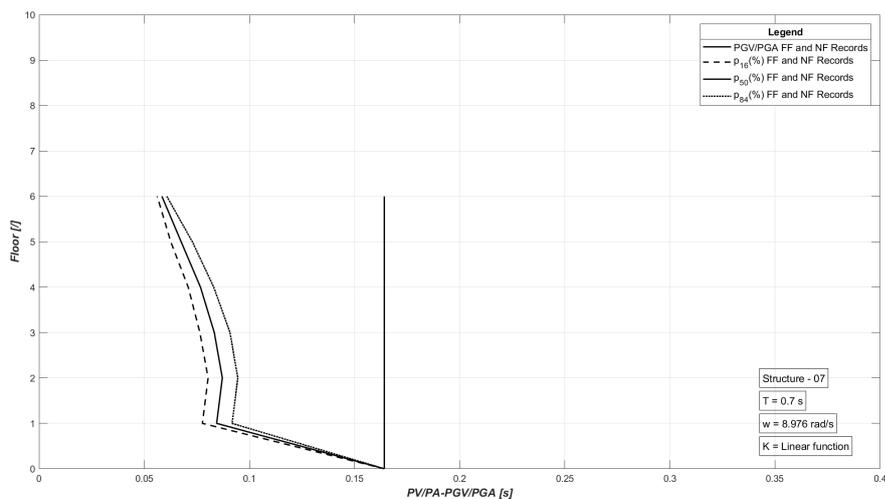


Figura 9.117: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

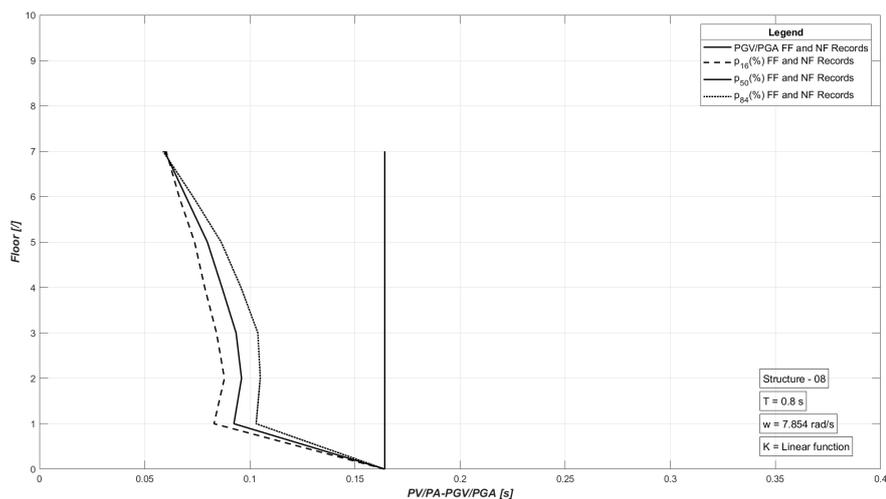


Figura 9.118: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

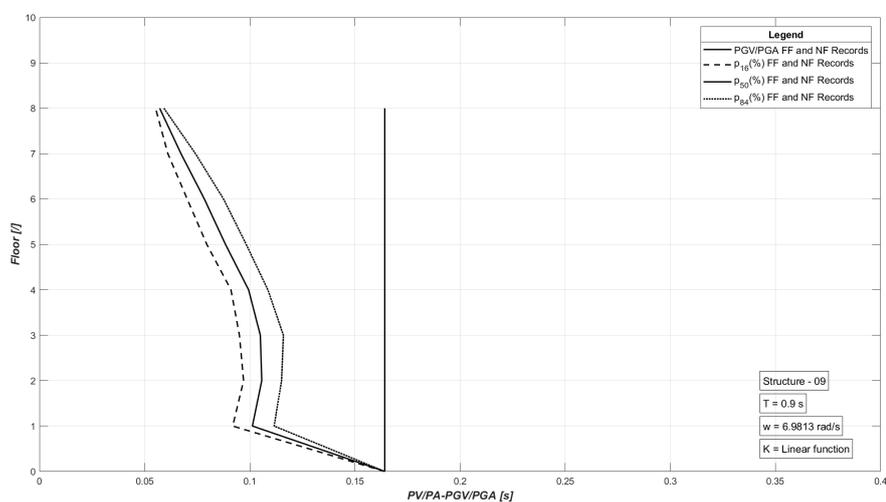


Figura 9.119: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 09.

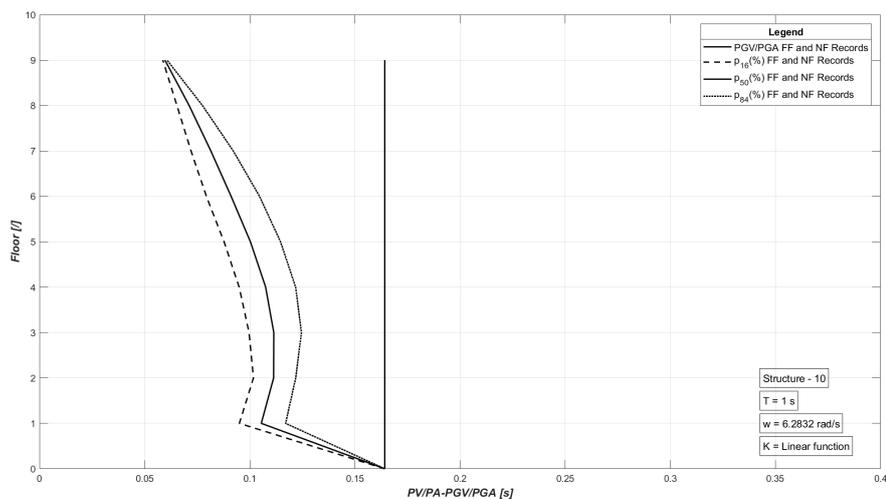


Figura 9.120: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 10.

9.2 Grafici inerenti all’analisi dei telai Shear-Type con IM normalizzata tramite lo spettro di risposta

Si riportano i grafici inerenti all’analisi delle strutture Shear-Type effettuate sia per i tre set di sismi Far-Field (FF), sia per i sismi Near-Fault (NF), sia per entrambe le tipologie di sismi, considerando una IM normalizzata tramite lo spettro di risposta. Anche in questo caso un’ulteriore suddivisione è stata effettuata considerando prima la matrice di rigidità $[K_{lin}]$ e successivamente la matrice di rigidità quadratica $[K_{quadr}]$, questo per tutte le combinazioni di sismi considerate. Inoltre i valori rappresentati nei grafici corrispondono ai valori statistici e di dispersione descritti nell’analisi parametrica del problema, in particolare vengono rappresentati il sedicesimo percentile ($p_{16}(\%)$), il cinquantesimo percentile ($p_{50}(\%)$) e infine l’ottantaquattresimo percentile ($p_{84}(\%)$). Per ogni struttura sono state costruite due tipologie di grafici:

- **Tipologia 1**, grafici con $2\pi \frac{PA}{PV} - 2\pi \frac{PGA}{PGV} \left[\frac{rad}{s} \right]$ sull’asse delle ascisse e il n^o piani sull’asse delle ordinate;
- **Tipologia 2**, grafici con $\frac{PV}{PA} - \frac{PGV}{PGA} [s]$ sull’asse delle ascisse e il n^o piani sull’asse delle ordinate;

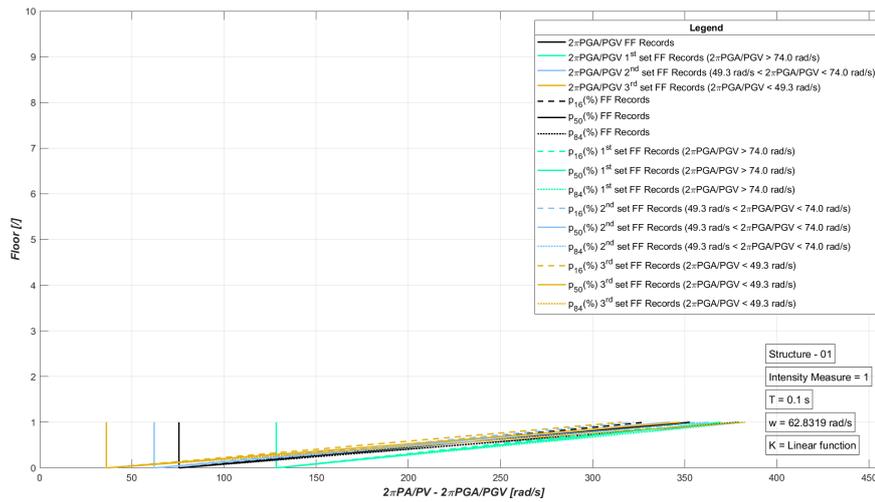


Figura 9.121: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

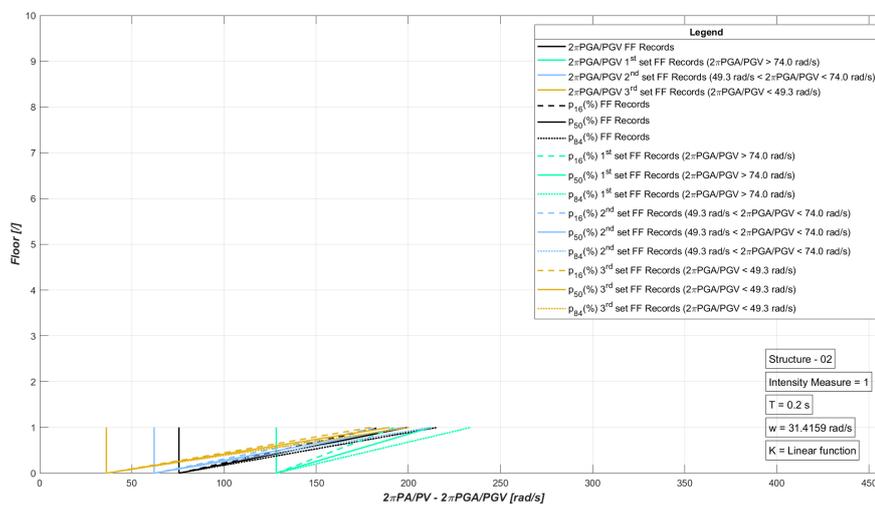


Figura 9.122: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

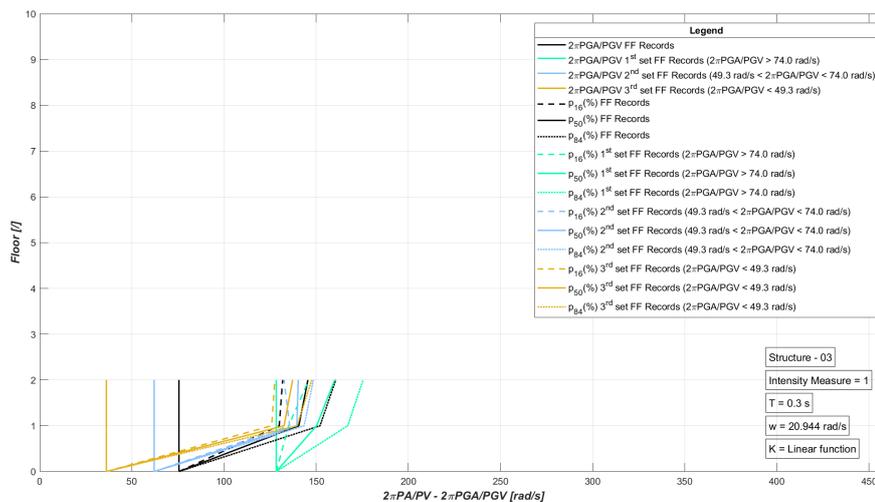


Figura 9.123: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

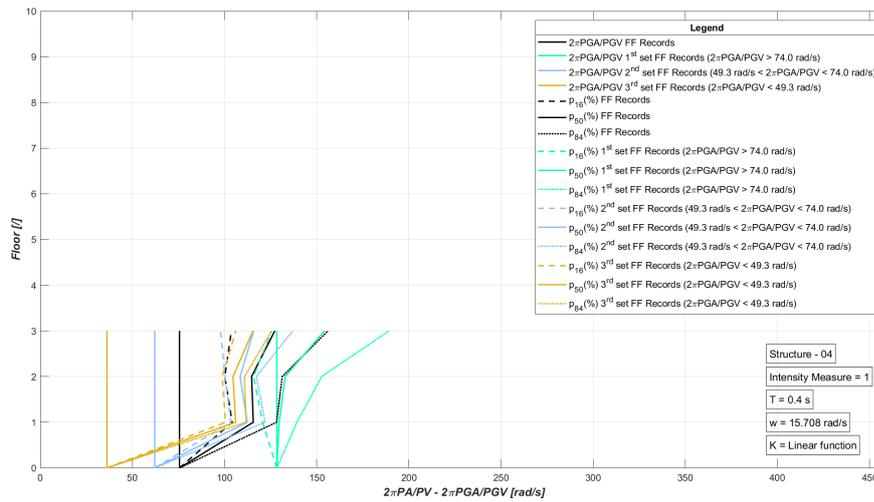


Figura 9.124: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

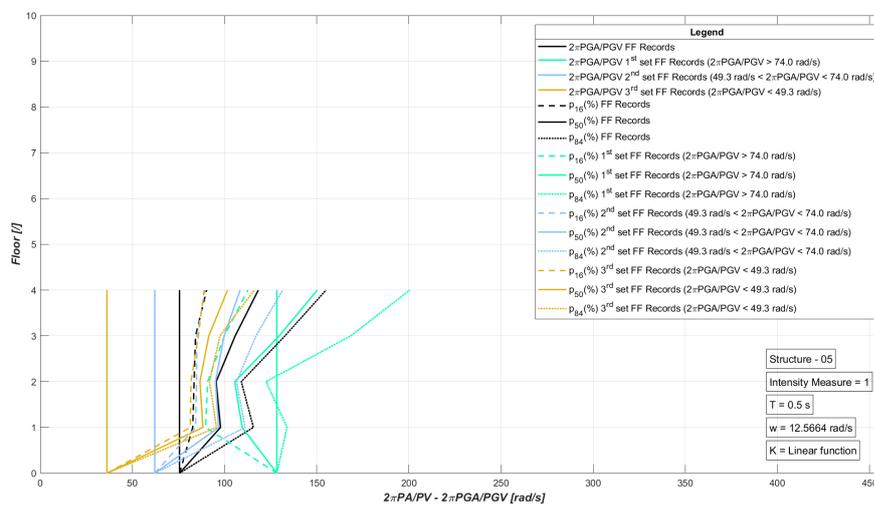


Figura 9.125: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

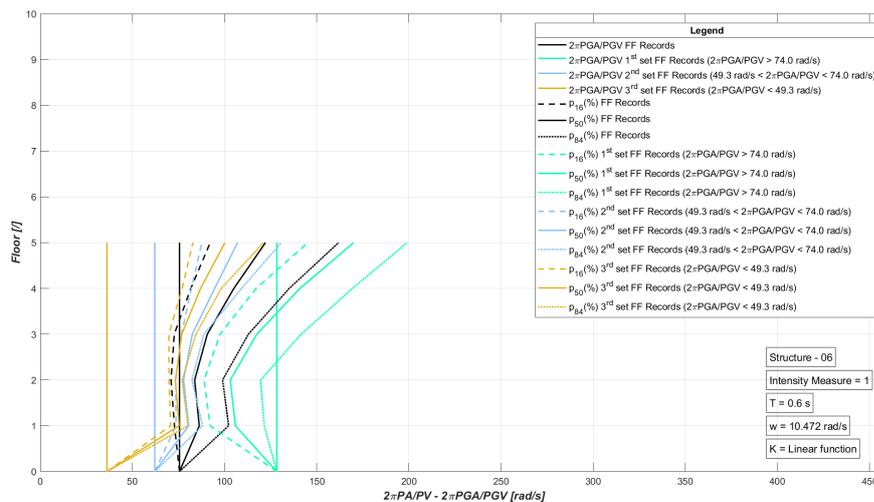


Figura 9.126: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

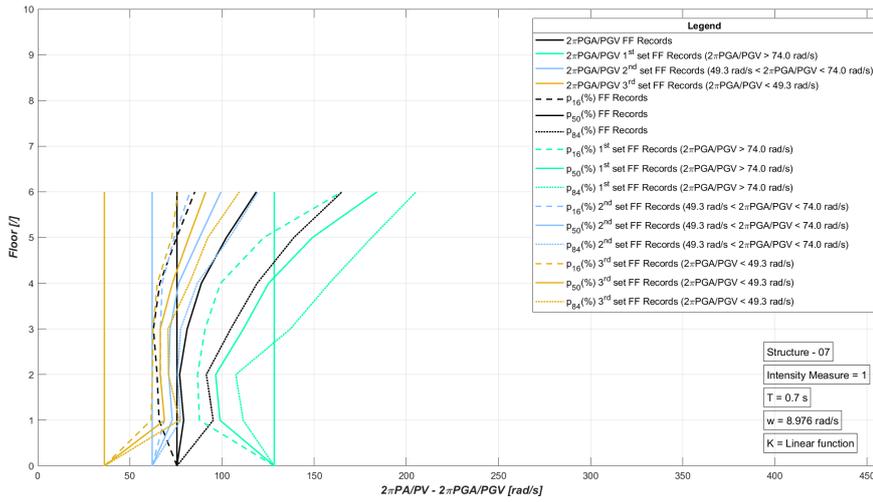


Figura 9.127: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

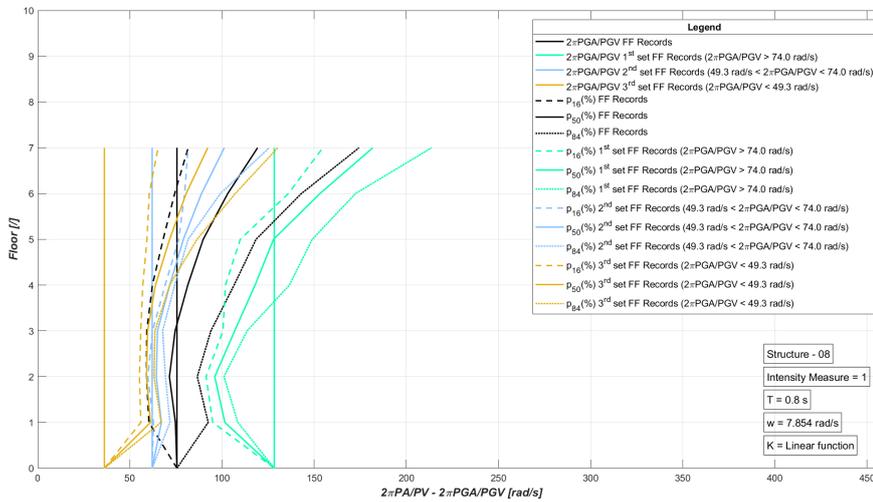


Figura 9.128: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

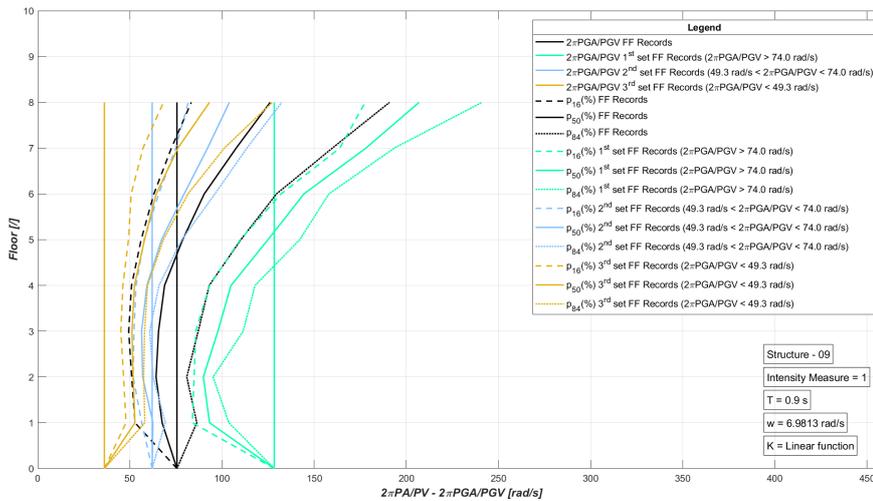


Figura 9.129: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

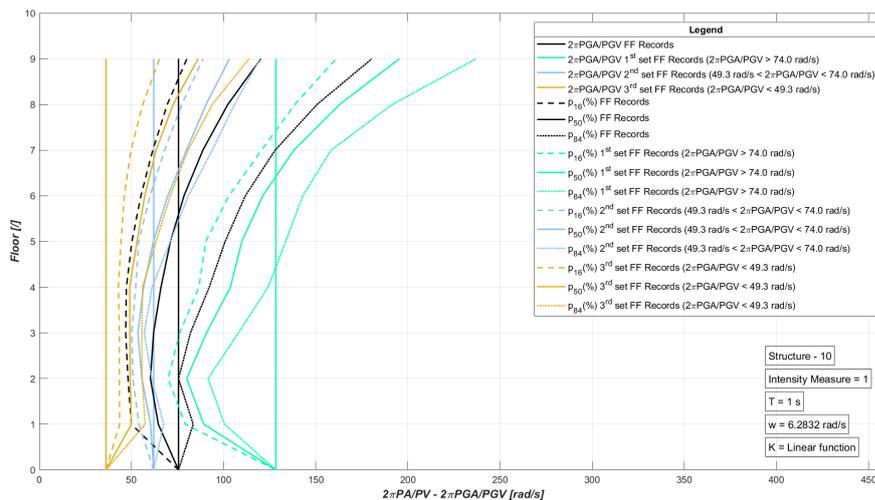


Figura 9.130: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

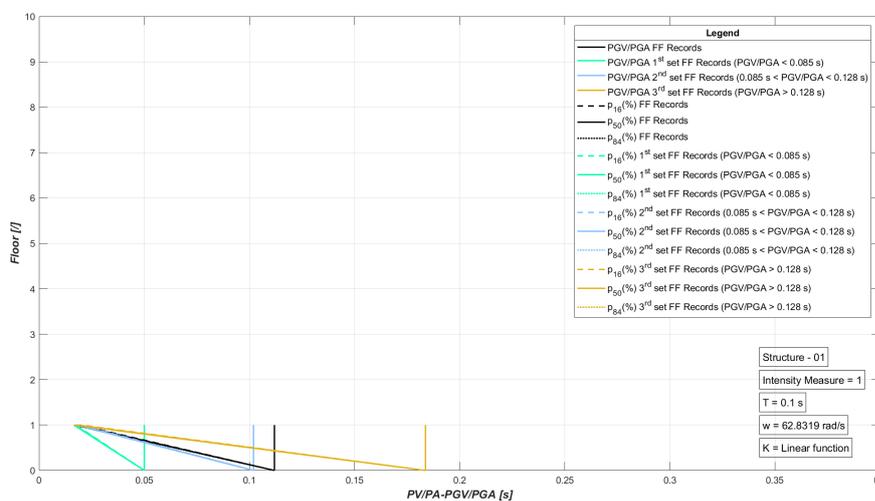


Figura 9.131: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

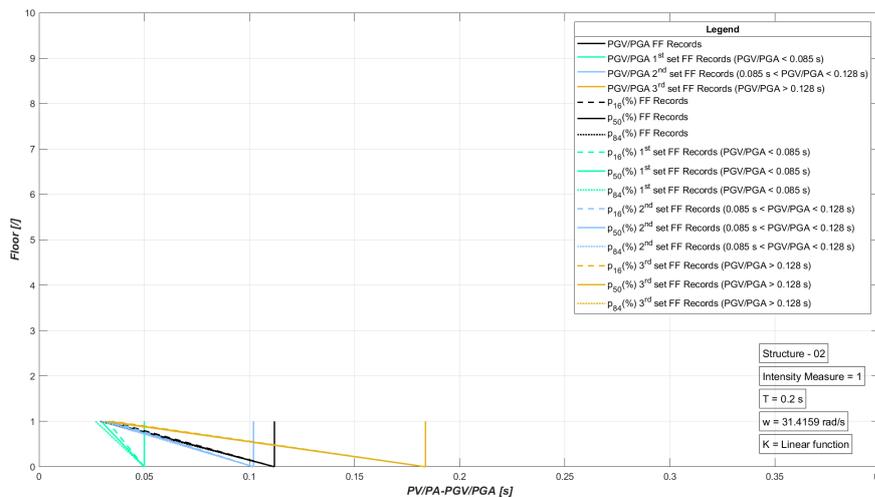


Figura 9.132: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

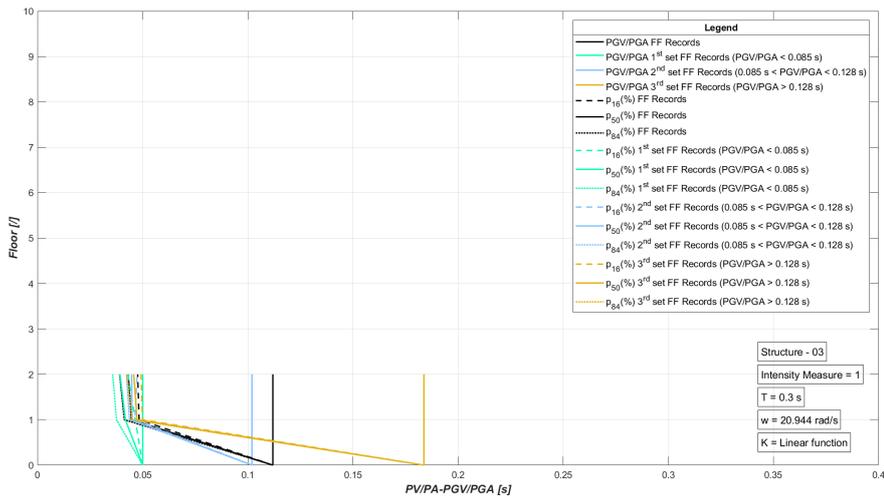


Figura 9.133: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

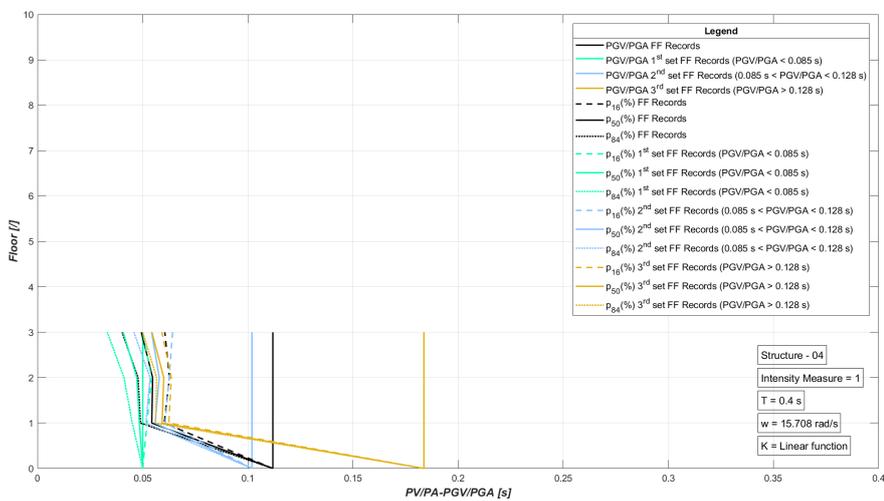


Figura 9.134: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

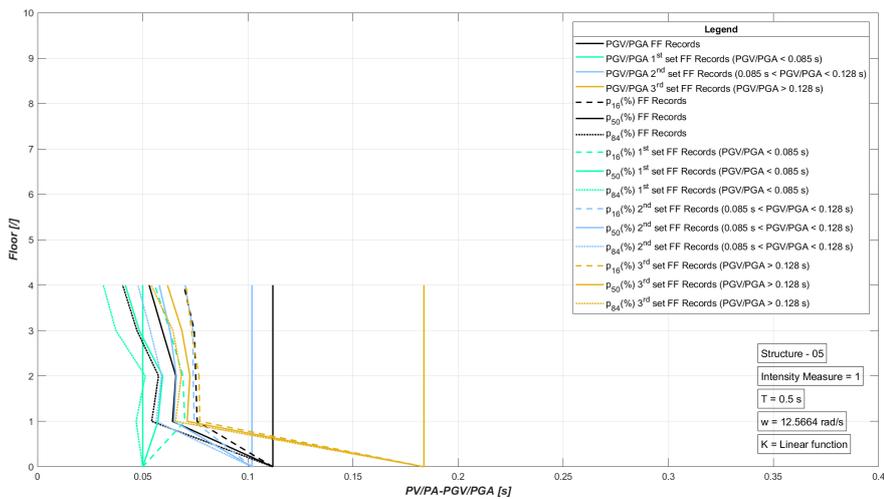


Figura 9.135: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

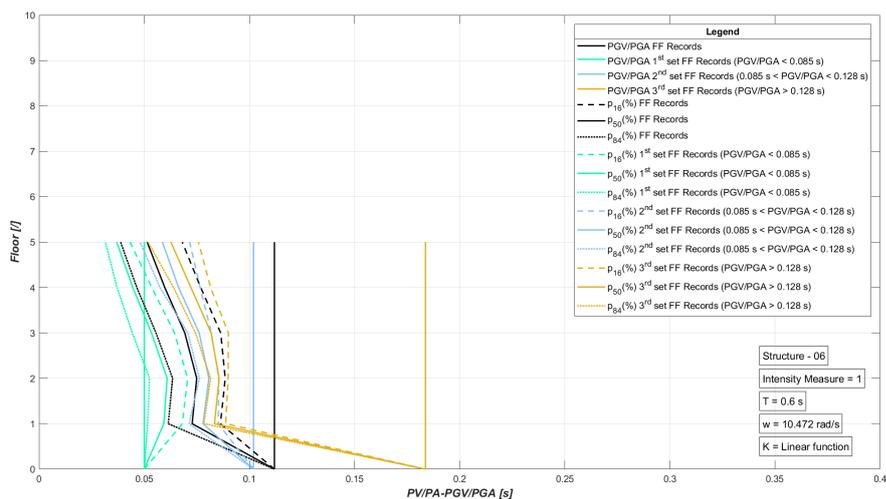


Figura 9.136: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

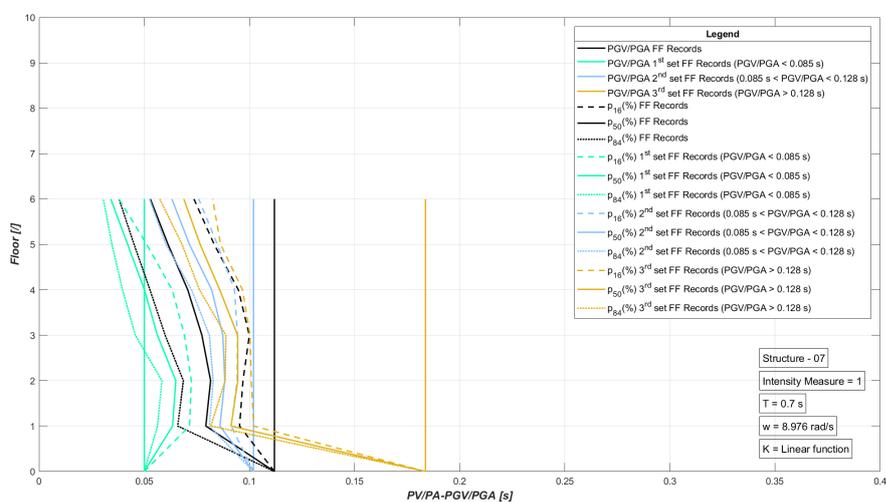


Figura 9.137: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

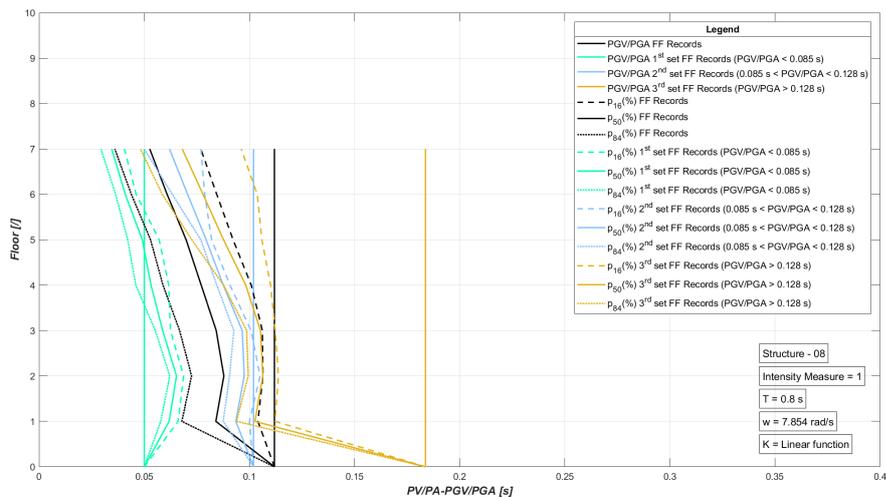


Figura 9.138: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

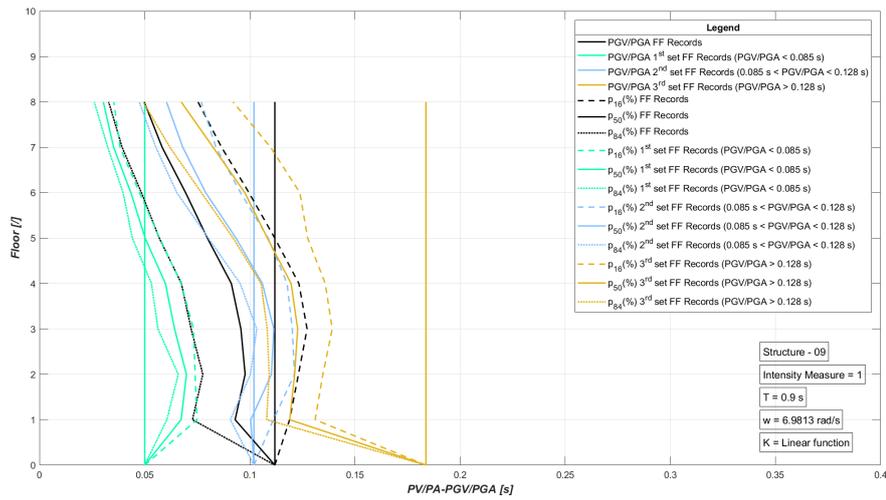


Figura 9.139: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

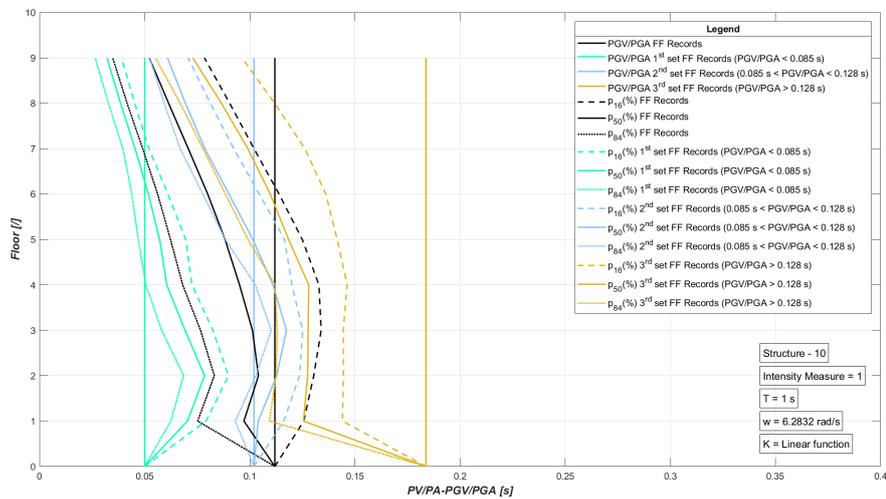


Figura 9.140: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

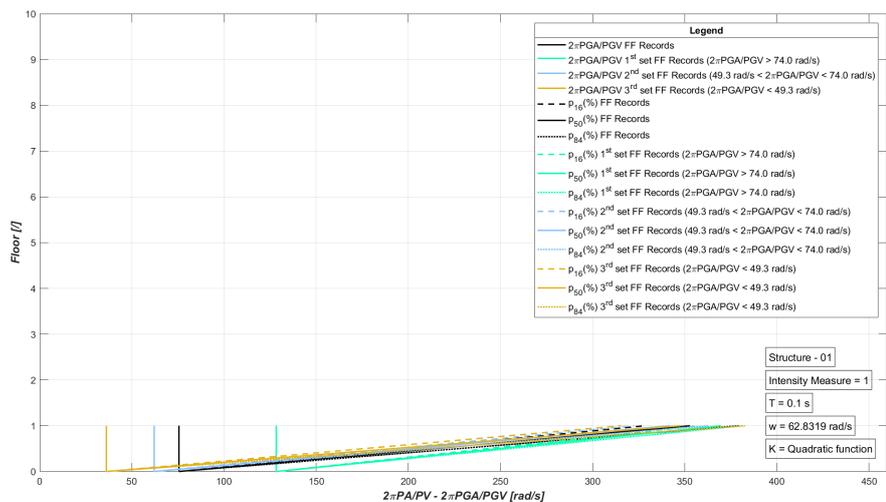


Figura 9.141: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

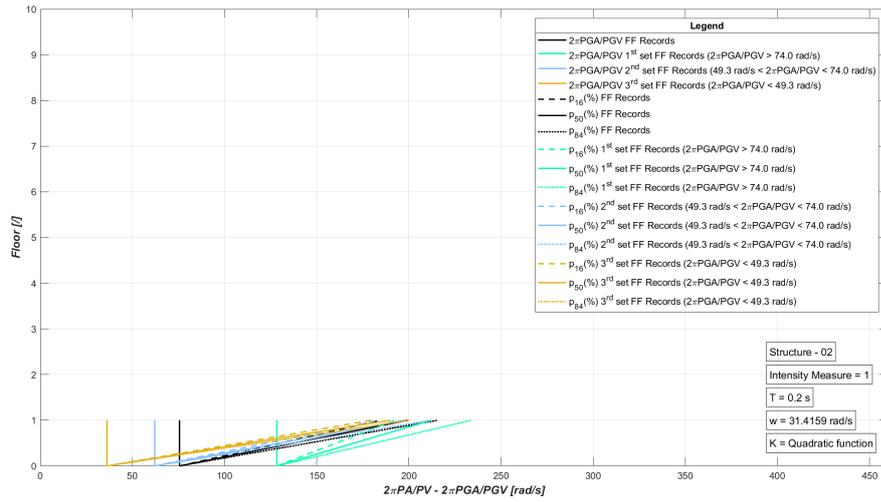


Figura 9.142: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 02.

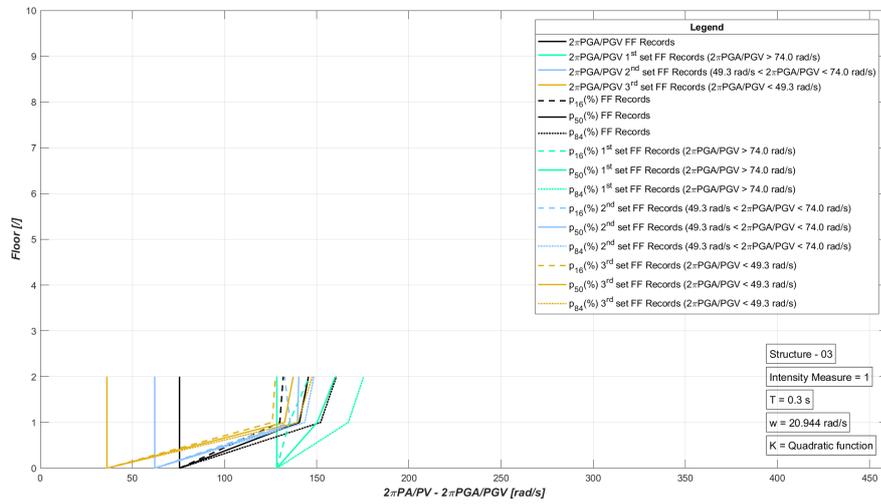


Figura 9.143: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 03.

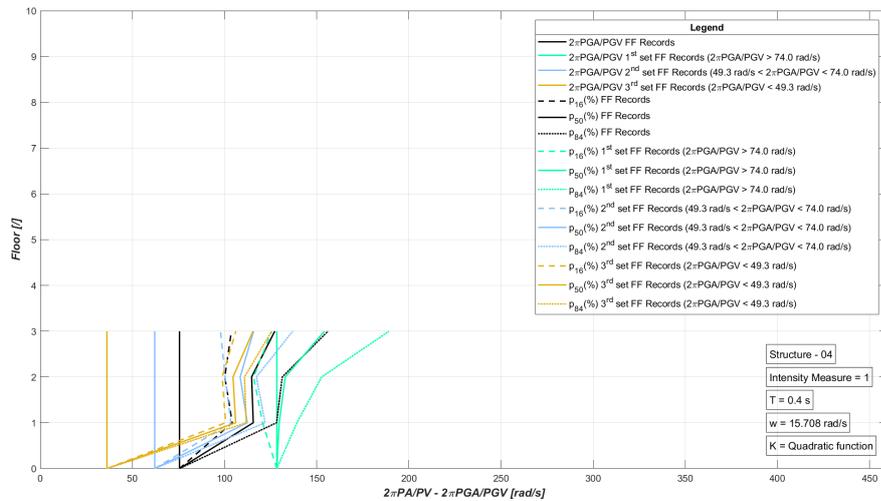


Figura 9.144: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

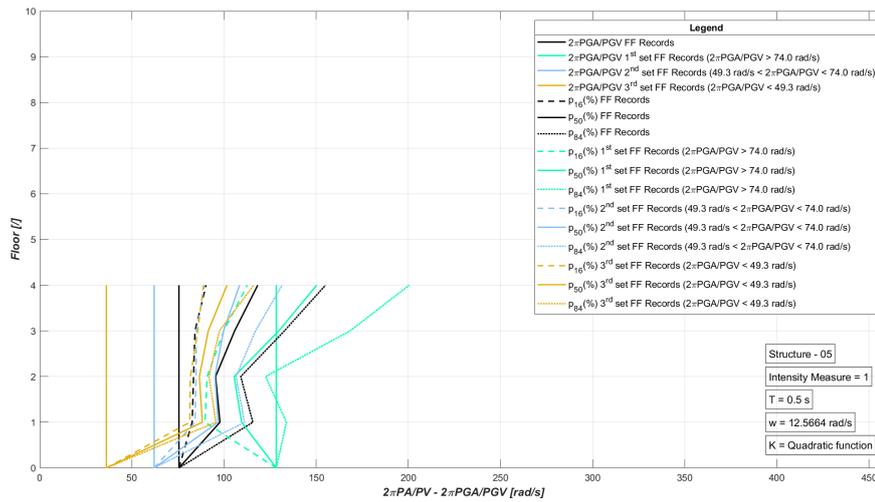


Figura 9.145: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

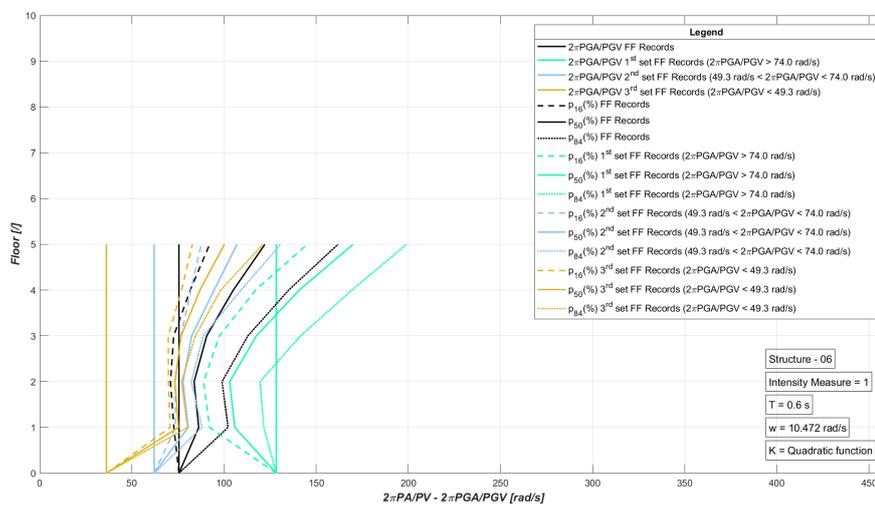


Figura 9.146: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

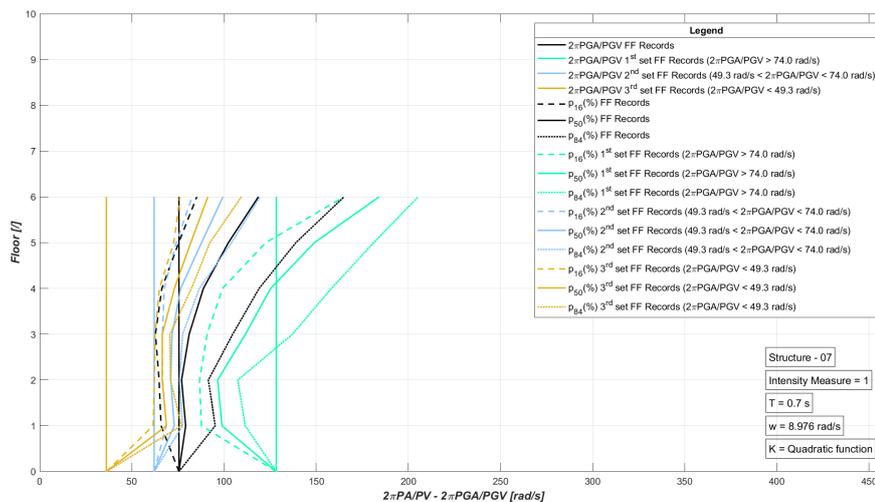


Figura 9.147: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

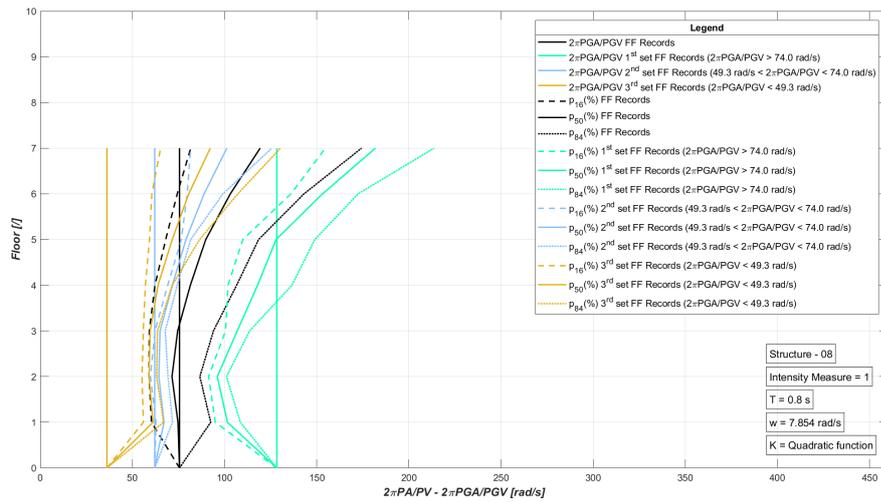


Figura 9.148: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

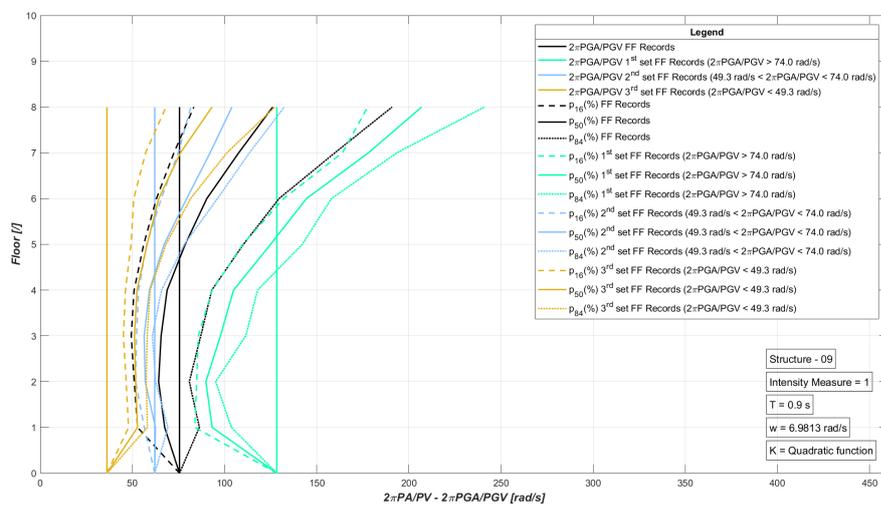


Figura 9.149: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

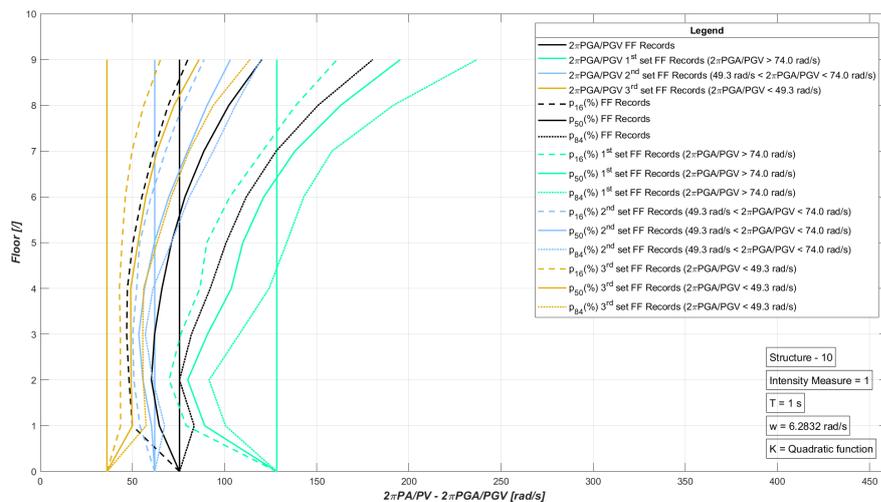


Figura 9.150: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

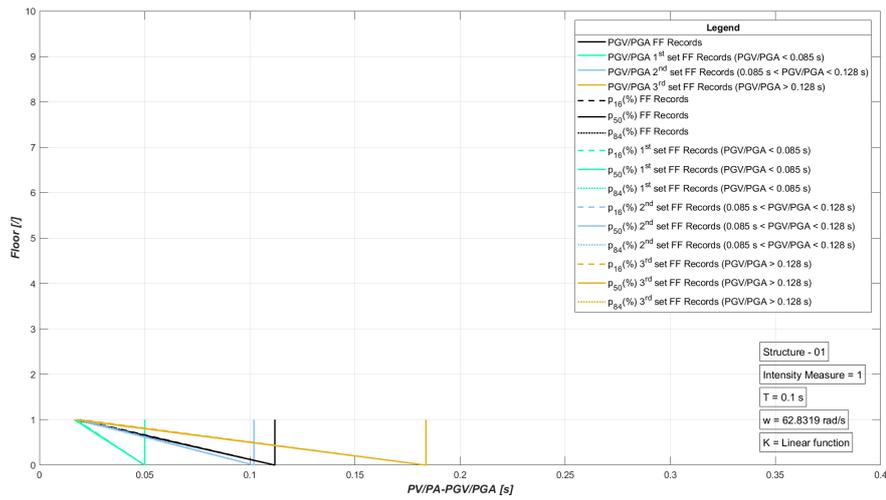


Figura 9.151: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

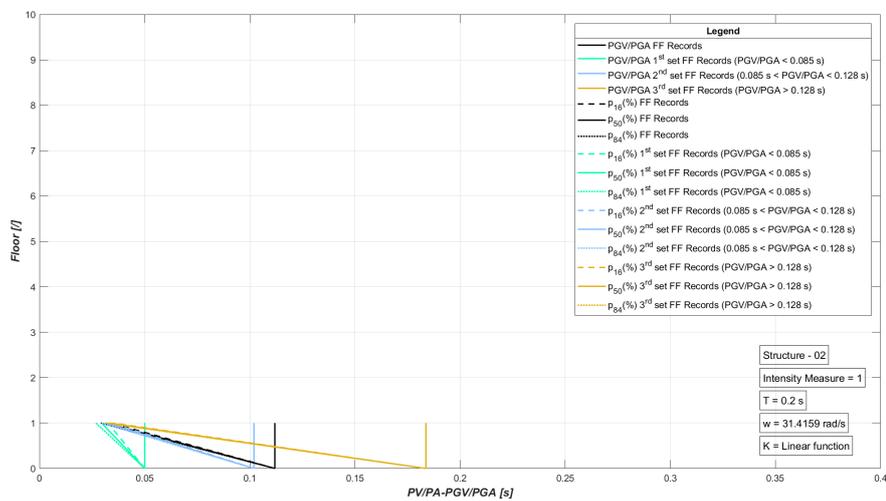


Figura 9.152: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

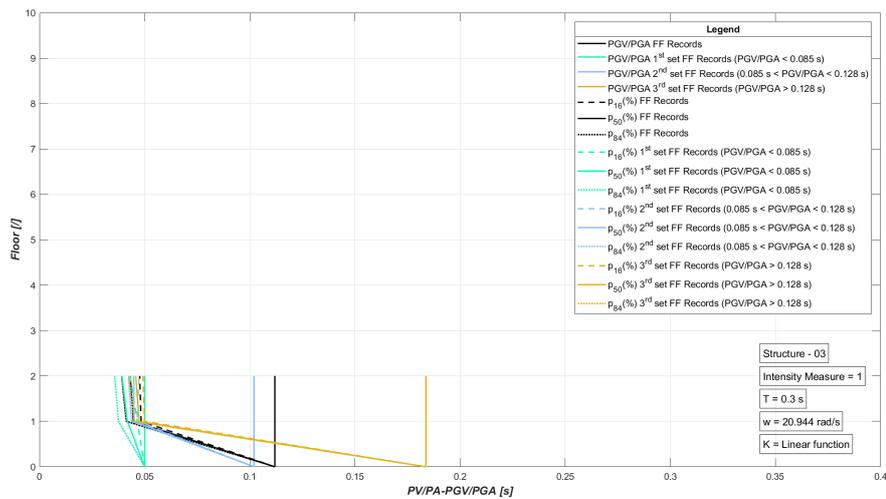


Figura 9.153: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

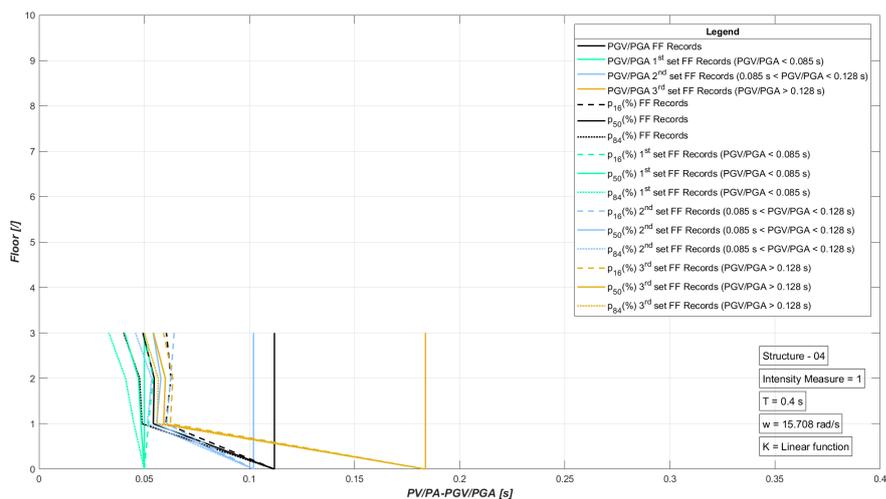


Figura 9.154: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

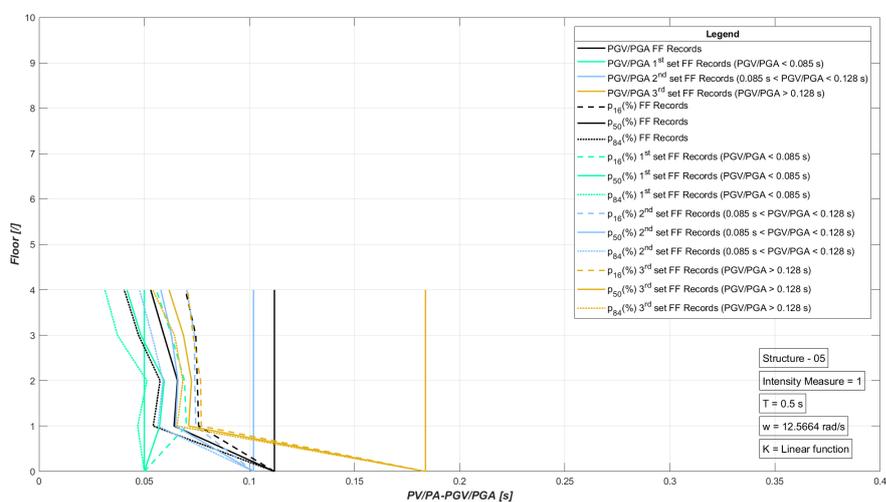


Figura 9.155: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

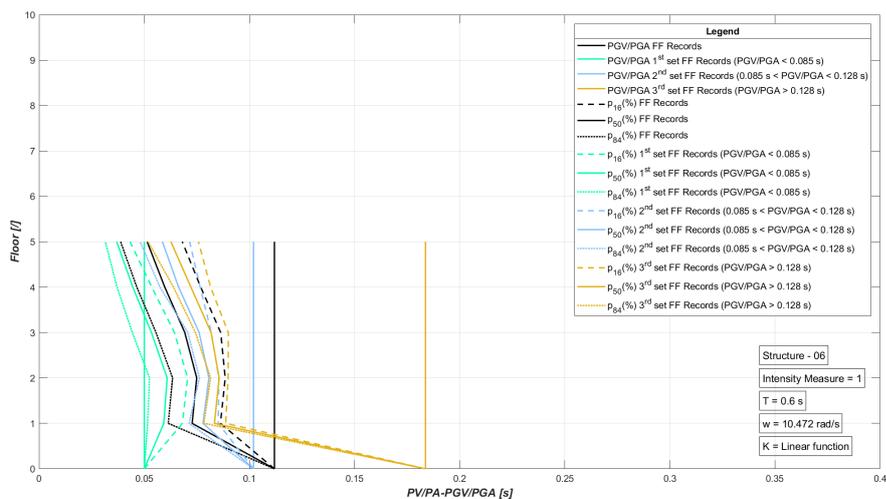


Figura 9.156: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

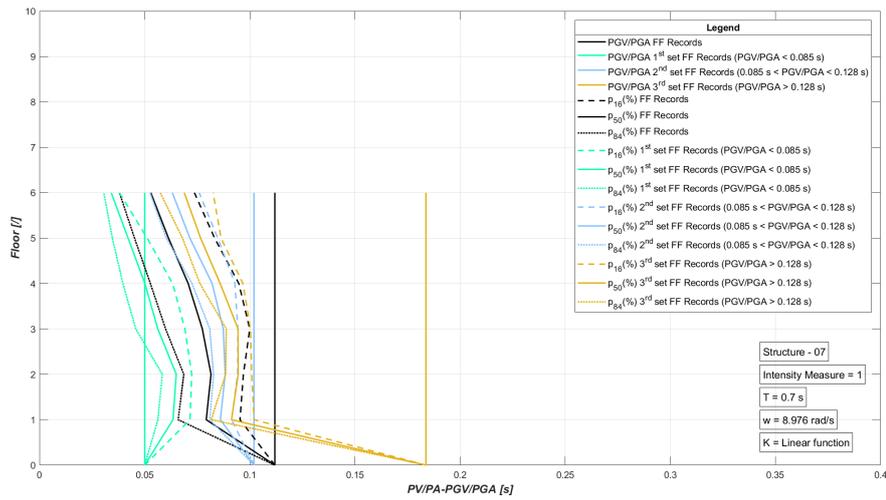


Figura 9.157: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 07.

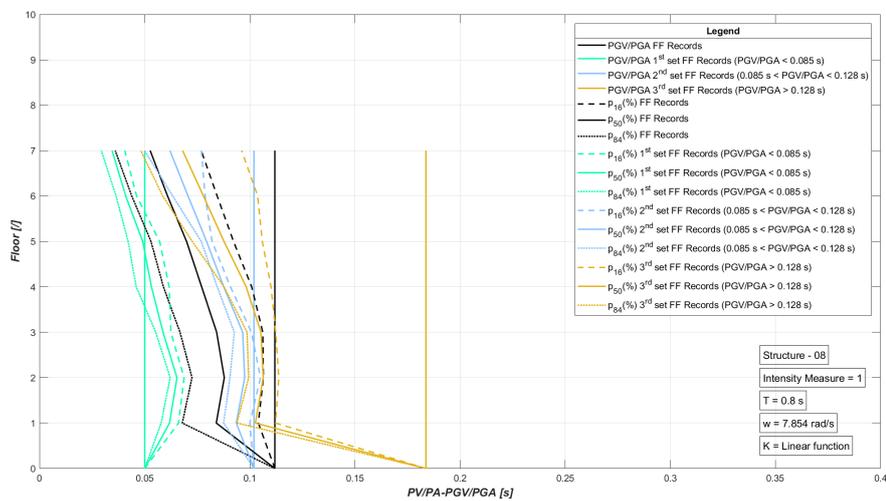


Figura 9.158: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

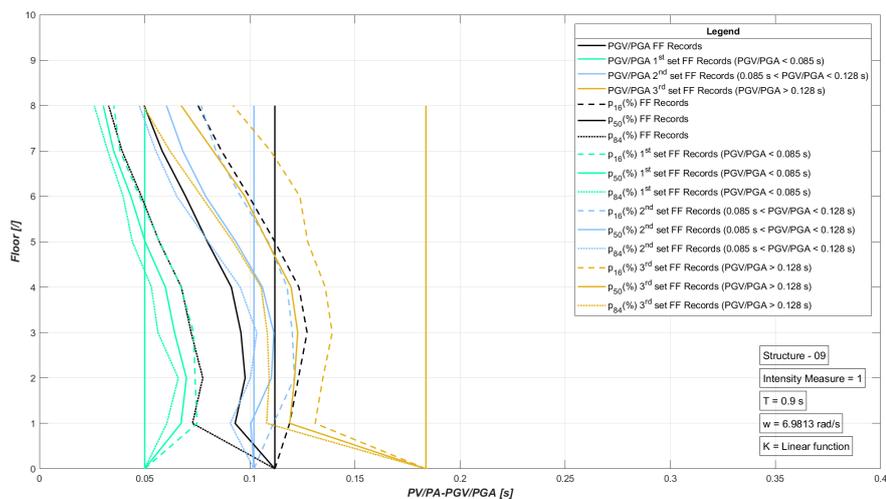


Figura 9.159: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

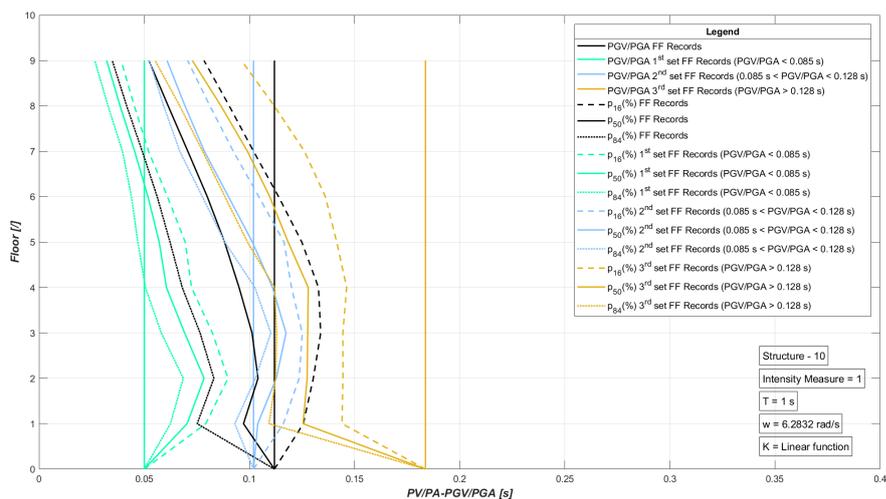


Figura 9.160: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

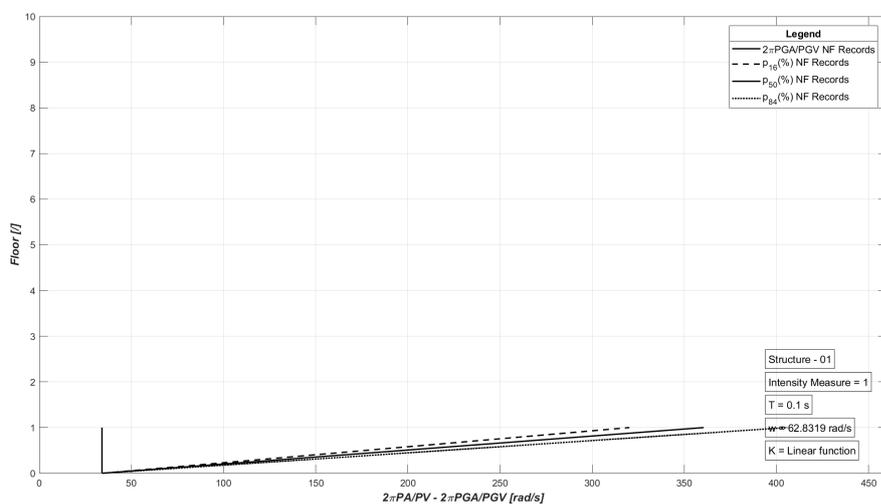


Figura 9.161: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

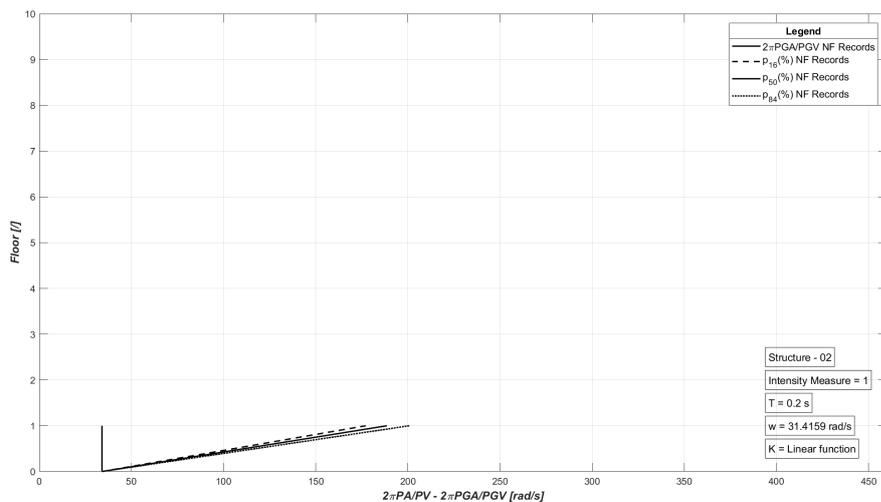


Figura 9.162: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

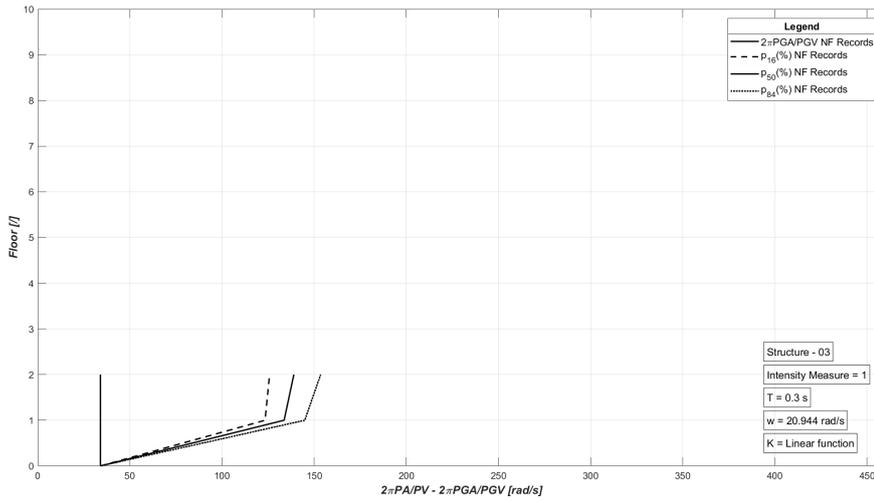


Figura 9.163: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

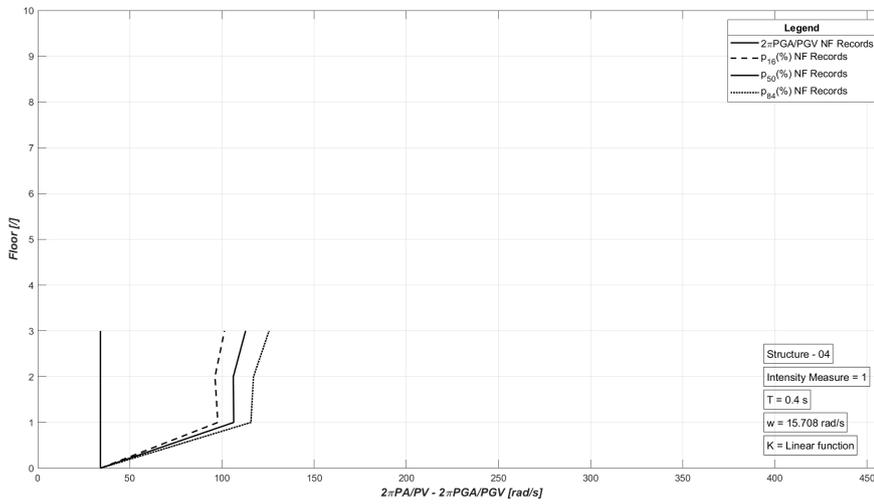


Figura 9.164: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

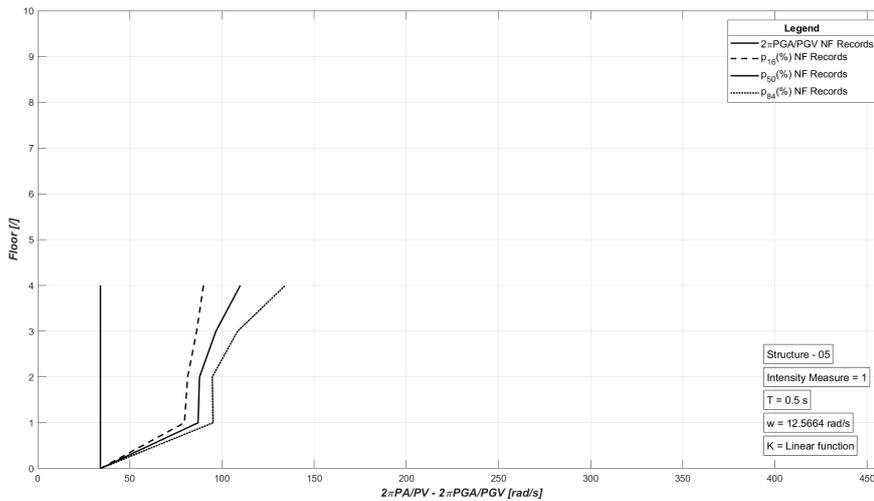


Figura 9.165: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

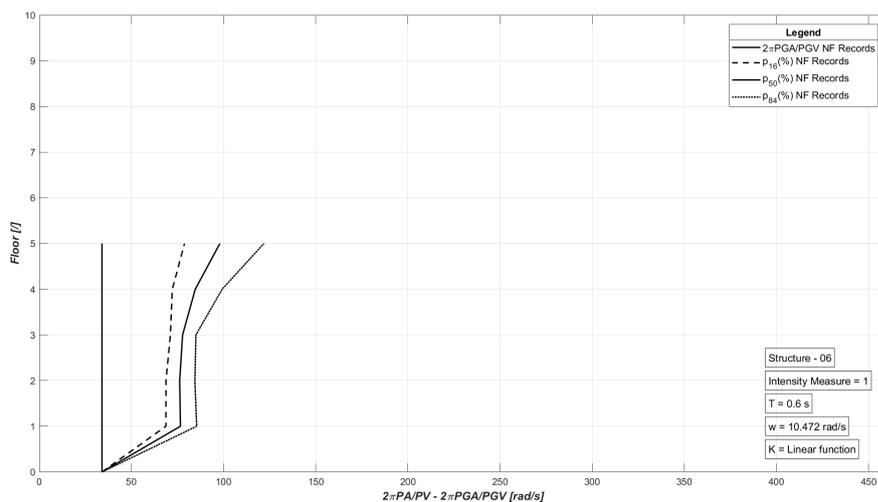


Figura 9.166: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

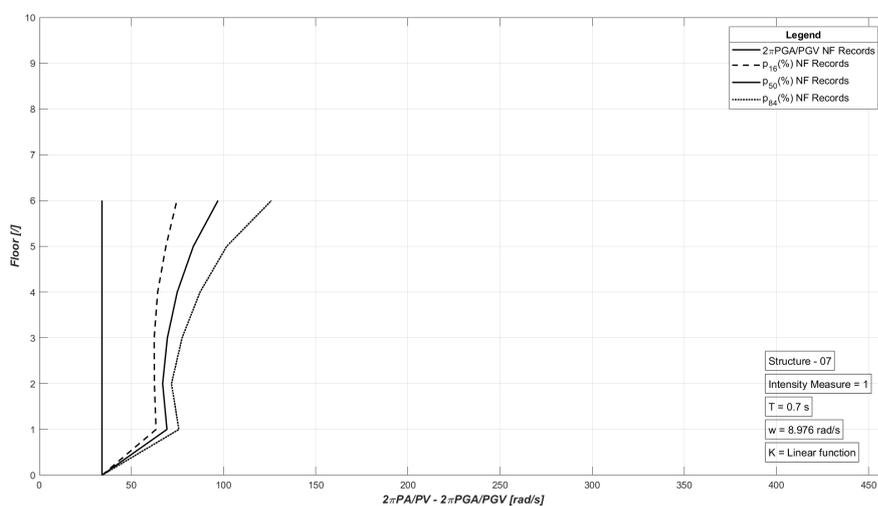


Figura 9.167: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

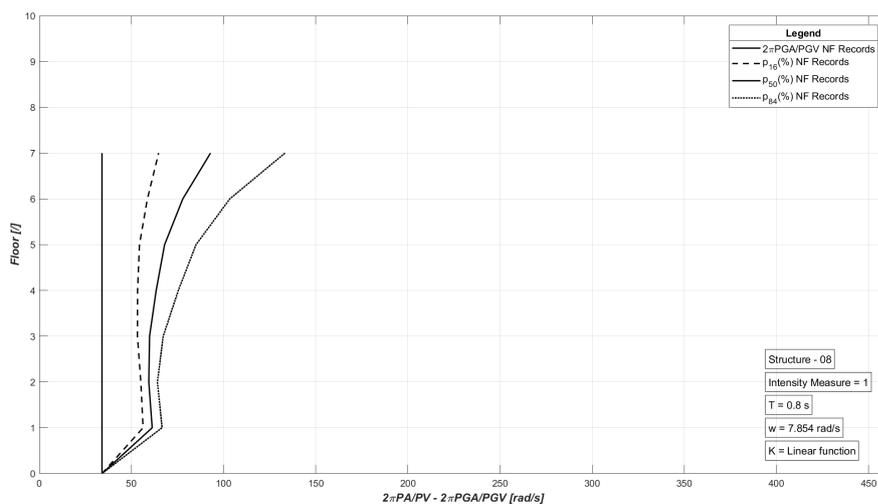


Figura 9.168: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

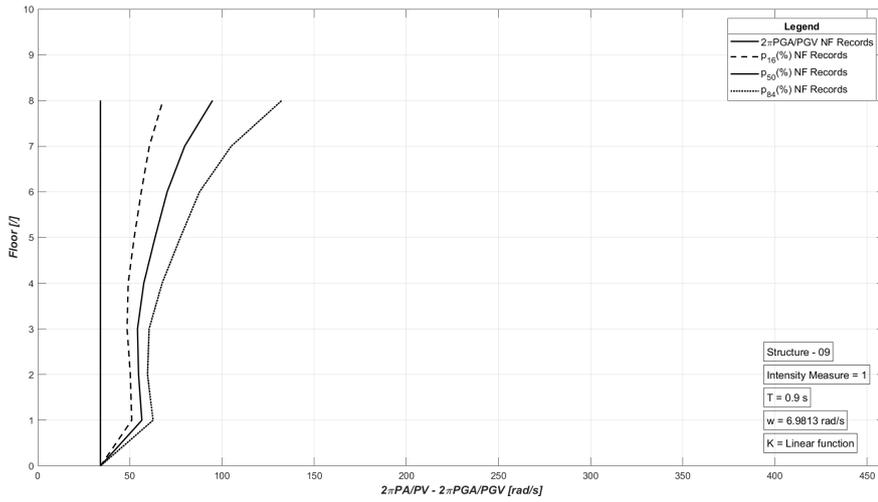


Figura 9.169: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

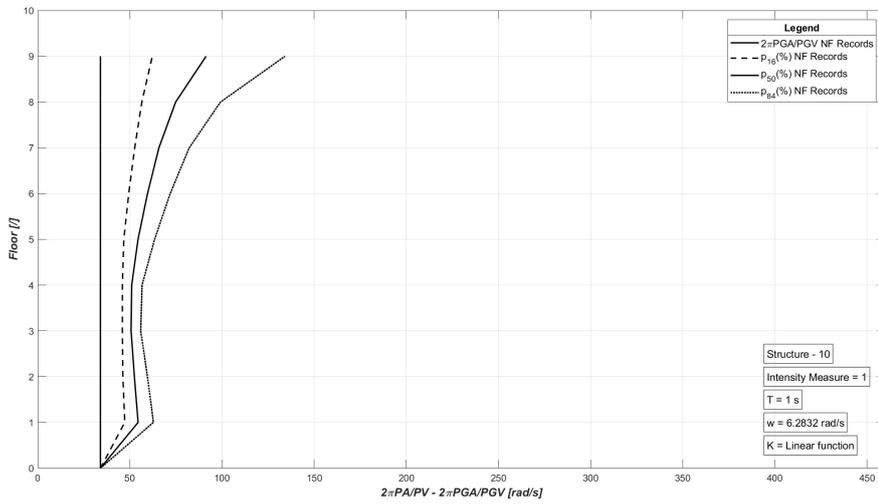


Figura 9.170: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

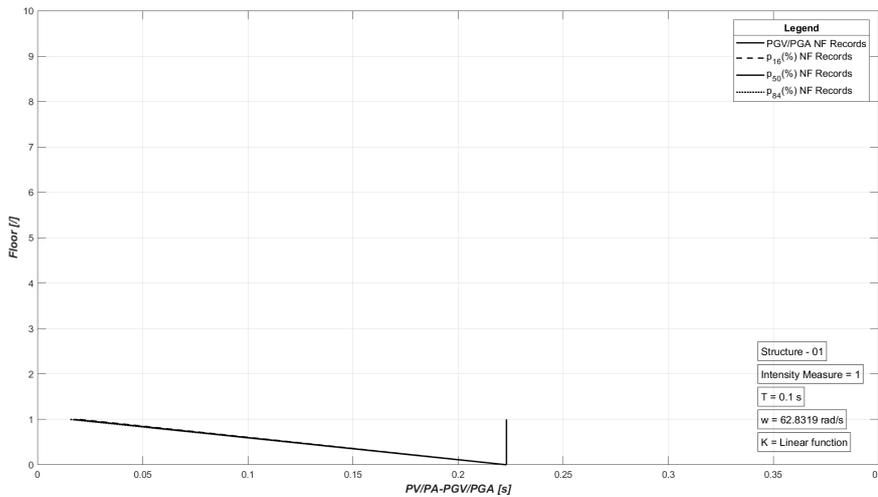


Figura 9.171: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

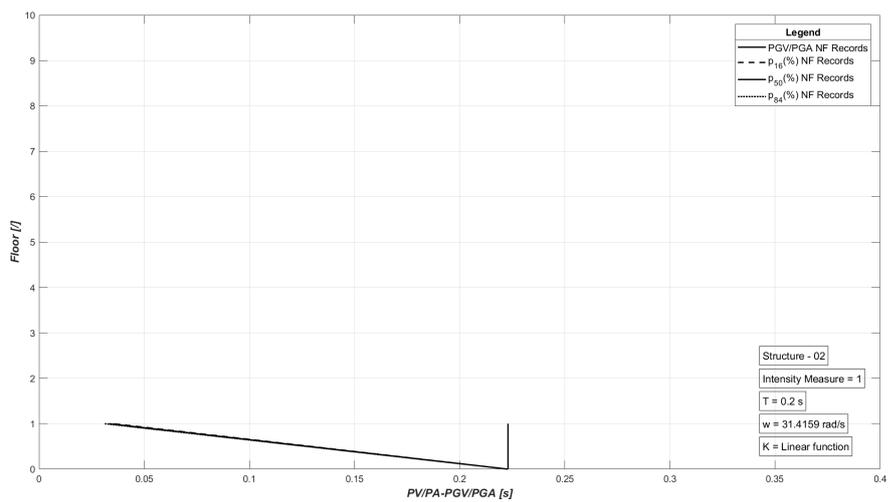


Figura 9.172: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

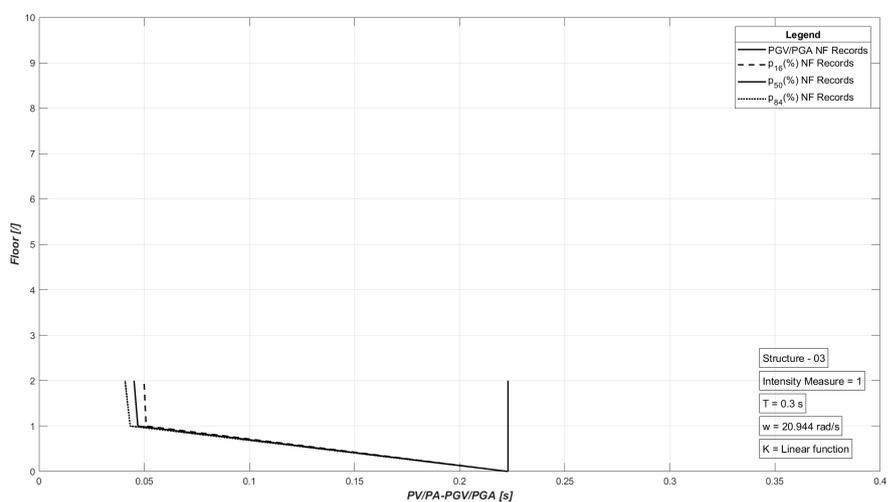


Figura 9.173: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

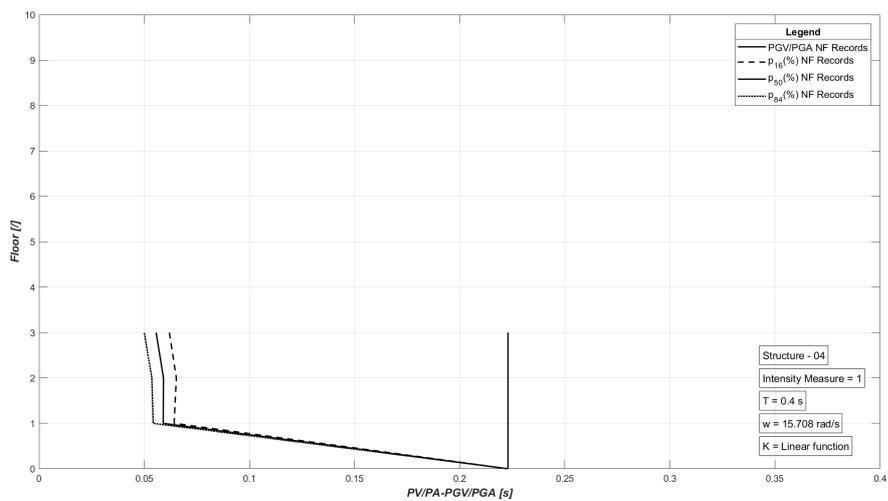


Figura 9.174: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

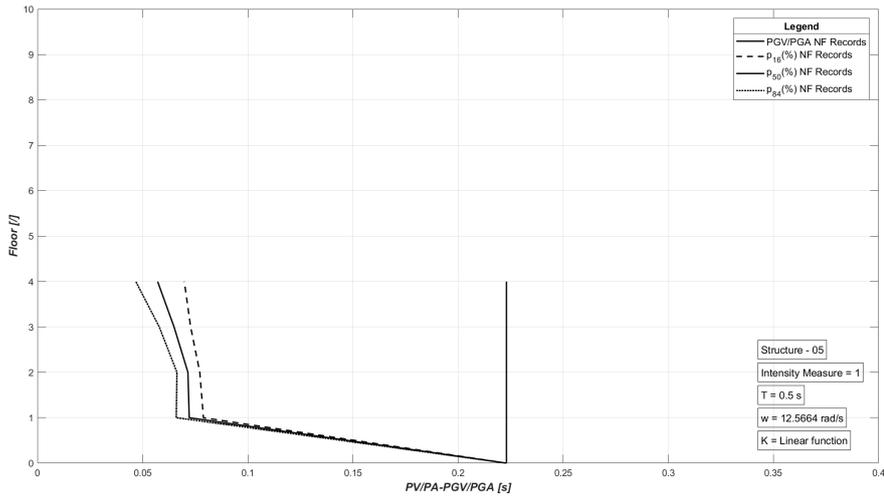


Figura 9.175: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

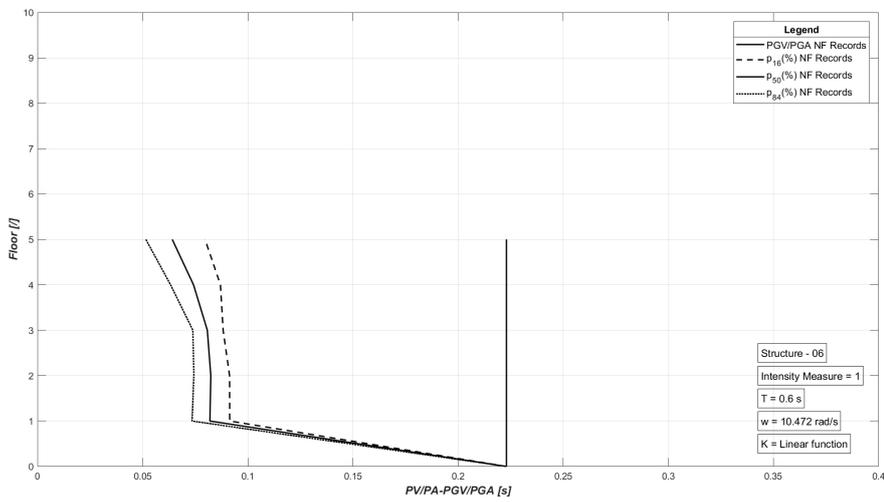


Figura 9.176: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

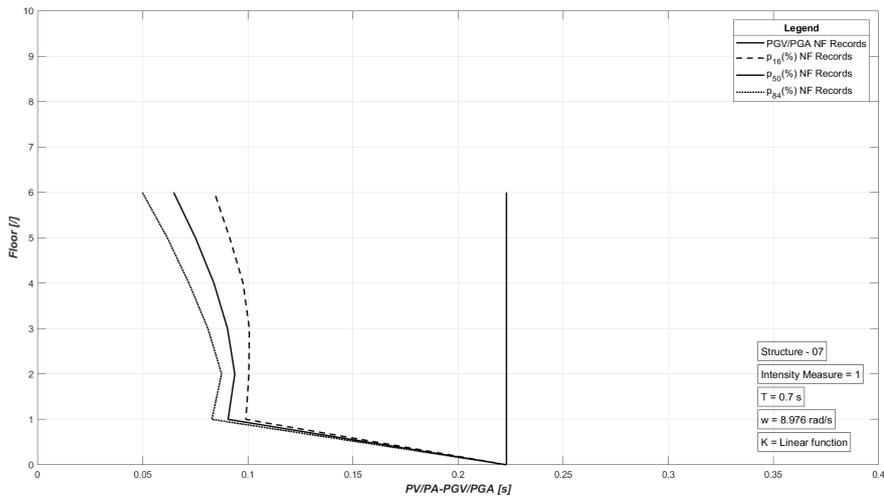


Figura 9.177: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

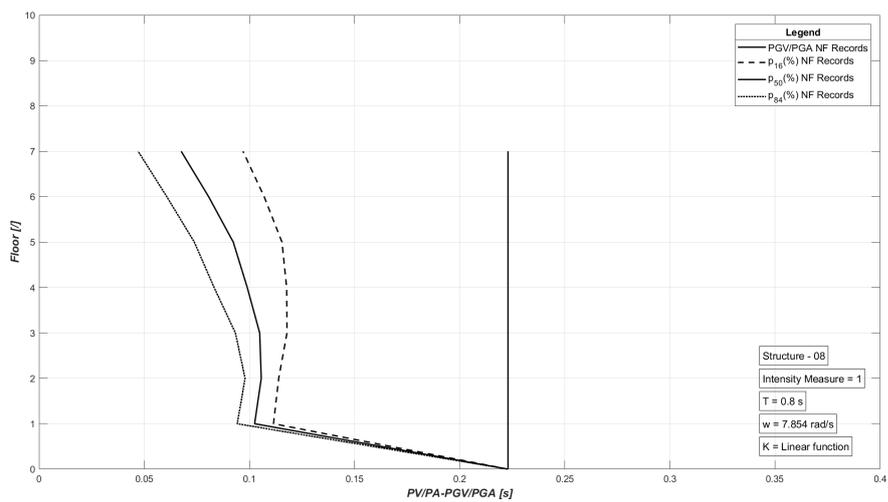


Figura 9.178: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

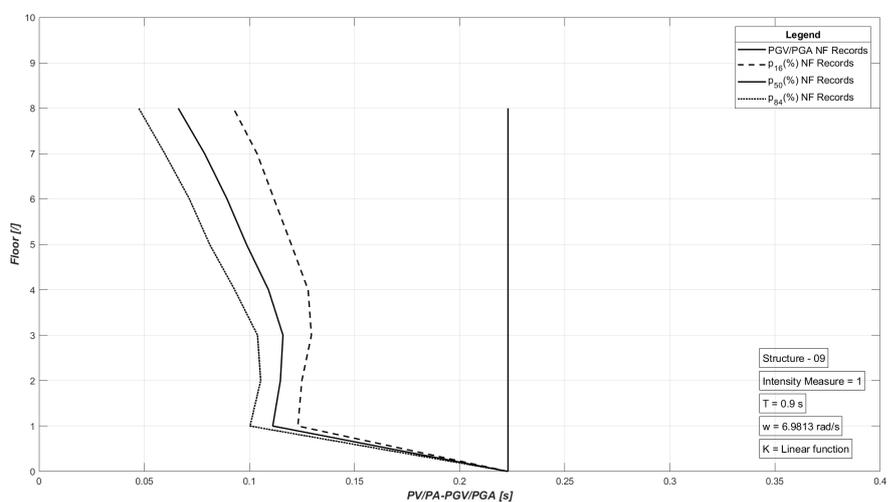


Figura 9.179: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

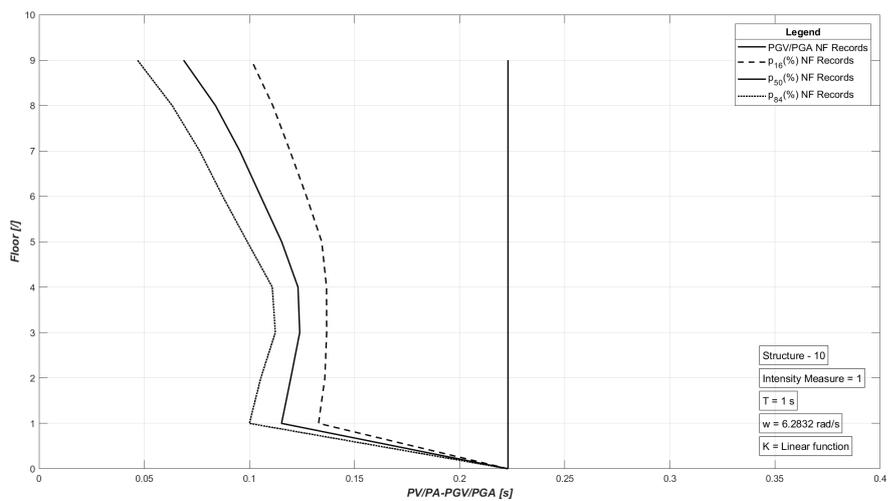


Figura 9.180: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

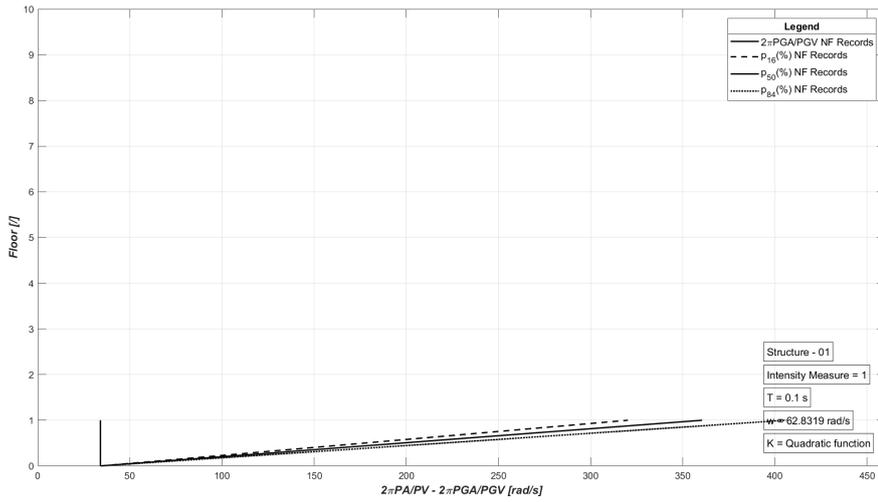


Figura 9.181: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

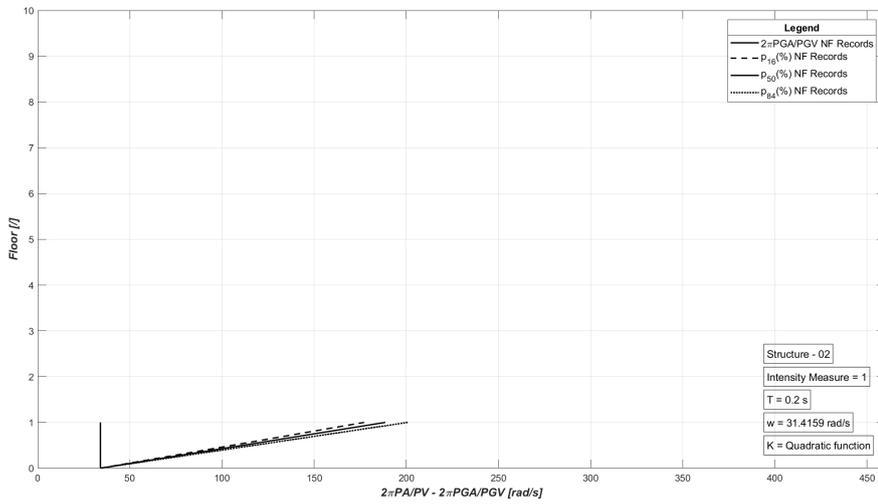


Figura 9.182: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 02.

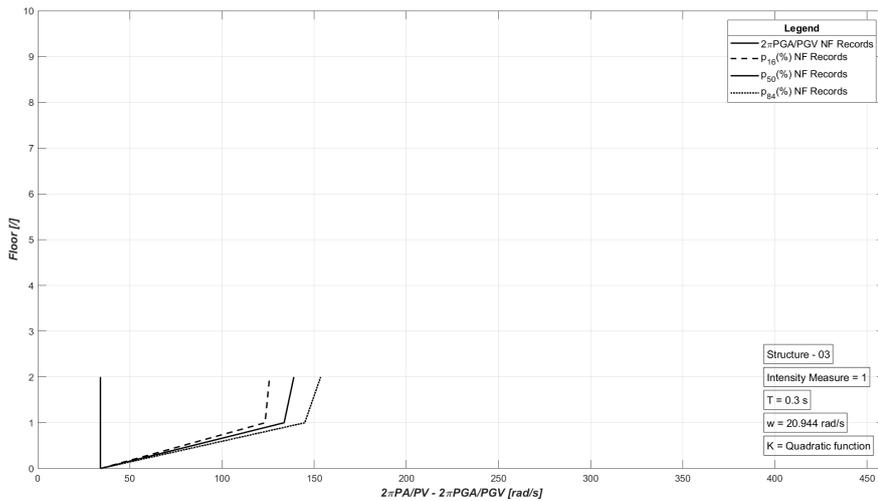


Figura 9.183: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 03.

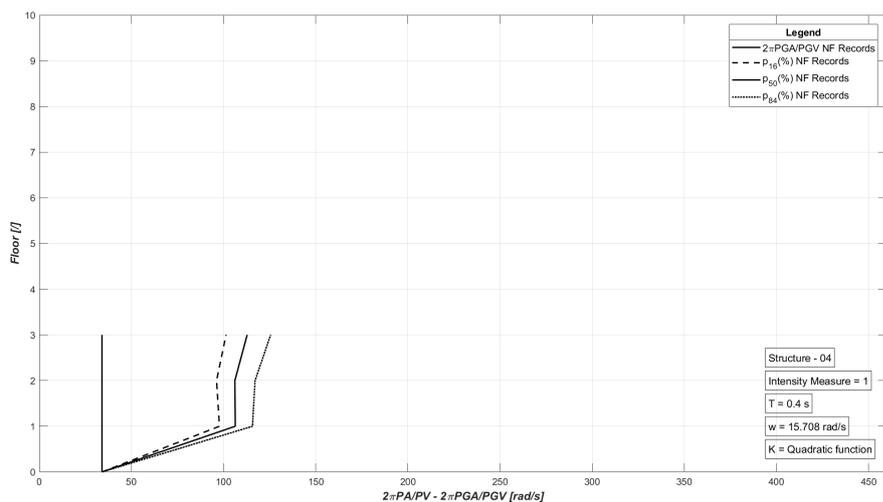


Figura 9.184: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

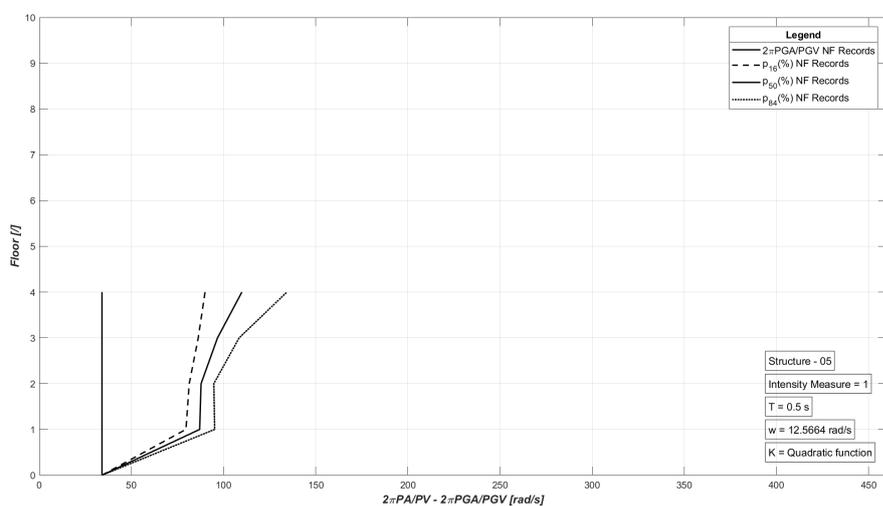


Figura 9.185: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

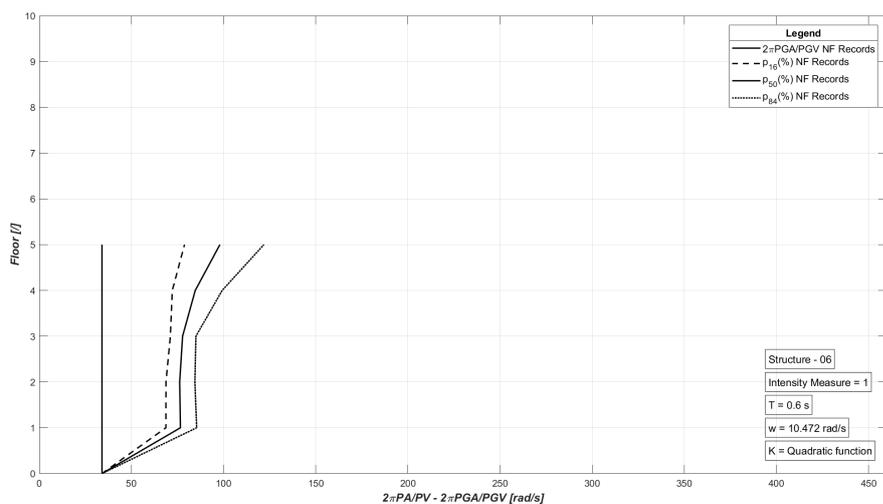


Figura 9.186: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

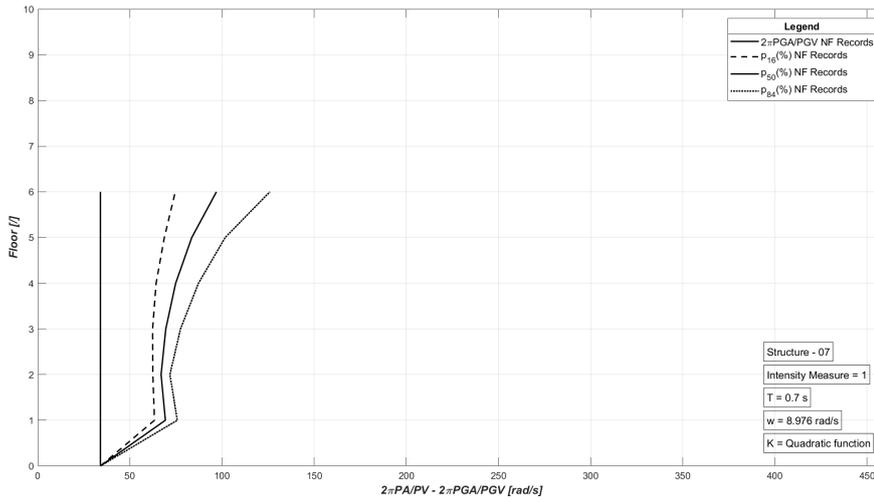


Figura 9.187: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

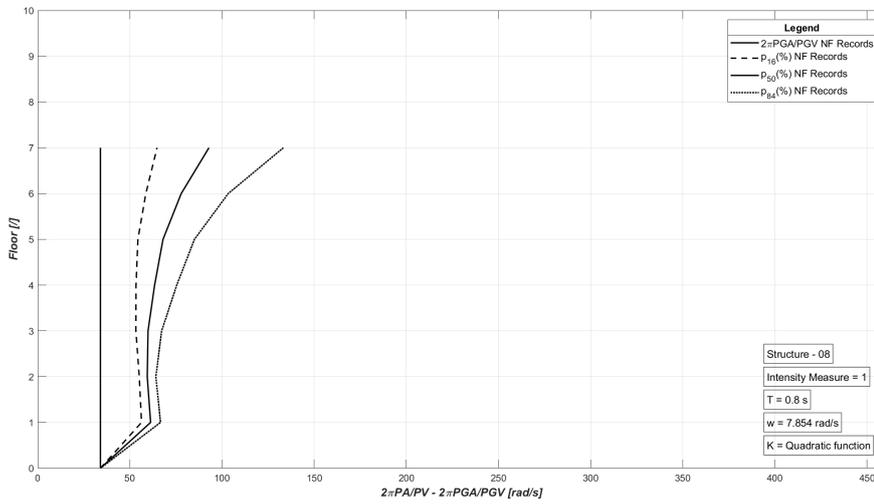


Figura 9.188: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

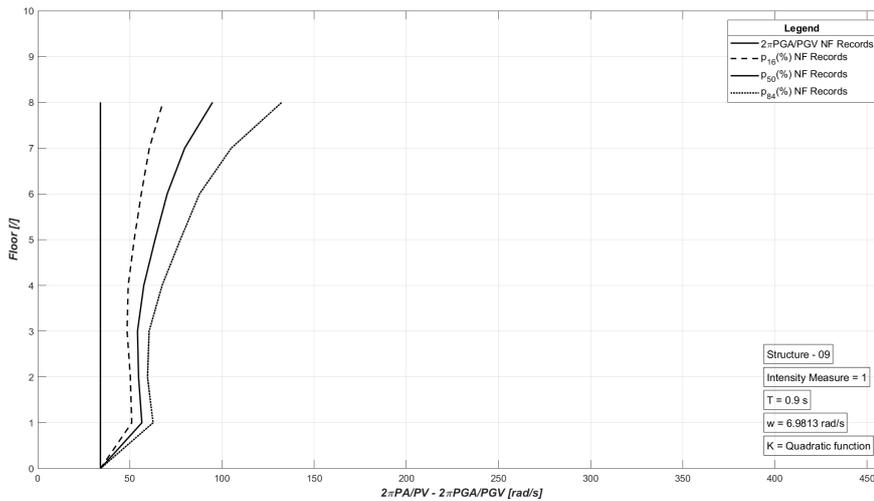


Figura 9.189: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 09.

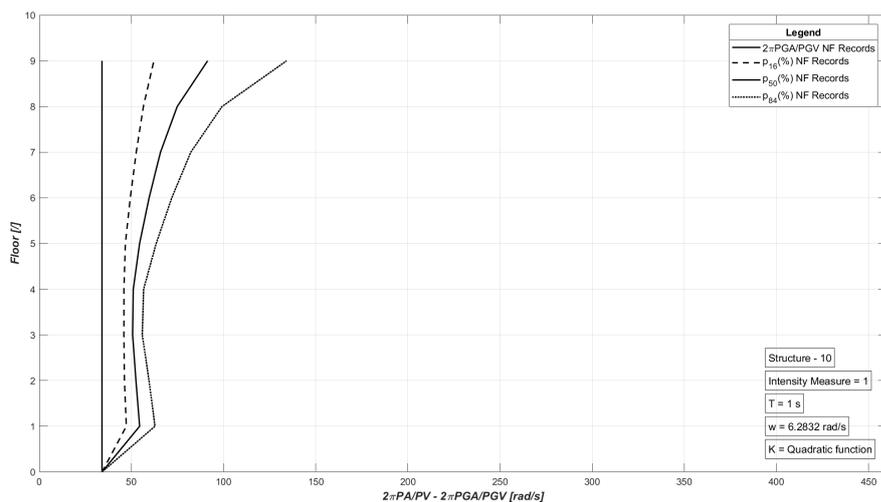


Figura 9.190: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

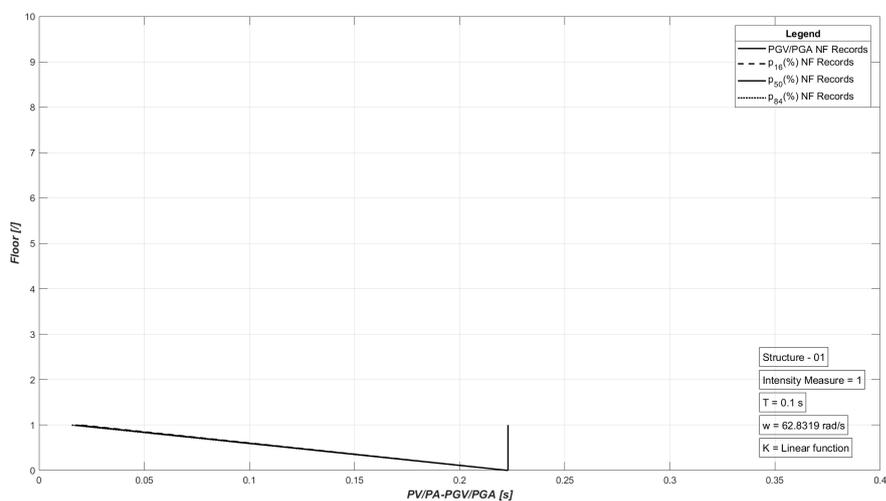


Figura 9.191: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

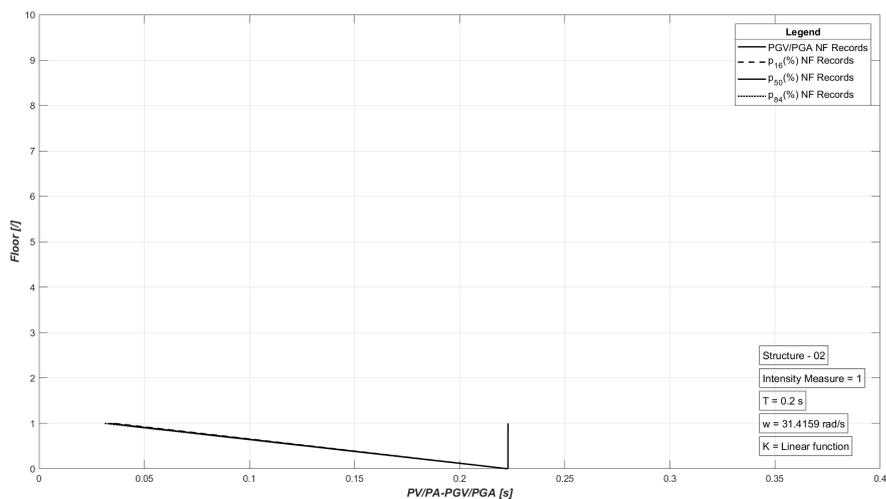


Figura 9.192: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 02.

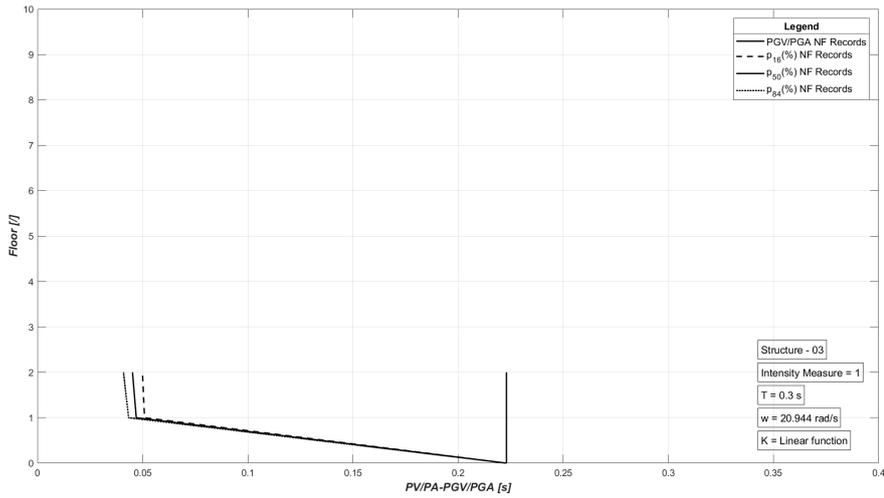


Figura 9.193: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 03.

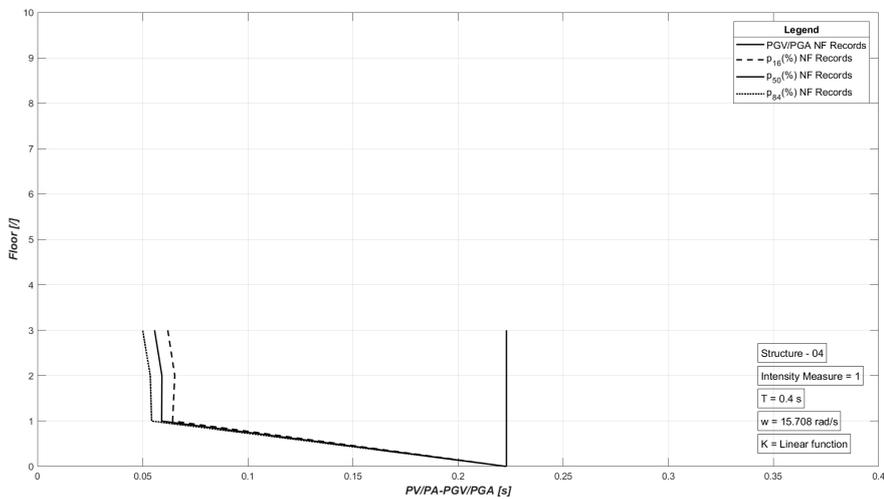


Figura 9.194: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

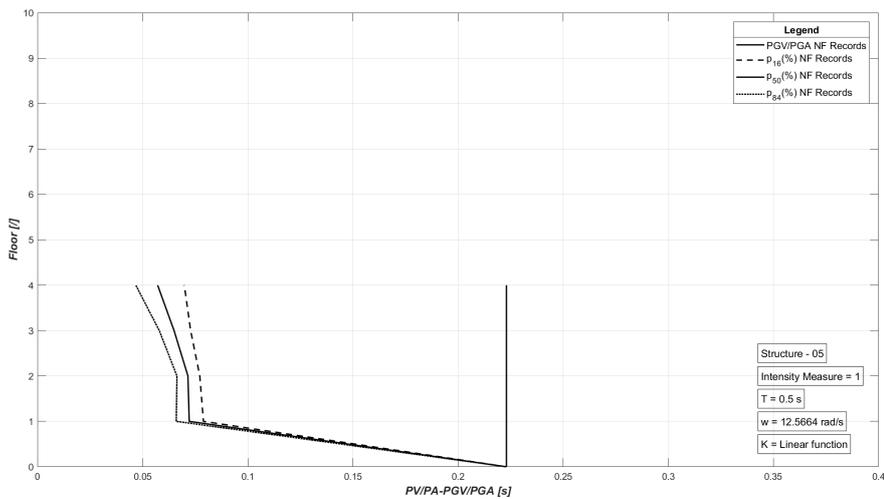


Figura 9.195: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

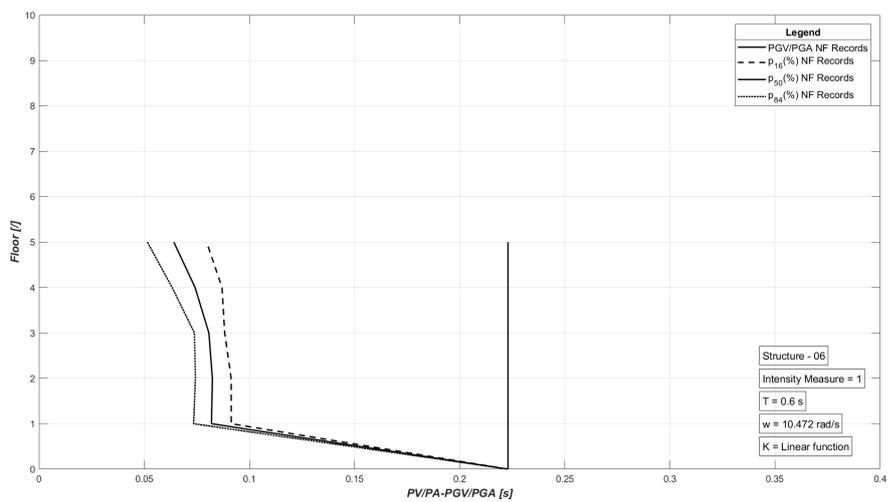


Figura 9.196: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

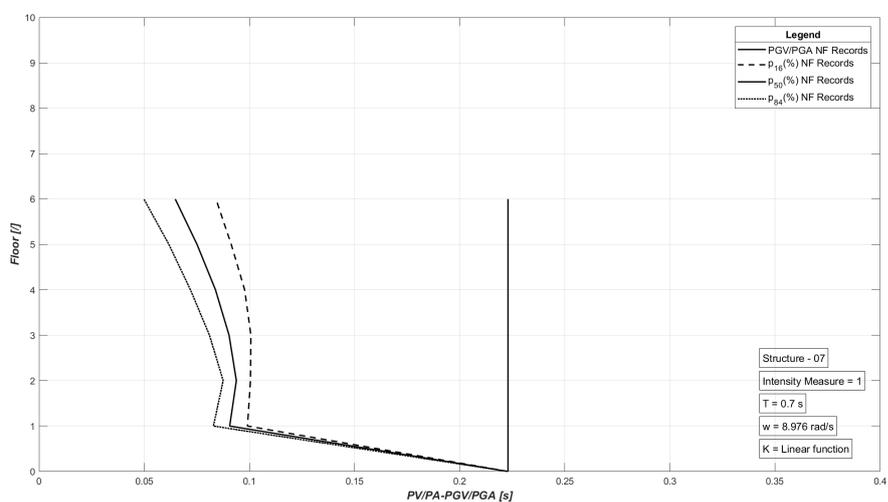


Figura 9.197: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 07.

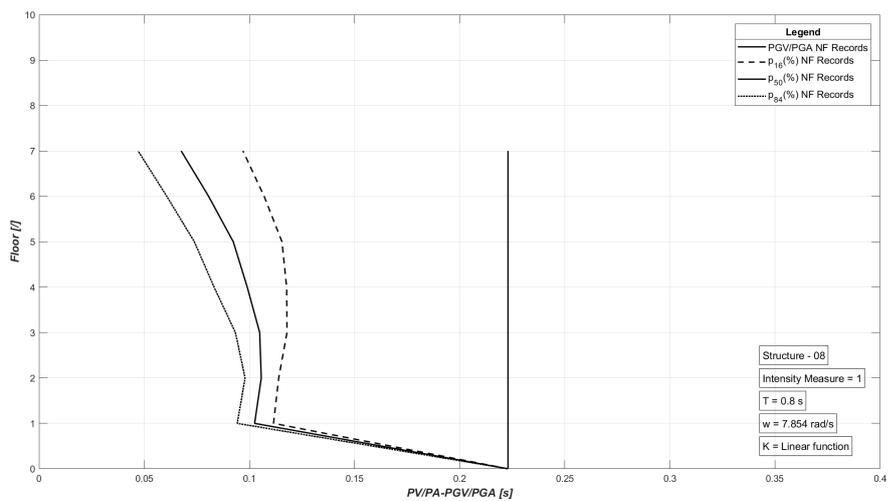


Figura 9.198: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

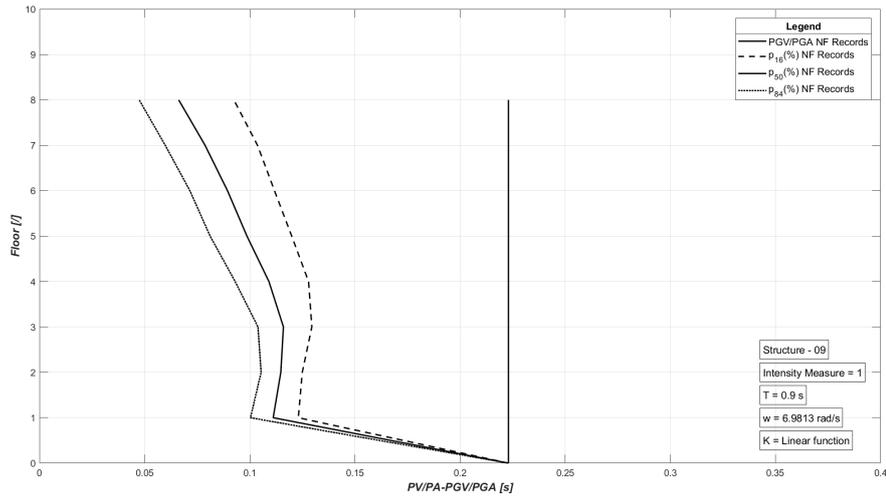


Figura 9.199: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

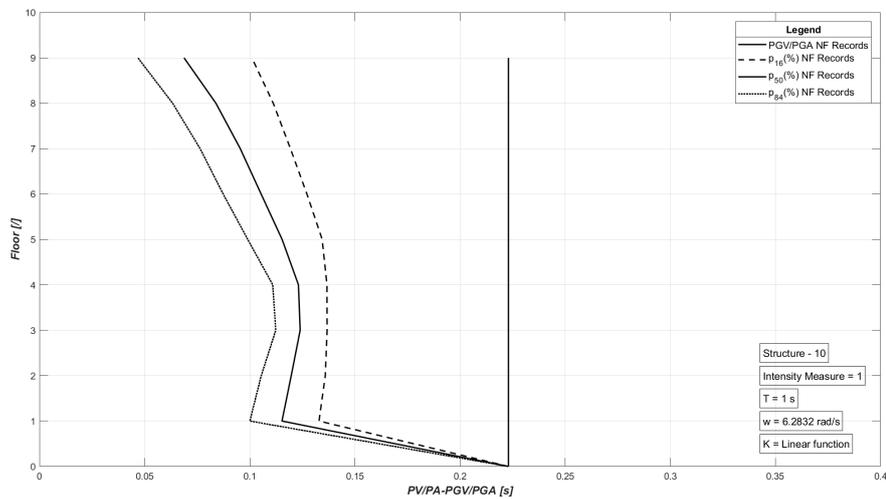


Figura 9.200: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

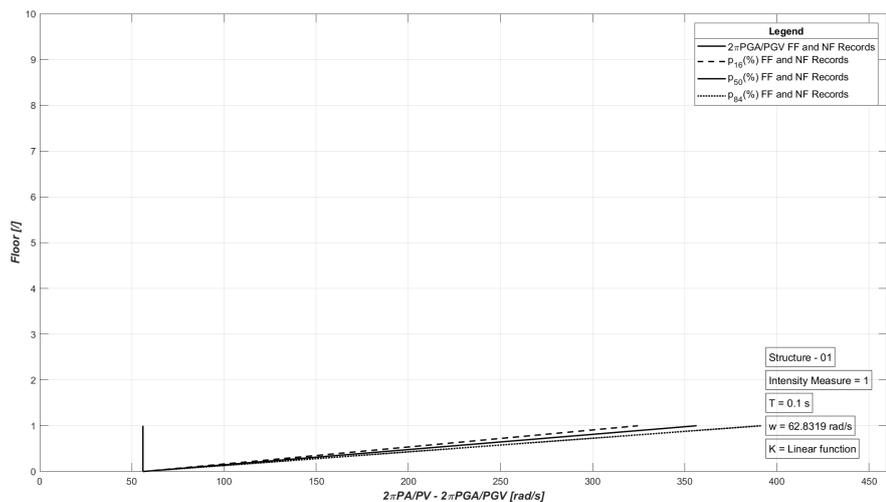


Figura 9.201: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

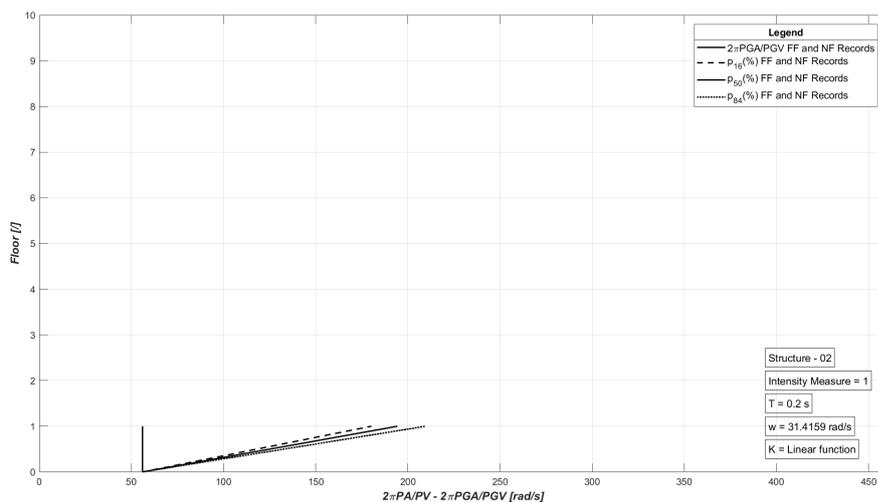


Figura 9.202: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

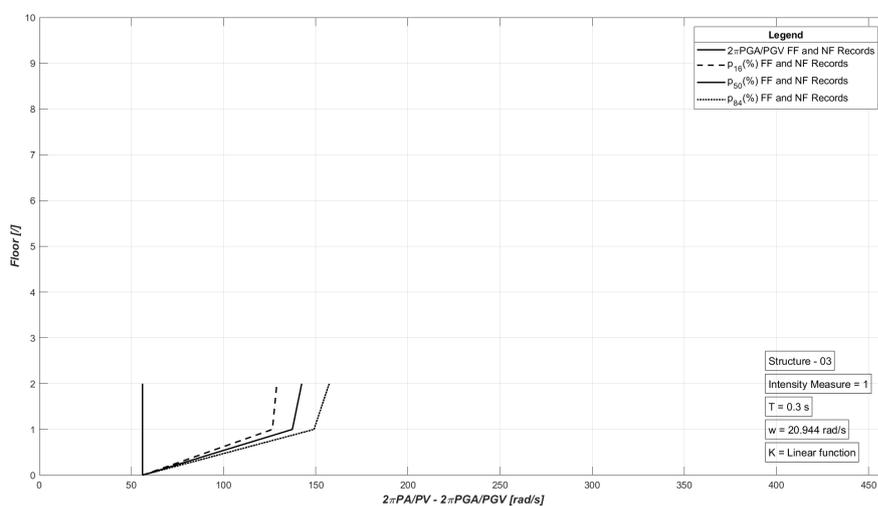


Figura 9.203: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

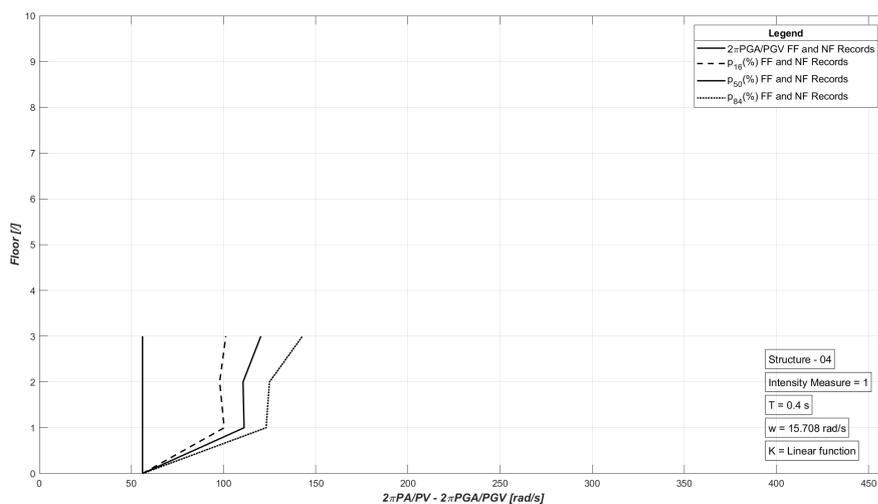


Figura 9.204: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

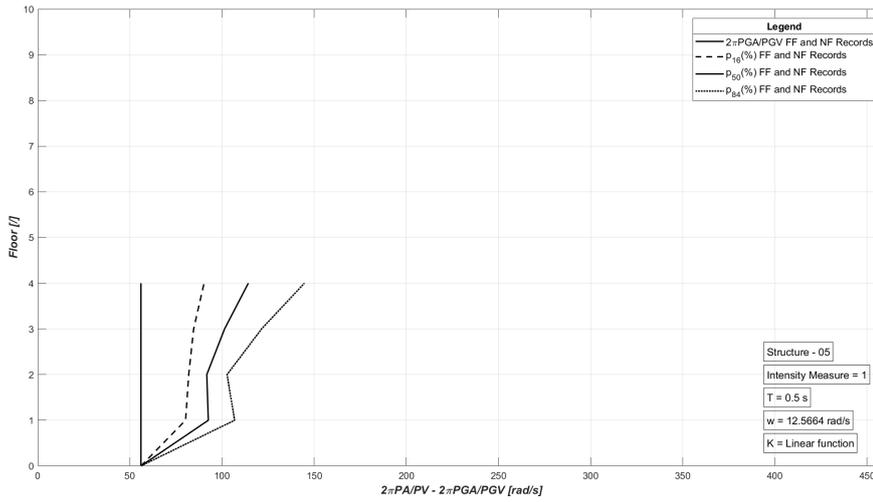


Figura 9.205: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

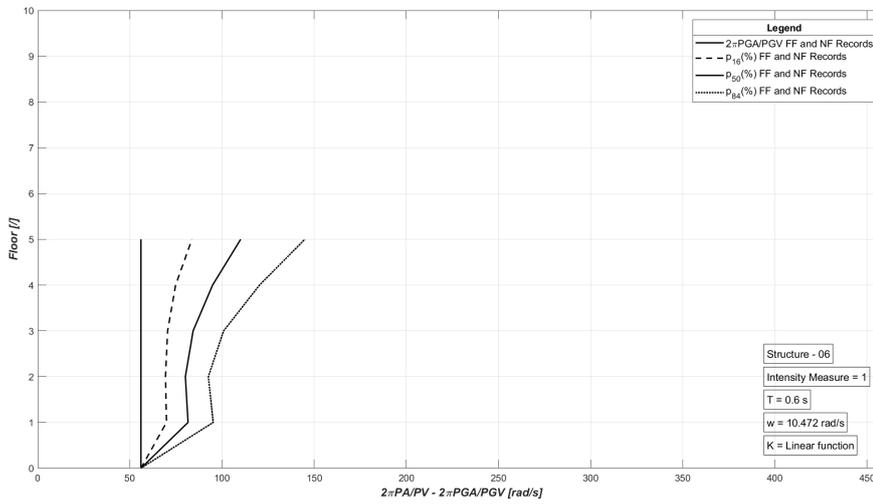


Figura 9.206: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

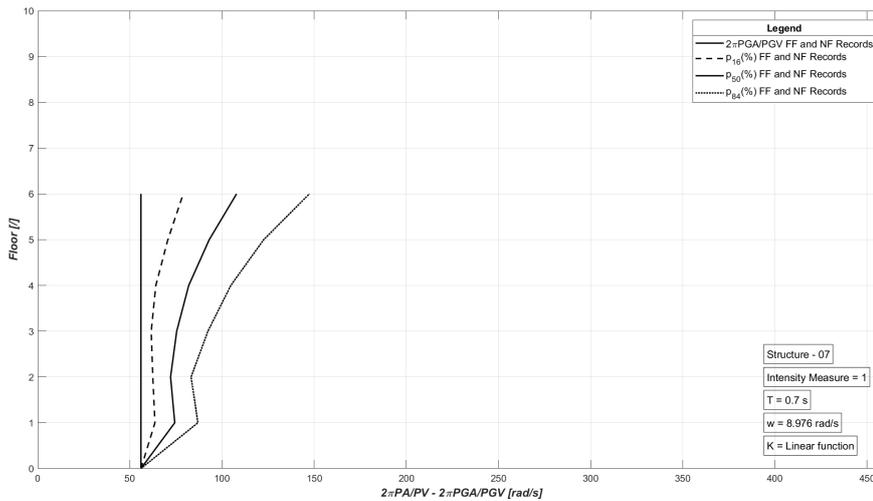


Figura 9.207: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

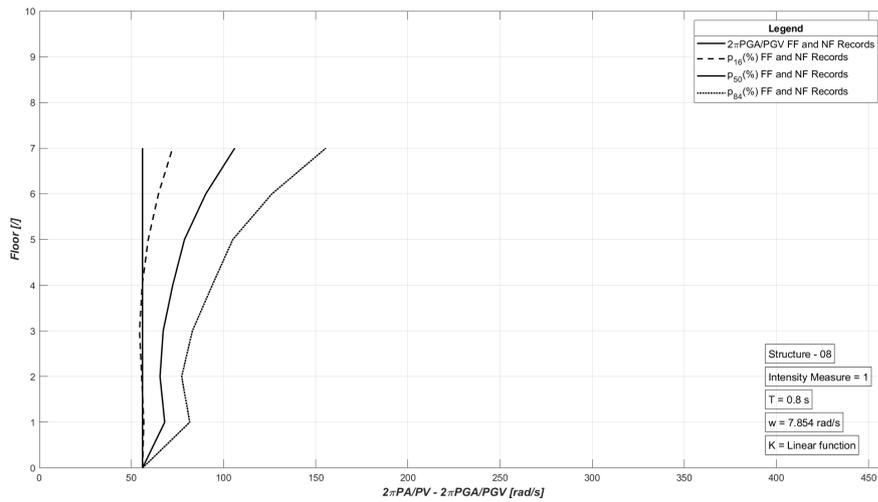


Figura 9.208: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

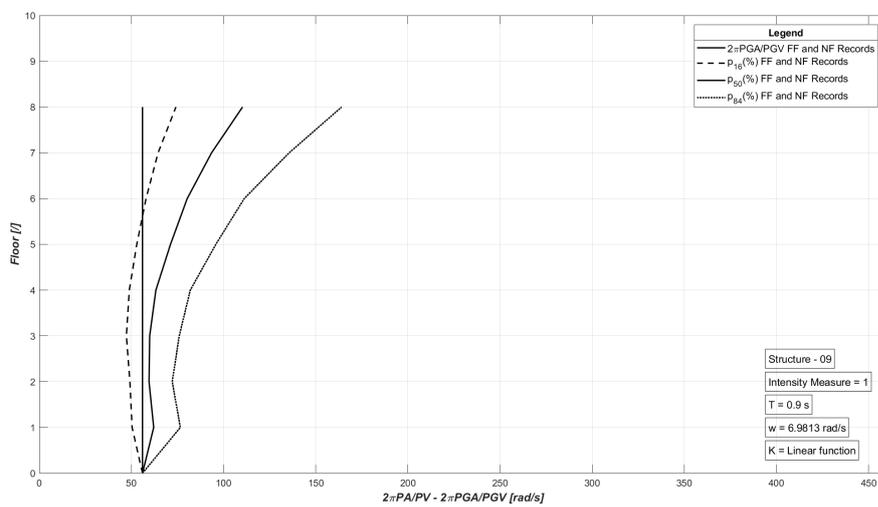


Figura 9.209: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

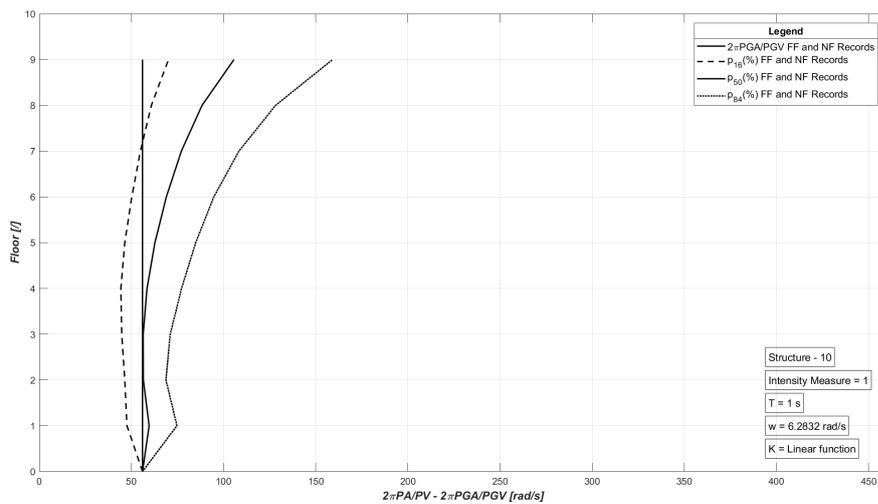


Figura 9.210: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

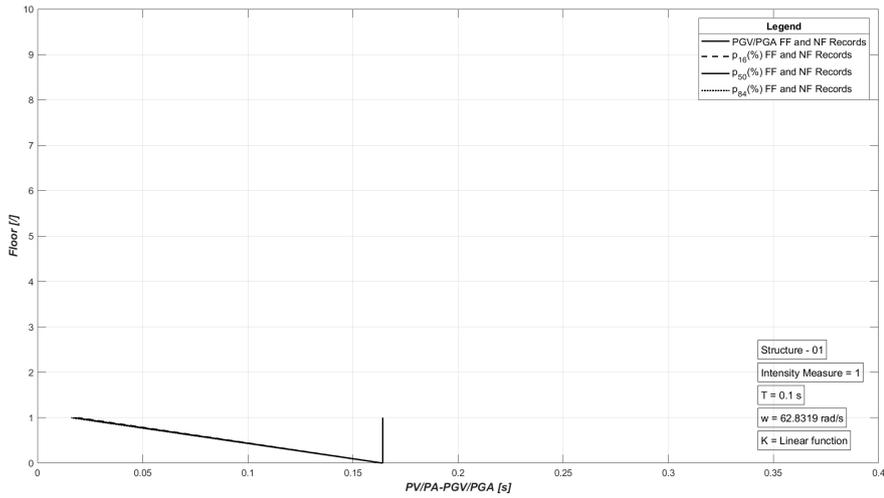


Figura 9.211: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

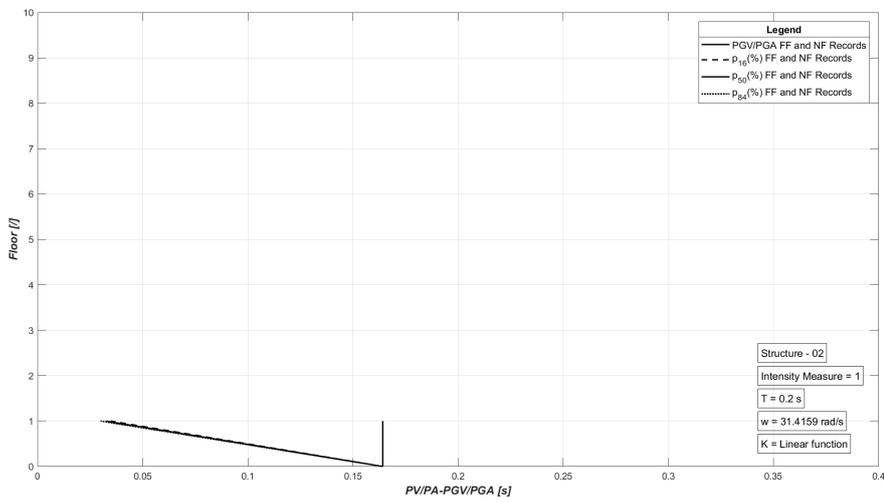


Figura 9.212: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

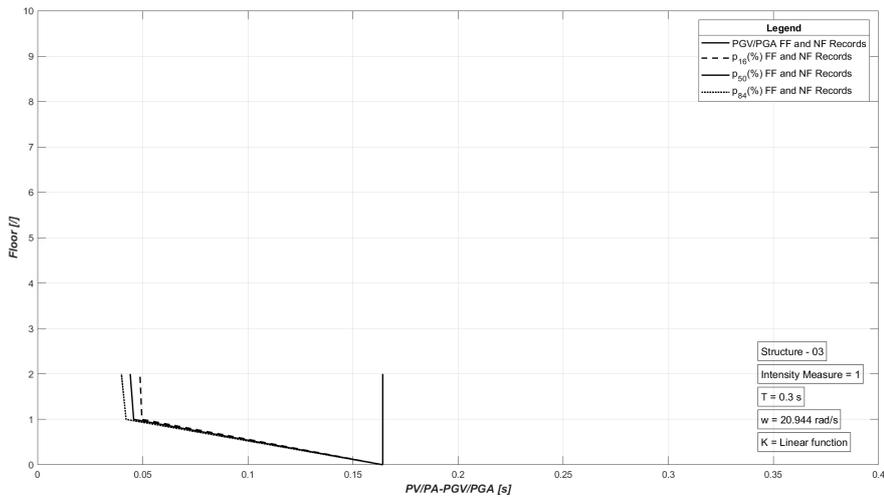


Figura 9.213: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

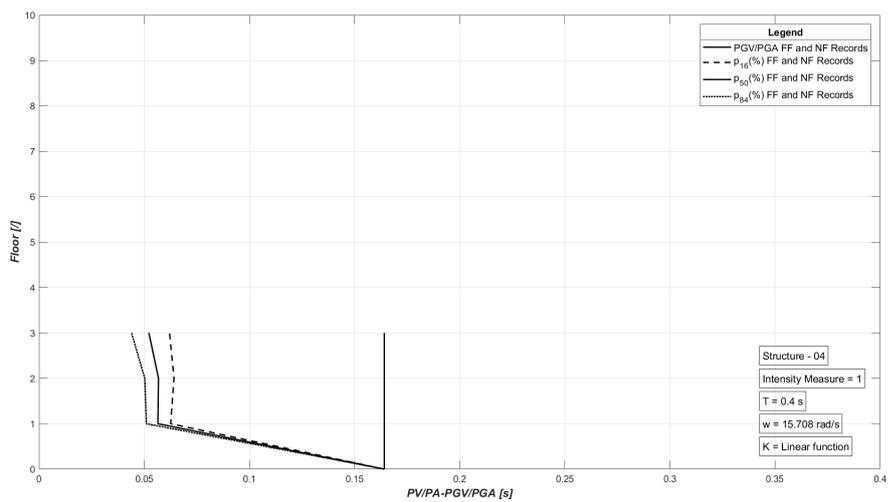


Figura 9.214: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

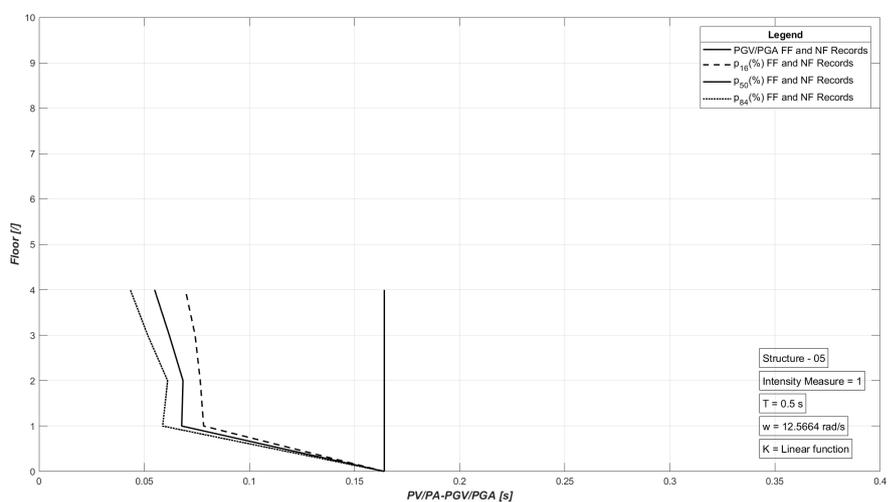


Figura 9.215: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

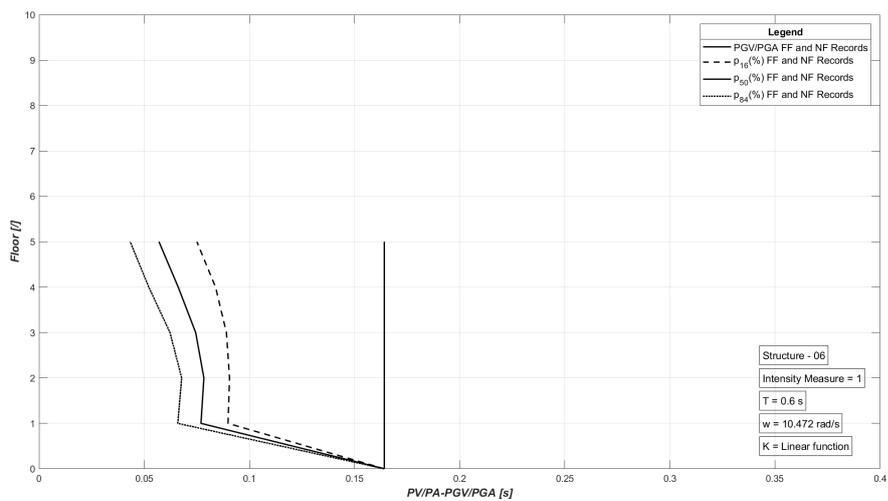


Figura 9.216: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

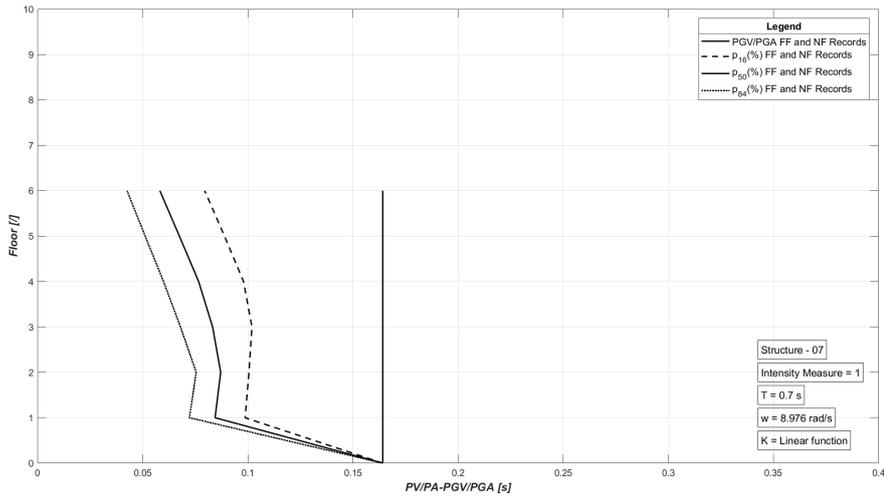


Figura 9.217: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

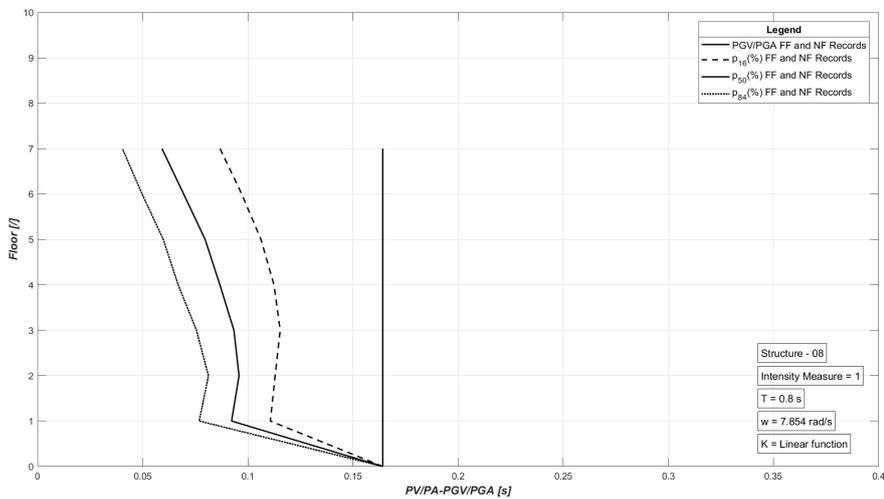


Figura 9.218: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

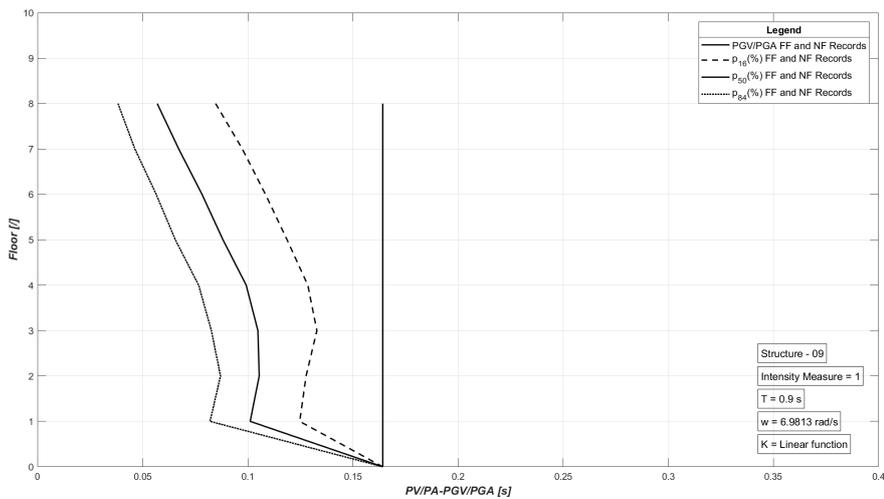


Figura 9.219: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

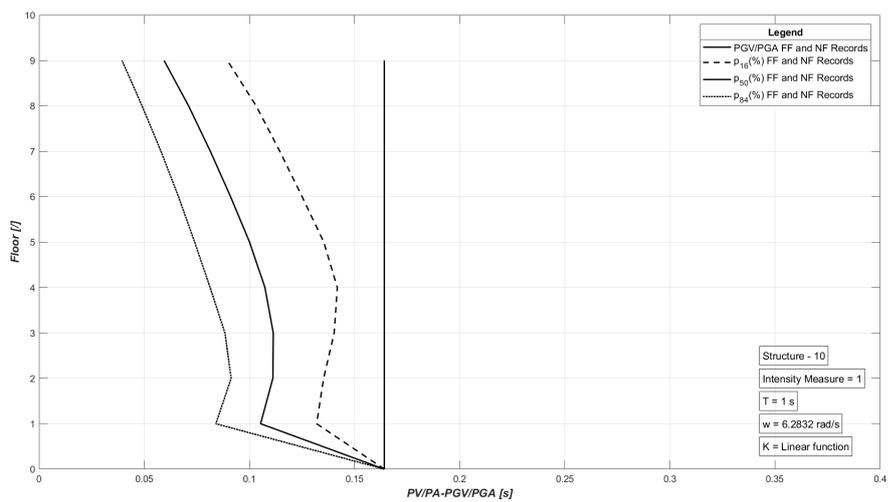


Figura 9.220: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

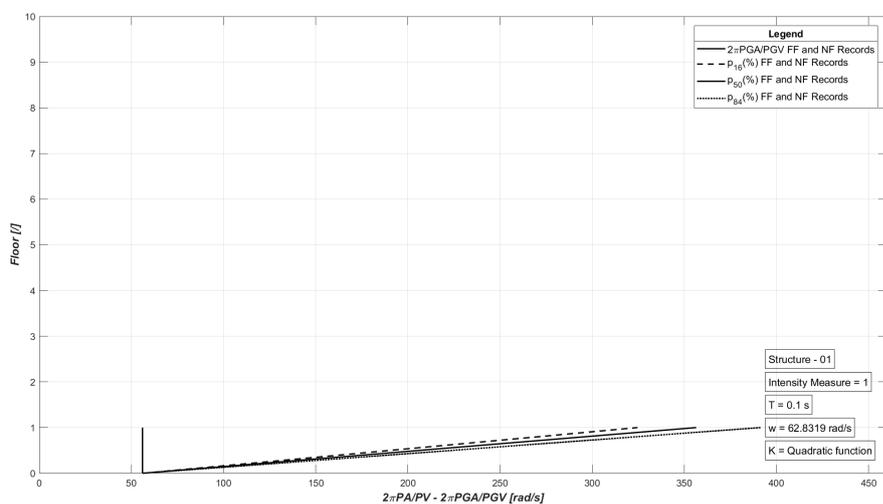


Figura 9.221: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

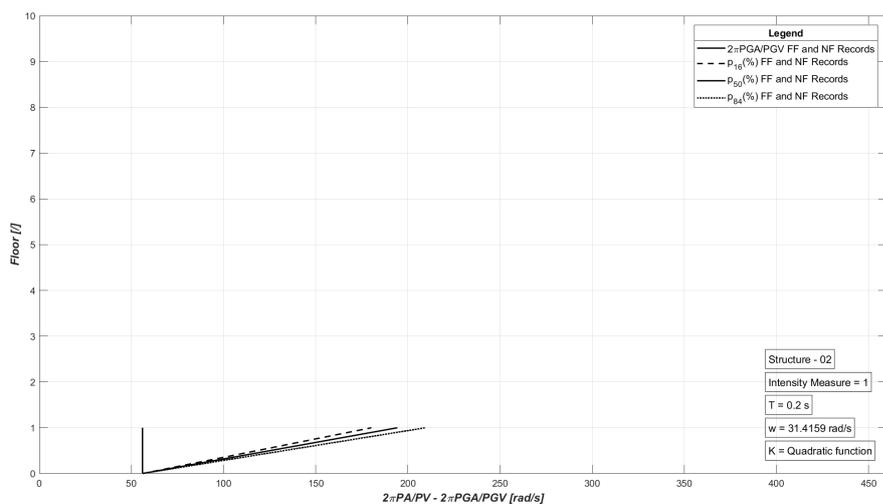


Figura 9.222: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

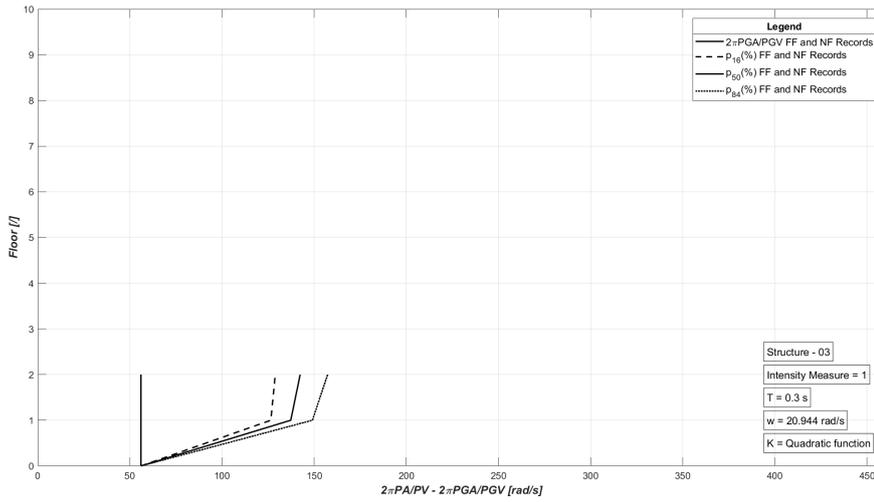


Figura 9.223: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

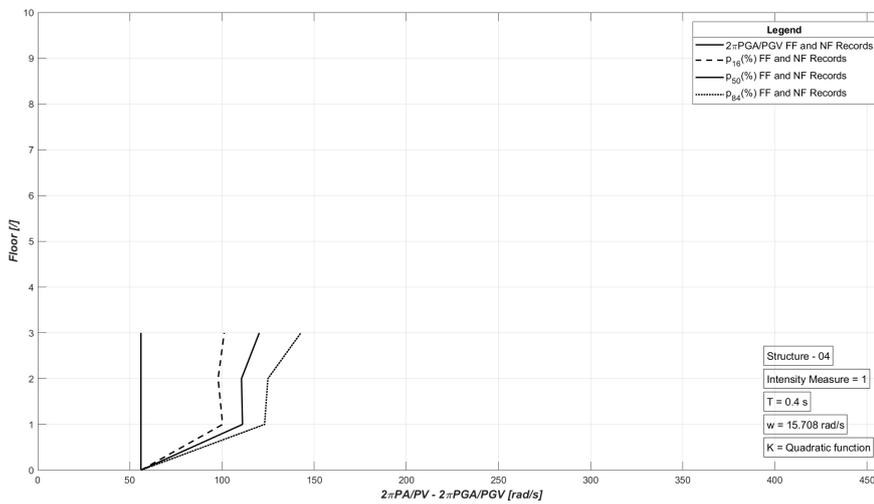


Figura 9.224: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

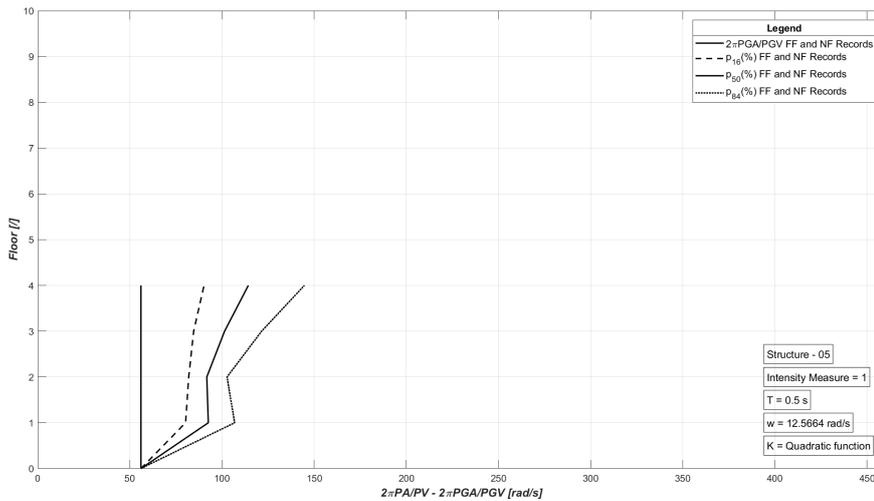


Figura 9.225: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

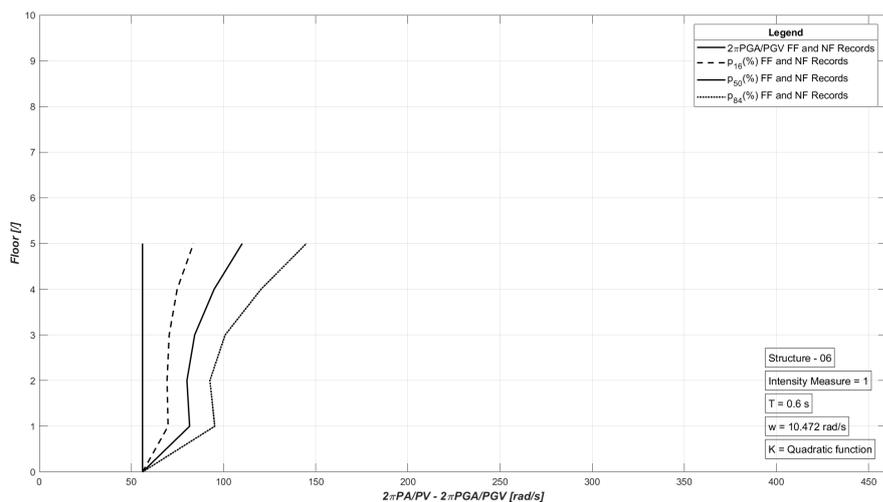


Figura 9.226: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

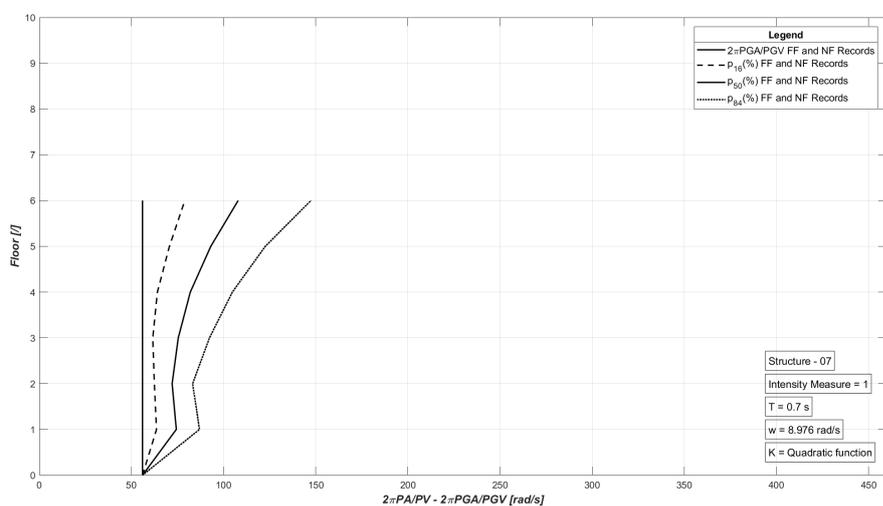


Figura 9.227: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 07.

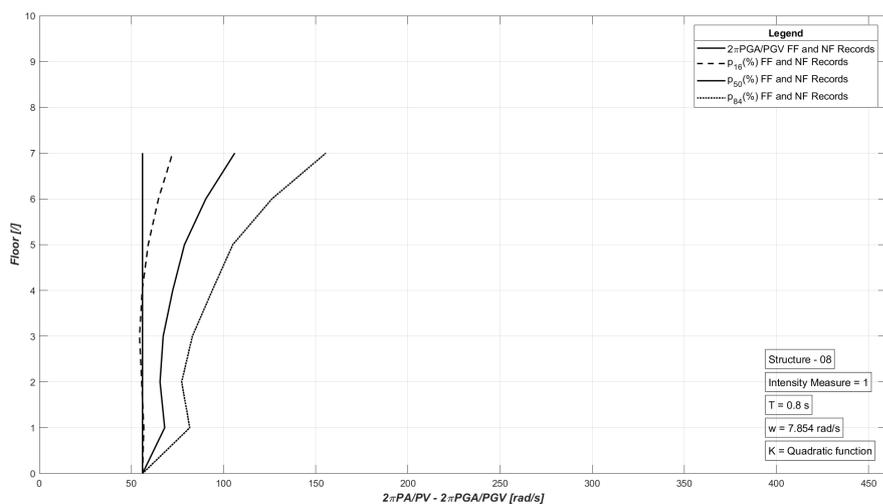


Figura 9.228: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

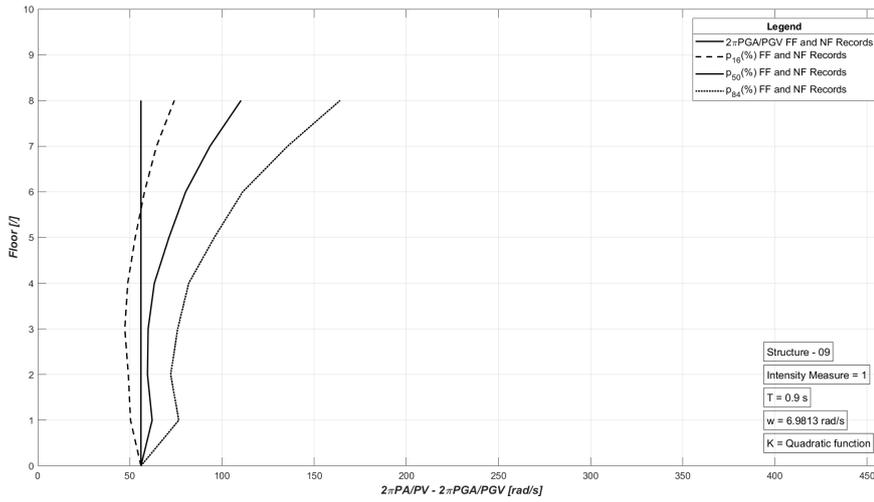


Figura 9.229: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

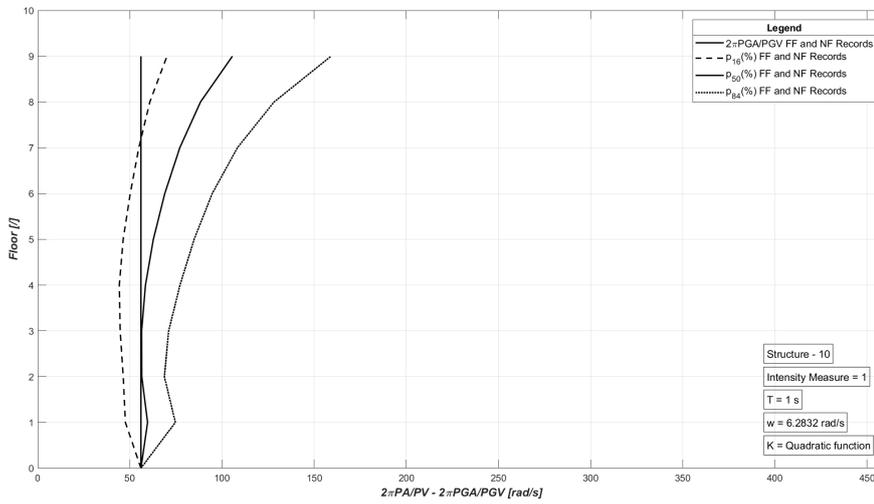


Figura 9.230: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

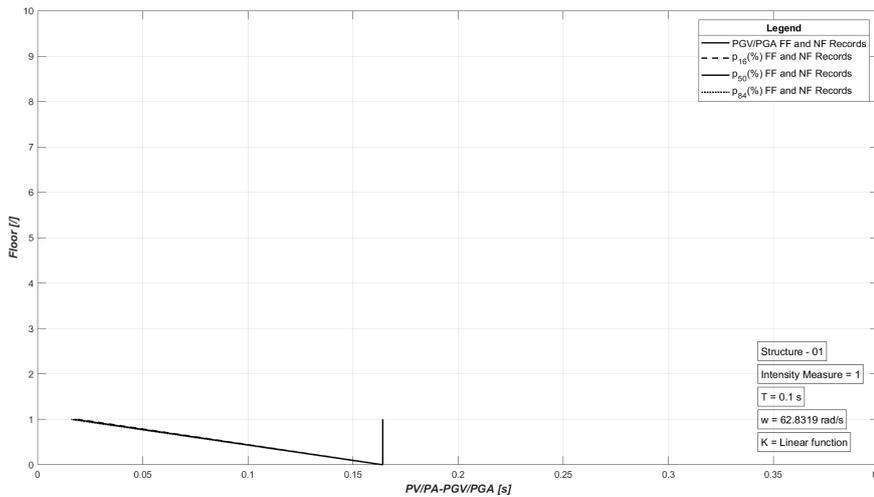


Figura 9.231: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

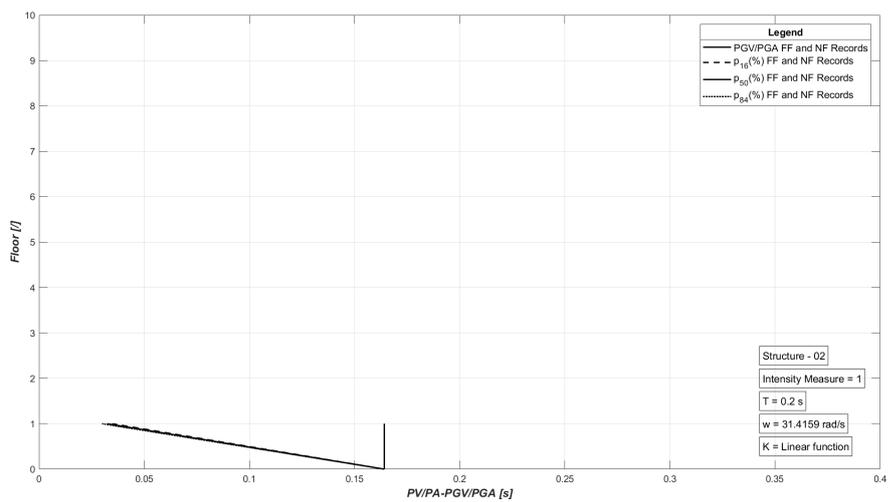


Figura 9.232: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

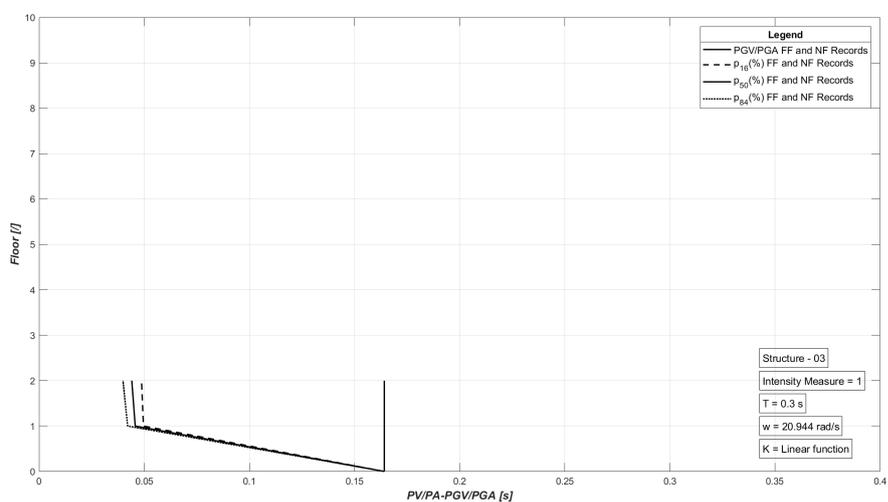


Figura 9.233: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

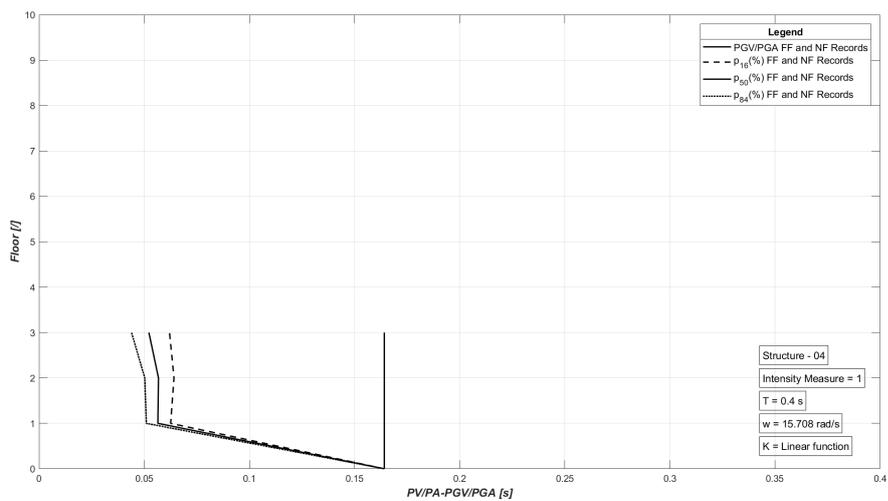


Figura 9.234: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

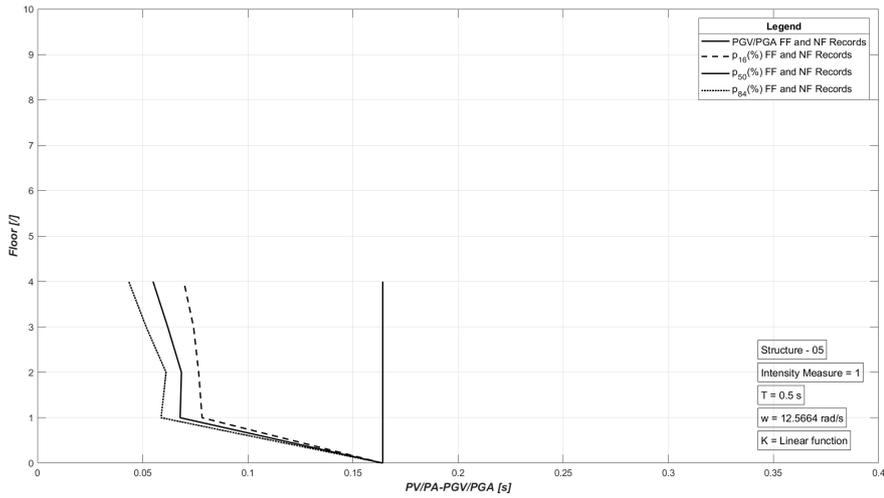


Figura 9.235: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

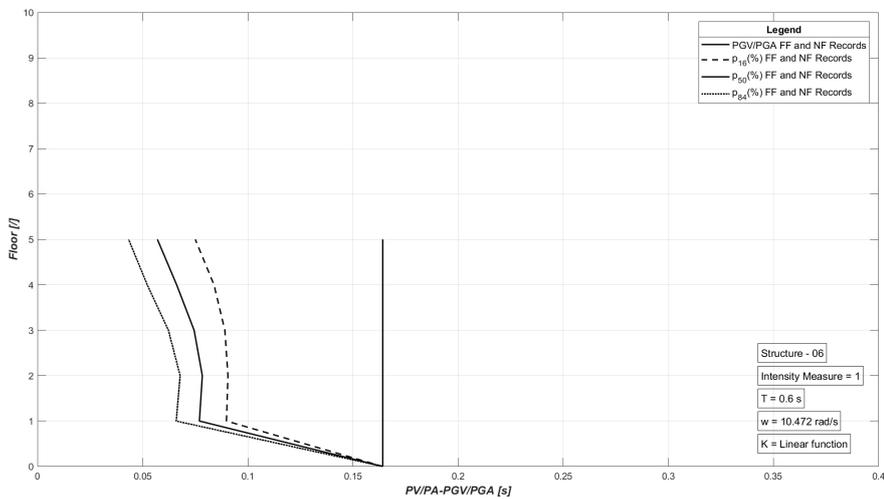


Figura 9.236: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

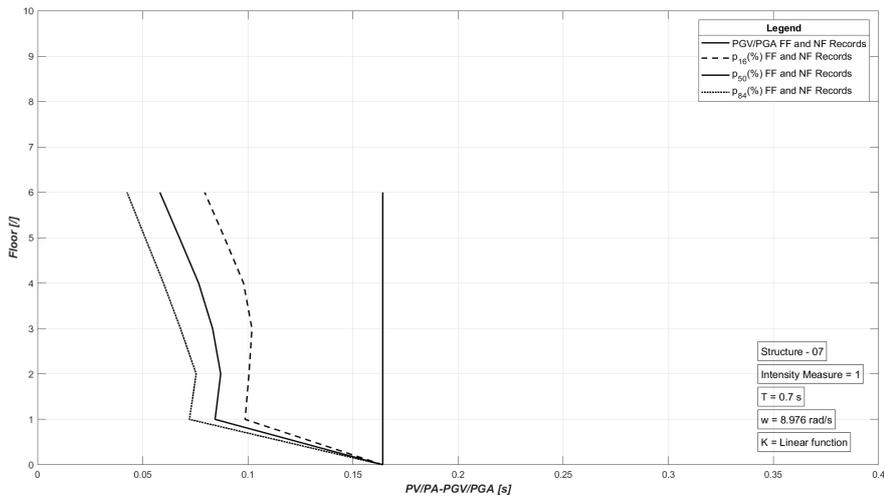


Figura 9.237: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 07.

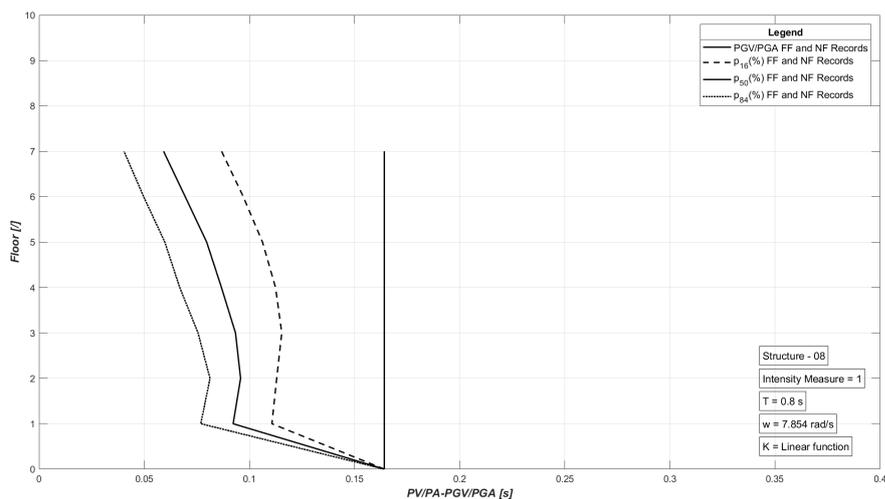


Figura 9.238: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

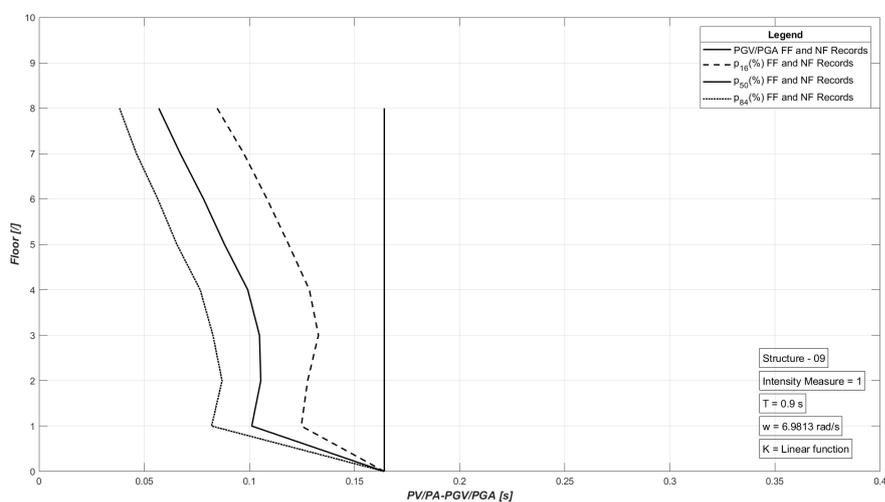


Figura 9.239: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 09.

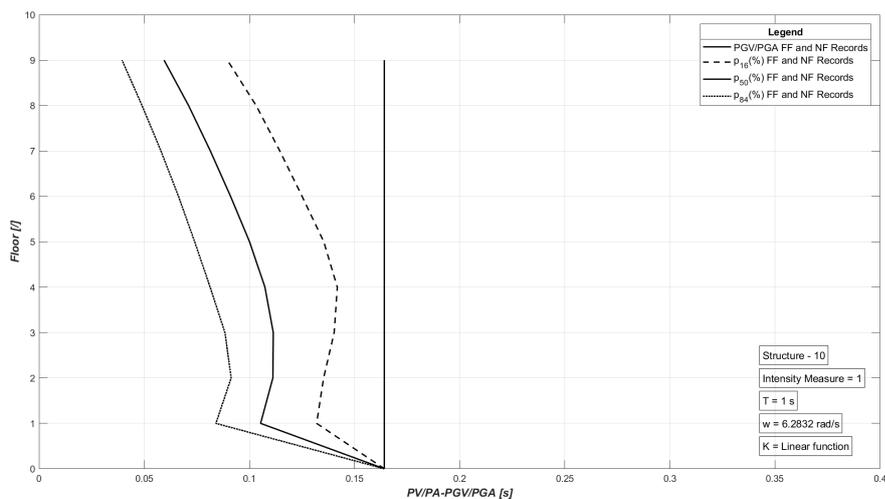


Figura 9.240: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 10.

9.3 Grafici inerenti all’analisi dei telai Shear-Type con IM normalizzata tramite la PGA

Si riportano i grafici inerenti all’analisi delle strutture Shear-Type effettuate sia per i tre set di sismi Far-Field (FF), sia per i sismi Near-Fault (NF), sia per entrambe le tipologie di sismi, considerando una IM normalizzata tramite la PGA (Peak Ground Acceleration). Come nei precedenti casi un’ulteriore suddivisione è stata effettuata considerando prima la matrice di rigidezza $[K_{lin}]$ e successivamente la matrice di rigidezza quadratica $[K_{quadr}]$, questo per tutte le combinazioni di sismi considerate. Inoltre i valori rappresentati nei grafici corrispondono ai valori statistici e di dispersione descritti nell’analisi parametrica del problema, in particolare vengono rappresentati il sedicesimo percentile ($p_{16}(\%)$), il cinquantesimo percentile ($p_{50}(\%)$) e infine l’ottantaquattresimo percentile ($p_{84}(\%)$). Per ogni struttura sono state costruite due tipologie di grafici:

- **Tipologia 1**, grafici con $2\pi \frac{PA}{PV} - 2\pi \frac{PGA}{PGV} \left[\frac{rad}{s} \right]$ sull’asse delle ascisse e il n^o piani sull’asse delle ordinate;
- **Tipologia 2**, grafici con $\frac{PV}{PA} - \frac{PGV}{PGA} [s]$ sull’asse delle ascisse e il n^o piani sull’asse delle ordinate;

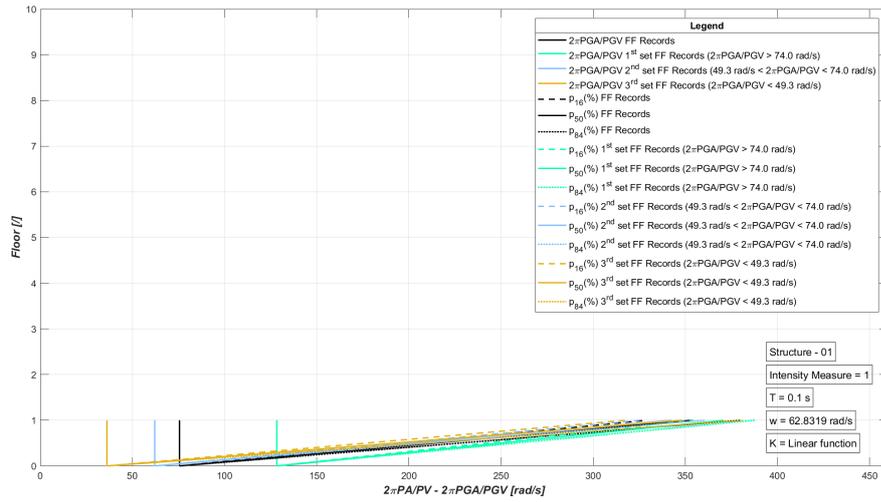


Figura 9.241: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

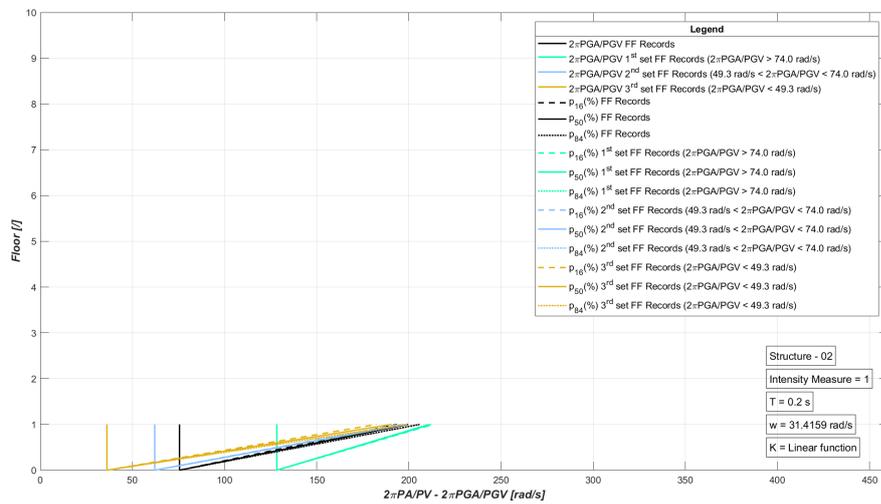


Figura 9.242: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

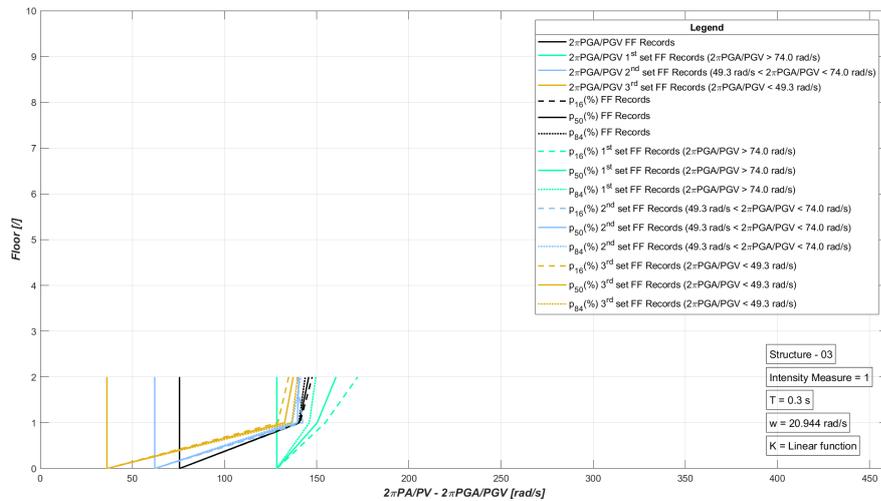


Figura 9.243: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

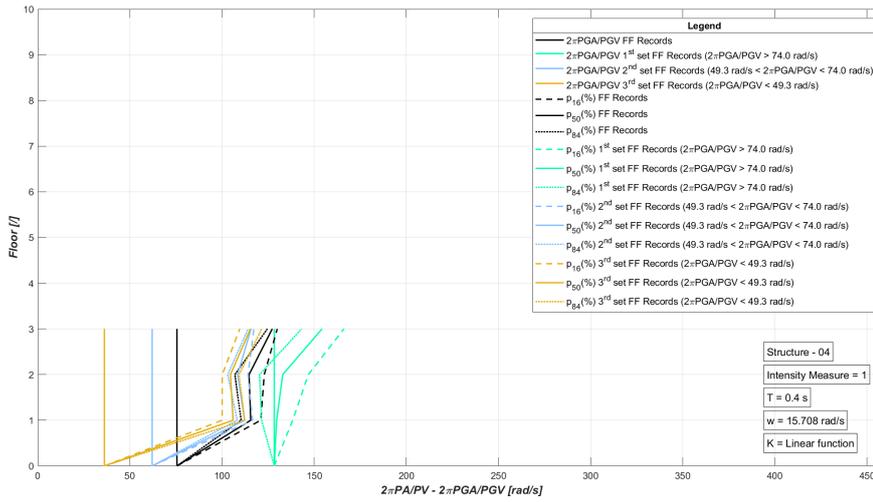


Figura 9.244: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

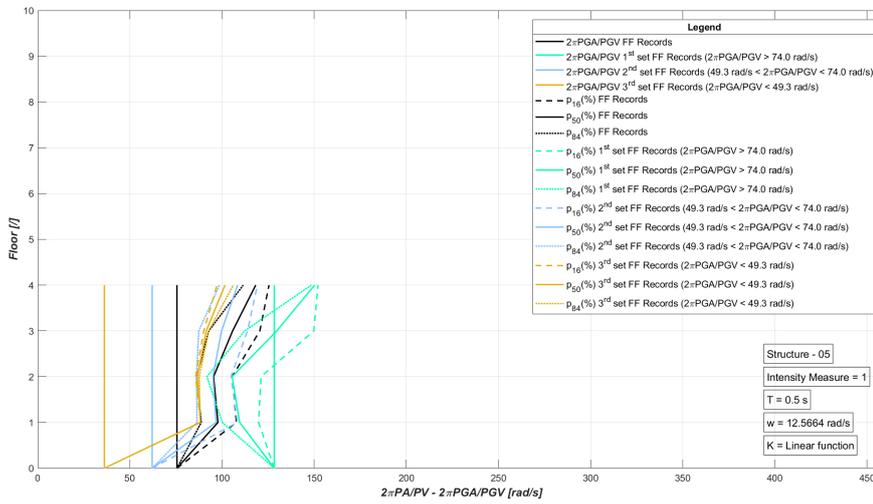


Figura 9.245: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

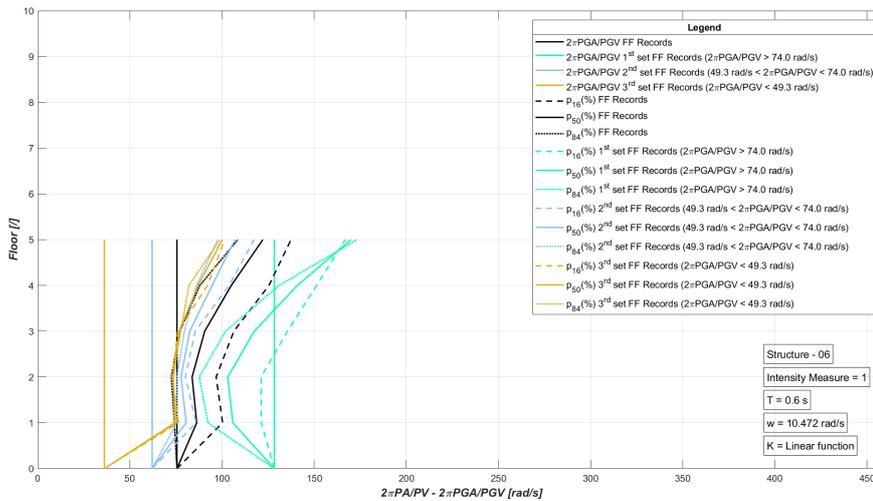


Figura 9.246: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

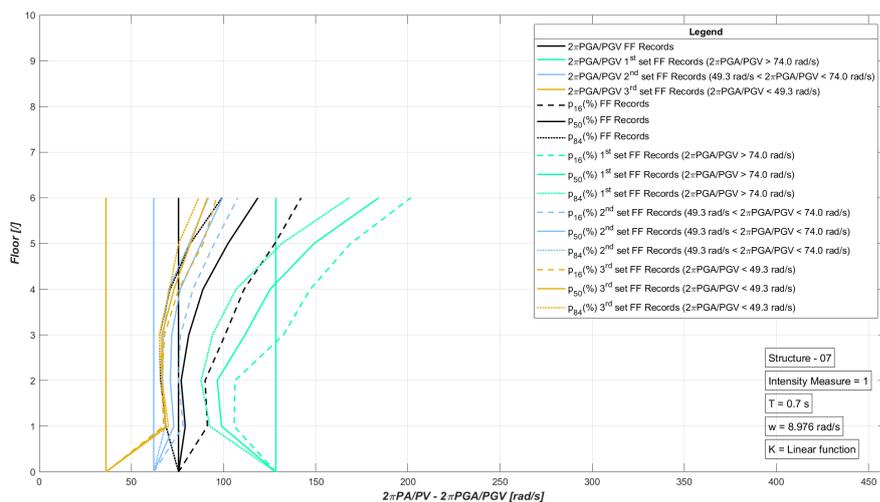


Figura 9.247: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

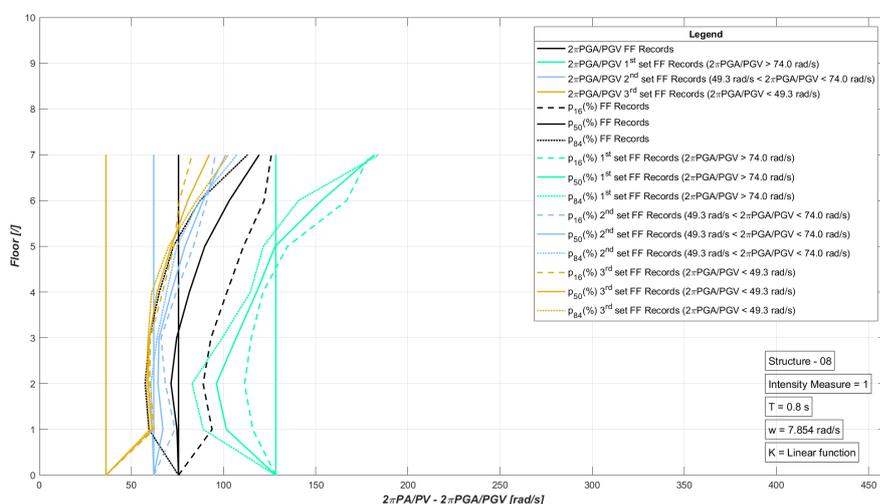


Figura 9.248: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

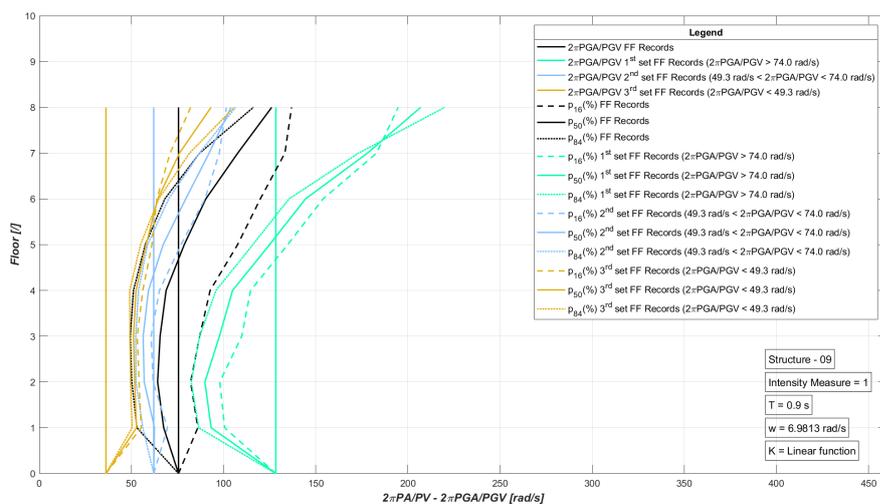


Figura 9.249: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

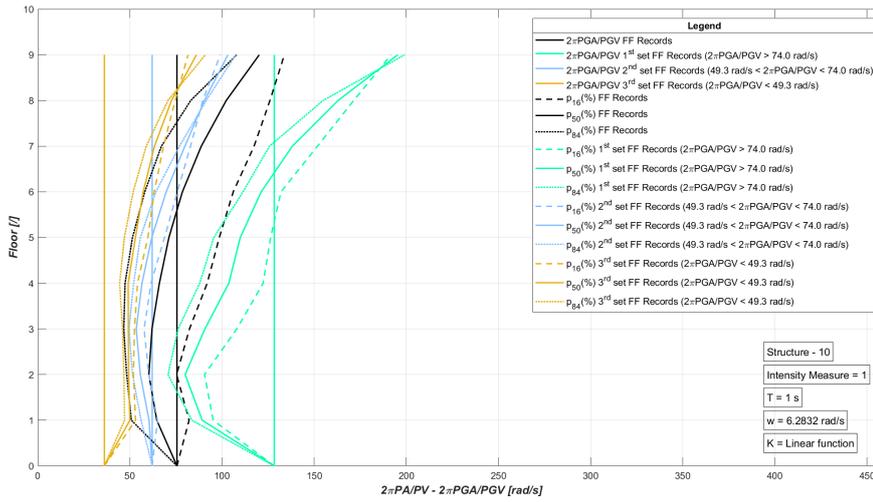


Figura 9.250: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

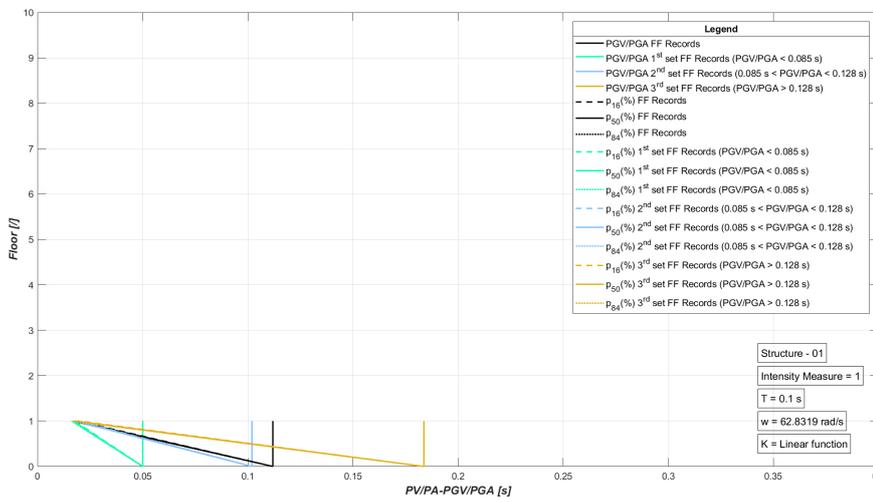


Figura 9.251: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

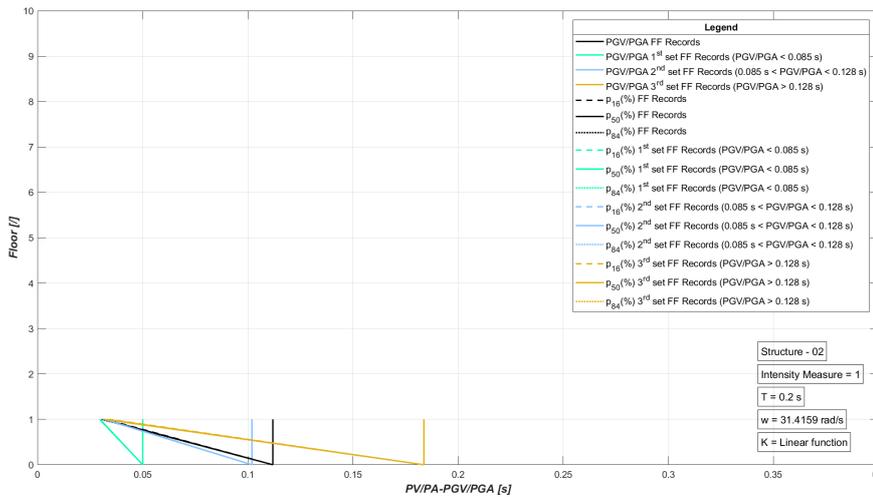


Figura 9.252: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

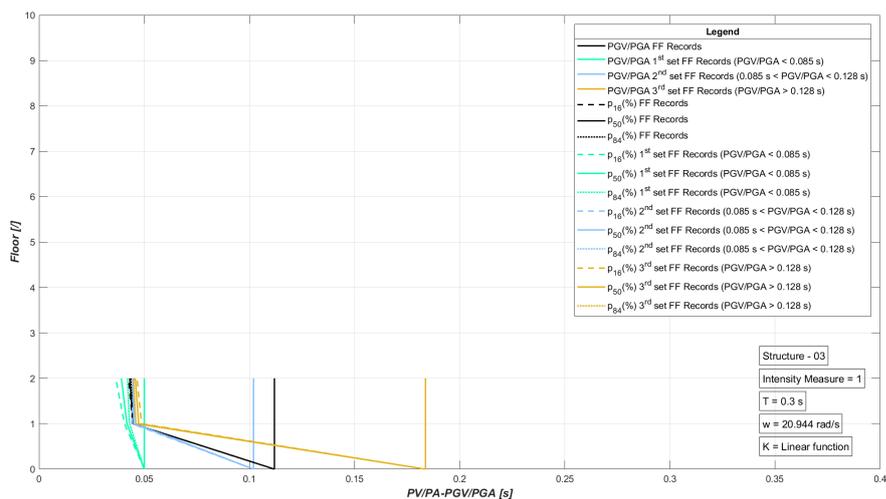


Figura 9.253: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

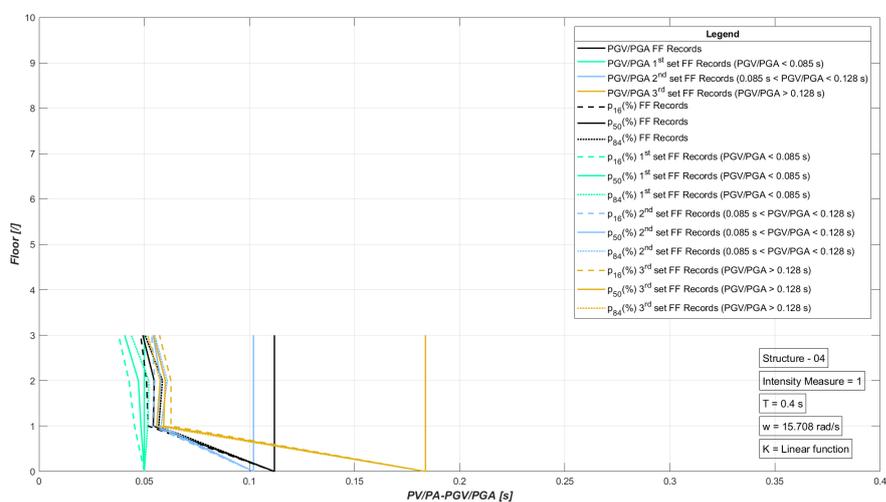


Figura 9.254: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

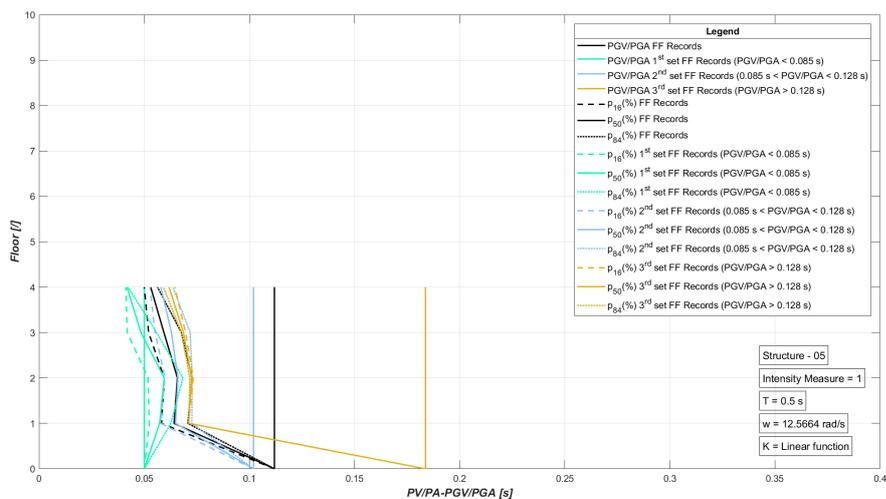


Figura 9.255: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

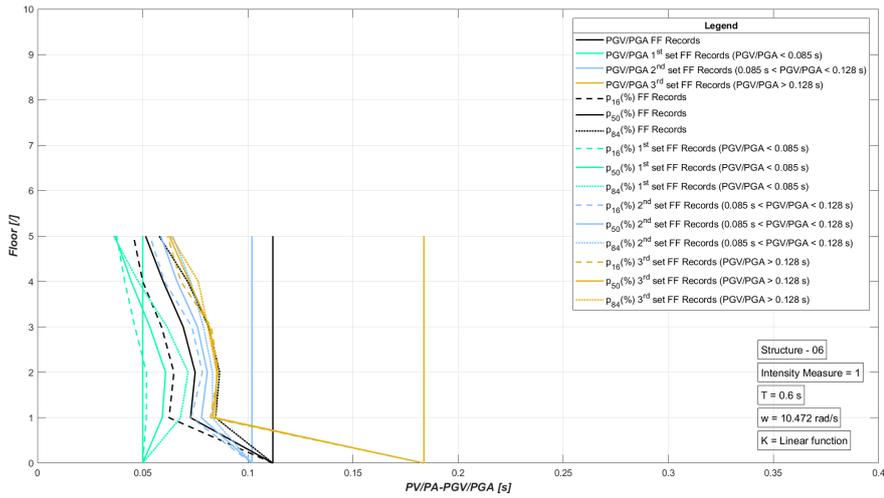


Figura 9.256: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

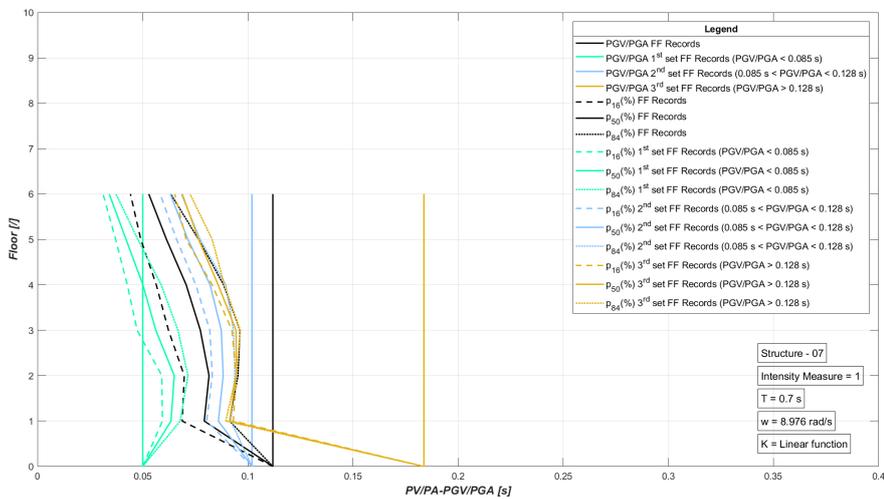


Figura 9.257: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

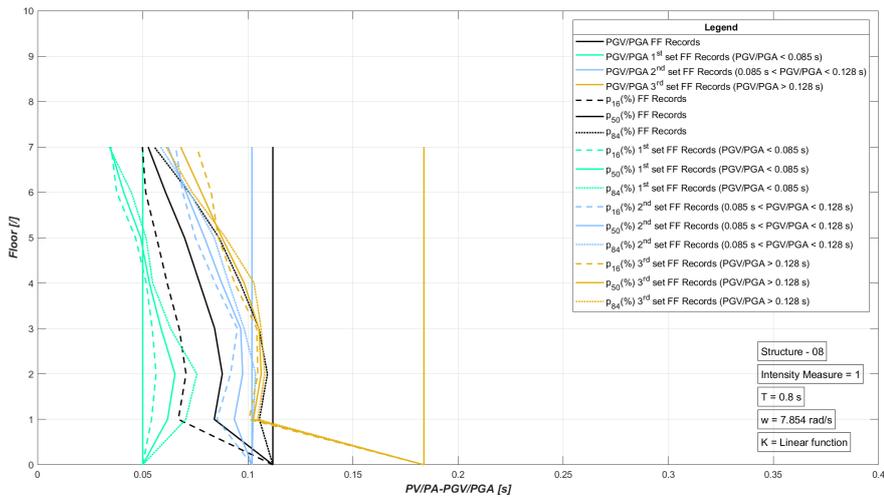


Figura 9.258: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

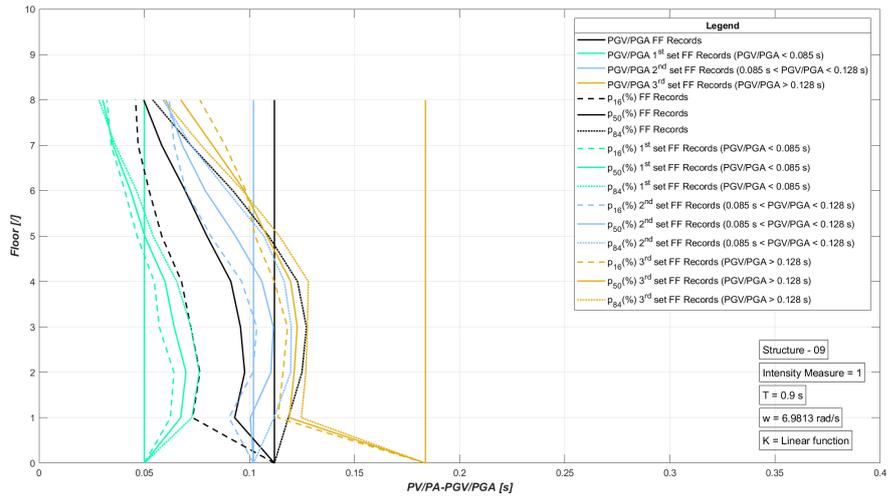


Figura 9.259: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

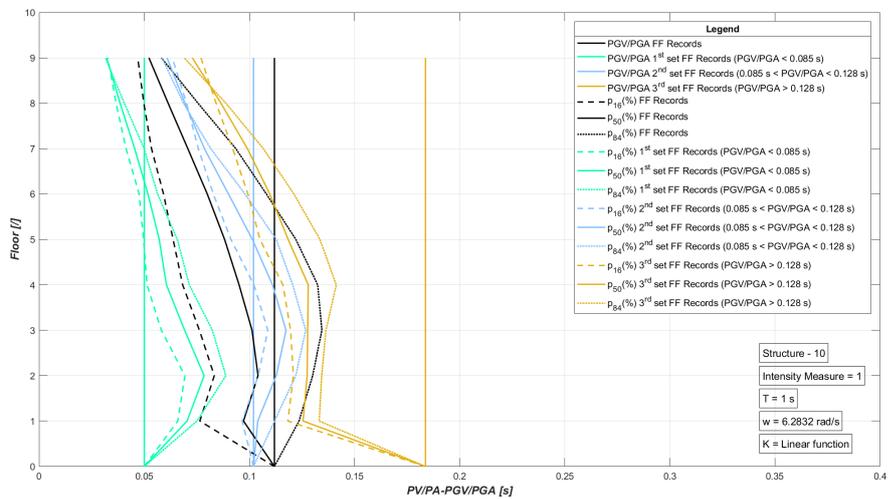


Figura 9.260: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

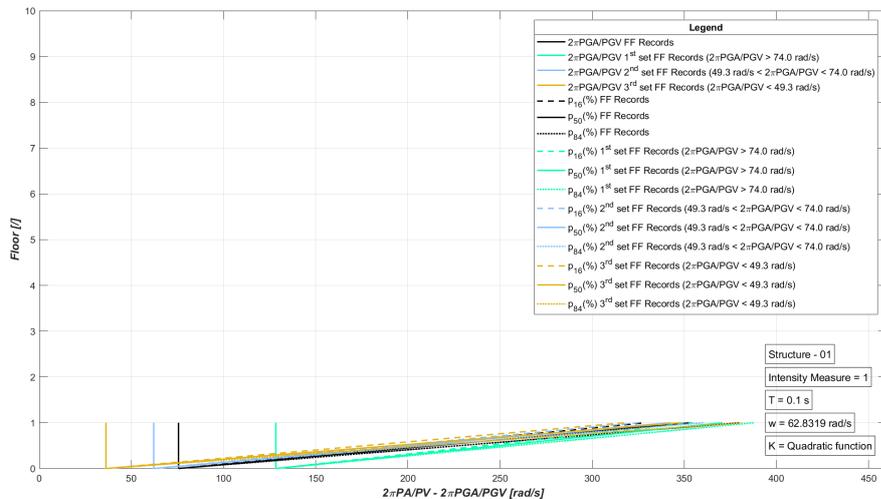


Figura 9.261: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

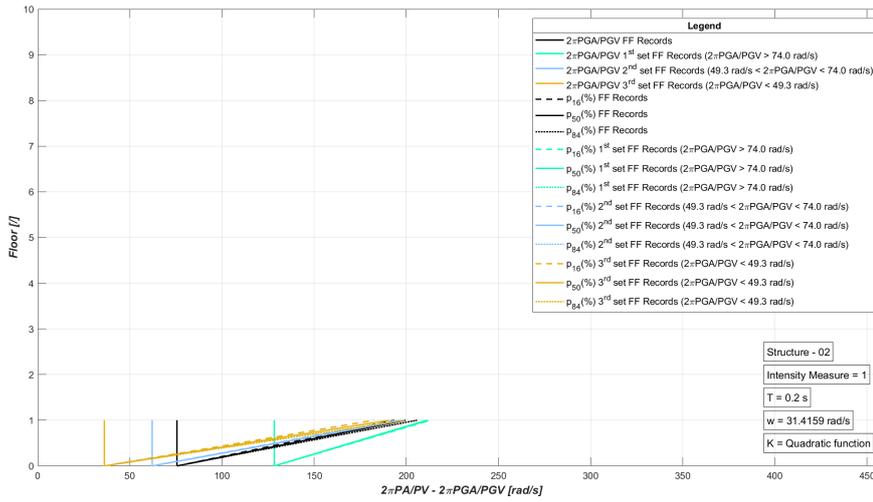


Figura 9.262: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

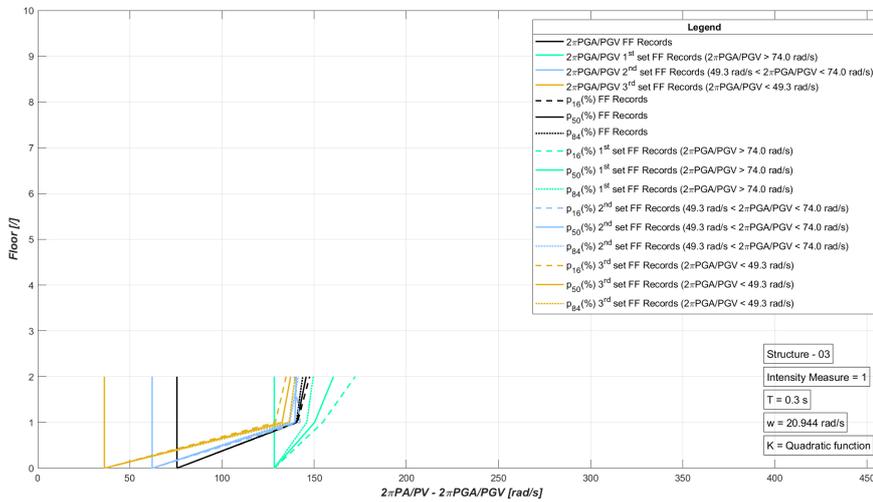


Figura 9.263: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

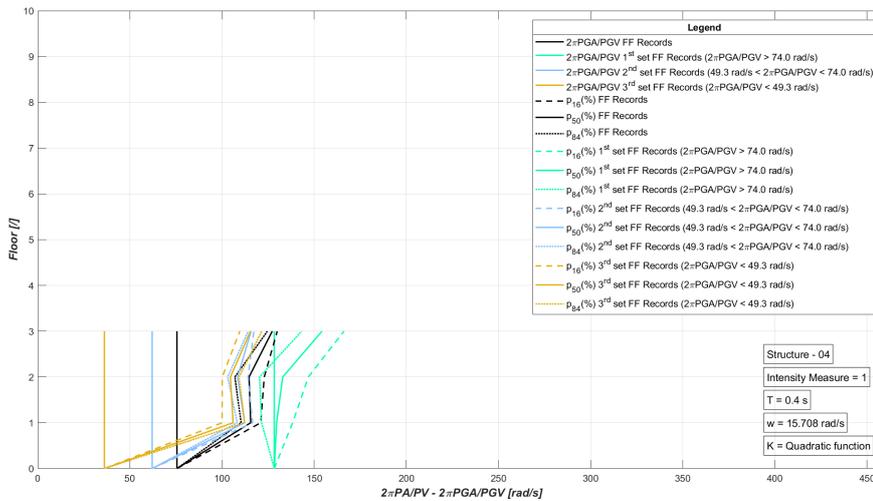


Figura 9.264: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

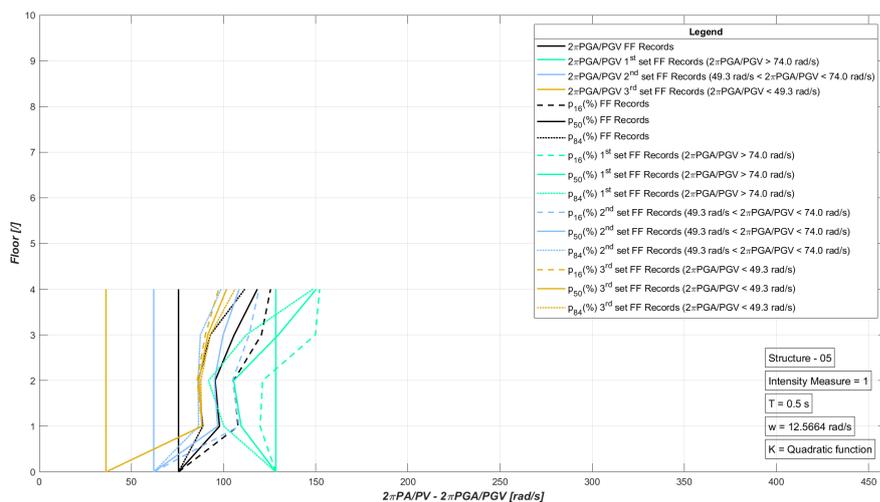


Figura 9.265: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

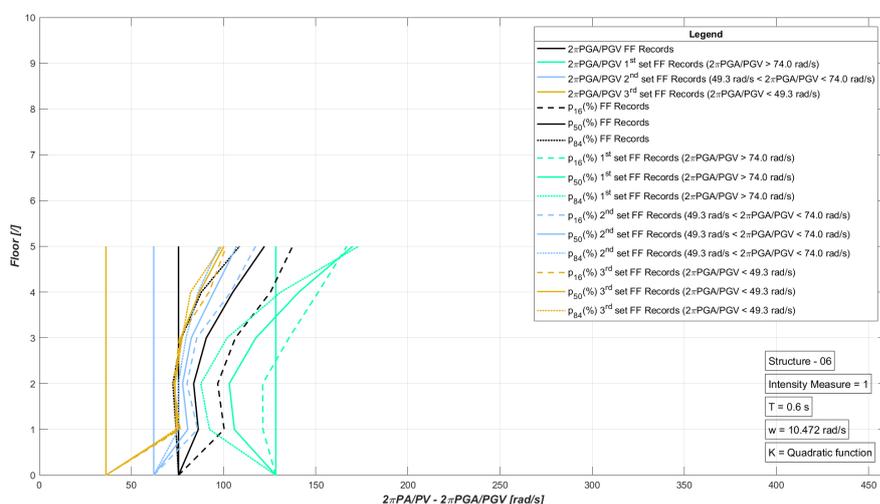


Figura 9.266: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 06.

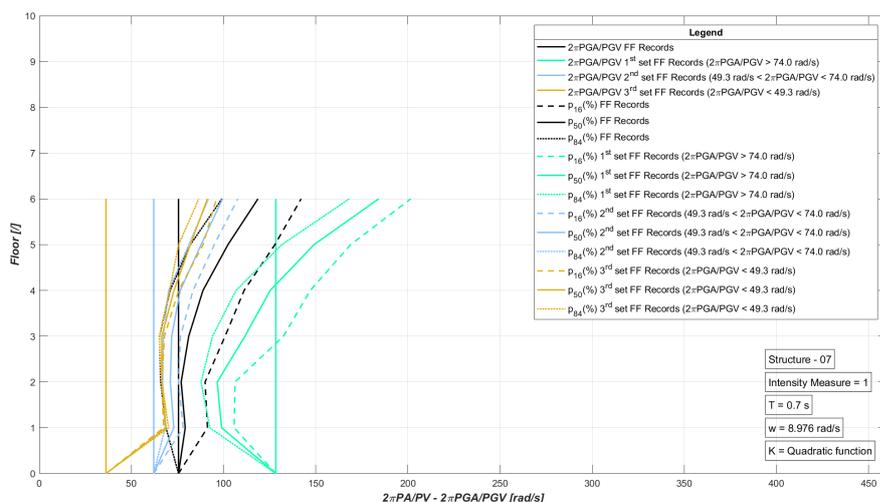


Figura 9.267: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 07.

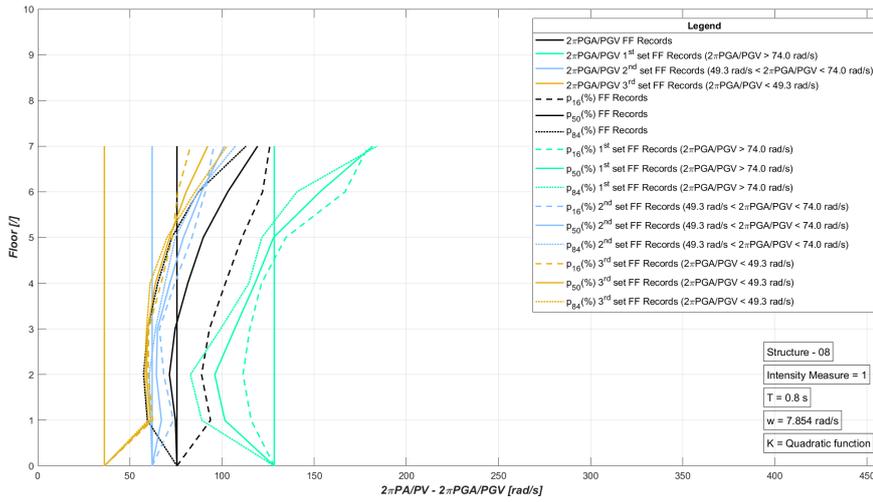


Figura 9.268: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

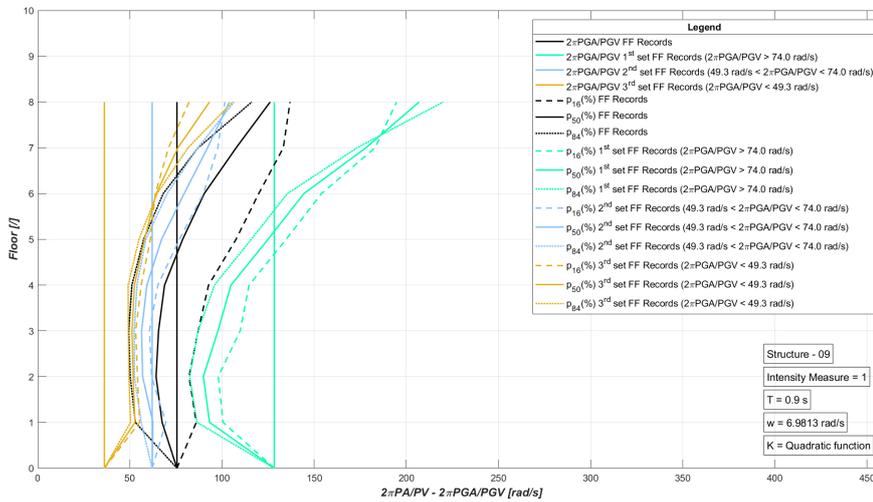


Figura 9.269: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

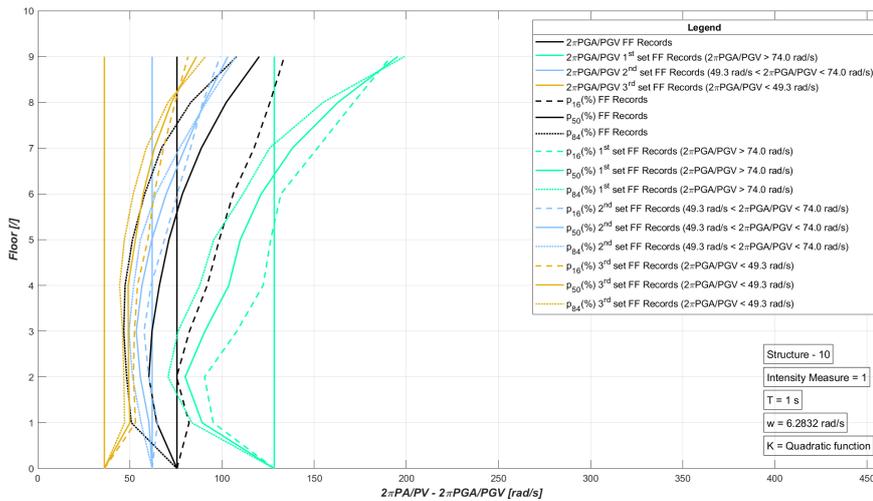


Figura 9.270: Sismi FF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

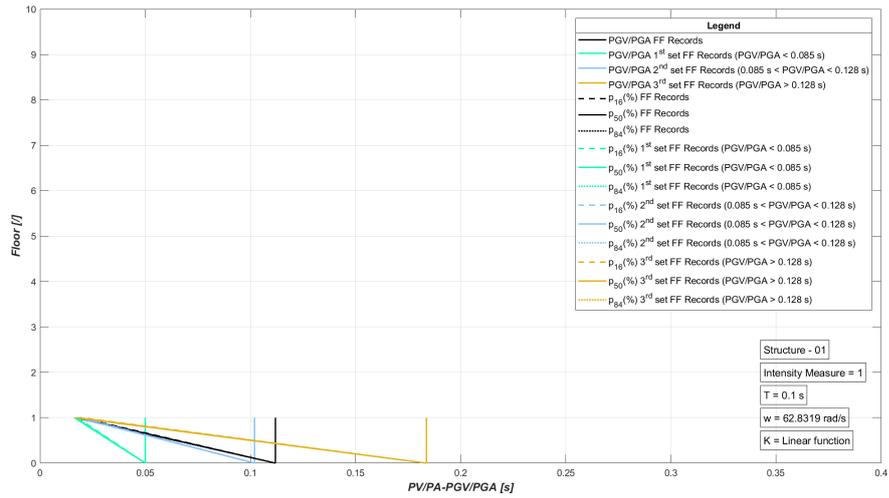


Figura 9.271: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

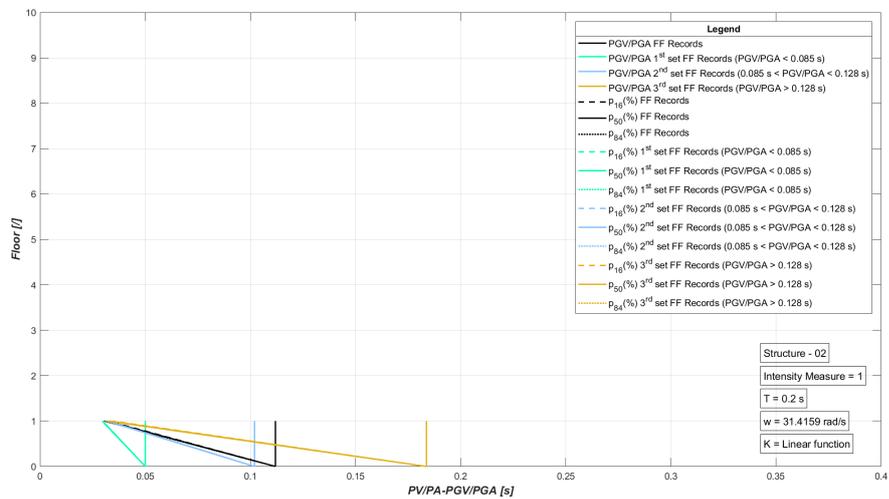


Figura 9.272: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 02.

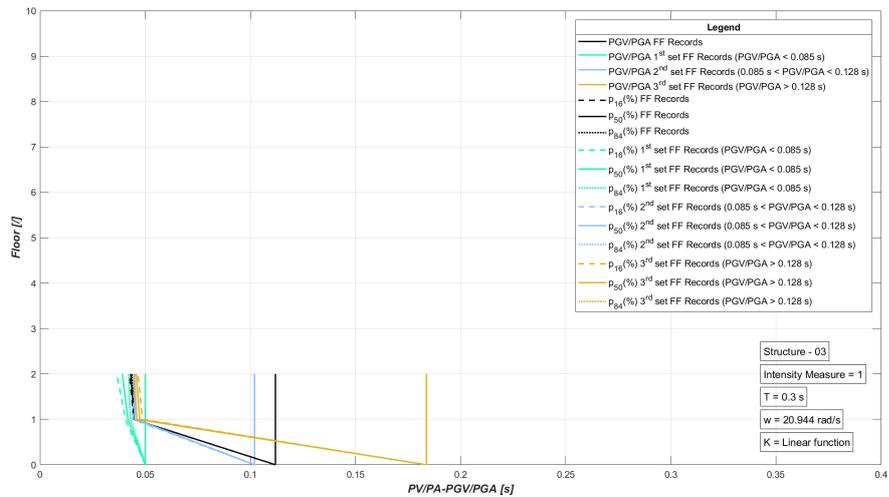


Figura 9.273: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 03.

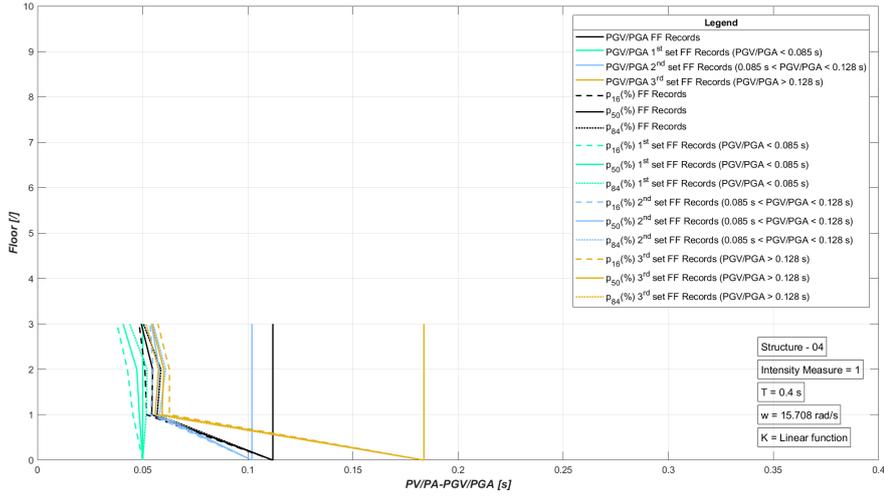


Figura 9.274: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadra}]$ - Struttura 04.

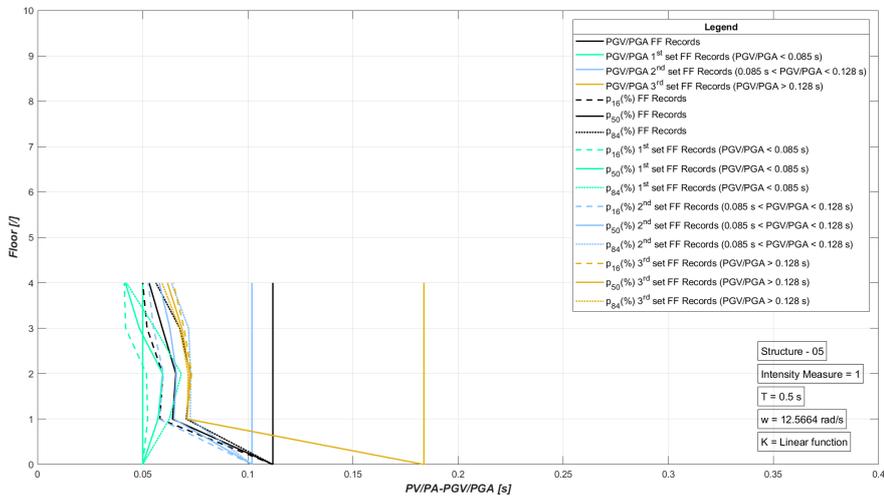


Figura 9.275: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadra}]$ - Struttura 05.

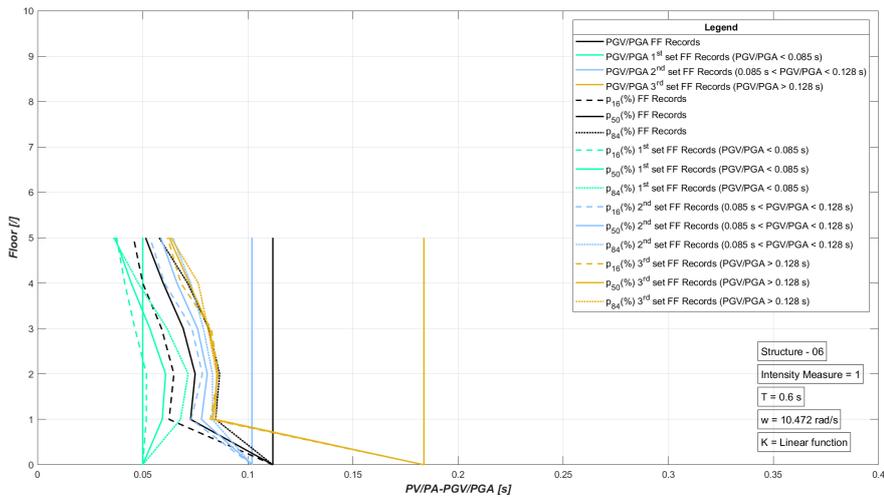


Figura 9.276: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quadra}]$ - Struttura 06.

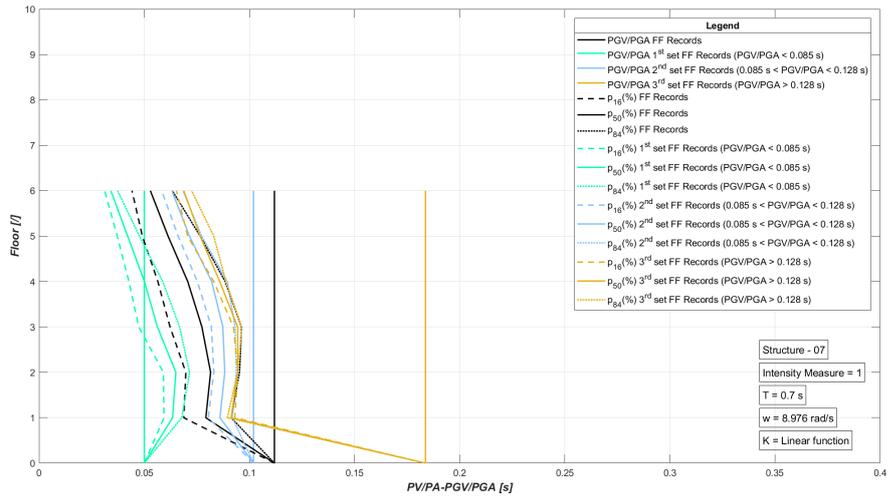


Figura 9.277: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 07.

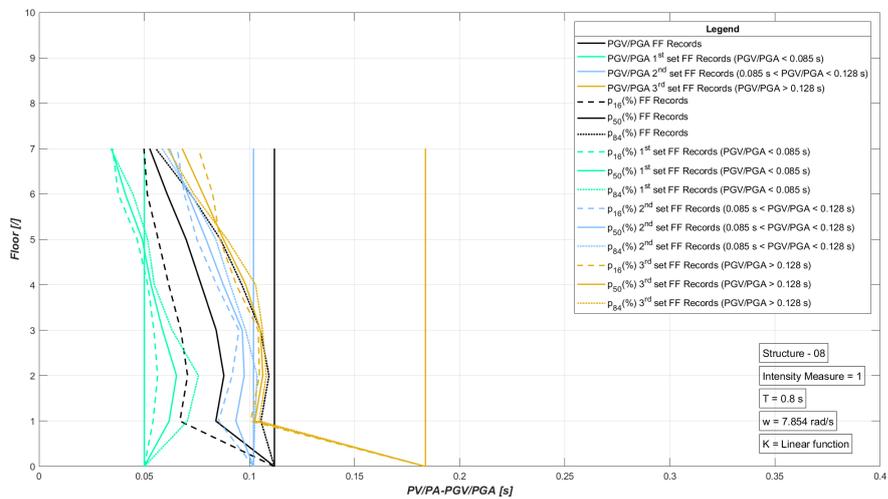


Figura 9.278: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

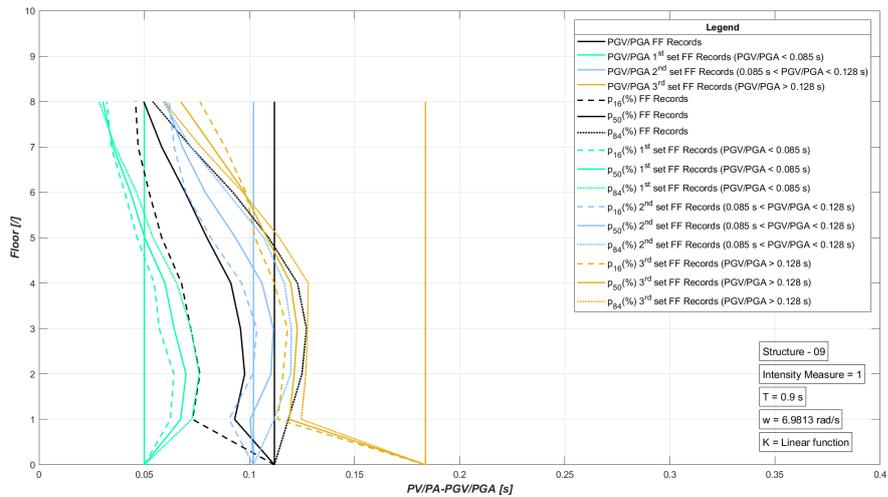


Figura 9.279: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

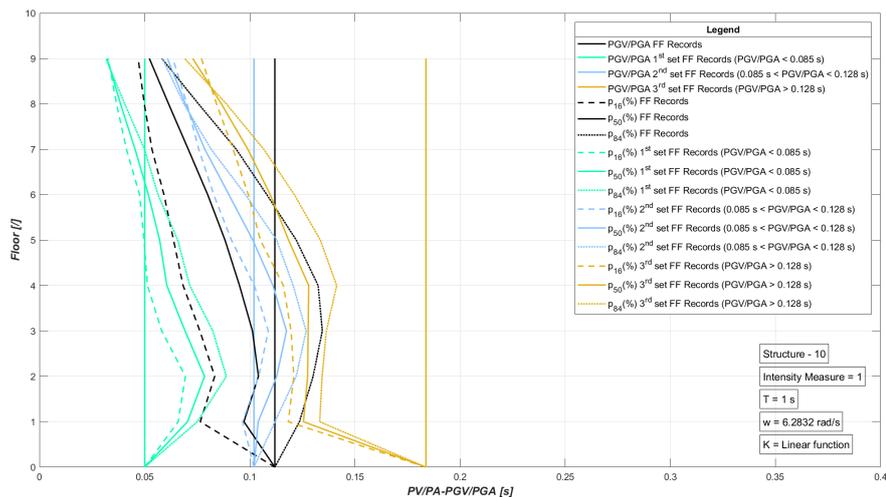


Figura 9.280: Sismi FF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

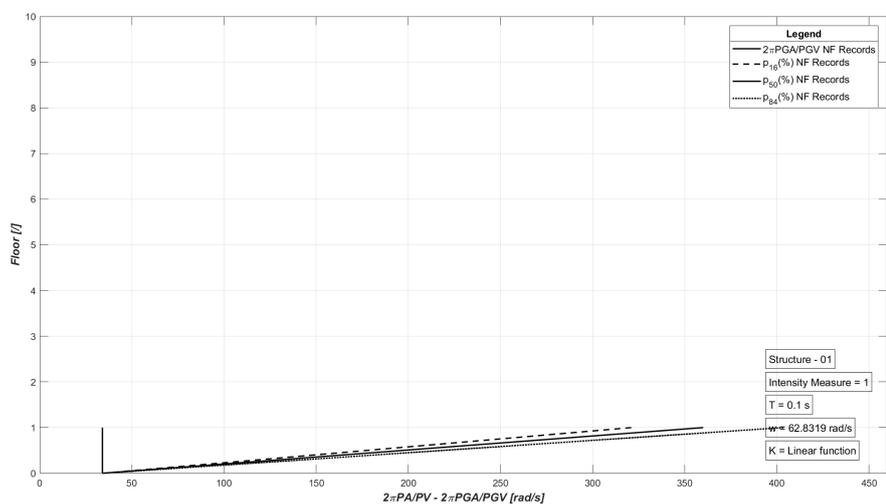


Figura 9.281: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

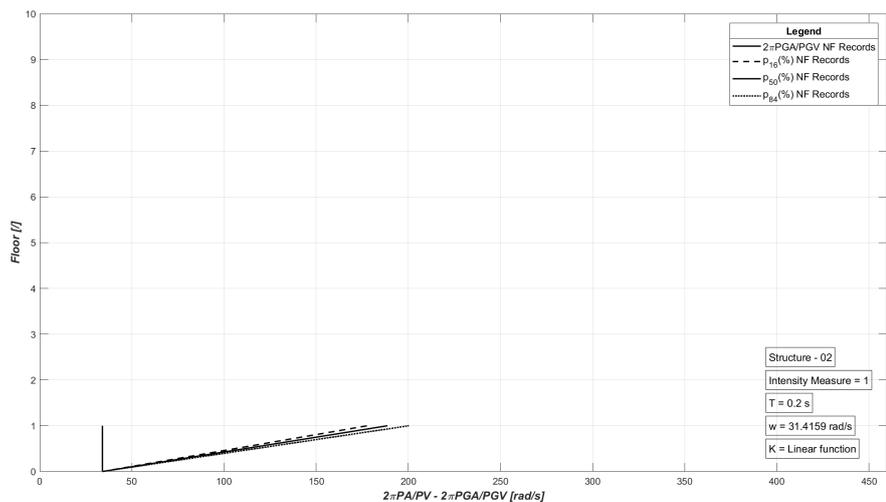


Figura 9.282: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

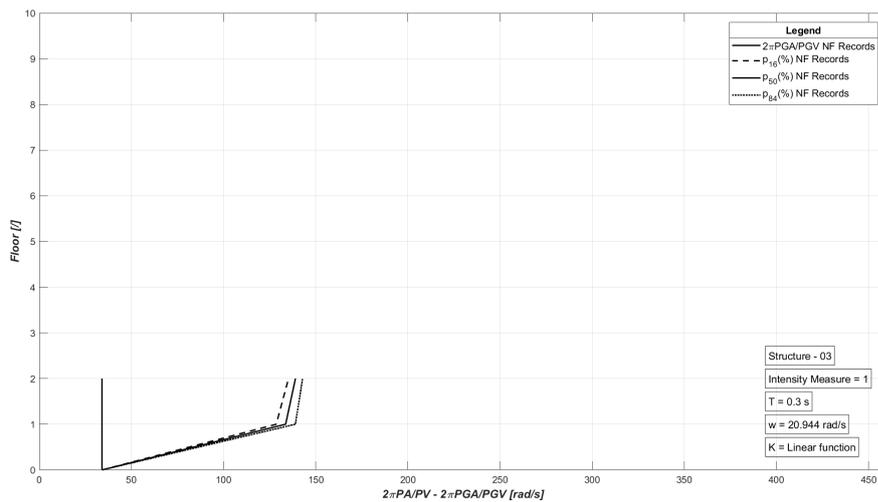


Figura 9.283: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

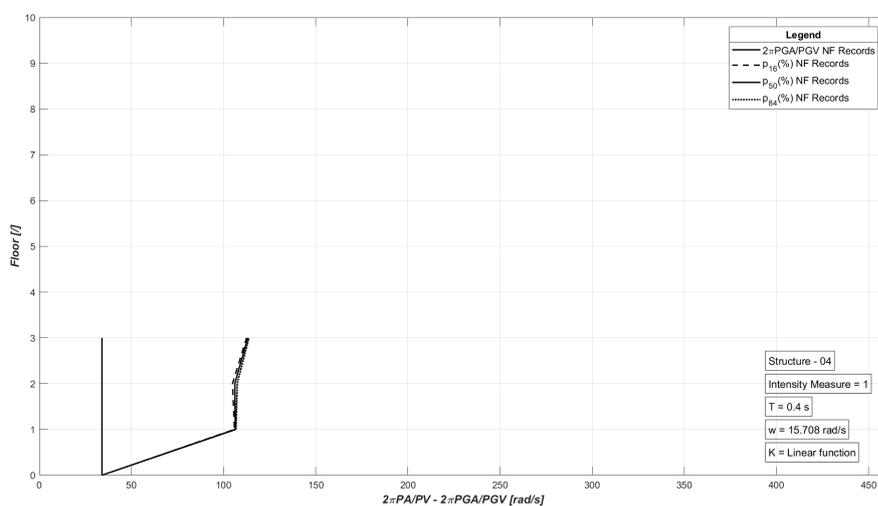


Figura 9.284: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

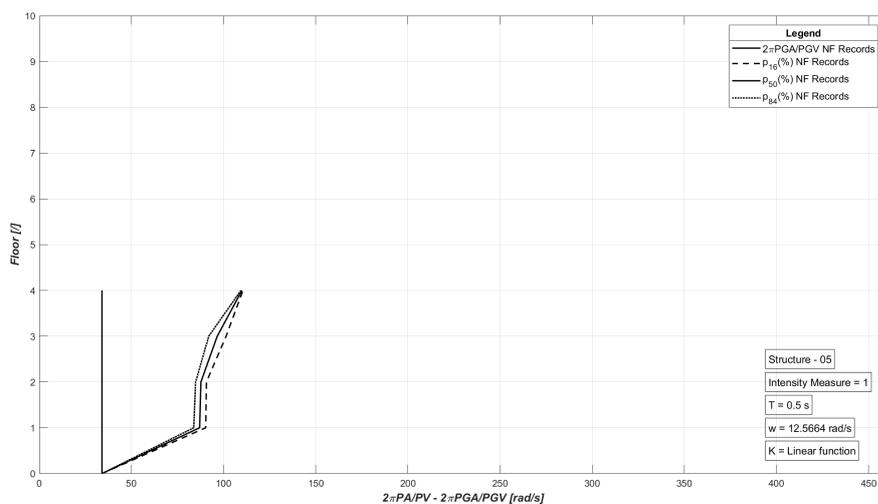


Figura 9.285: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

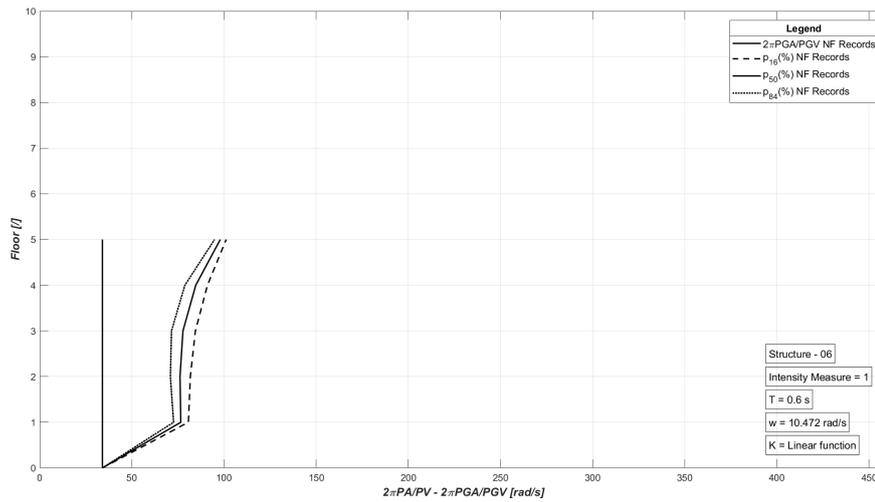


Figura 9.286: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

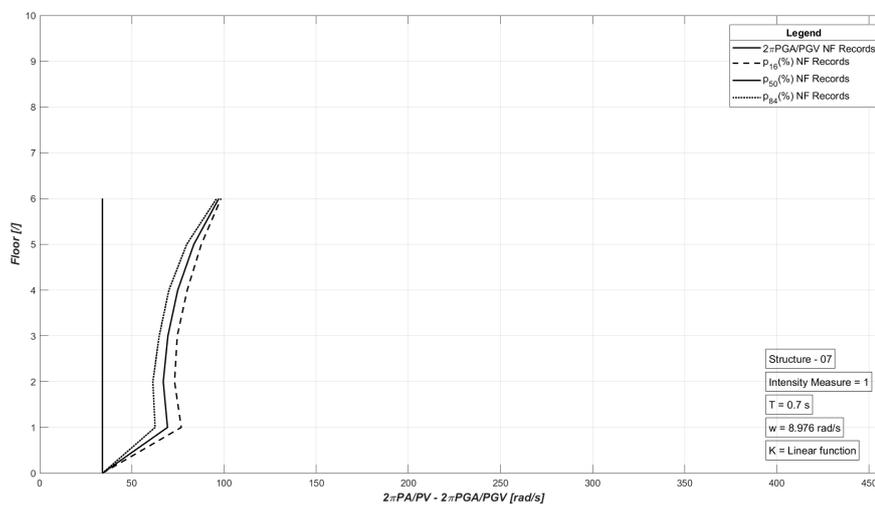


Figura 9.287: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

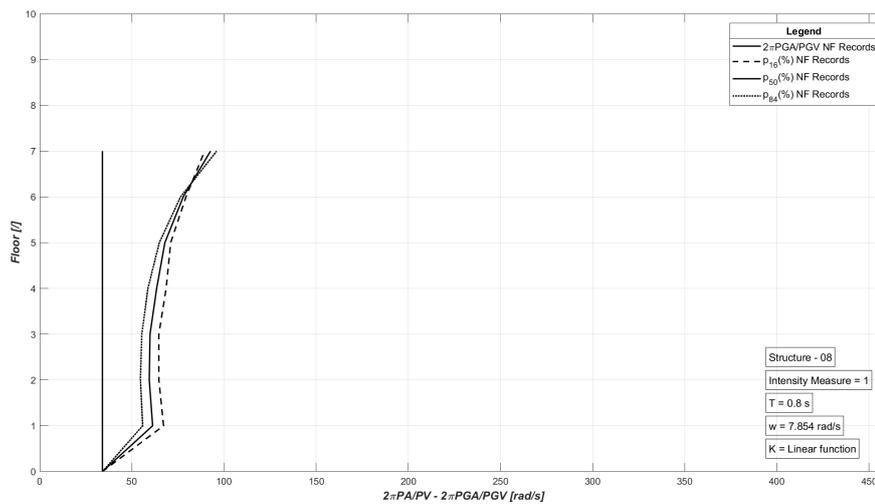


Figura 9.288: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

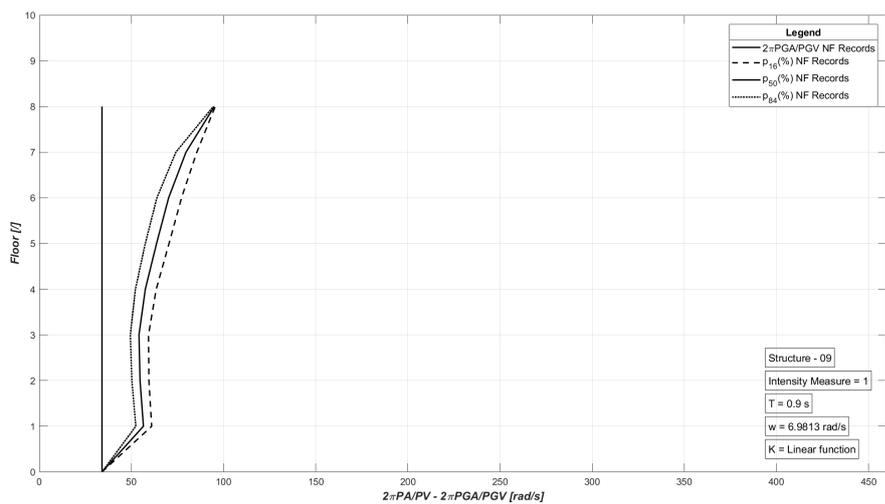


Figura 9.289: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

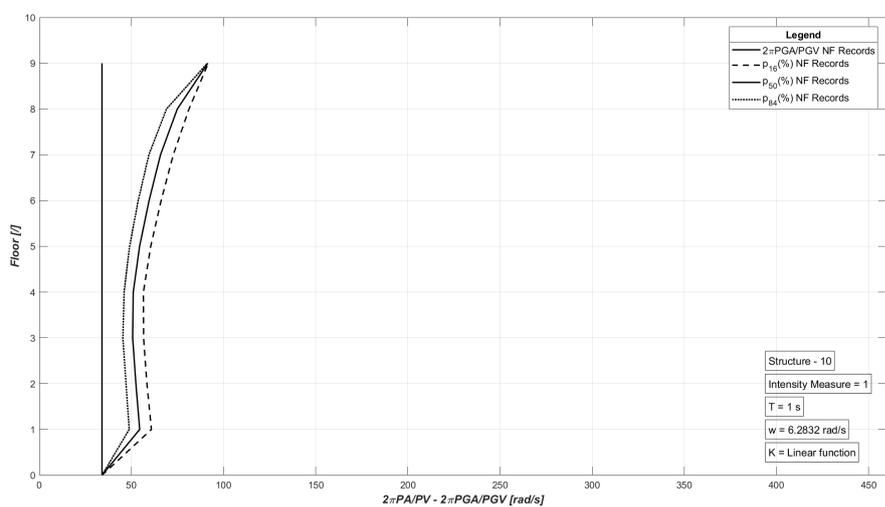


Figura 9.290: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

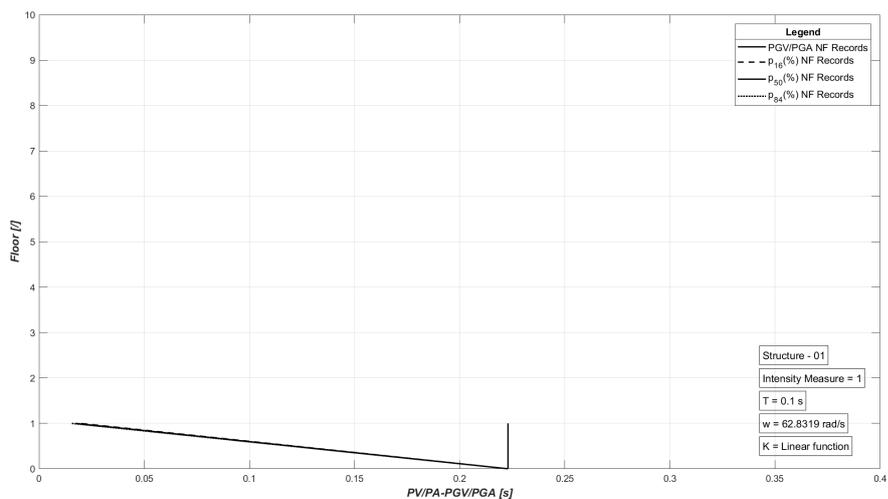


Figura 9.291: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

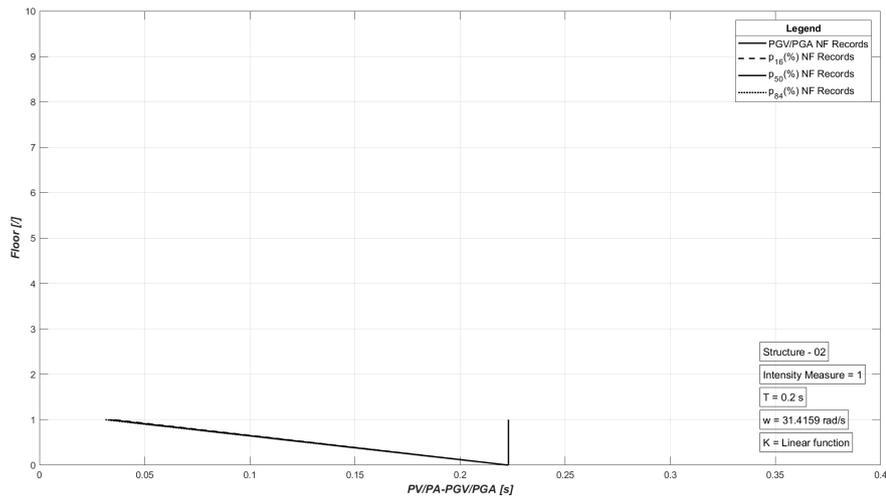


Figura 9.292: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

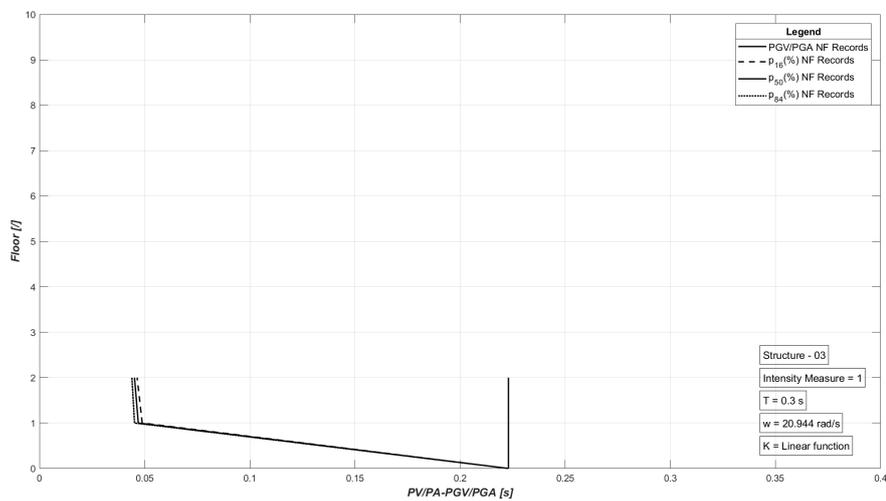


Figura 9.293: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

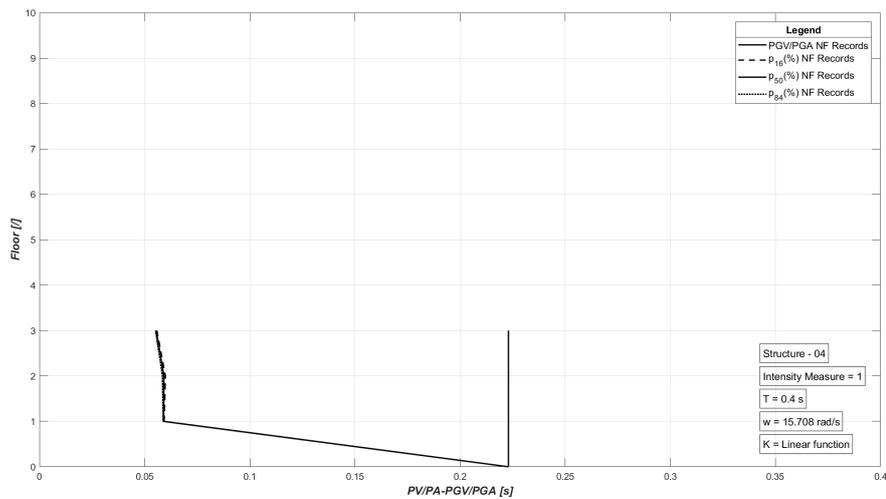


Figura 9.294: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

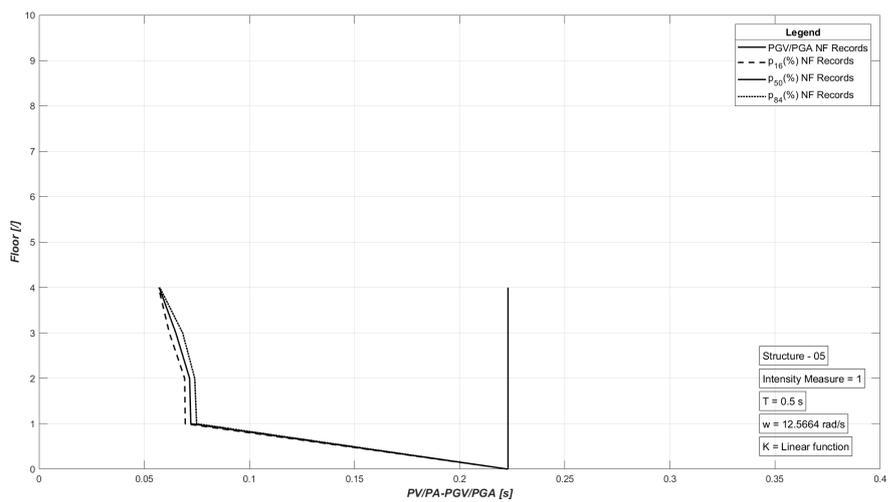


Figura 9.295: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

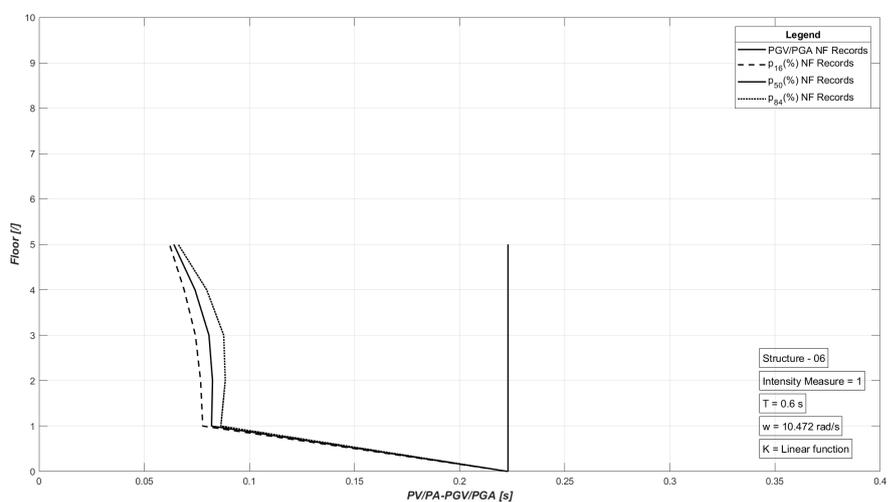


Figura 9.296: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

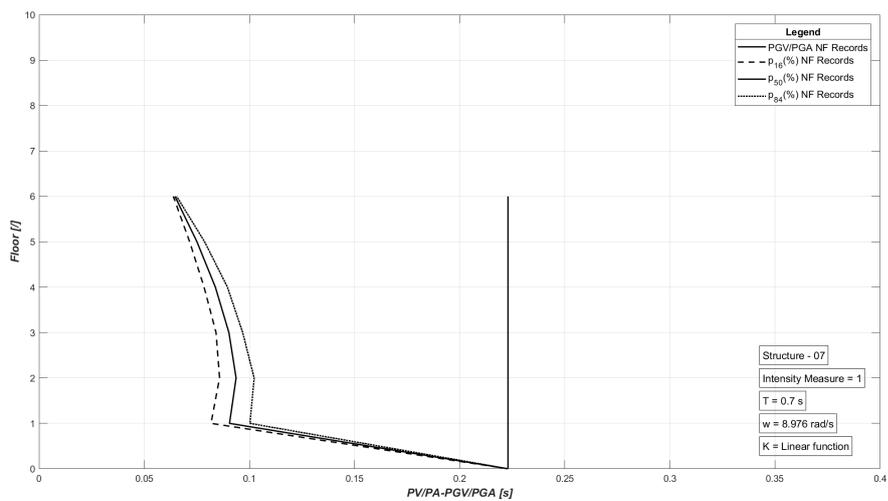


Figura 9.297: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

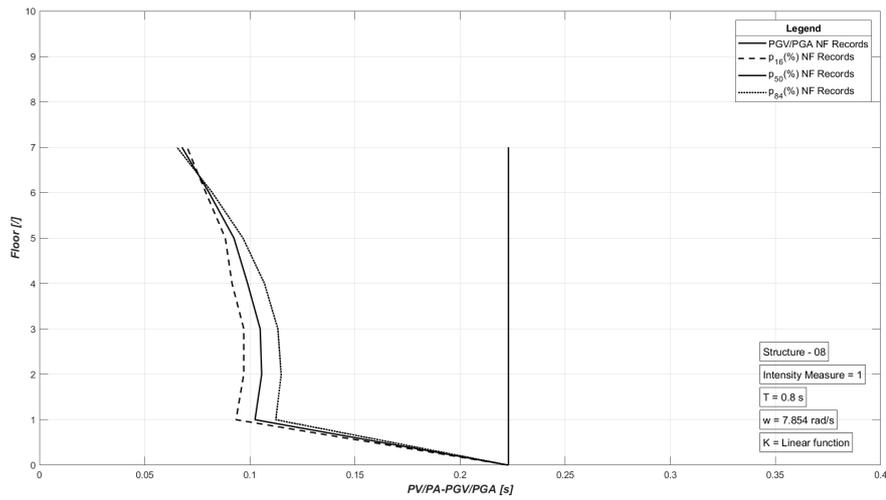


Figura 9.298: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

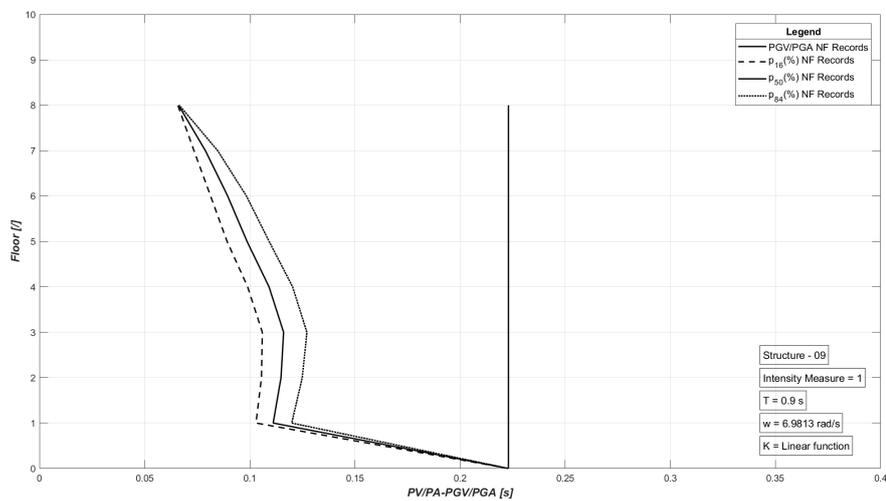


Figura 9.299: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

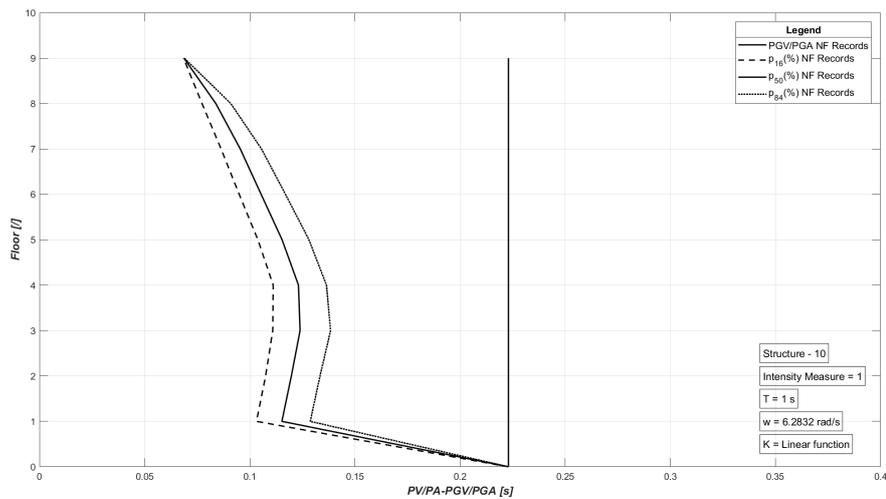


Figura 9.300: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

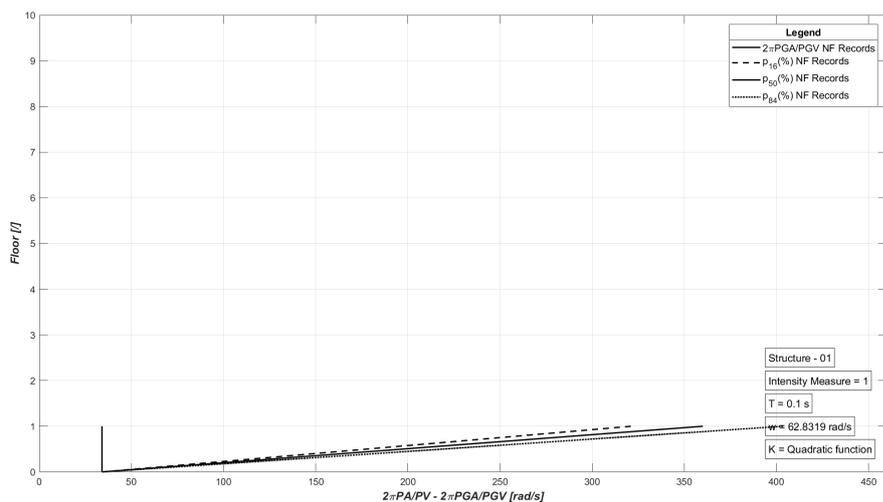


Figura 9.301: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

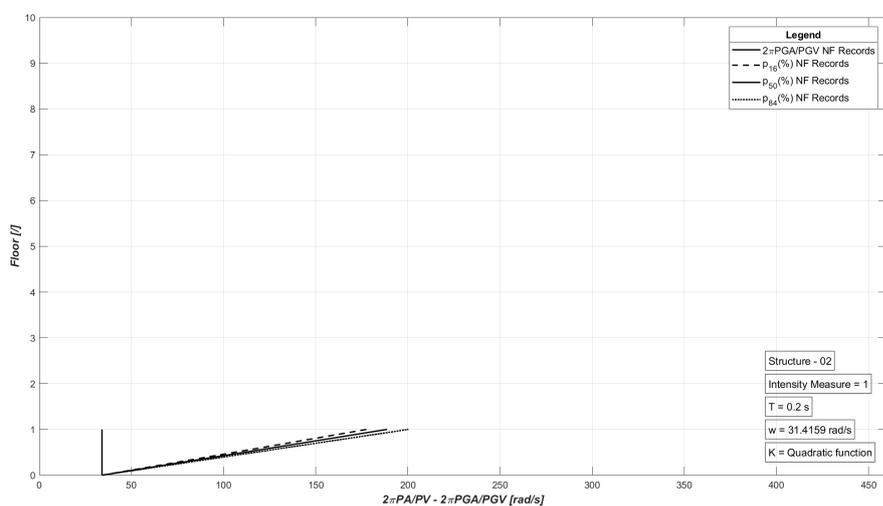


Figura 9.302: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

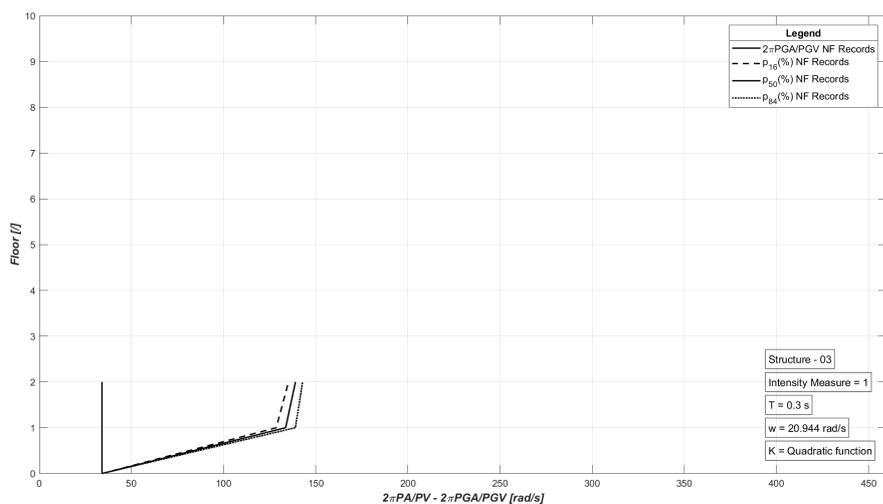


Figura 9.303: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

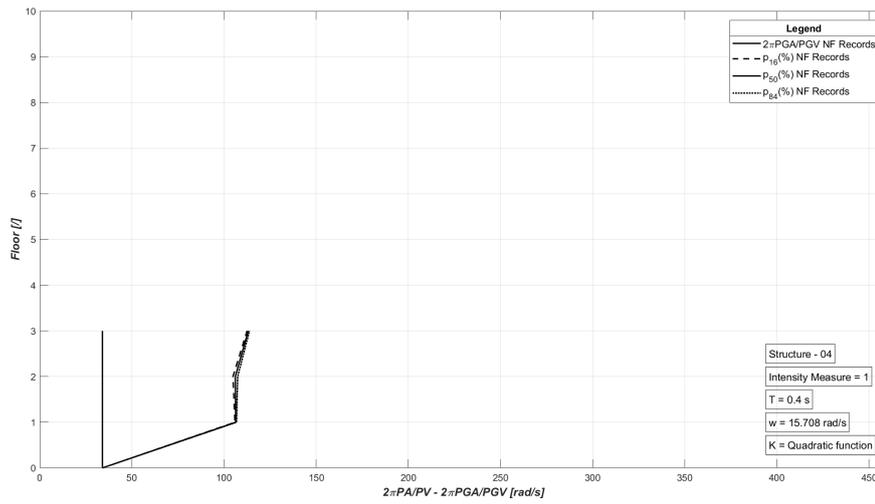


Figura 9.304: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

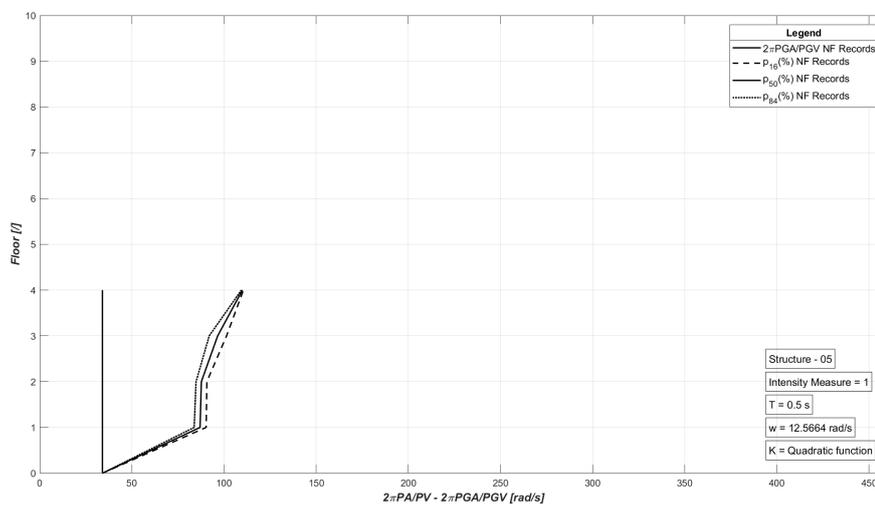


Figura 9.305: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

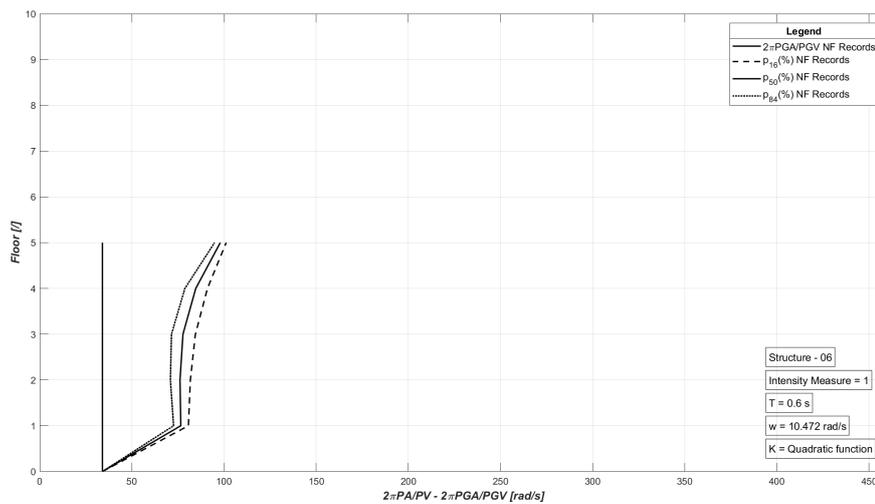


Figura 9.306: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

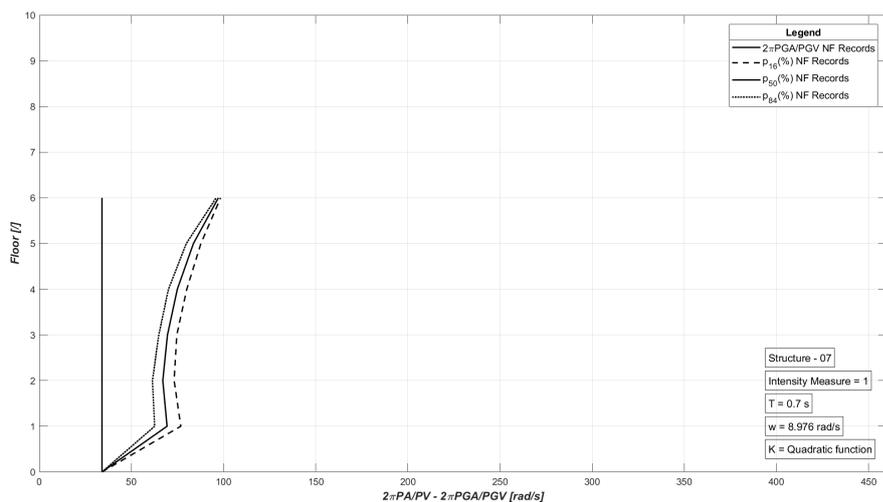


Figura 9.307: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

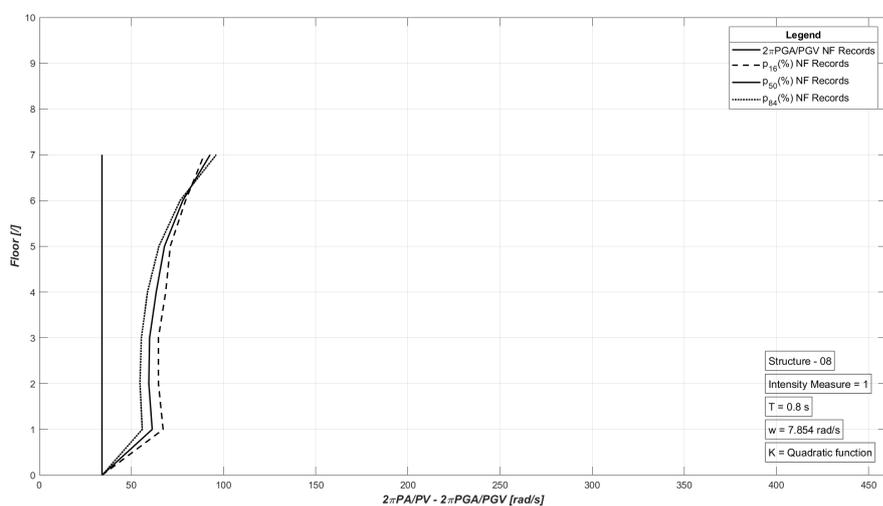


Figura 9.308: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

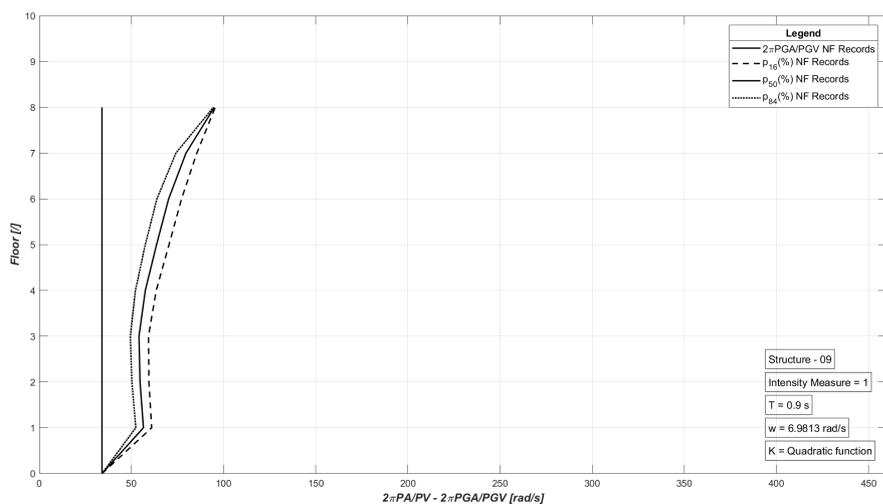


Figura 9.309: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 09.

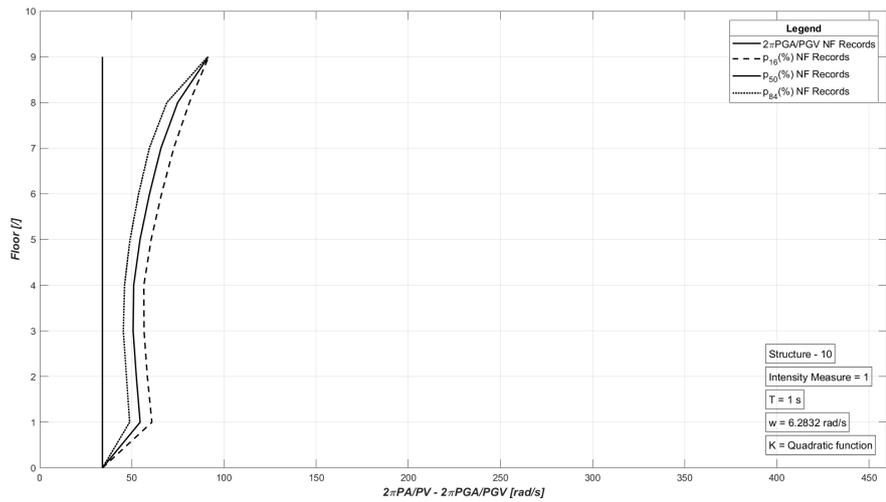


Figura 9.310: Sismi NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 10.

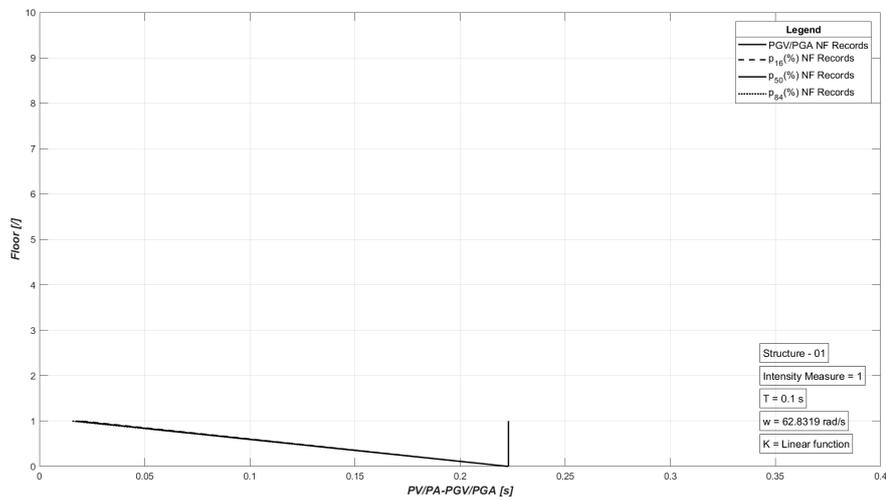


Figura 9.311: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

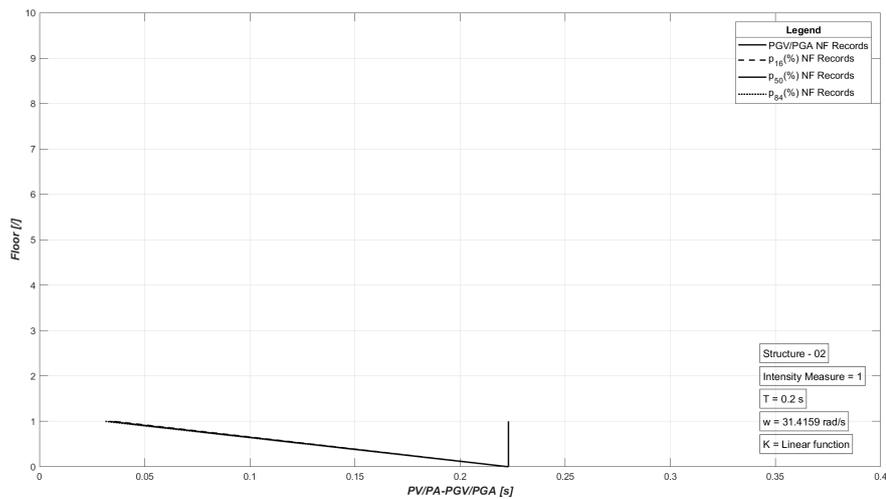


Figura 9.312: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

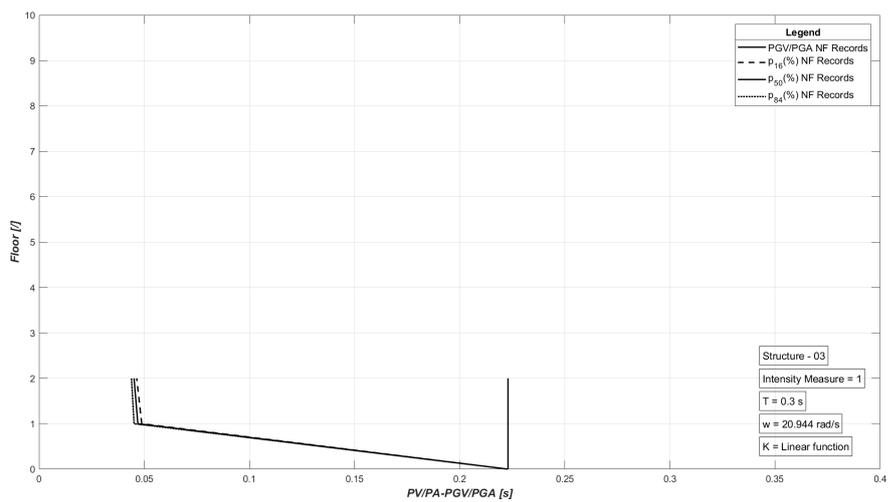


Figura 9.313: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 03.

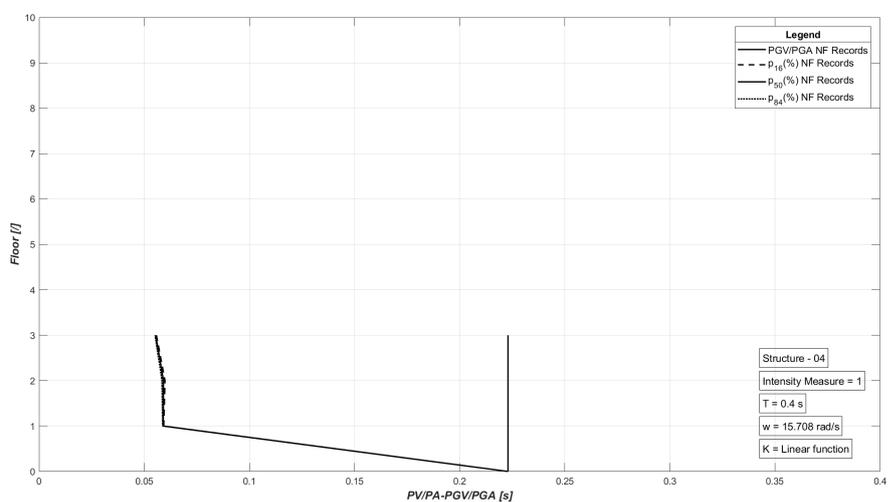


Figura 9.314: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 04.

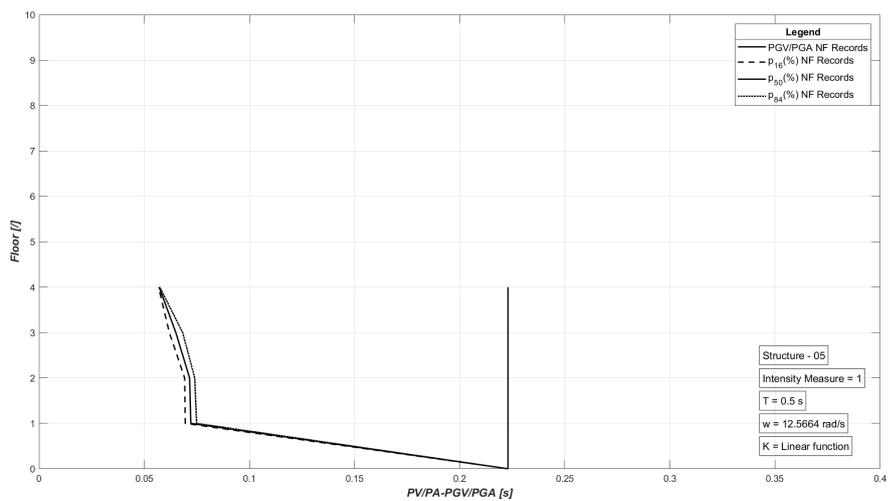


Figura 9.315: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 05.

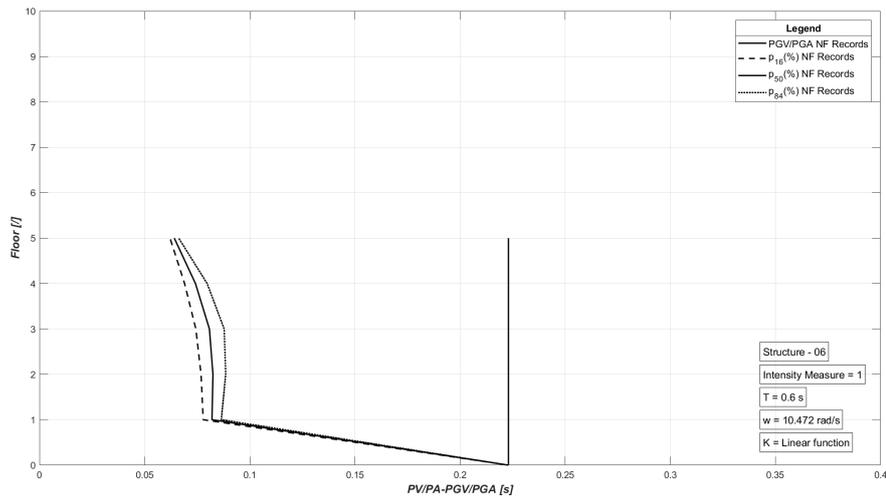


Figura 9.316: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

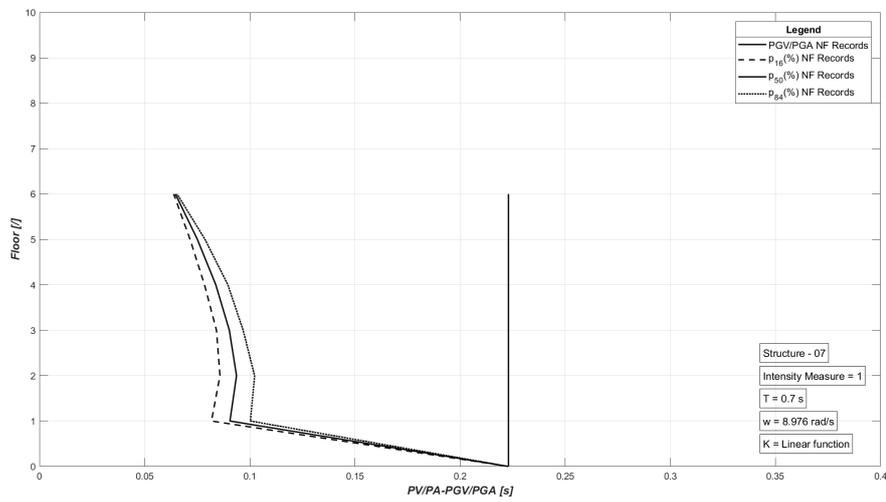


Figura 9.317: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

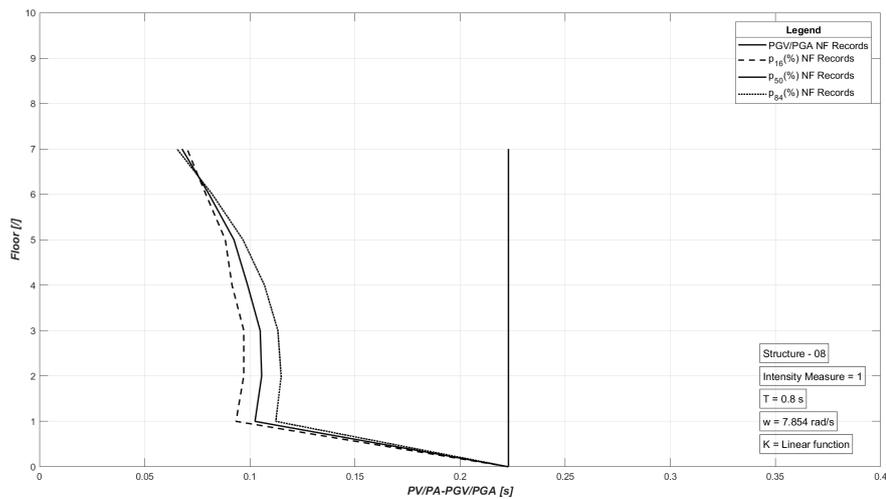


Figura 9.318: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

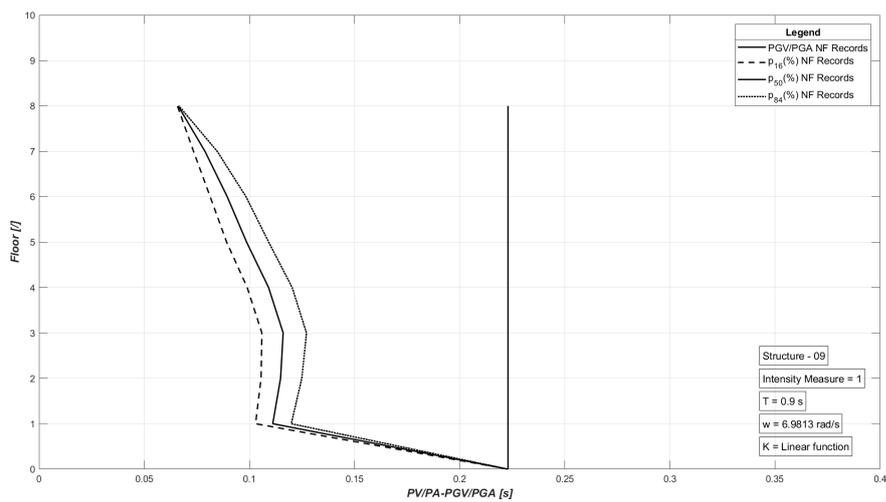


Figura 9.319: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

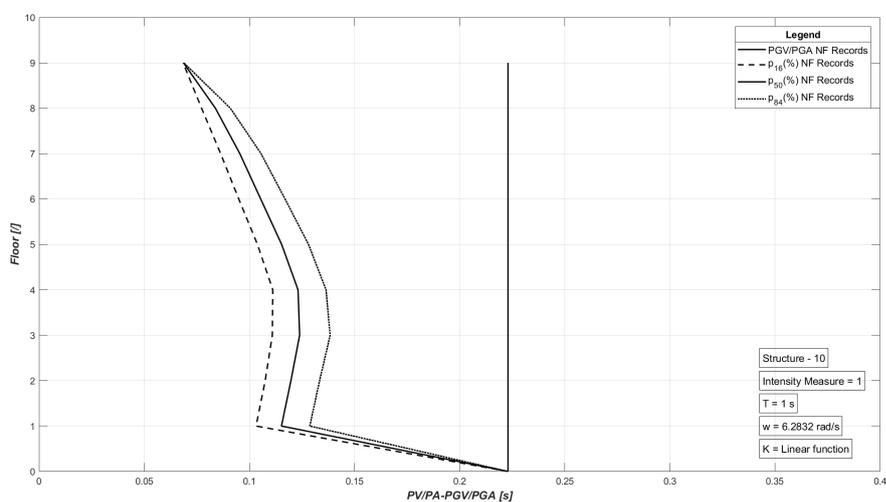


Figura 9.320: Sismi NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

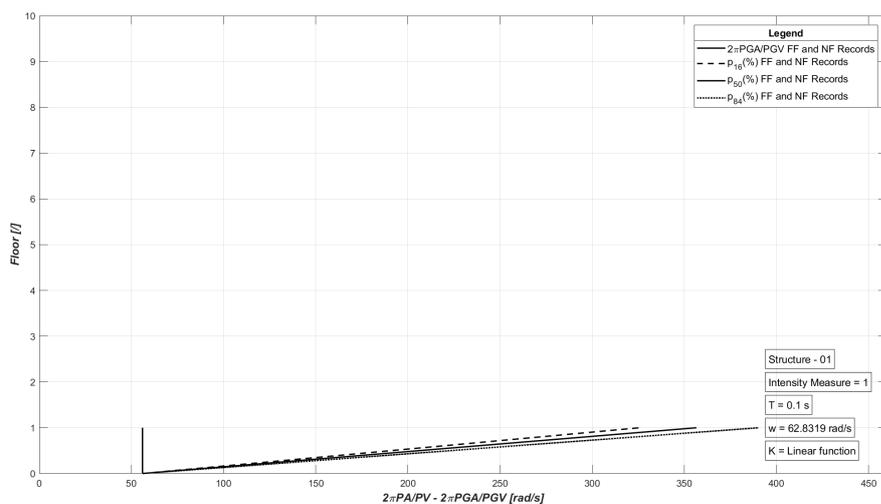


Figura 9.321: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

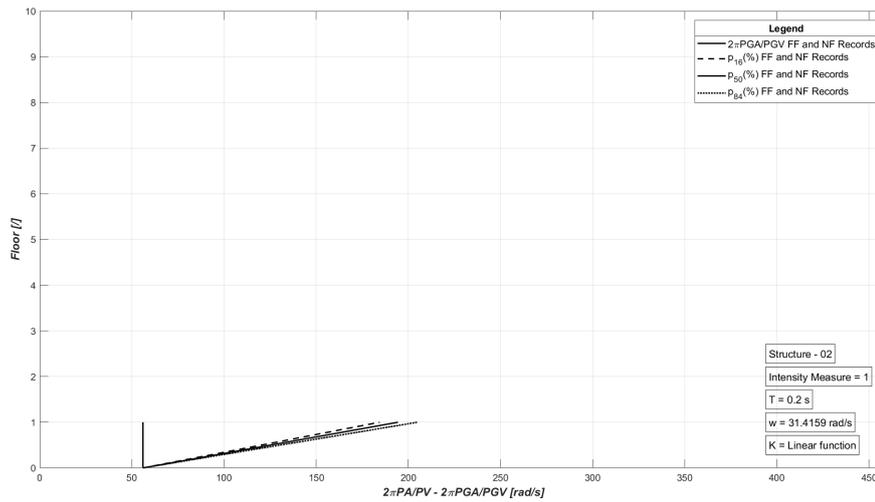


Figura 9.322: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

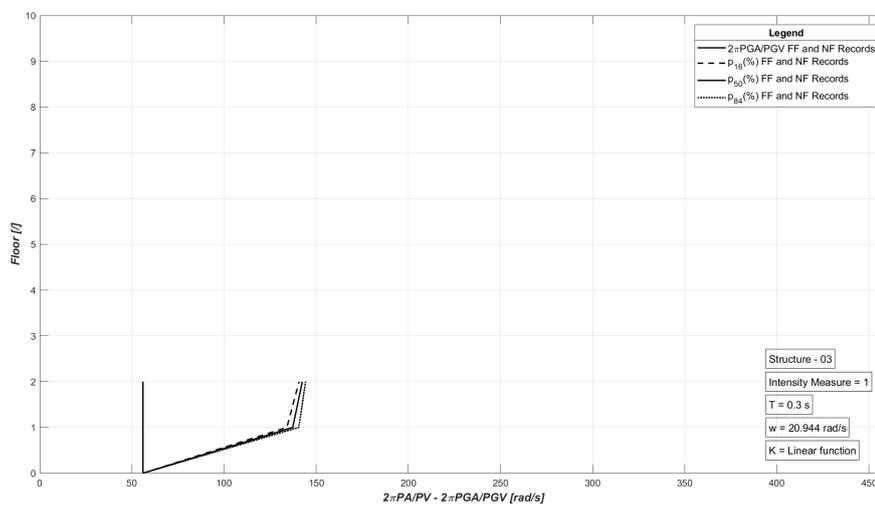


Figura 9.323: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

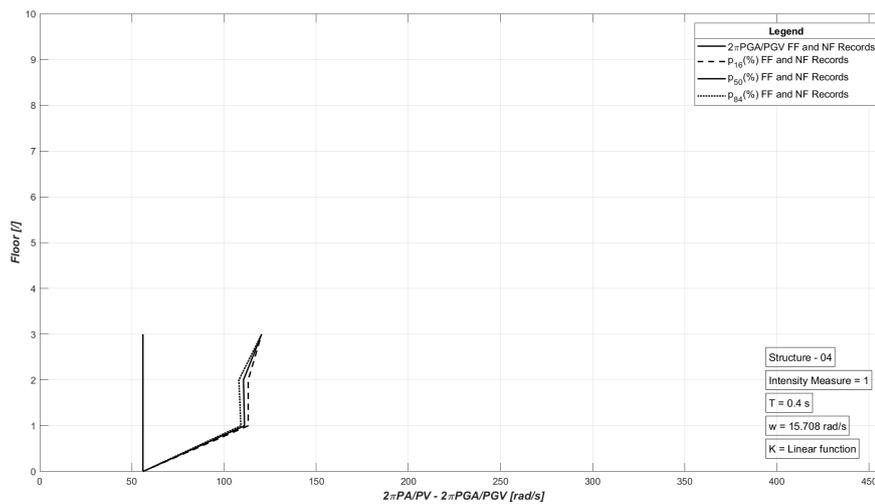


Figura 9.324: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

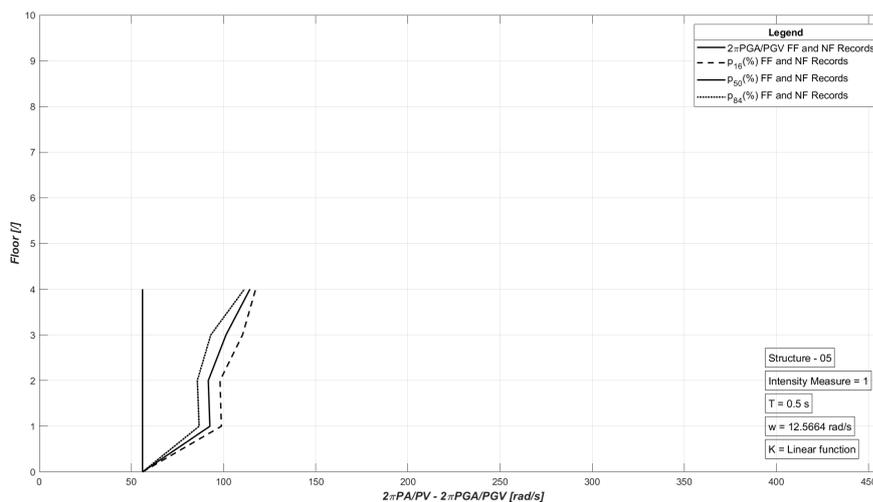


Figura 9.325: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

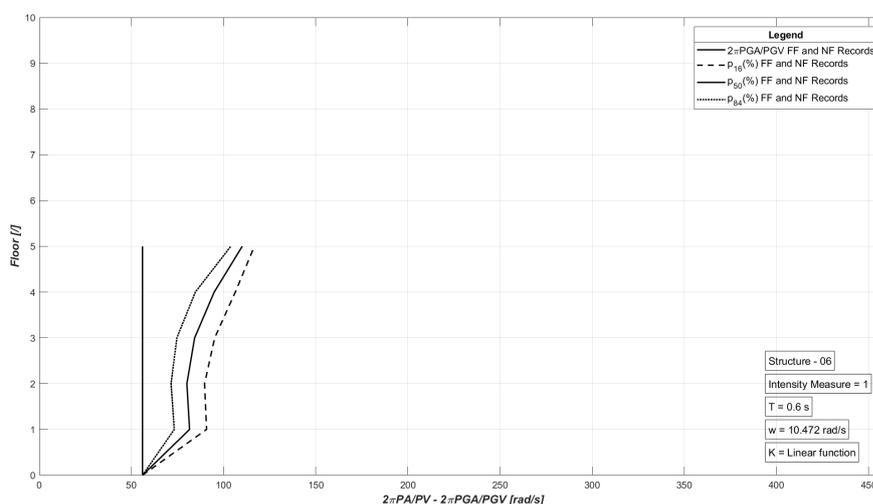


Figura 9.326: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

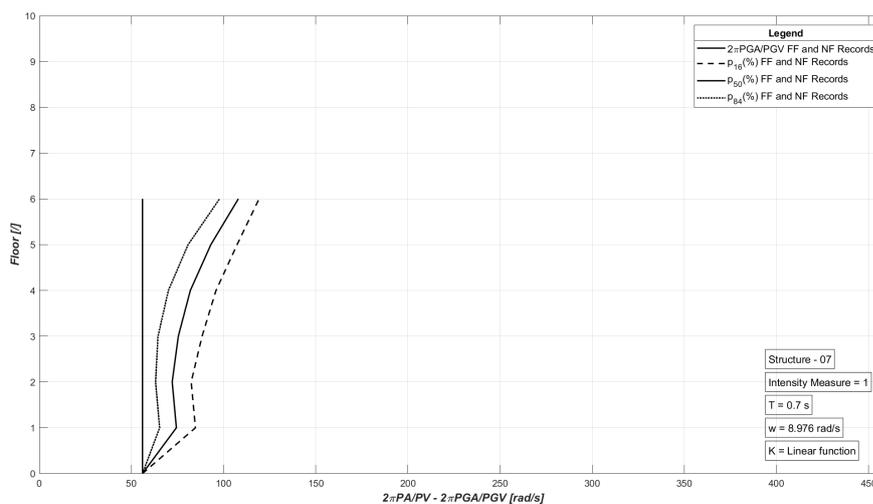


Figura 9.327: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

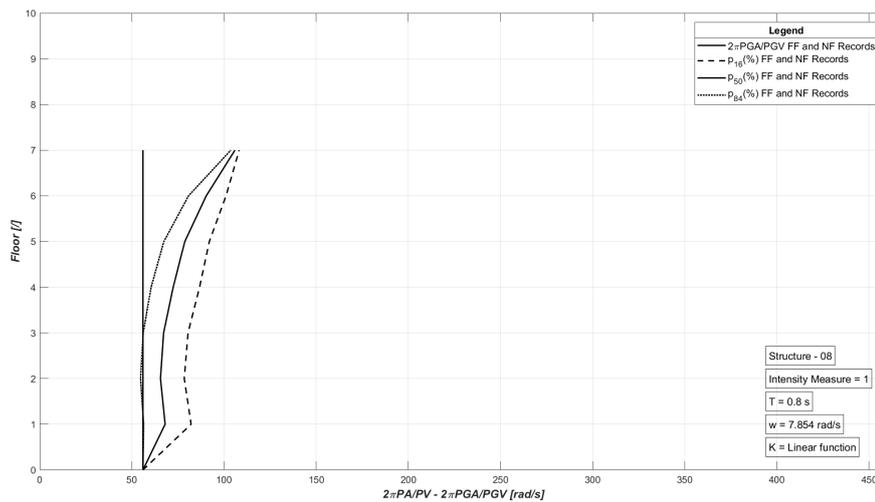


Figura 9.328: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

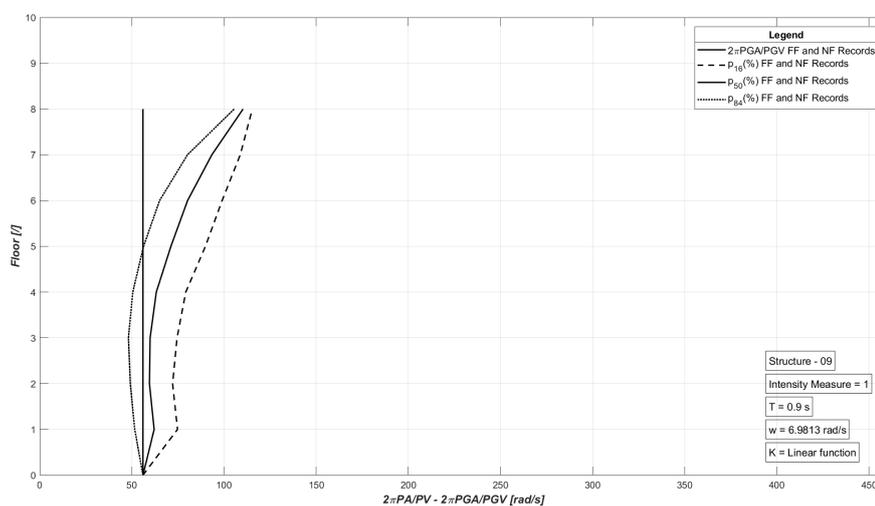


Figura 9.329: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

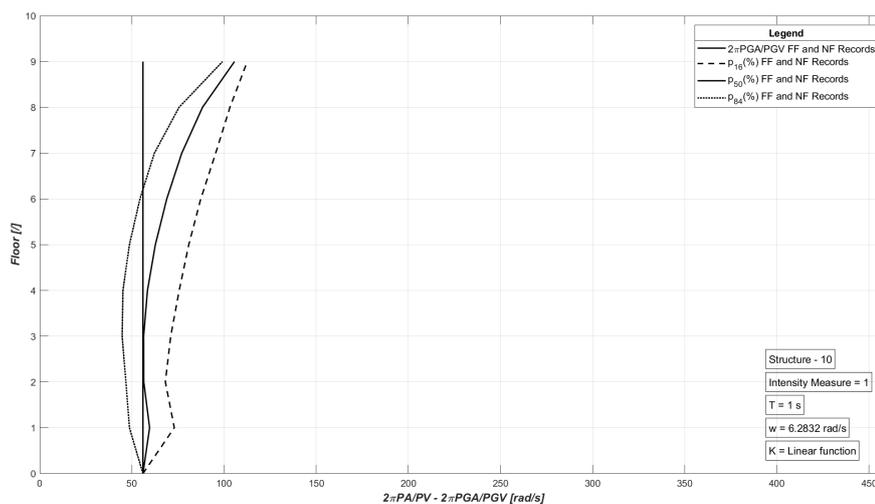


Figura 9.330: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

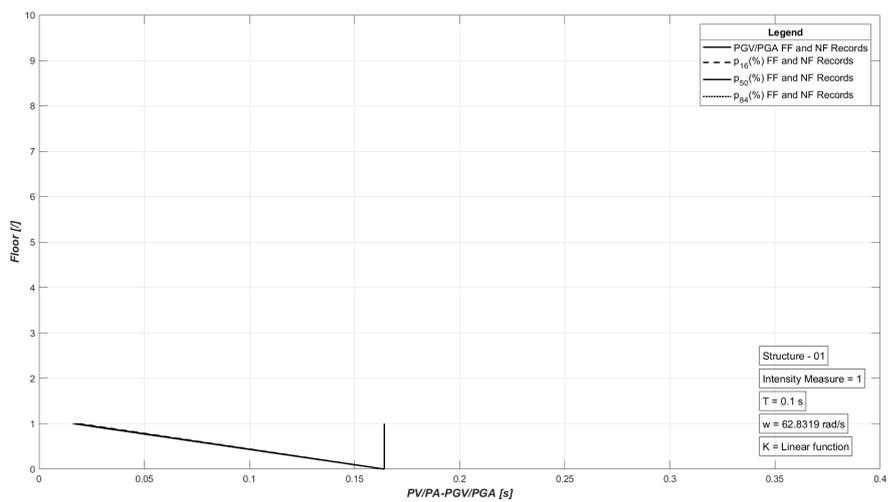


Figura 9.331: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 01.

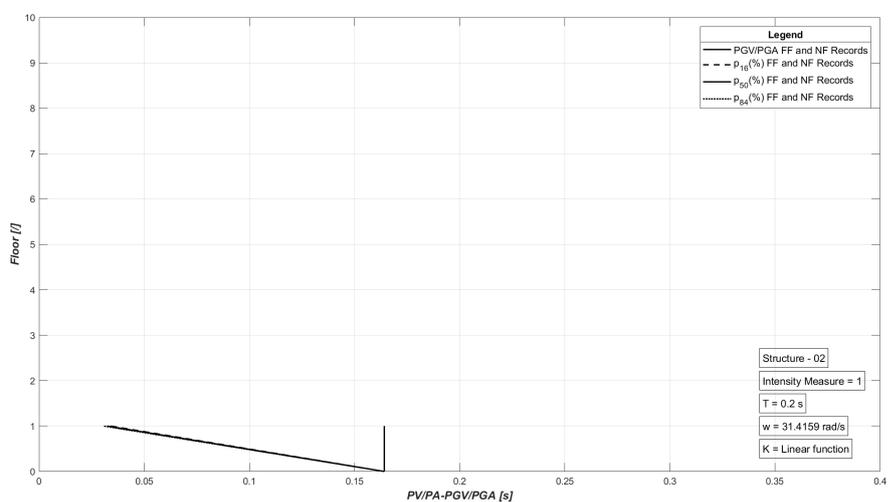


Figura 9.332: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 02.

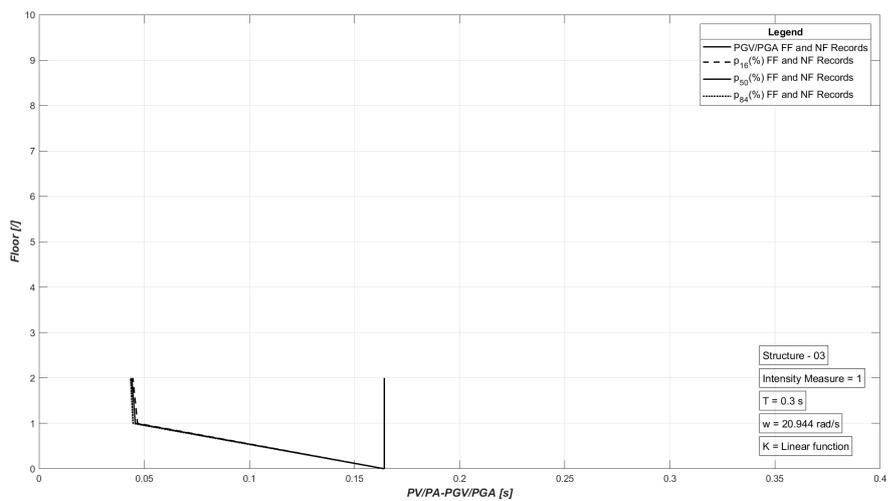


Figura 9.333: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 03.

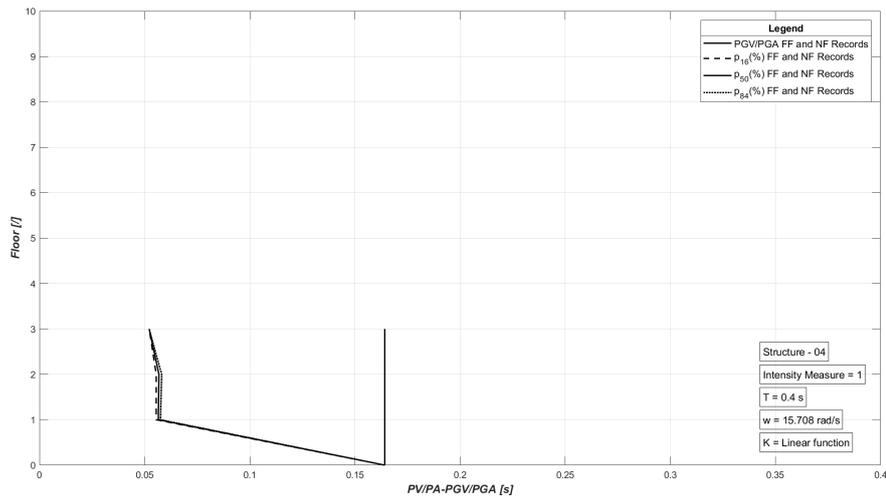


Figura 9.334: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 04.

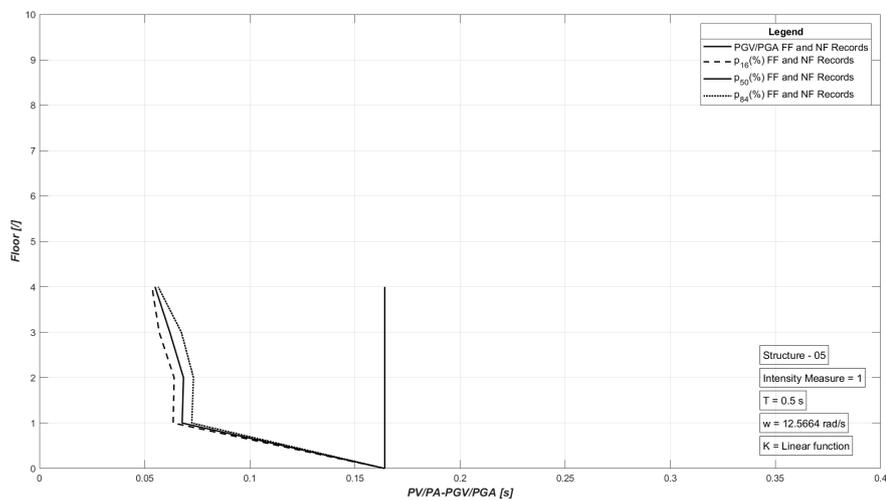


Figura 9.335: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 05.

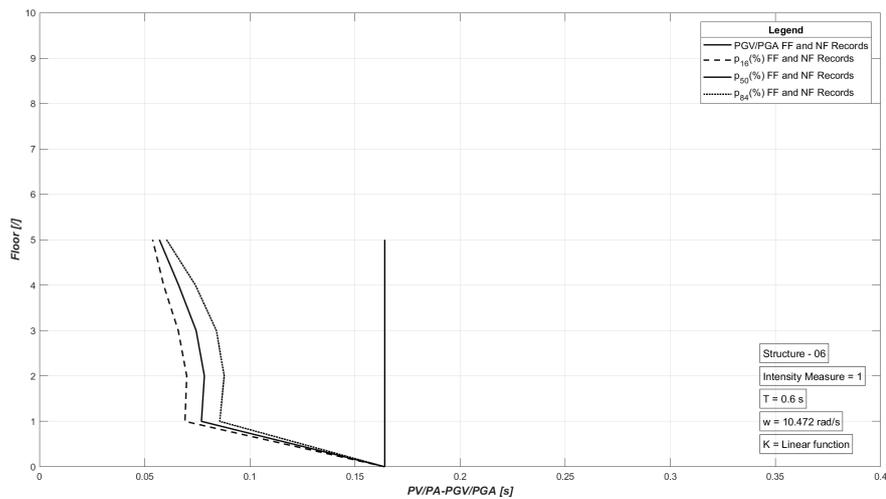


Figura 9.336: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 06.

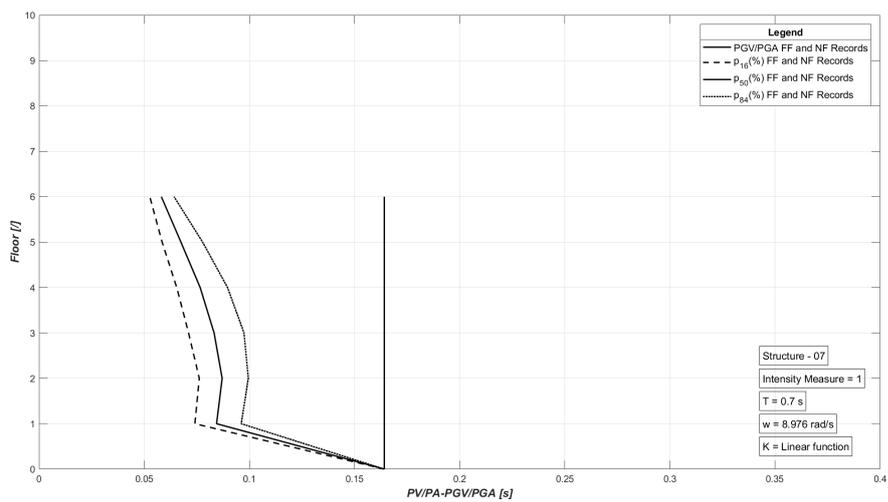


Figura 9.337: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 07.

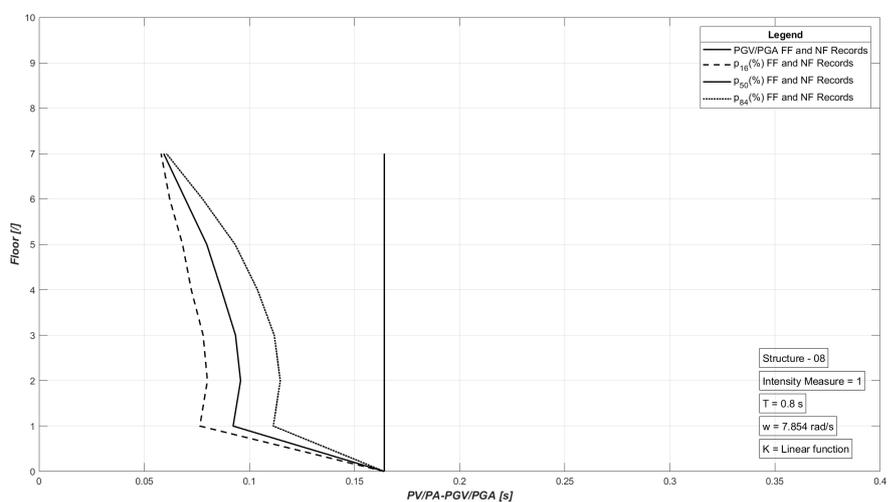


Figura 9.338: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 08.

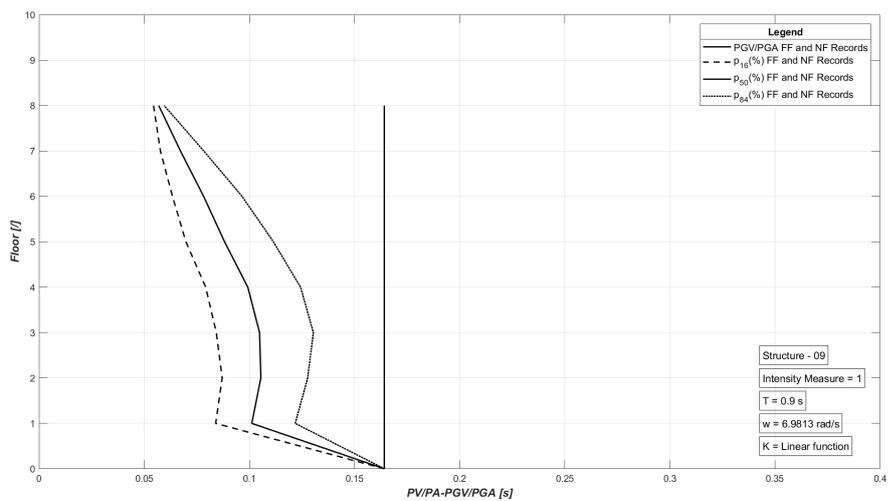


Figura 9.339: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 09.

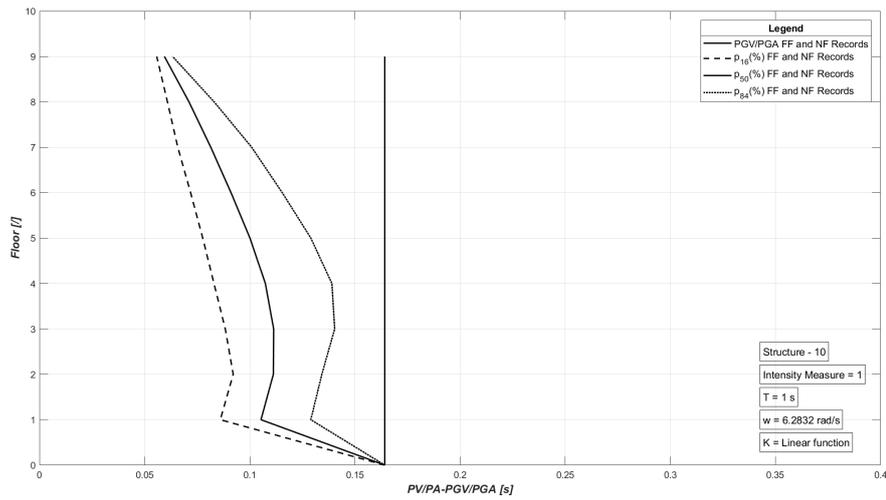


Figura 9.340: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{lin}]$ - Struttura 10.

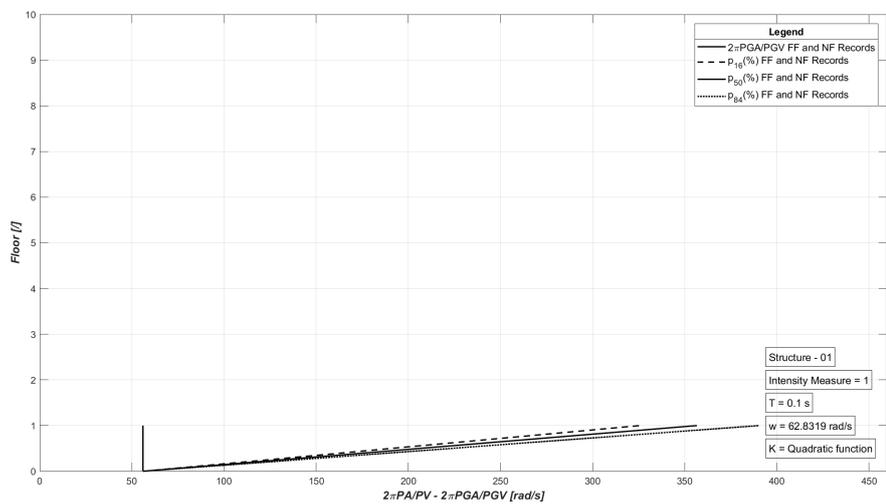


Figura 9.341: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 01.

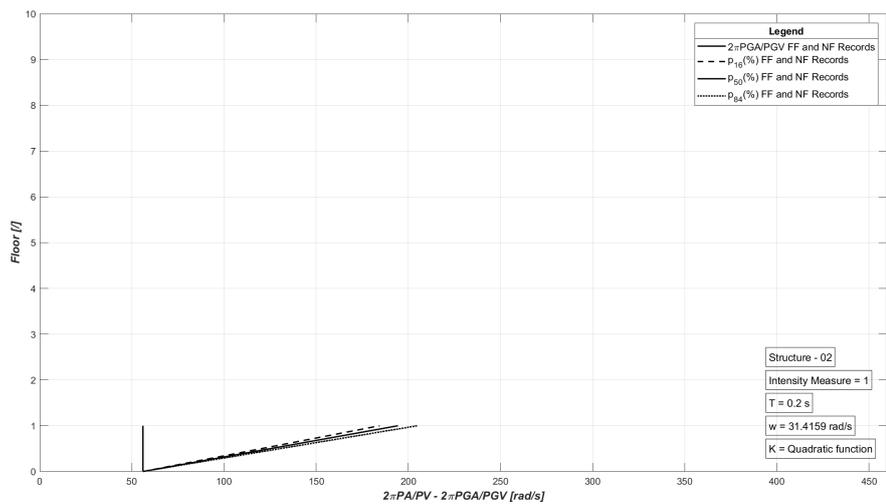


Figura 9.342: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

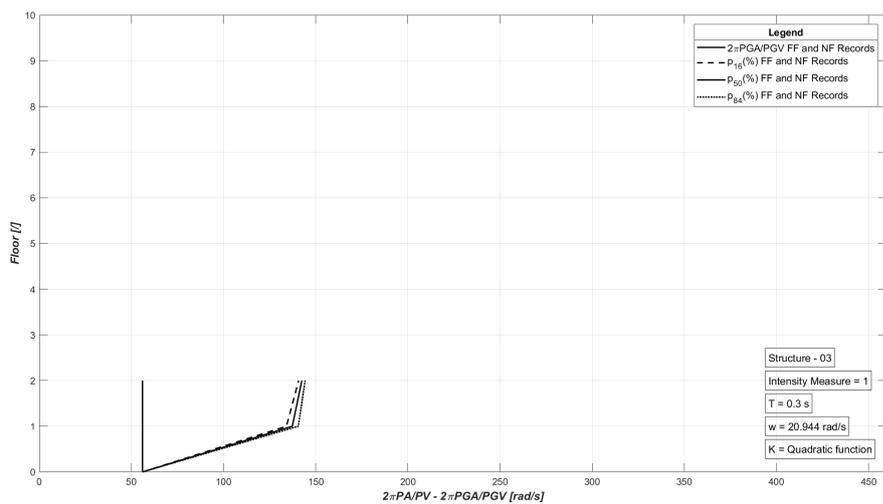


Figura 9.343: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

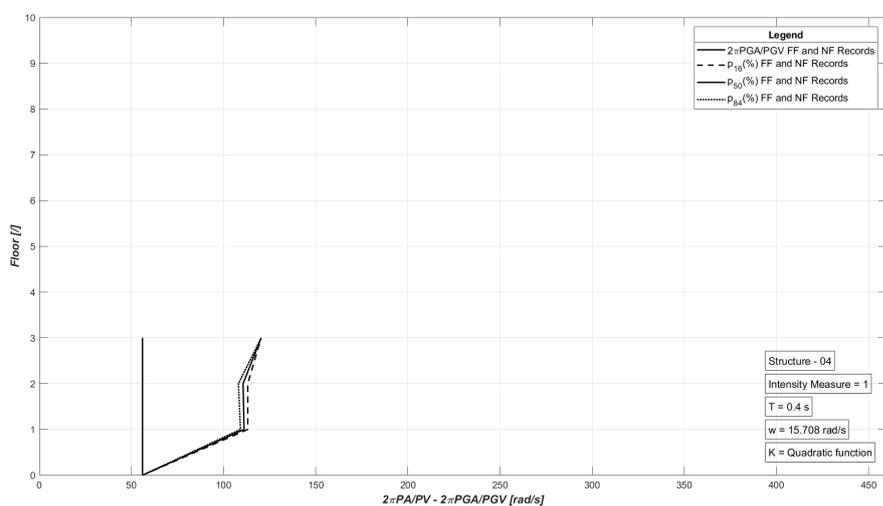


Figura 9.344: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

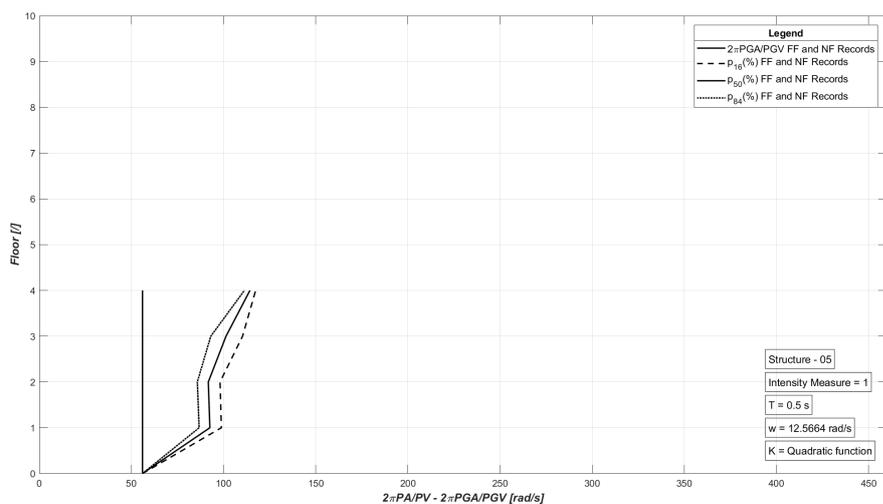


Figura 9.345: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

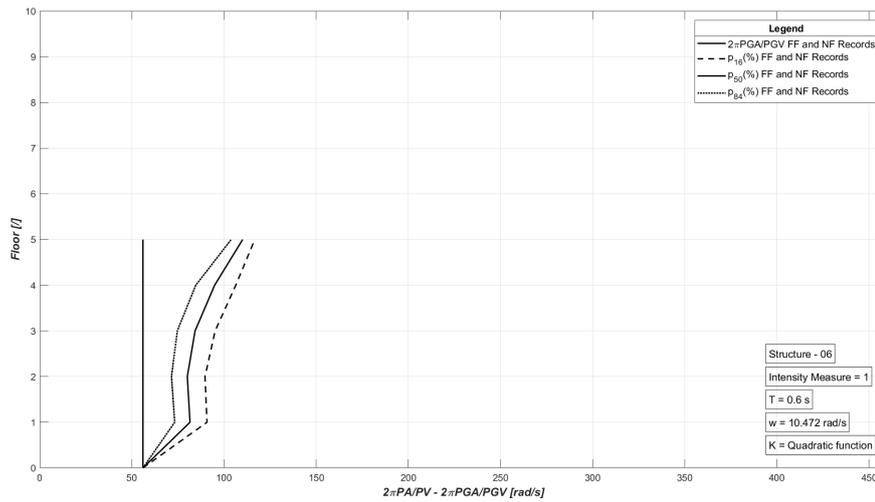


Figura 9.346: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

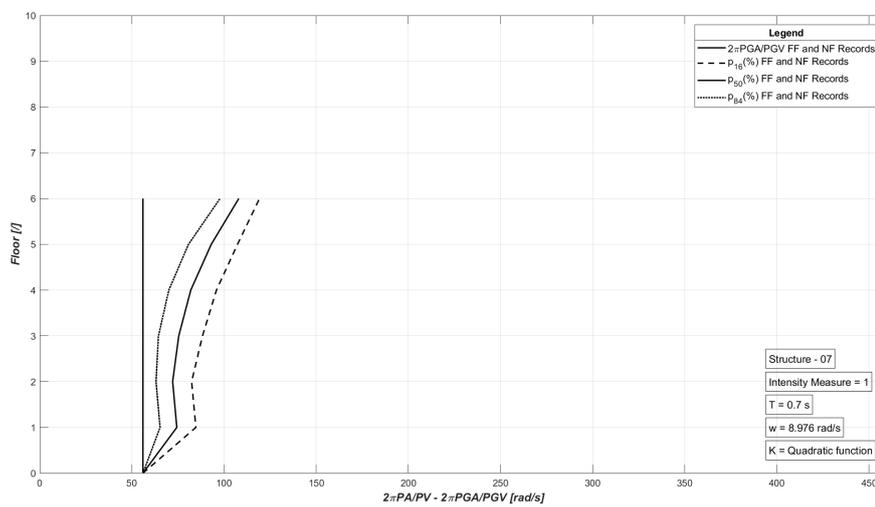


Figura 9.347: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

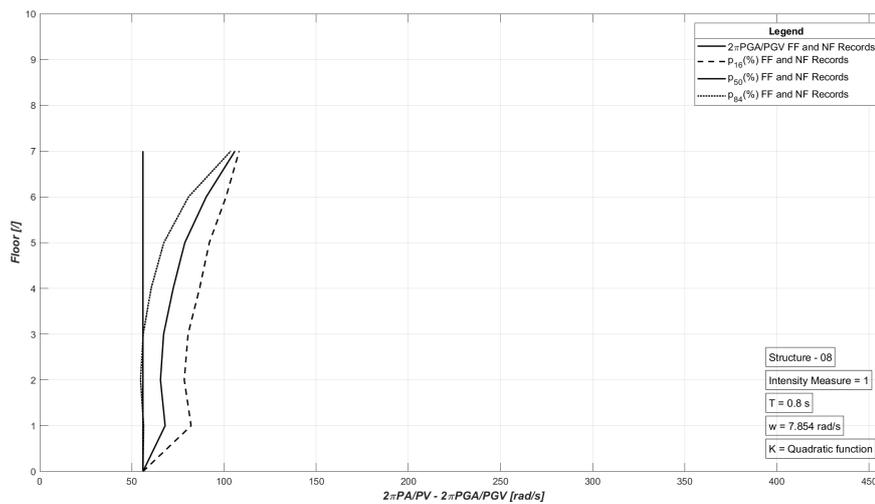


Figura 9.348: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 08.

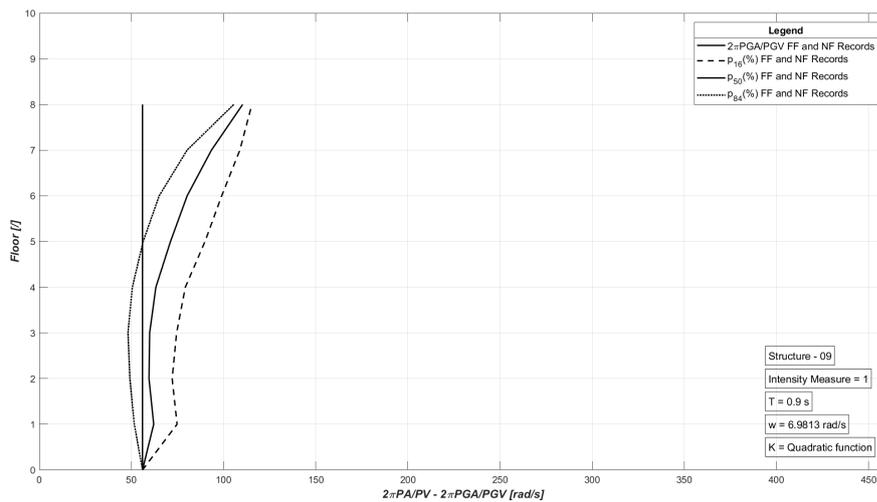


Figura 9.349: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

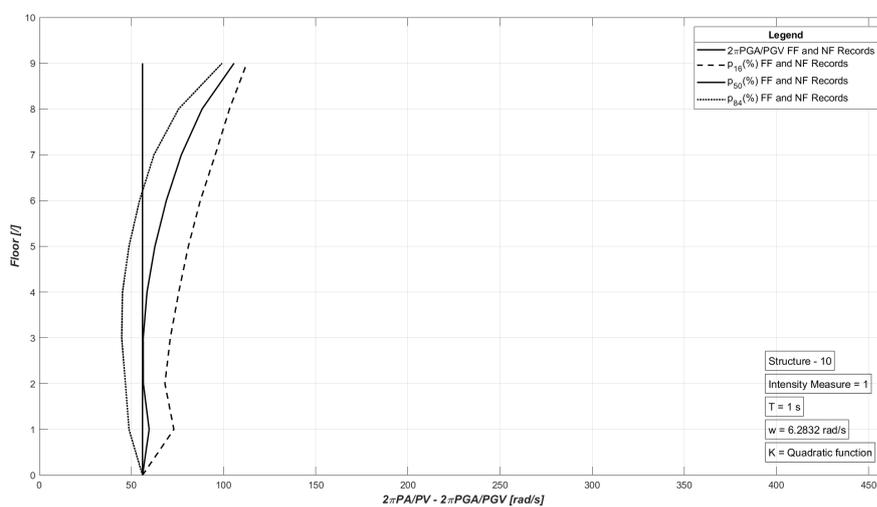


Figura 9.350: Sismi FF e NF - Tipologia 1 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

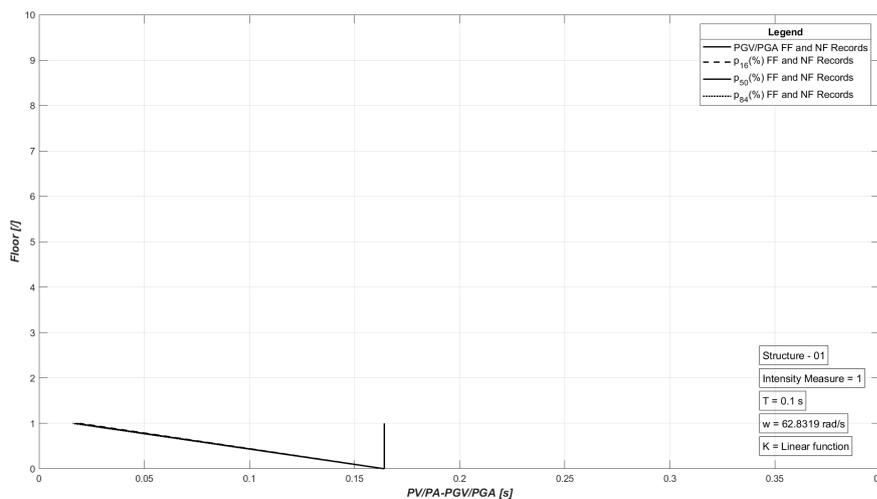


Figura 9.351: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 01.

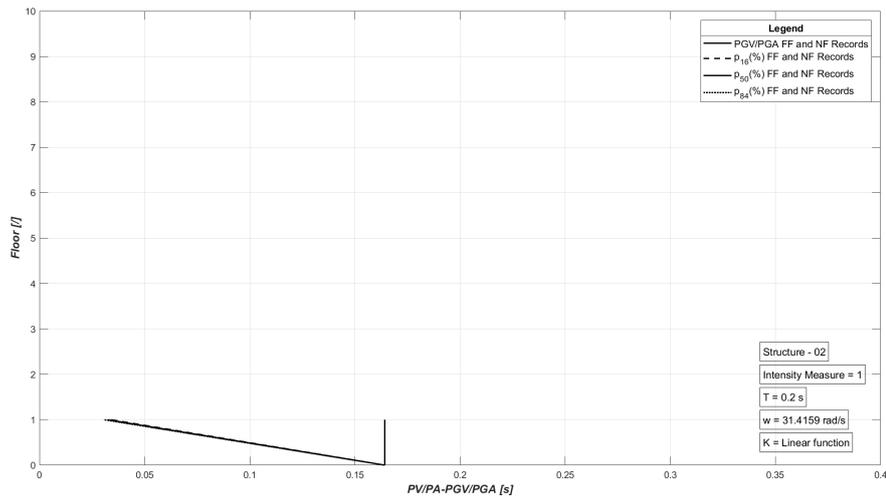


Figura 9.352: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 02.

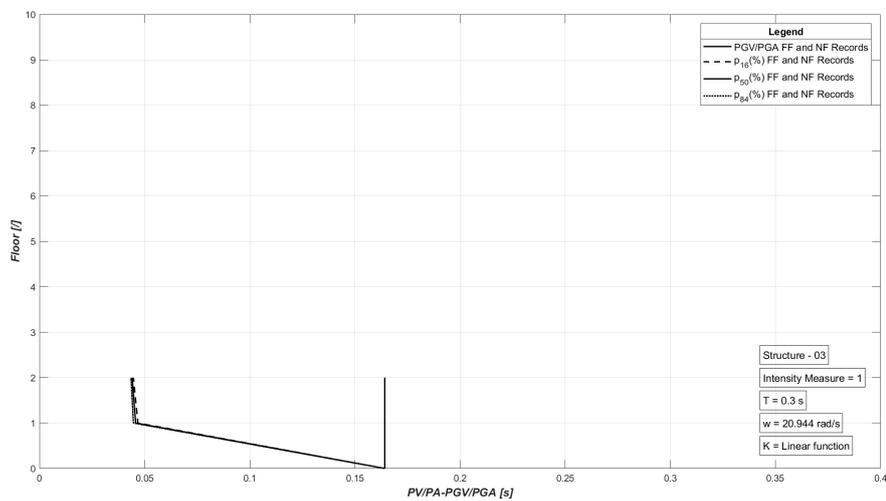


Figura 9.353: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 03.

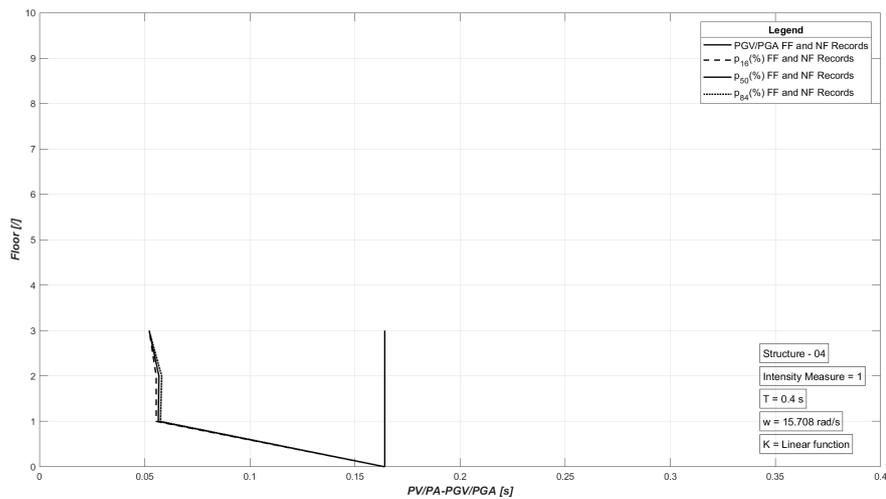


Figura 9.354: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 04.

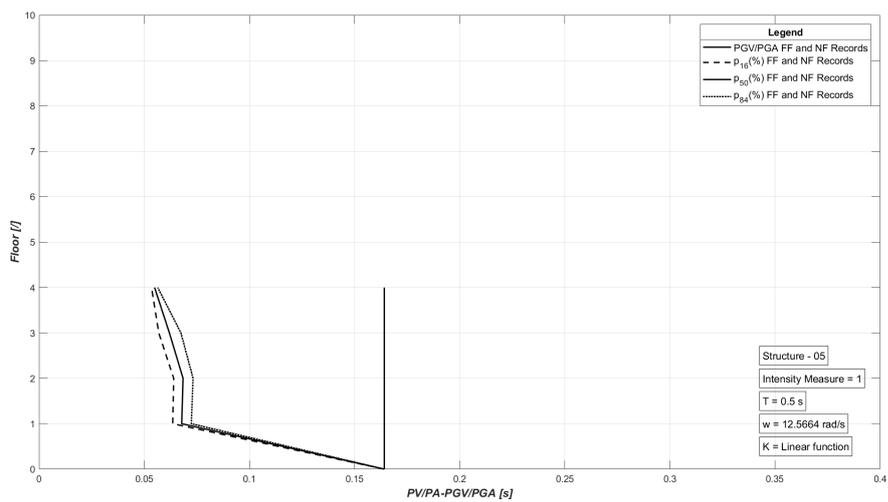


Figura 9.355: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 05.

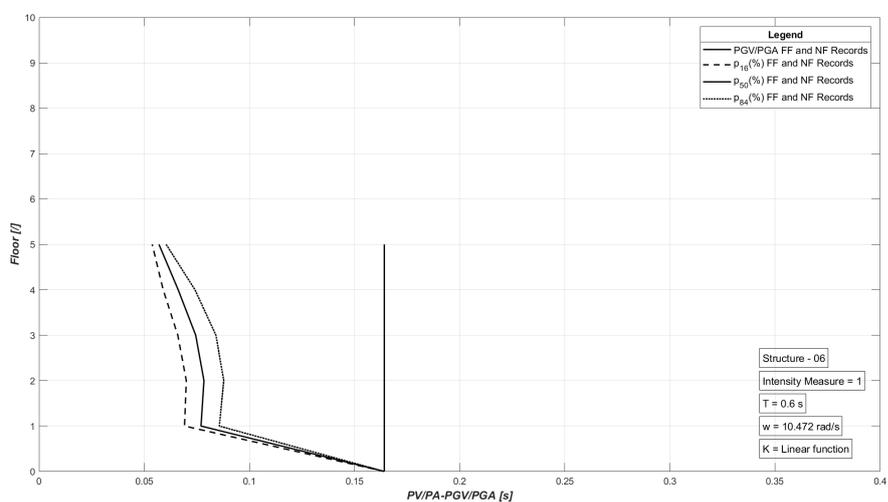


Figura 9.356: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 06.

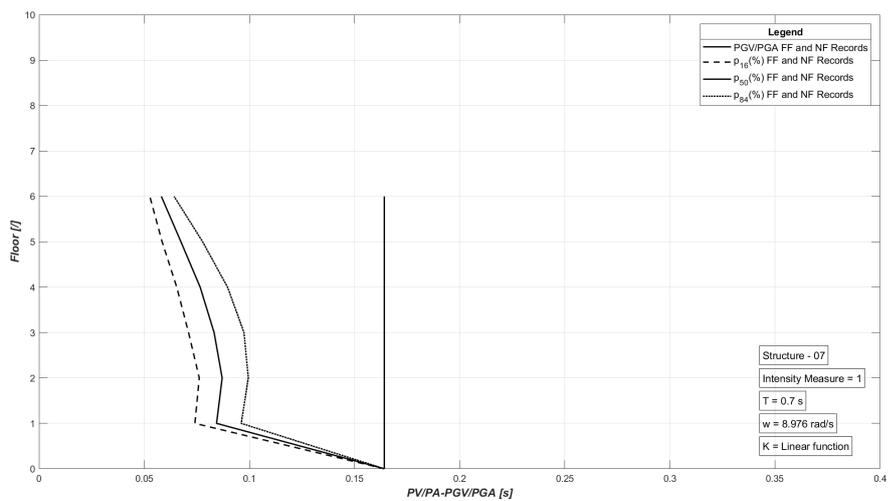


Figura 9.357: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quadr}]$ - Struttura 07.

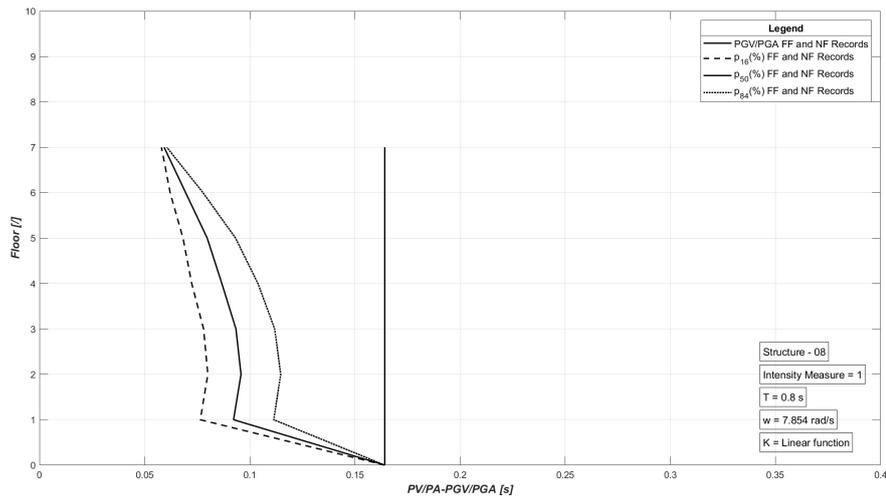


Figura 9.358: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 08.

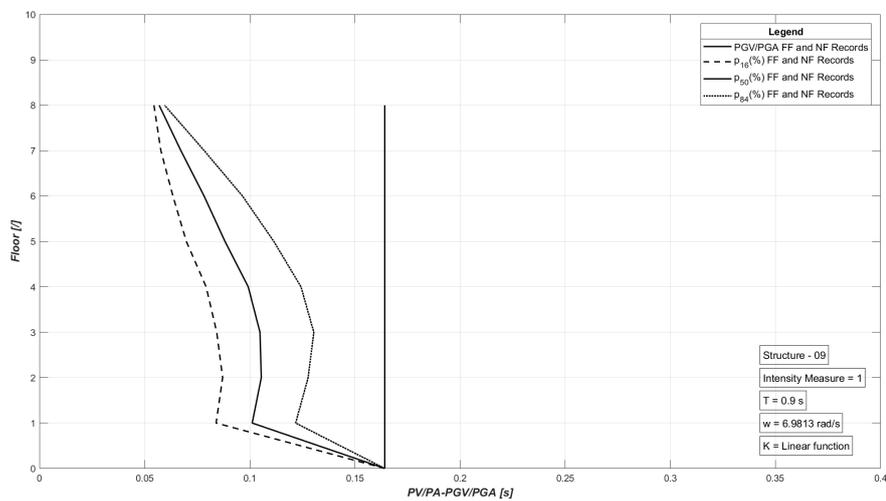


Figura 9.359: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 09.

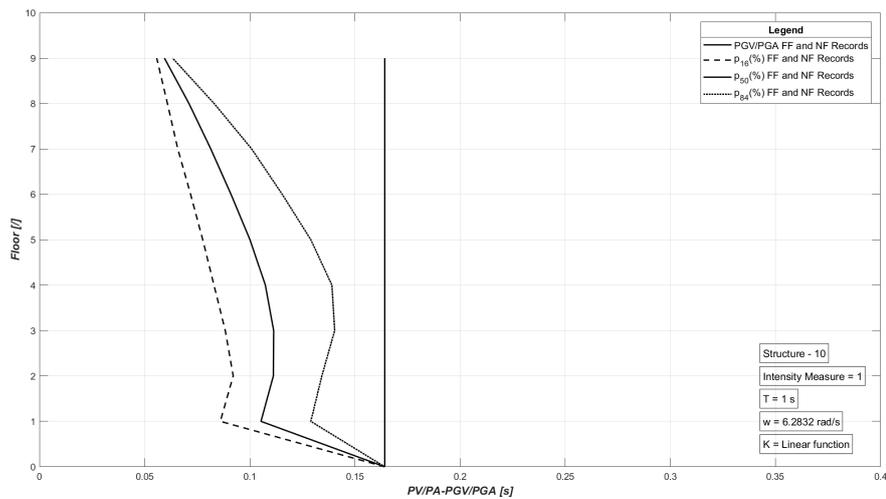


Figura 9.360: Sismi FF e NF - Tipologia 2 - $[K_{quad}]$ - Struttura 10.

9.4 Grafici inerenti all'analisi del sistema isolato

Si riportano in questa sezione i grafici inerenti all'analisi del sistema isolato descritta nella *sezione 8.4*, in particolare si riportano tre tipologie di grafici:

- **Tipologia 1:** Grafici tridimensionali degli spostamenti adimensionalizzati ($\psi_s(\tau)$), in funzione del rapporto tra il periodo dell'isolatore FPS e il periodo naturale del moto del suolo ($\frac{T_b}{T_g}$), e del parametro di rigidità dell'isolatore FPS (Π_μ).
- **Tipologia 2:** Grafici bidimensionali ($\Pi_\mu ; \psi_s(\tau)$) ottenuti sezionando i grafici tridimensionali tramite piani verticali aventi rapporto $\frac{T_b}{T_g}$ costante.
- **Tipologia 3:** Grafici bidimensionali ($\frac{T_b}{T_g} ; \Pi_\mu^{Opt}$) ottenuti dall'intersezione tra la curva interpolante i valori ottimali del parametro Π_μ e le curve aventi $\frac{T_b}{T_g}$ costante.

9.4.1 Grafici tridimensionali: spostamenti adimensionalizzati

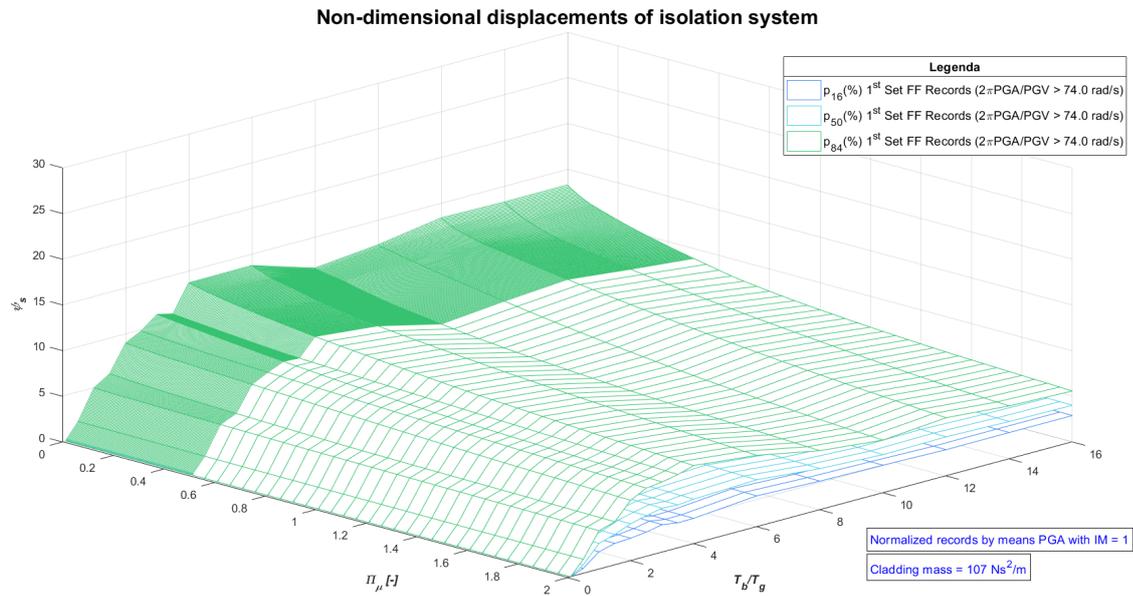


Figura 9.361: 1°set Sismi FF - Complessivo - Tamponatura monostrato

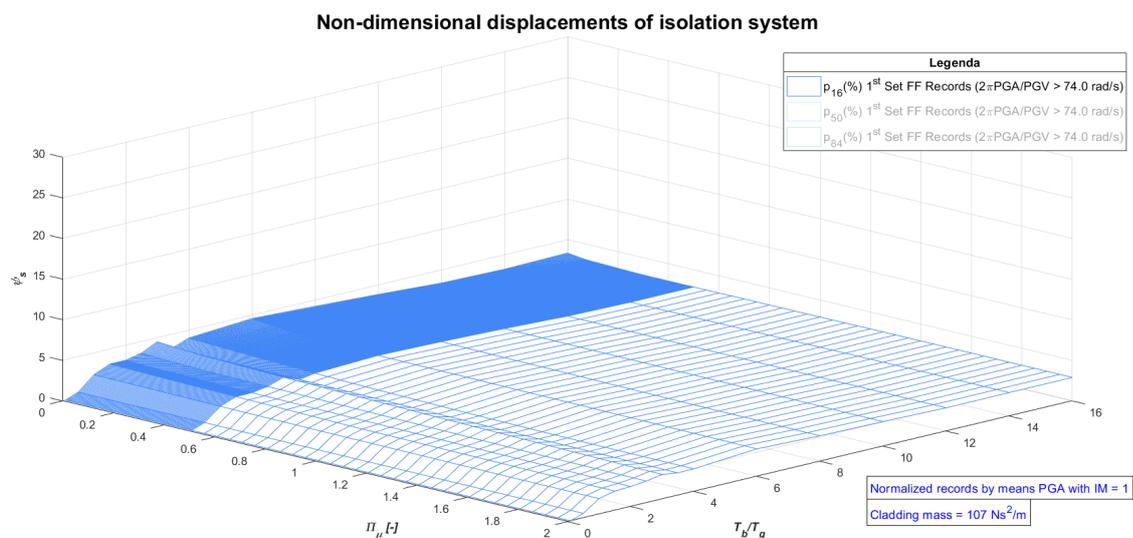


Figura 9.362: 1°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

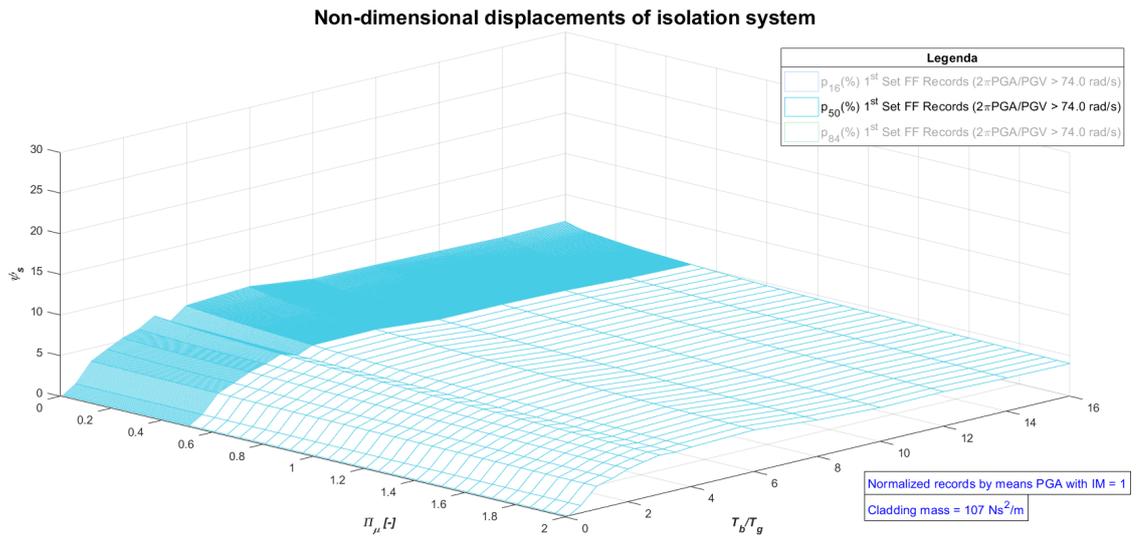


Figura 9.363: 1°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

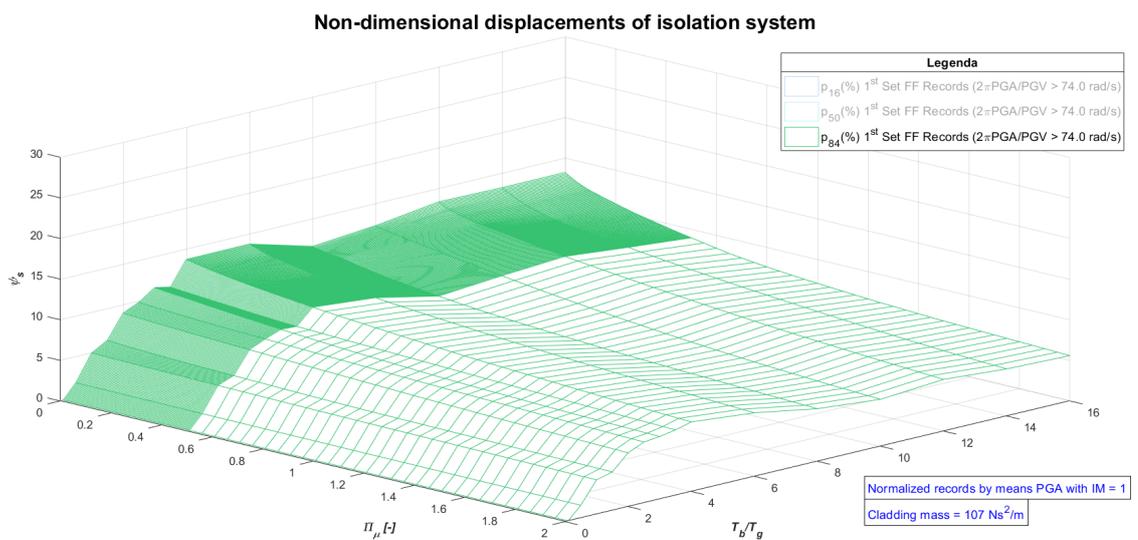


Figura 9.364: 1°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

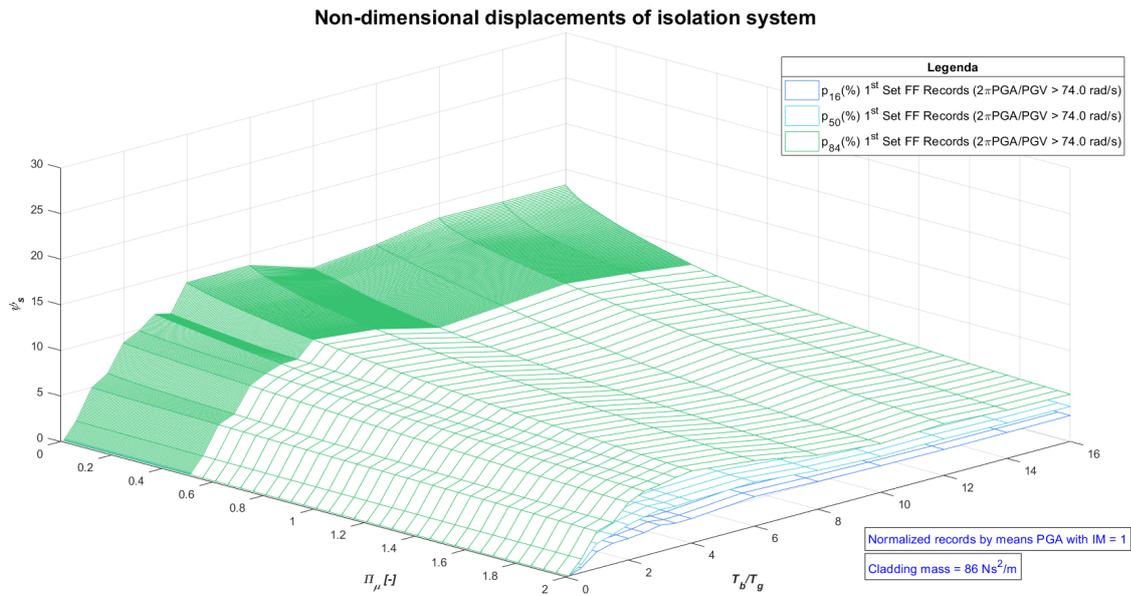


Figura 9.365: 1°set Sismi FF - Complessivo - Tamponatura pluristrato

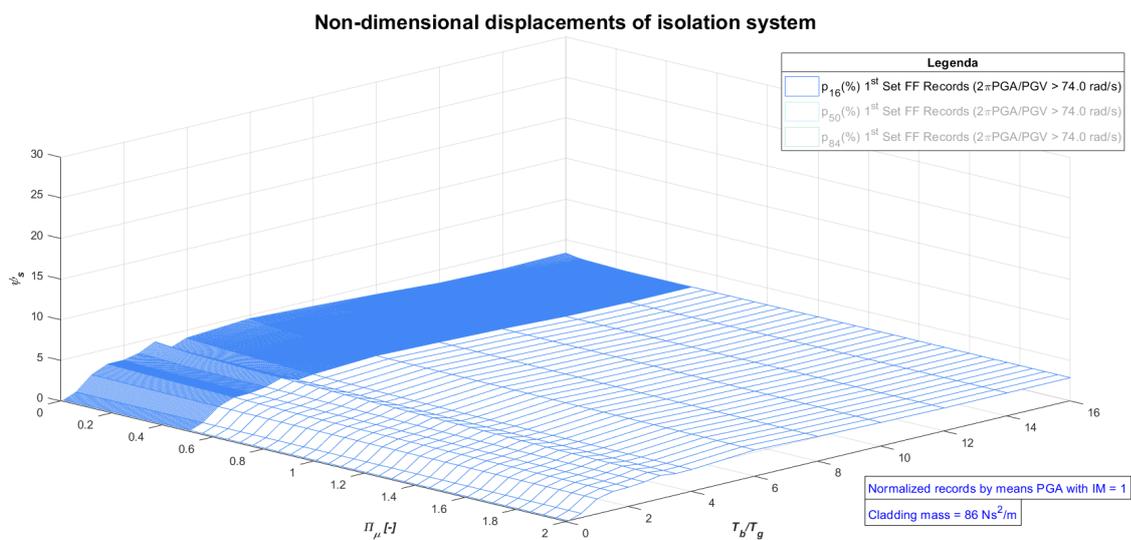


Figura 9.366: 1°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

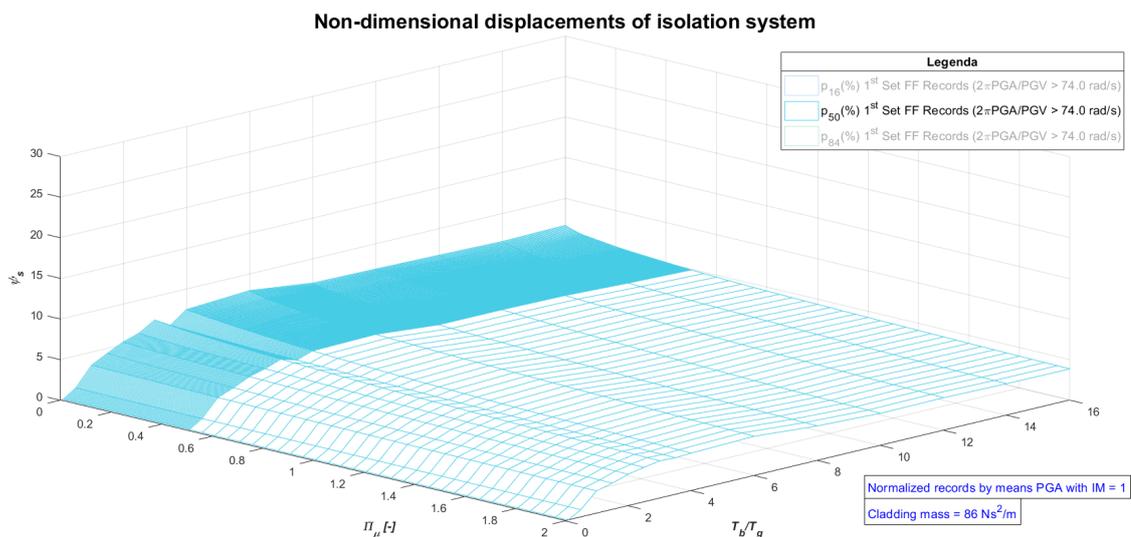


Figura 9.367: 1°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

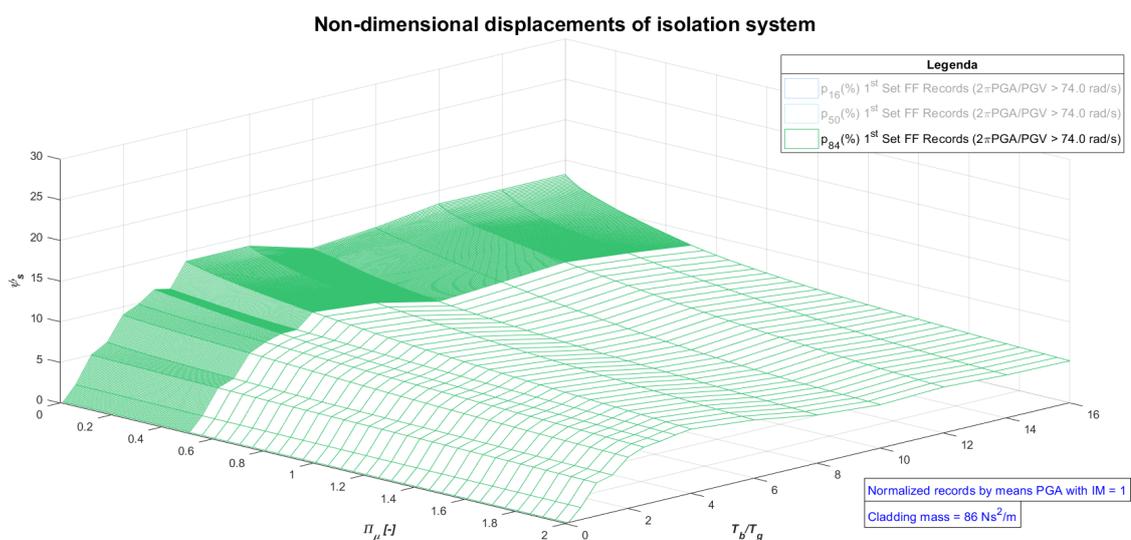


Figura 9.368: 1°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

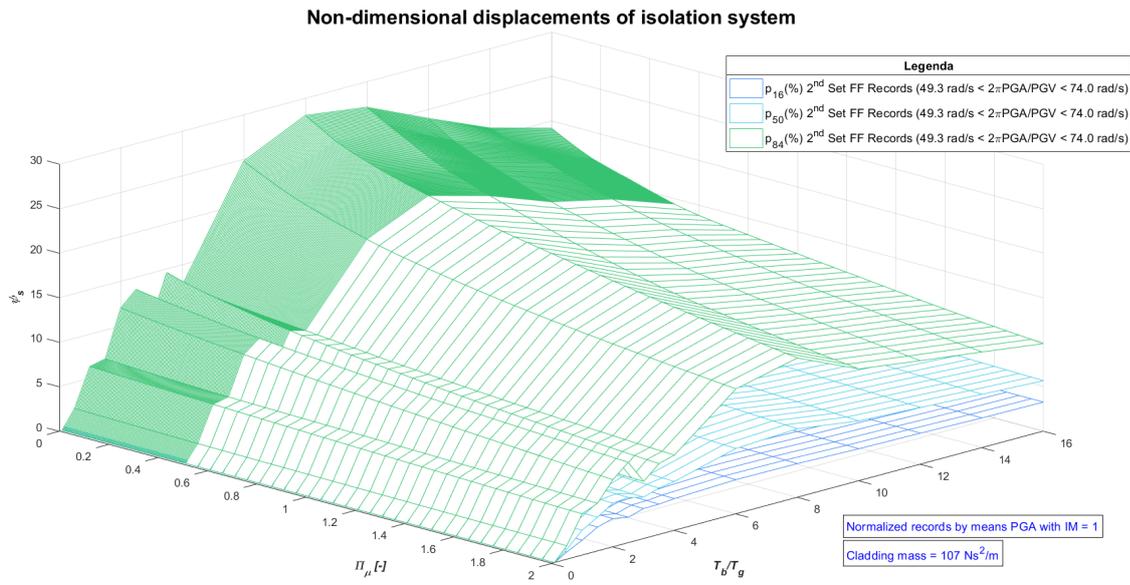


Figura 9.369: 2°set Sismi FF - Complessivo - Tamponatura monostrato

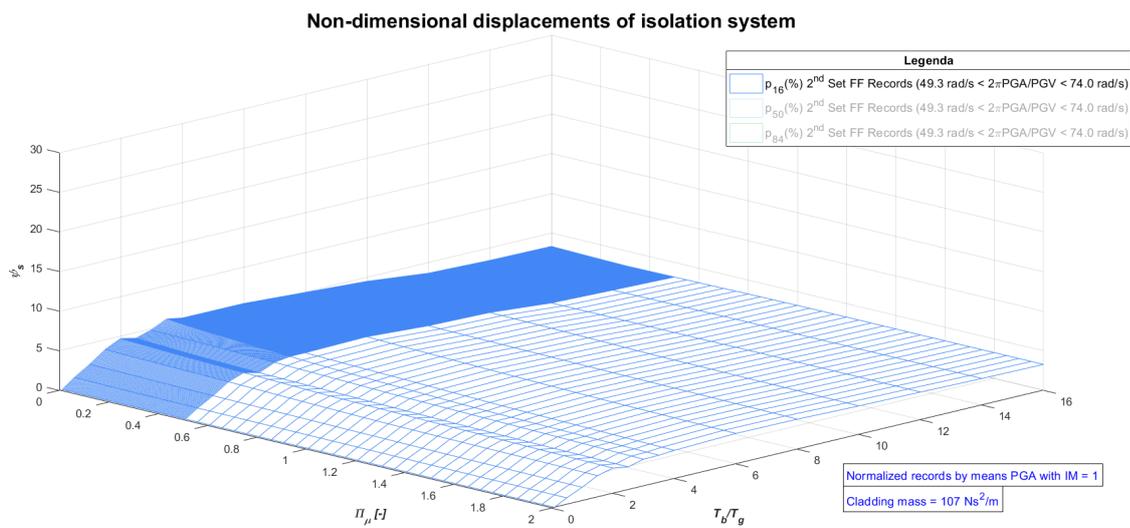


Figura 9.370: 2°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

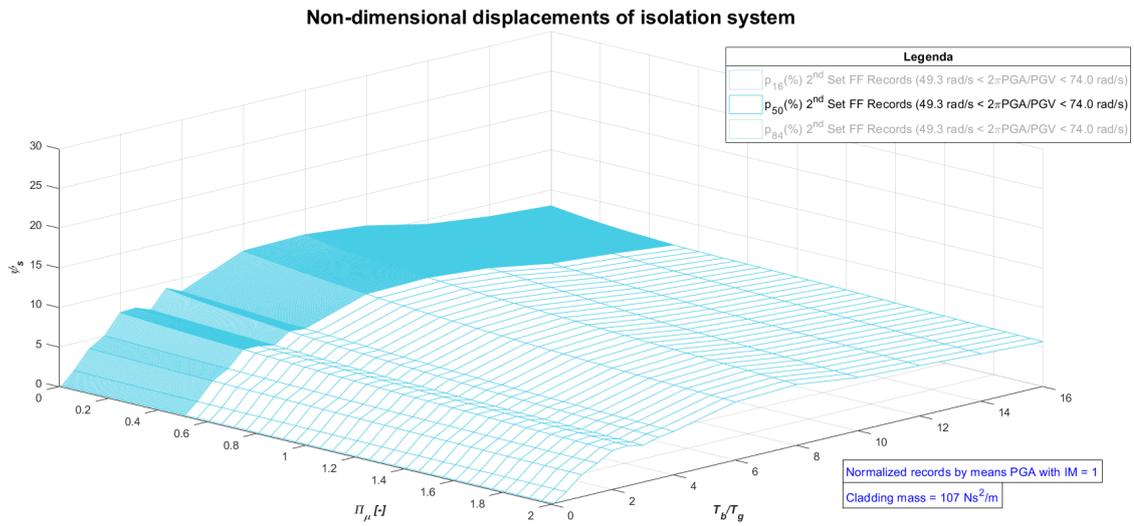


Figura 9.371: 2°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

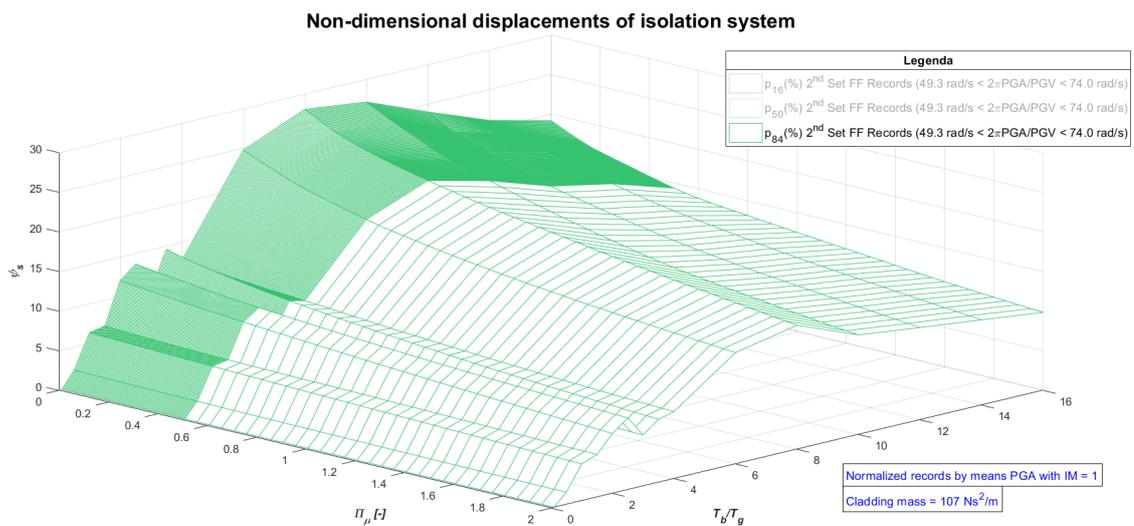


Figura 9.372: 2°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

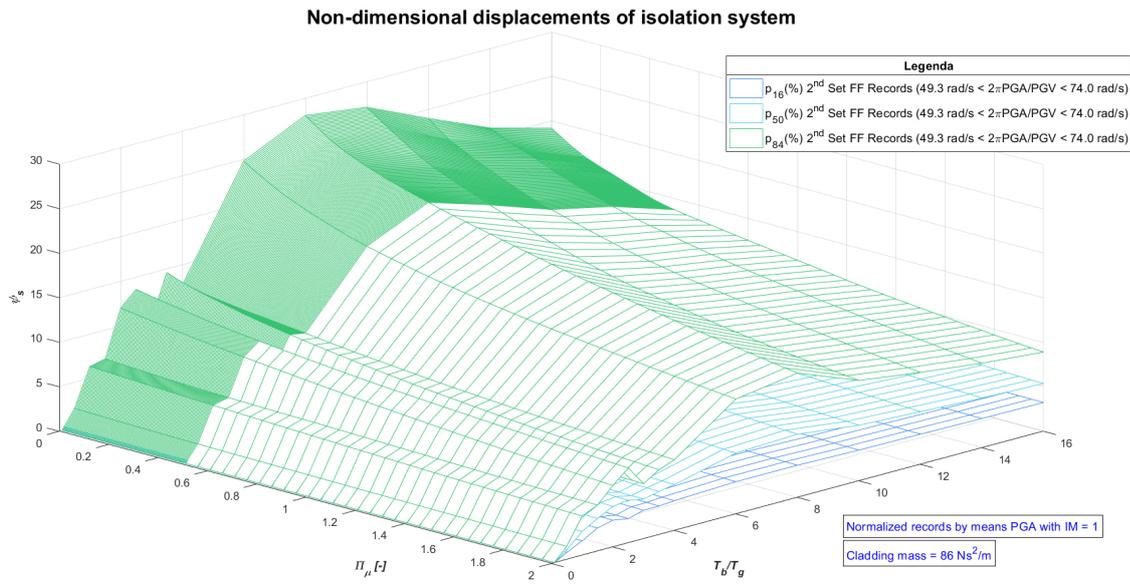


Figura 9.373: 2°set Sismi FF - Complessivo - Tamponatura pluristrato

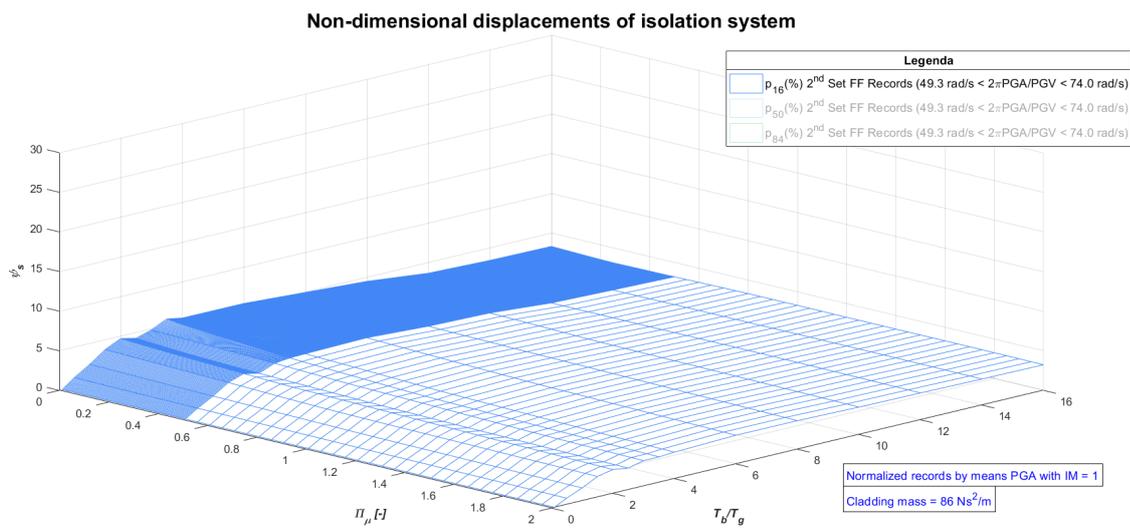


Figura 9.374: 2°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

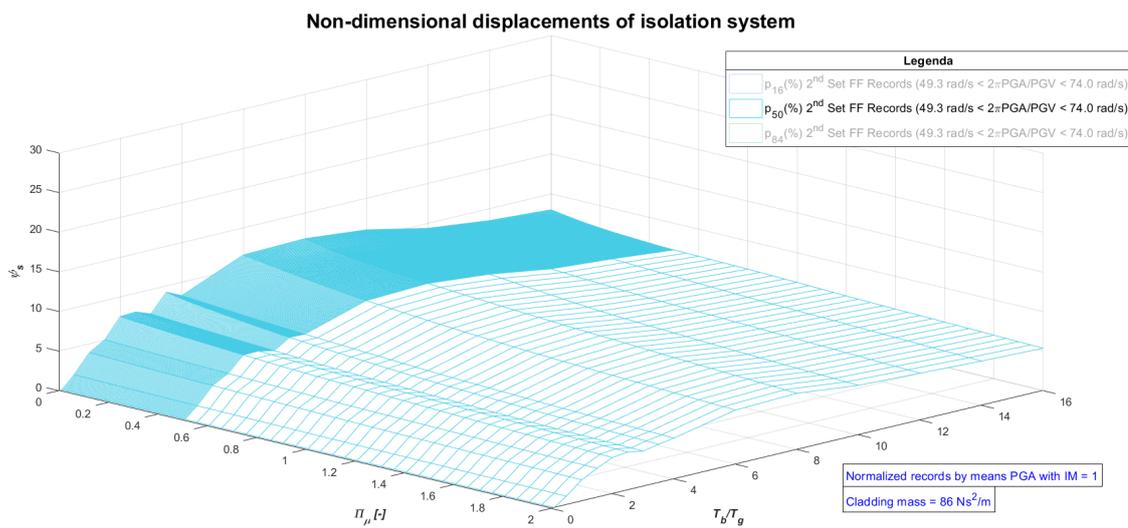


Figura 9.375: 2°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

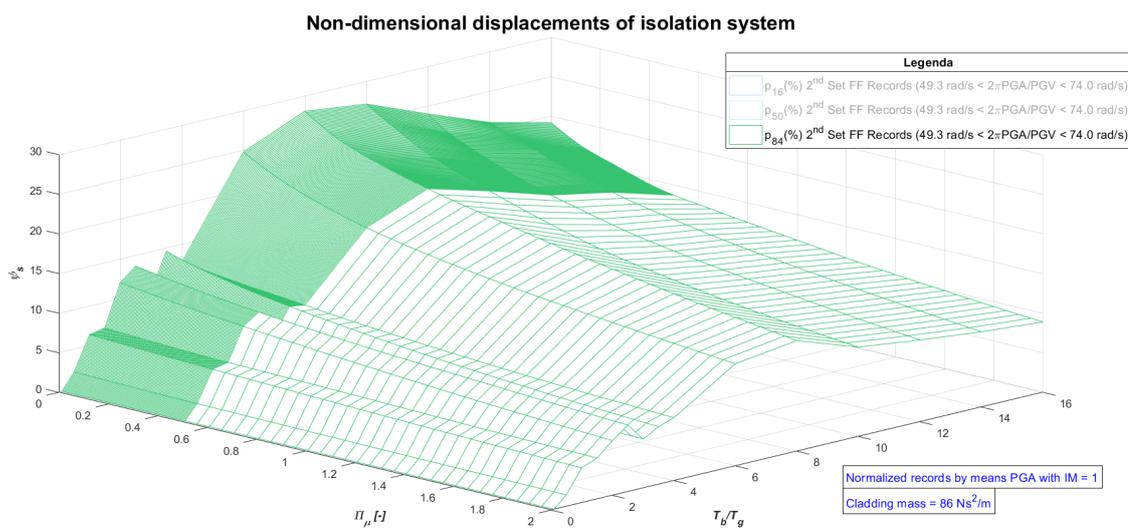


Figura 9.376: 2°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

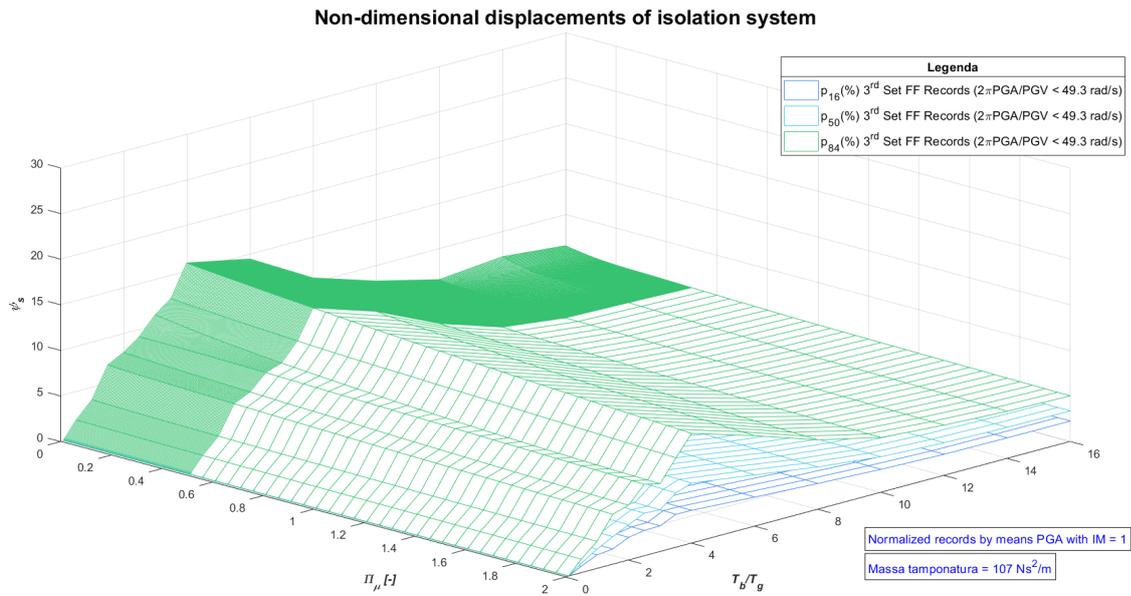


Figura 9.377: 3°set Sismi FF - Complessivo - Tamponatura monostrato

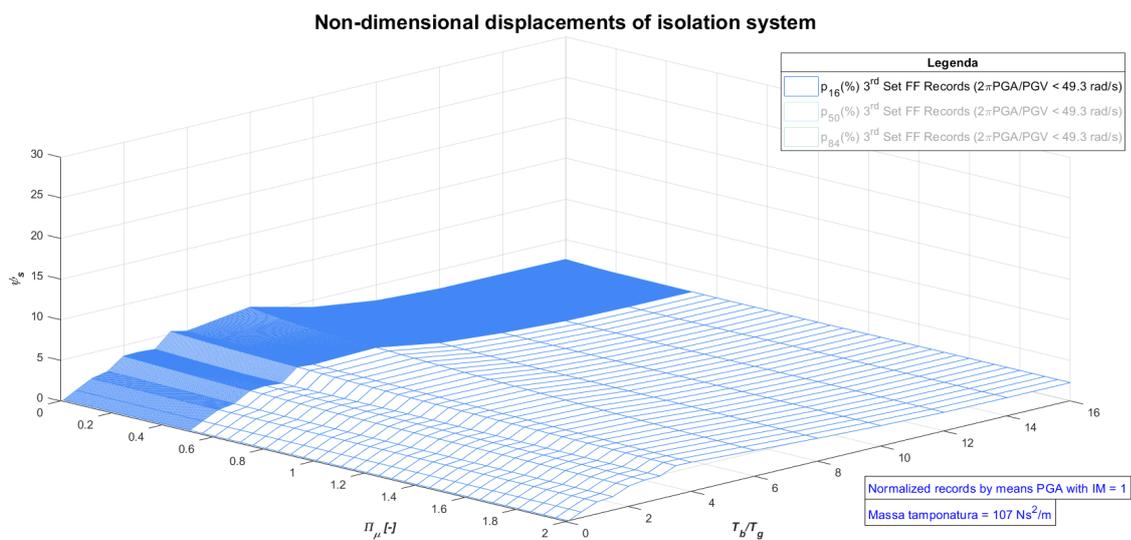


Figura 9.378: 3°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

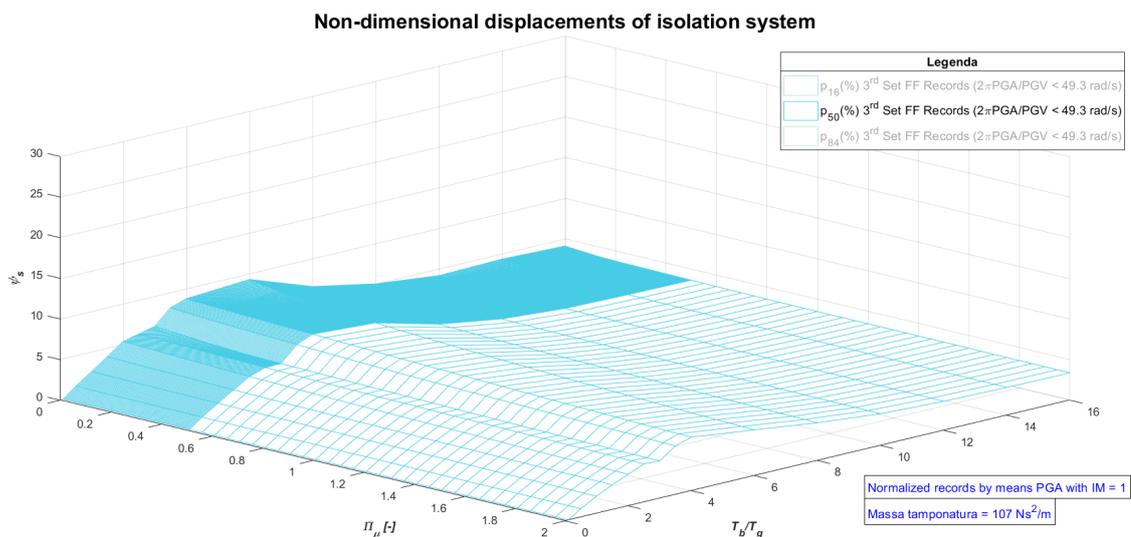


Figura 9.379: 3°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

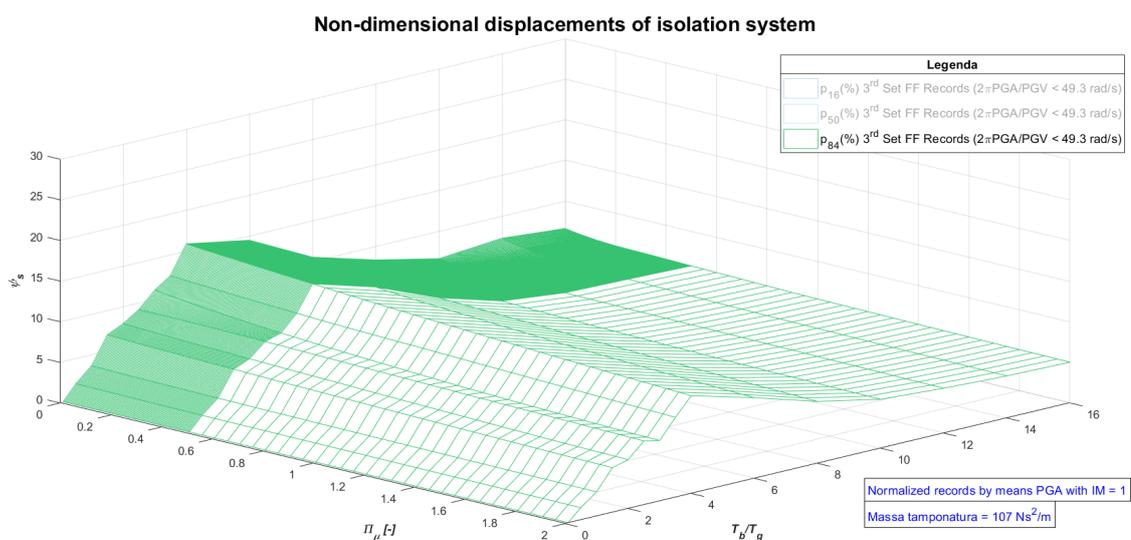


Figura 9.380: 3°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

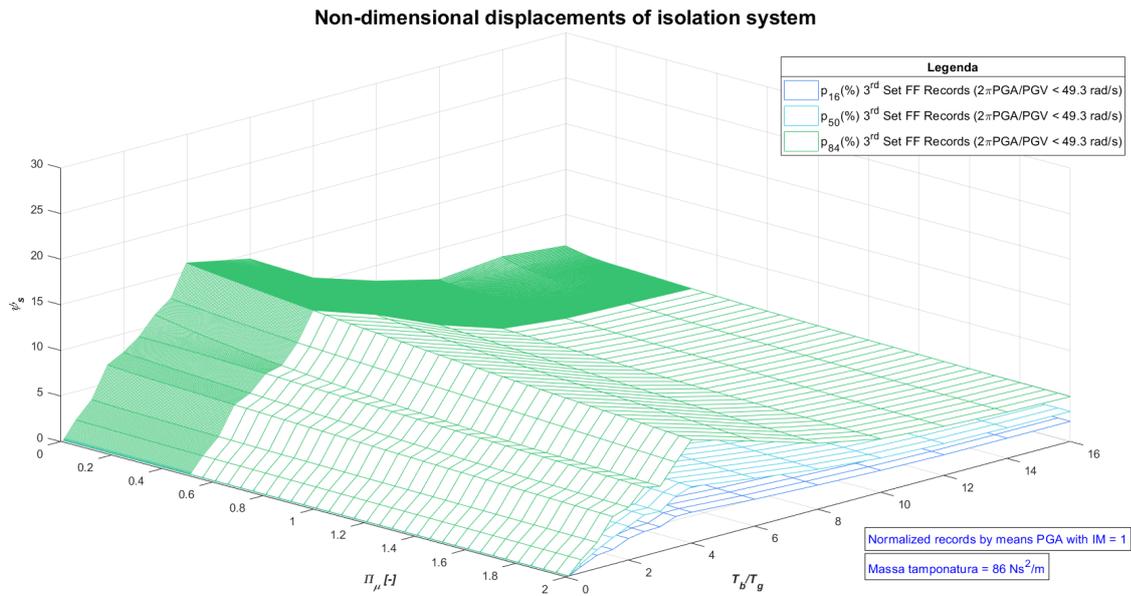


Figura 9.381: 3°set Sismi FF - Complessivo - Tamponatura pluristrato

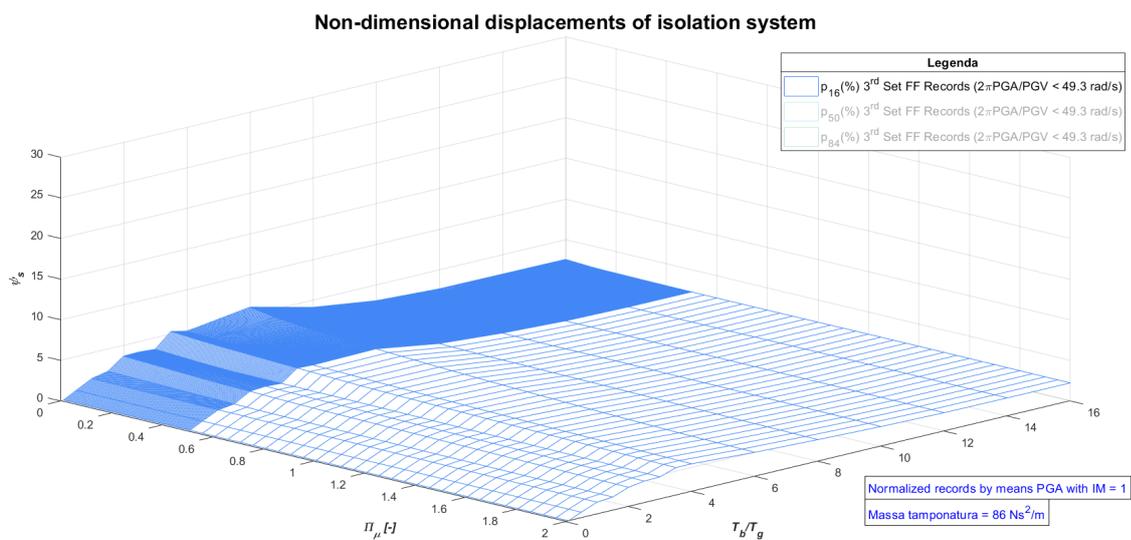


Figura 9.382: 3°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

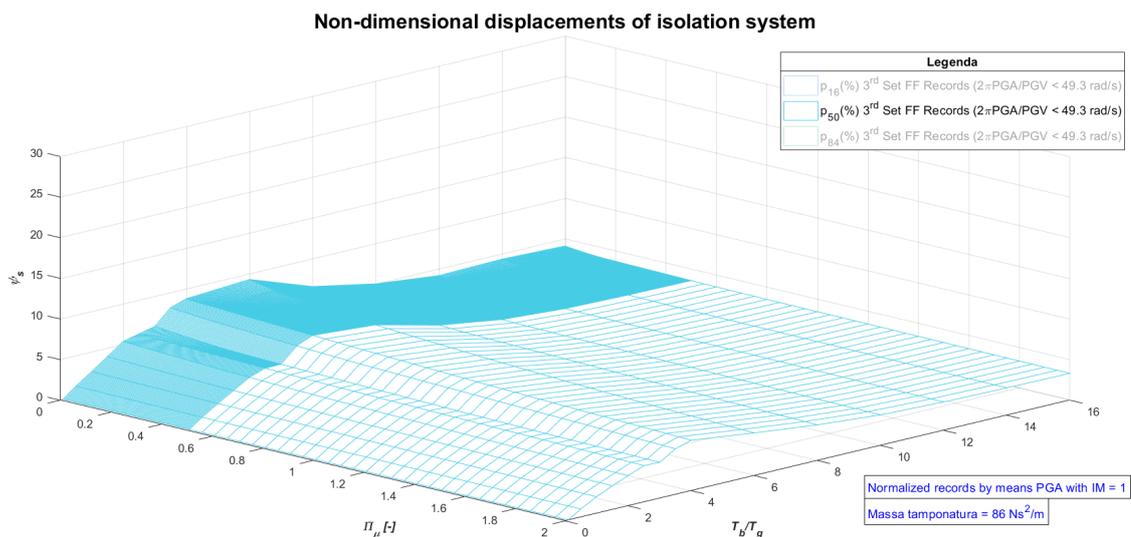


Figura 9.383: 3°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

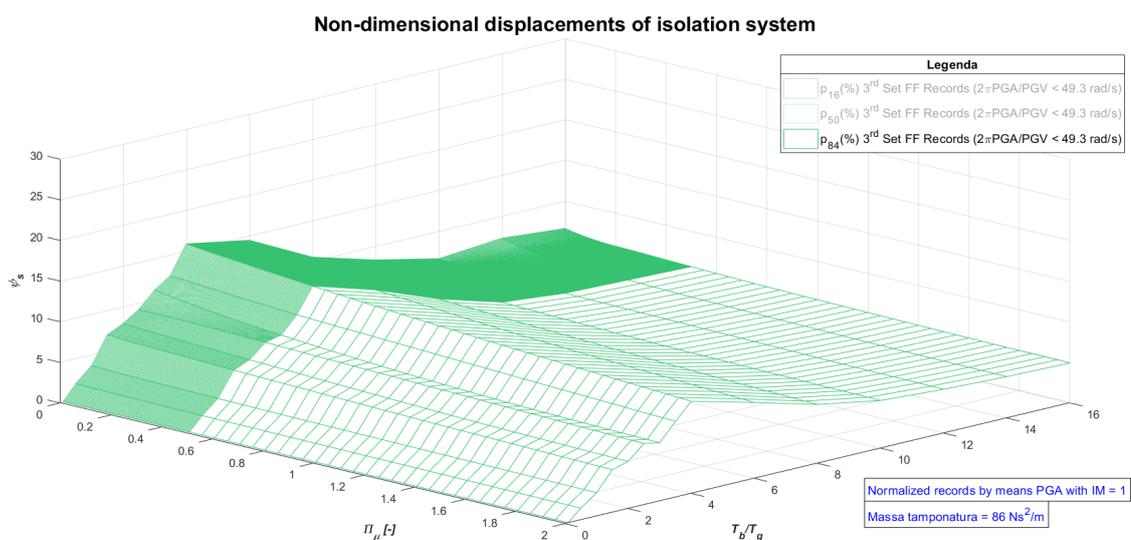


Figura 9.384: 3°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

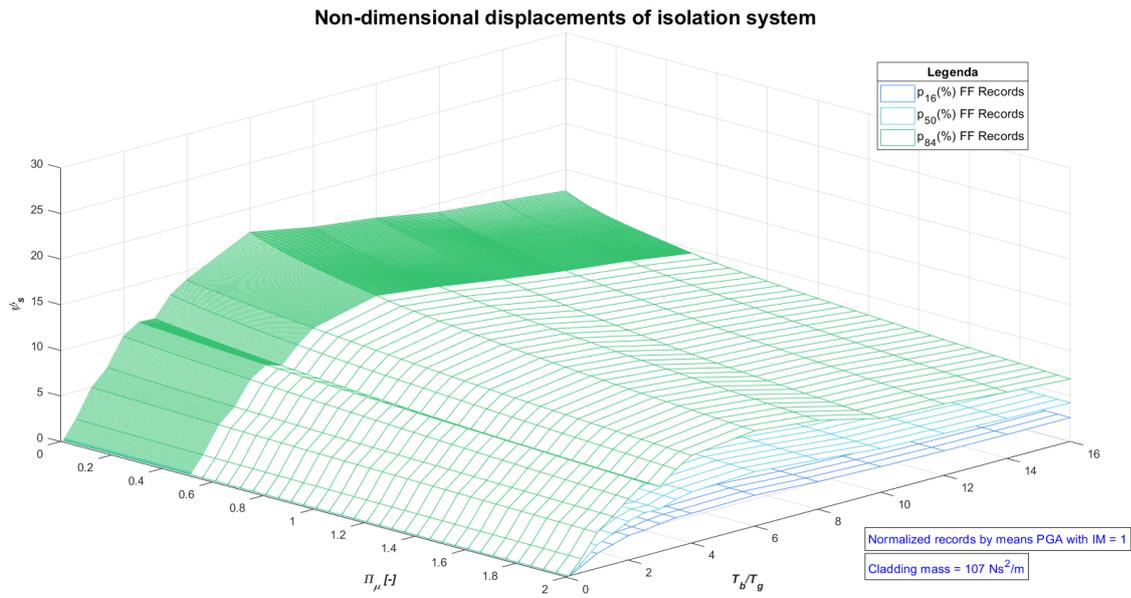


Figura 9.385: Sismi FF - Complessivo - Tamponatura monostrato

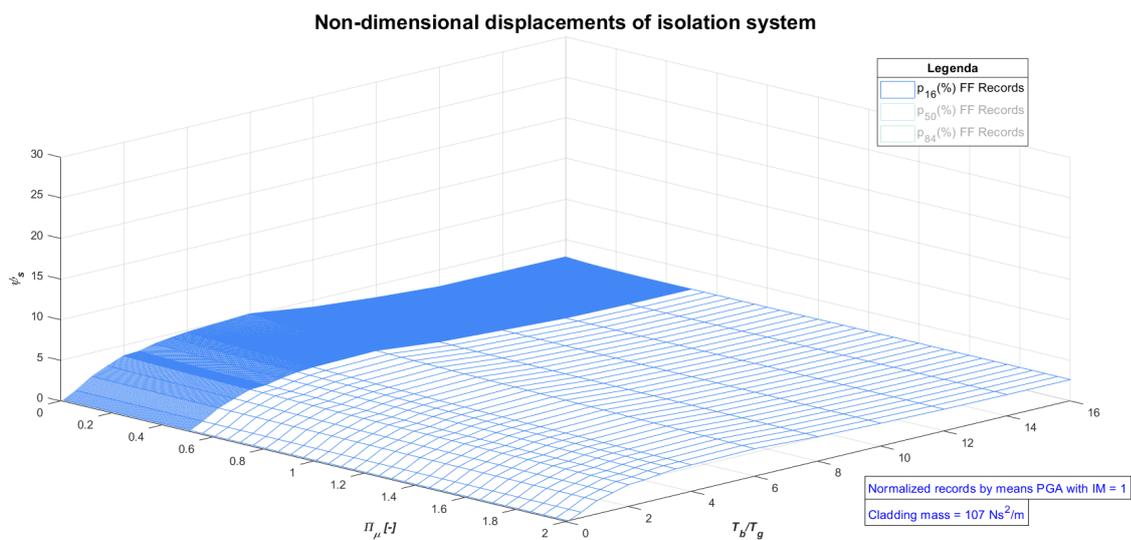


Figura 9.386: Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

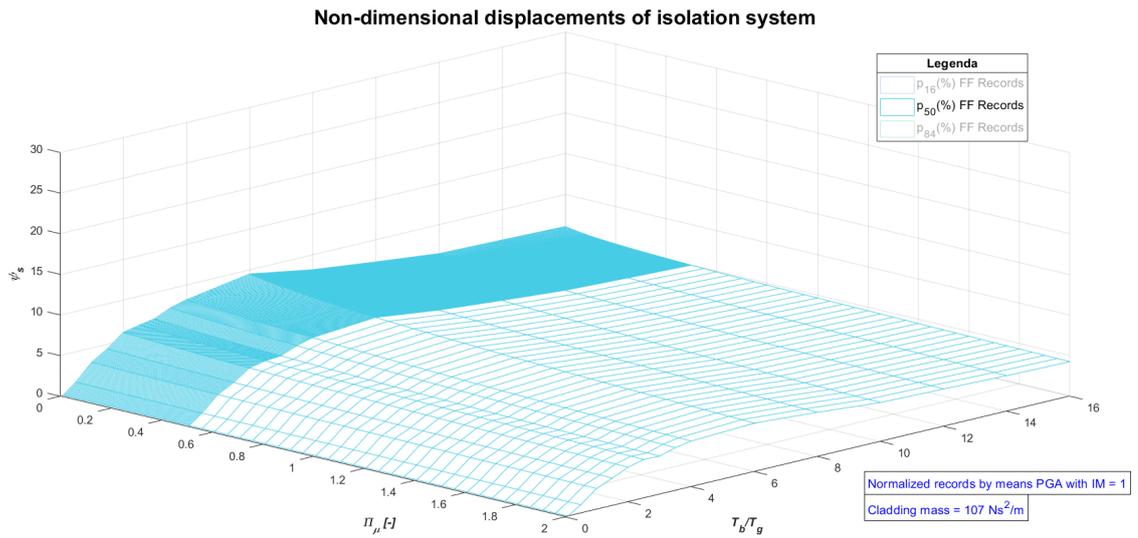


Figura 9.387: Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

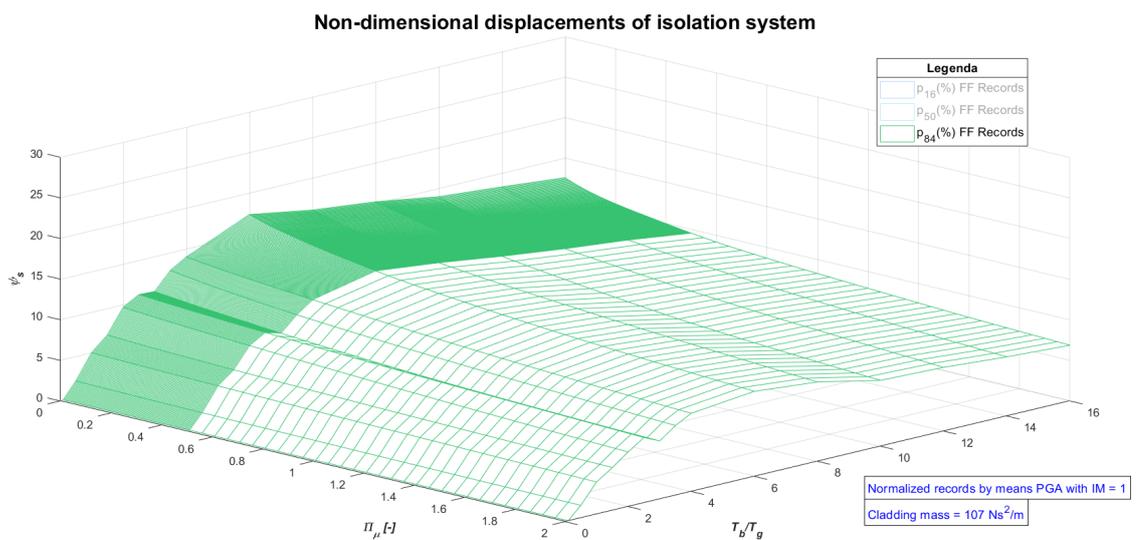


Figura 9.388: Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

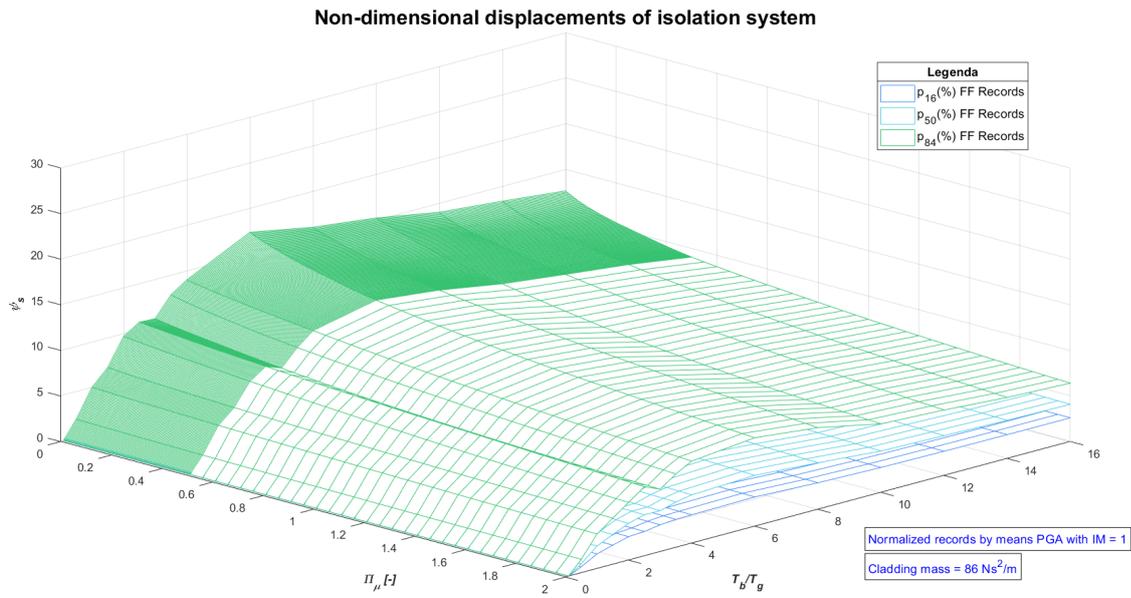


Figura 9.389: Sismi FF - Complessivo - Tamponatura pluristrato

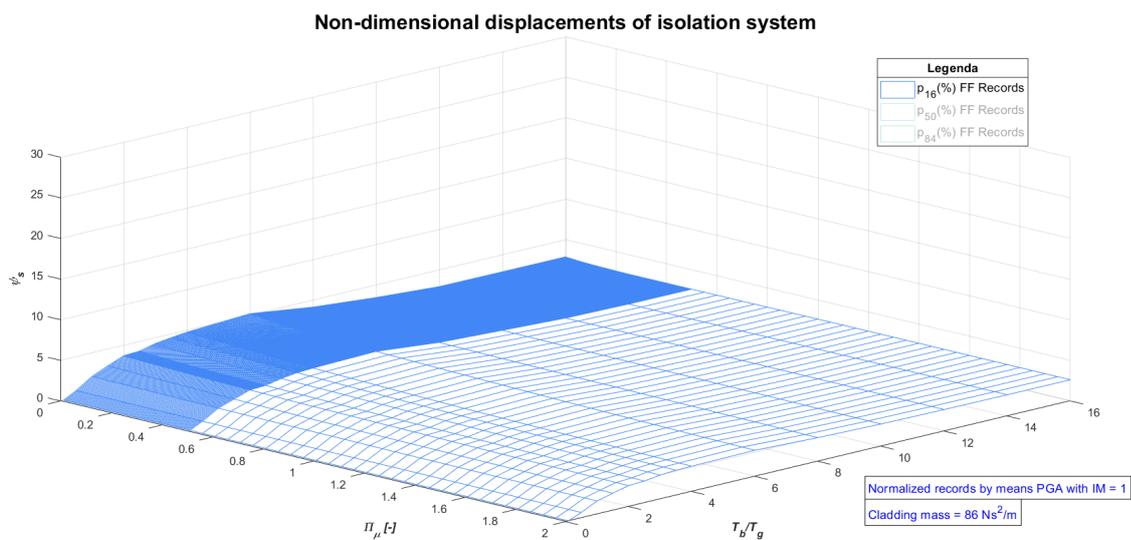


Figura 9.390: Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

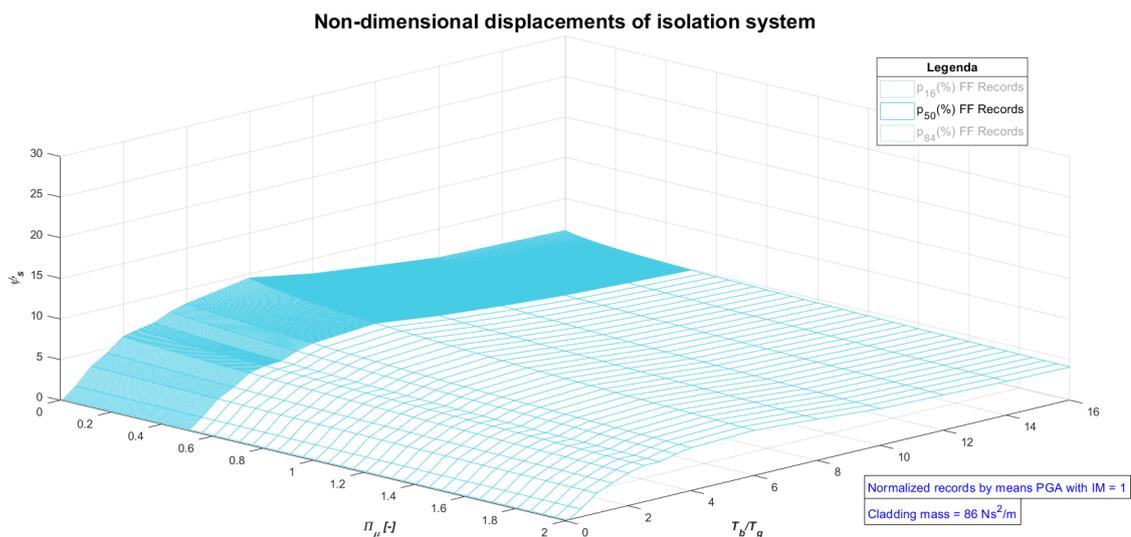


Figura 9.391: Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

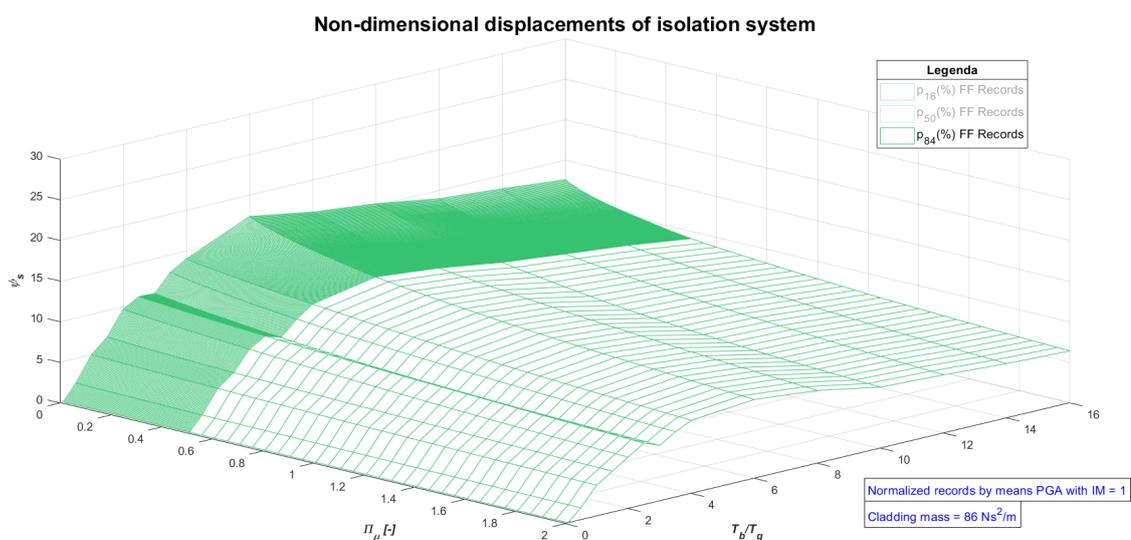


Figura 9.392: Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

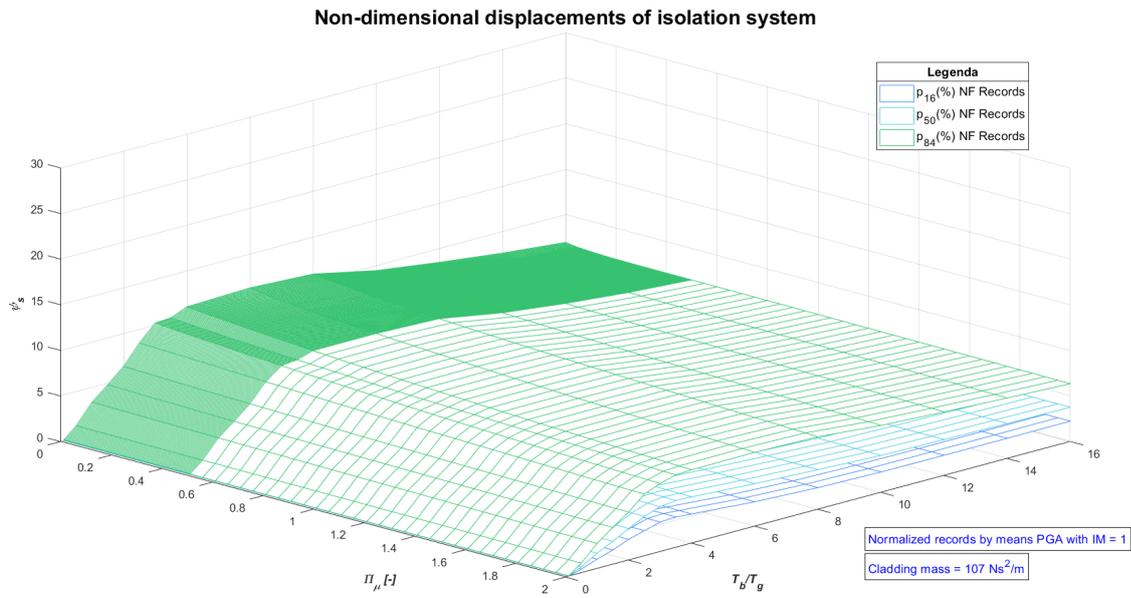


Figura 9.393: Sismi NF - Complessivo - Tamponatura monostrato

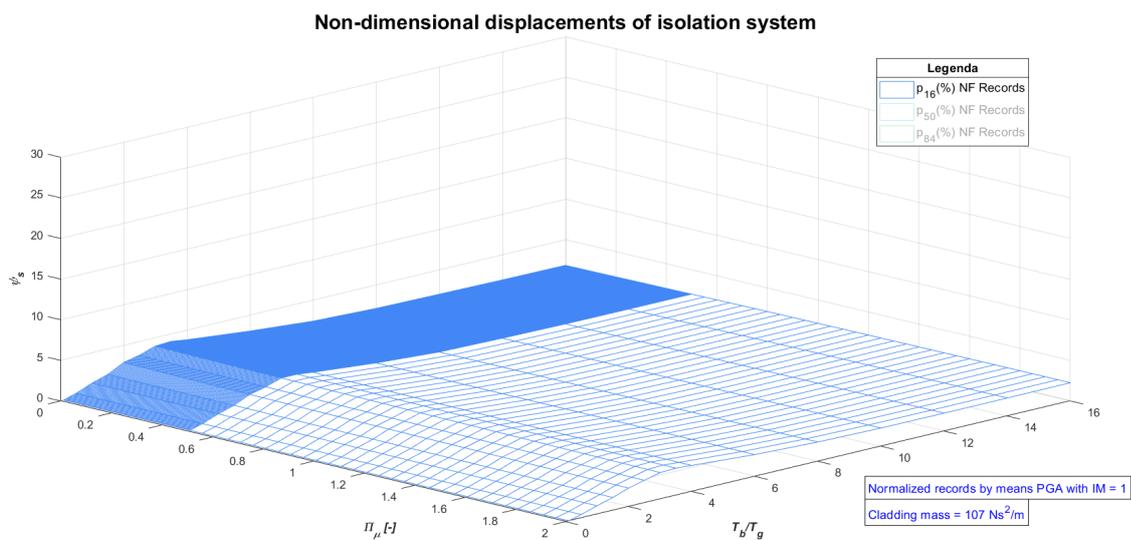


Figura 9.394: Sismi NF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

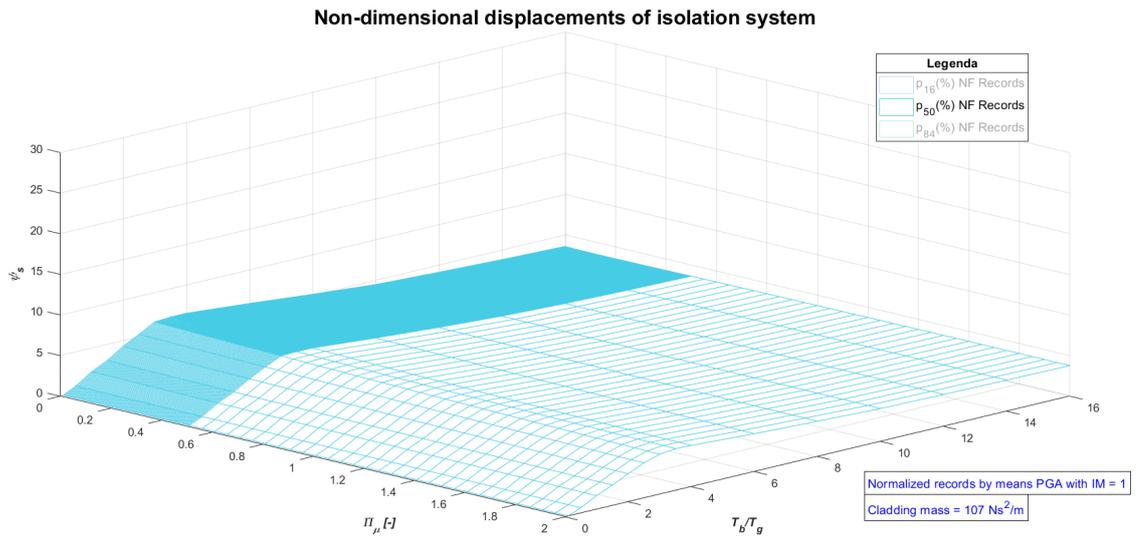


Figura 9.395: Sismi NF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

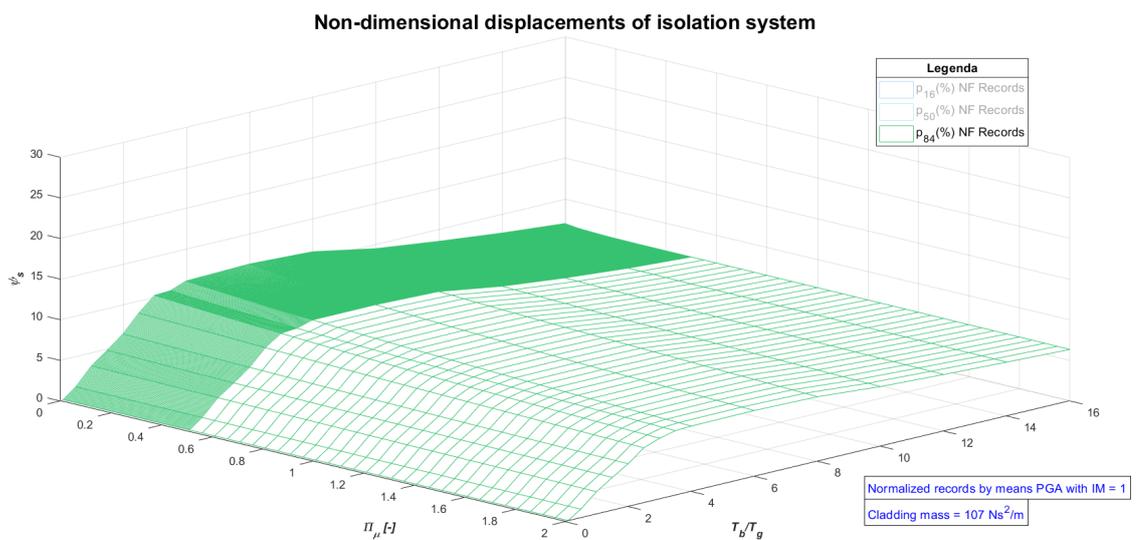


Figura 9.396: Sismi NF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

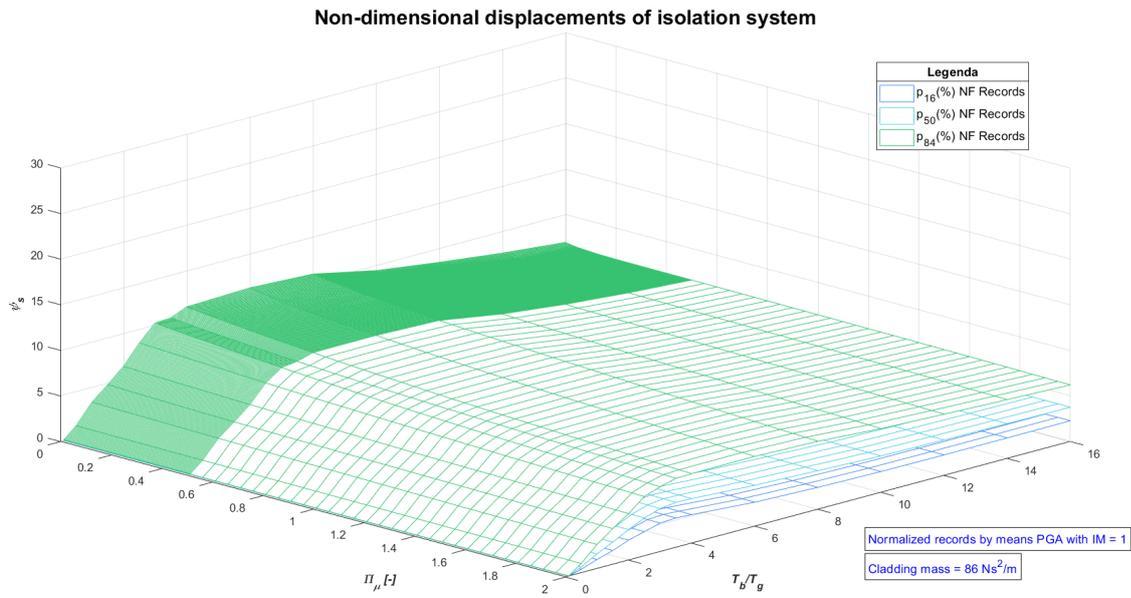


Figura 9.397: Sismi NF - Complessivo - Tamponatura pluristrato

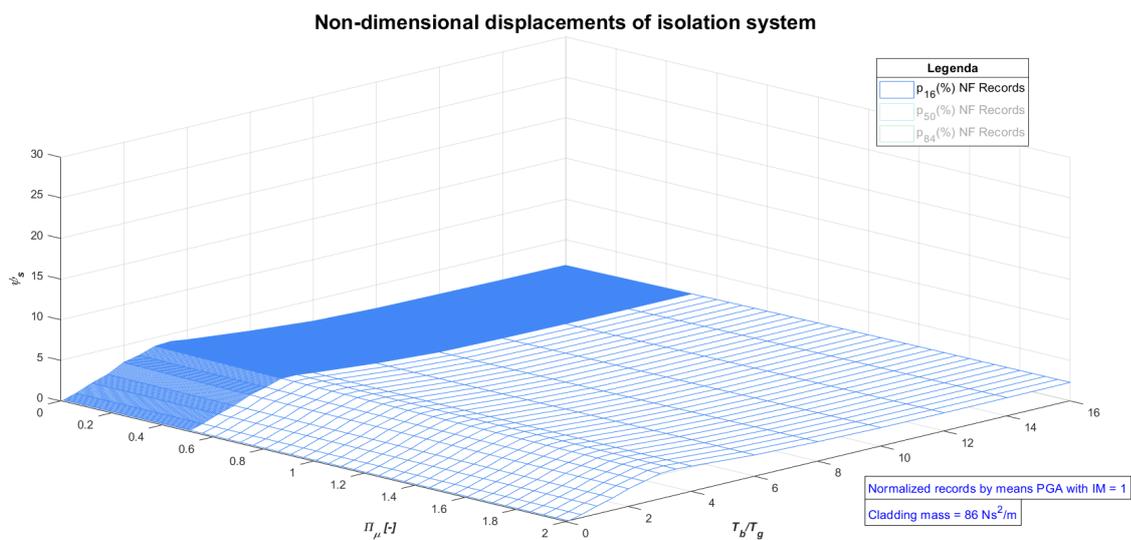


Figura 9.398: Sismi NF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

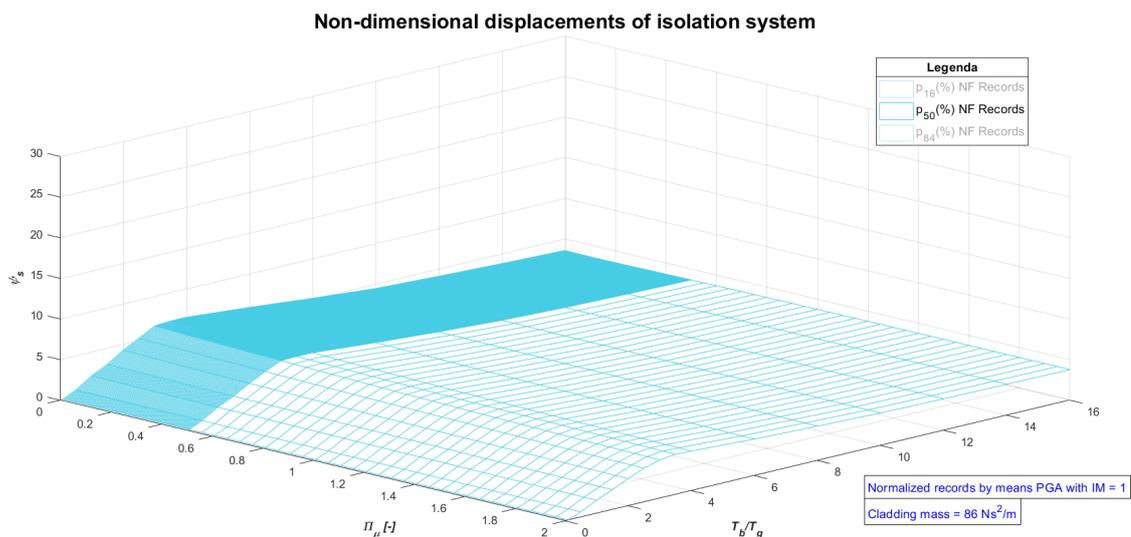


Figura 9.399: Sismi NF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

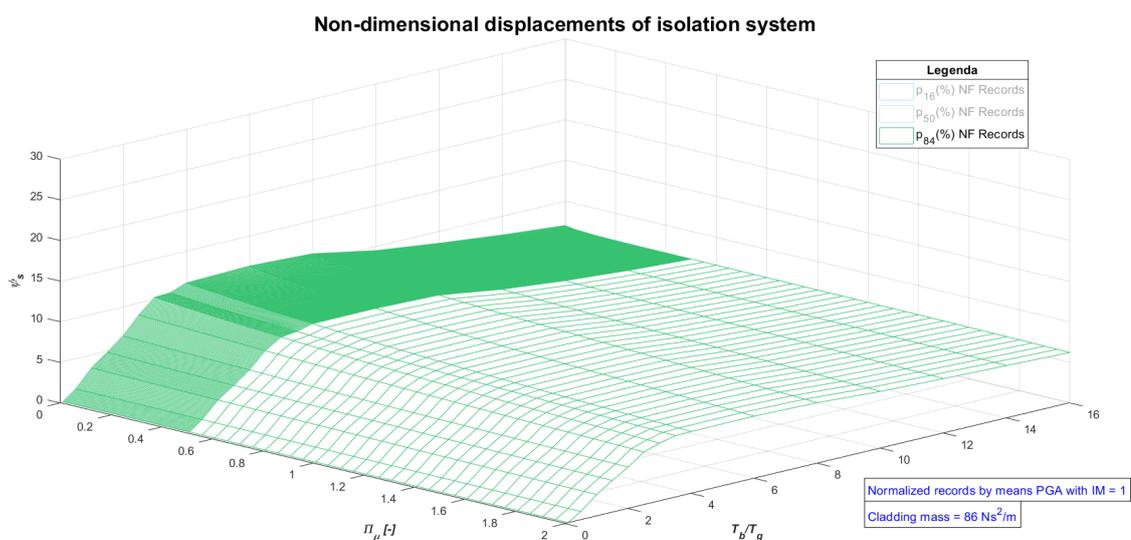


Figura 9.400: Sismi NF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

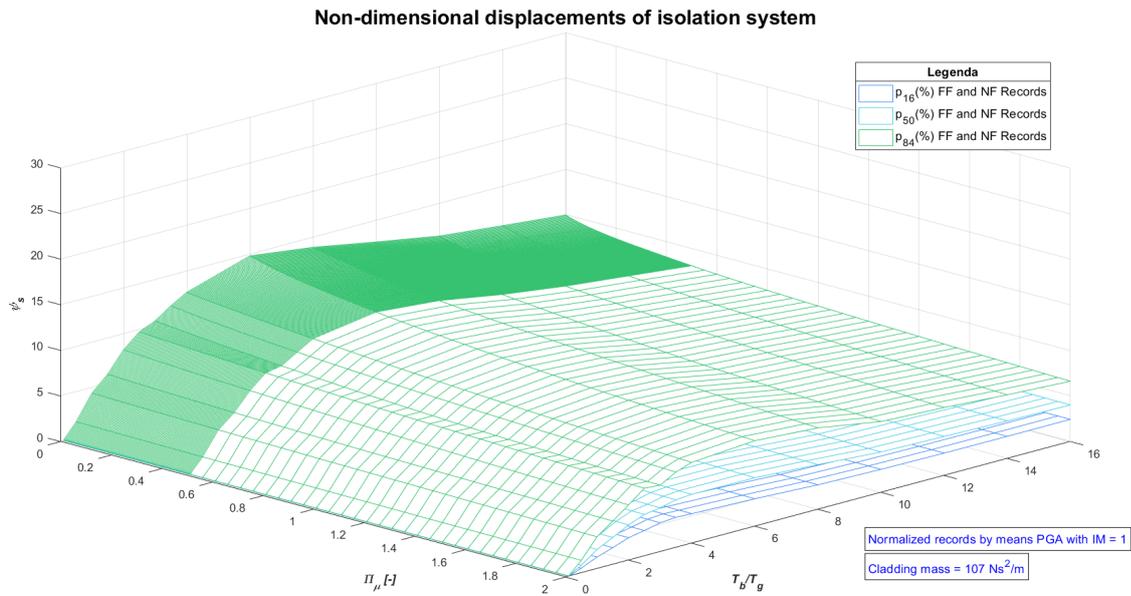


Figura 9.401: Sismi NF + FF - Complessivo - Tamponatura monostrato

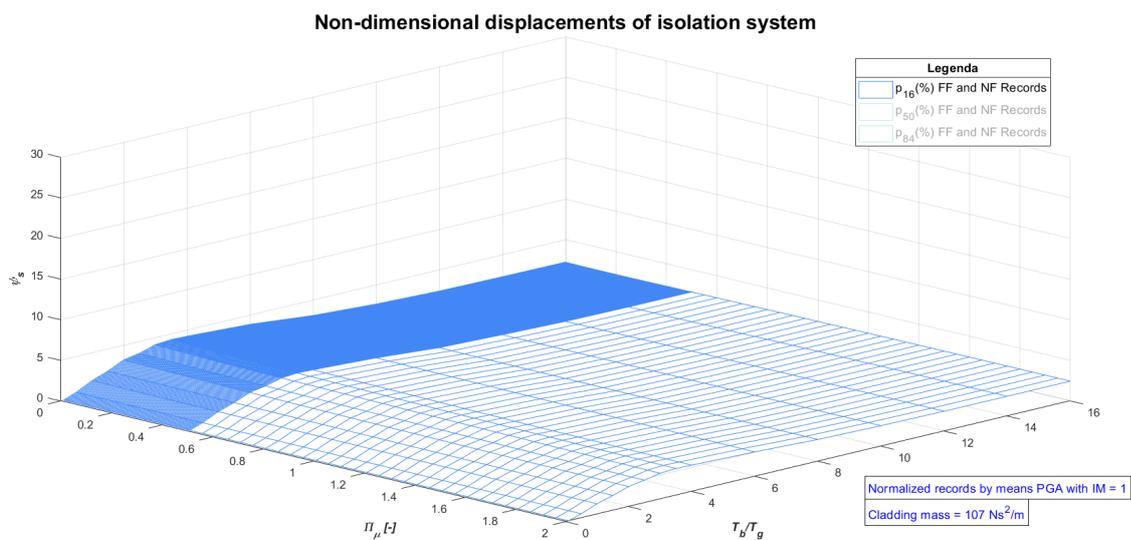


Figura 9.402: Sismi NF + FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

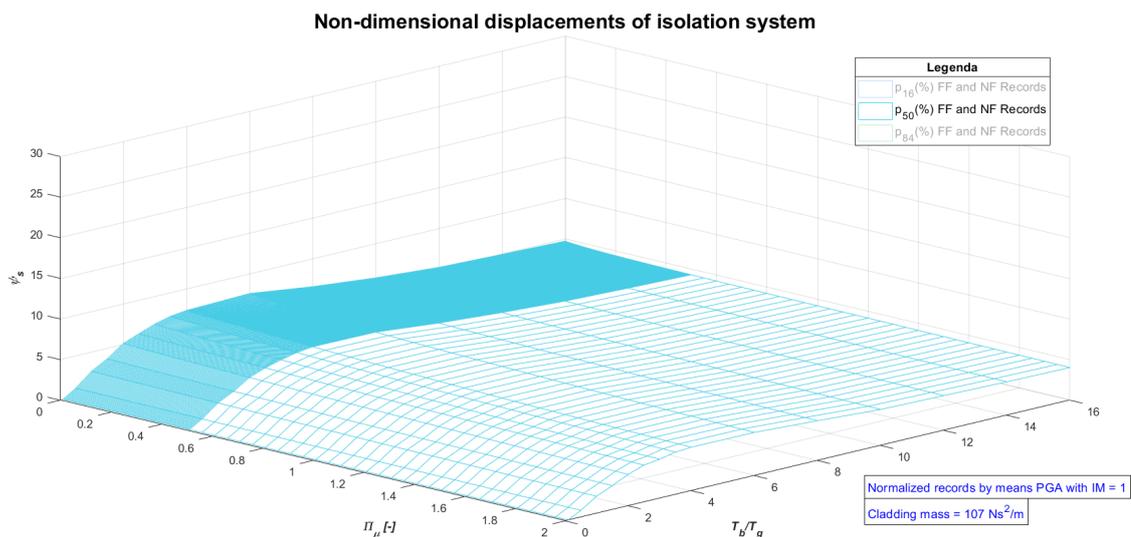


Figura 9.403: Sismi NF + FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

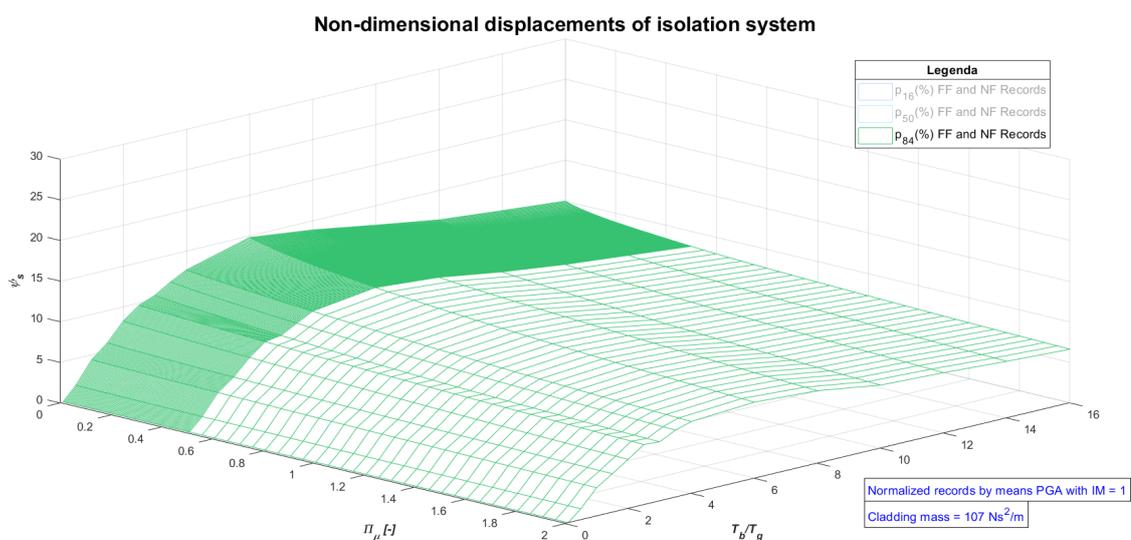


Figura 9.404: Sismi NF + FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

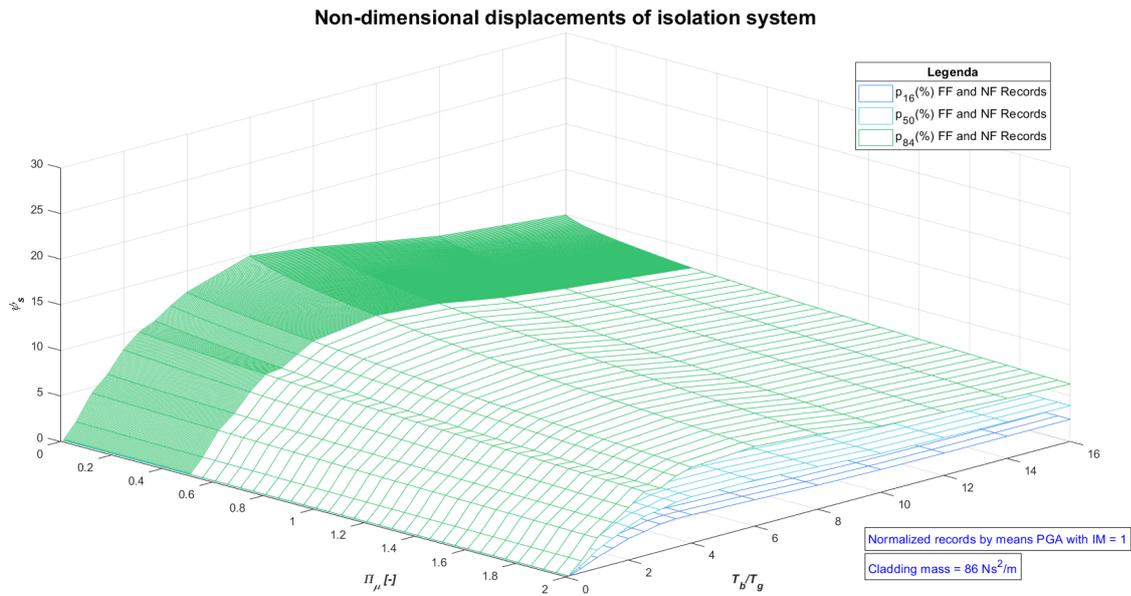


Figura 9.405: Sismi NF + FF - Complessivo - Tamponatura pluristrato

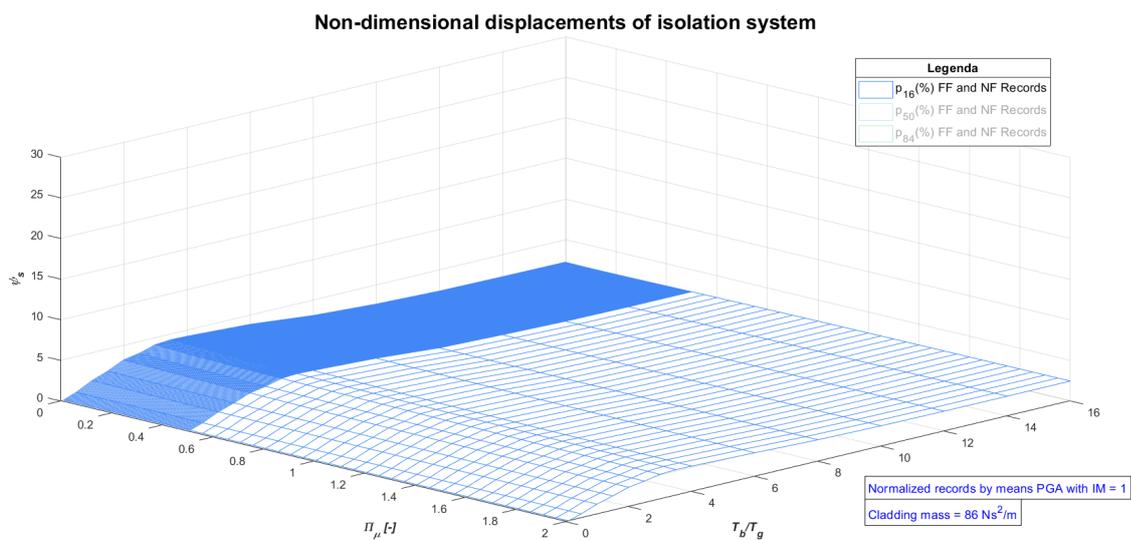


Figura 9.406: Sismi NF + FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

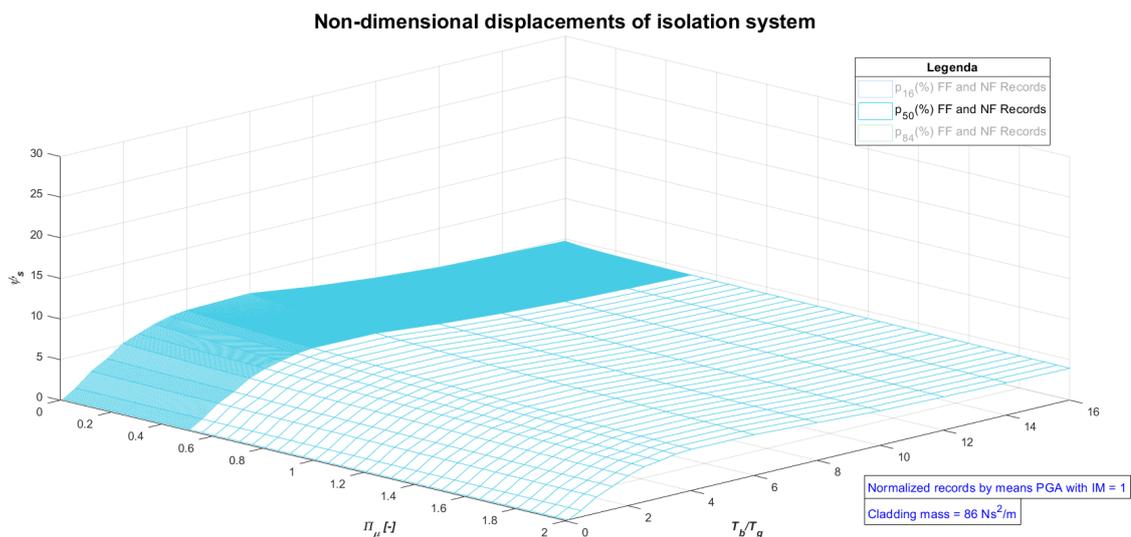


Figura 9.407: Sismi NF + FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

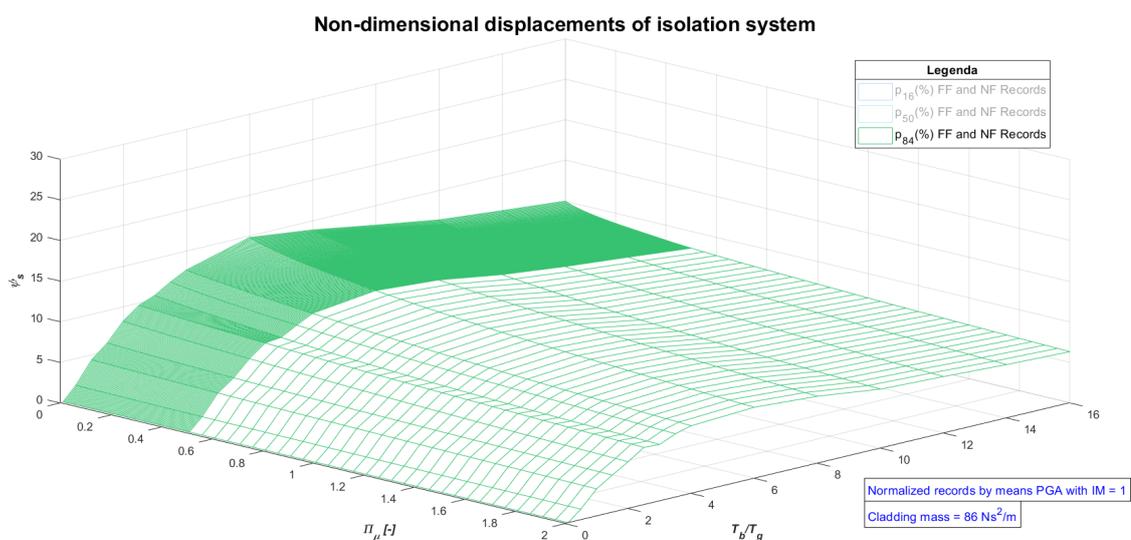


Figura 9.408: Sismi NF + FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

9.4.2 Grafici bidimensionali (Π_μ ; $\psi_s(\tau)$)

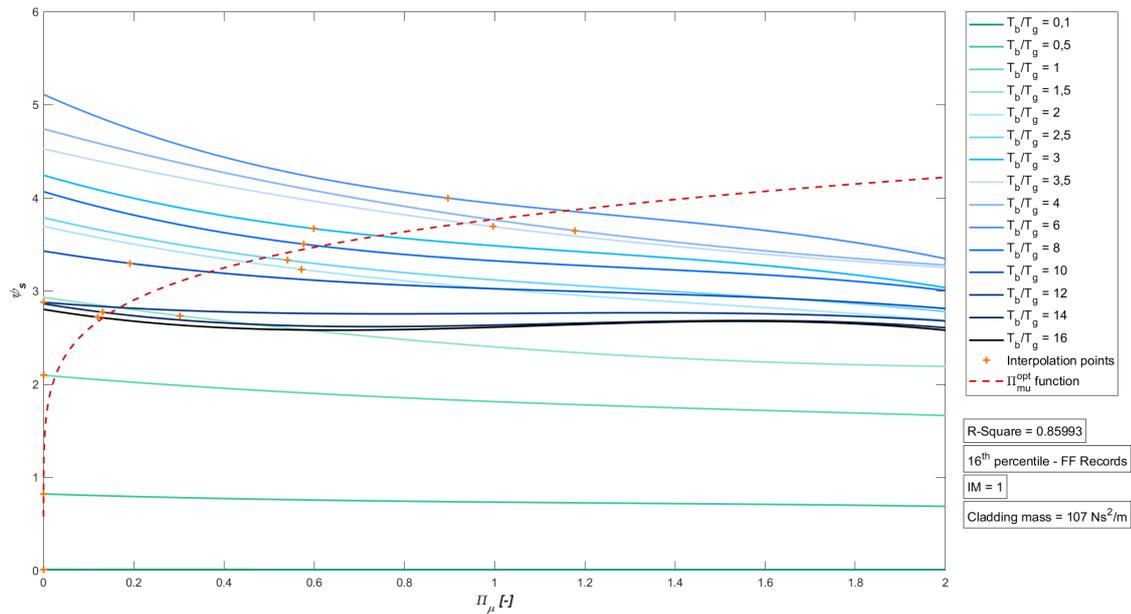


Figura 9.409: Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

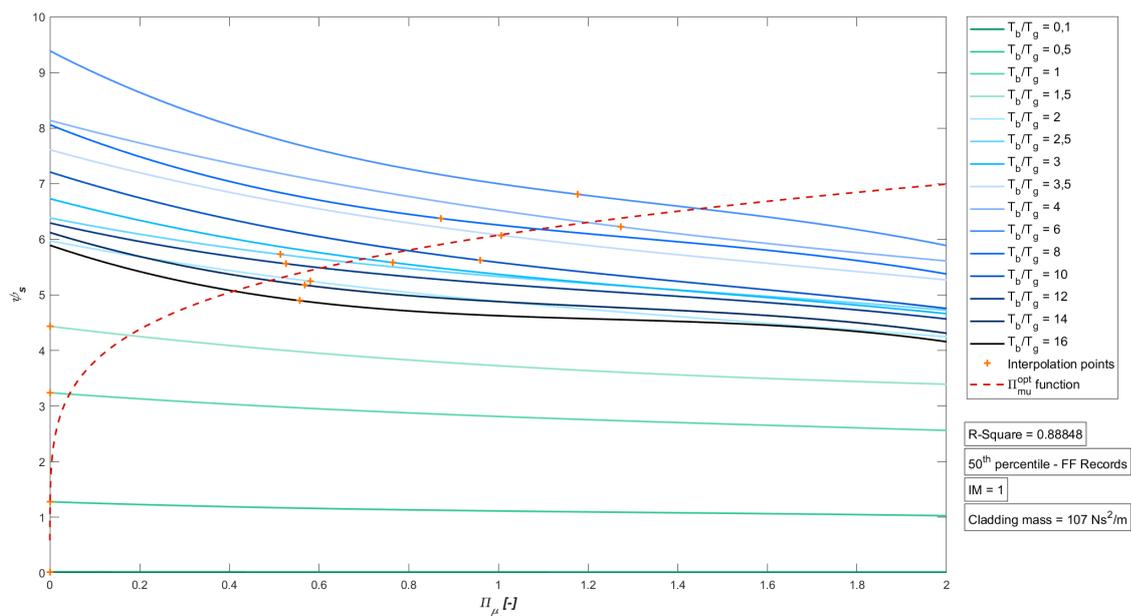


Figura 9.410: Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

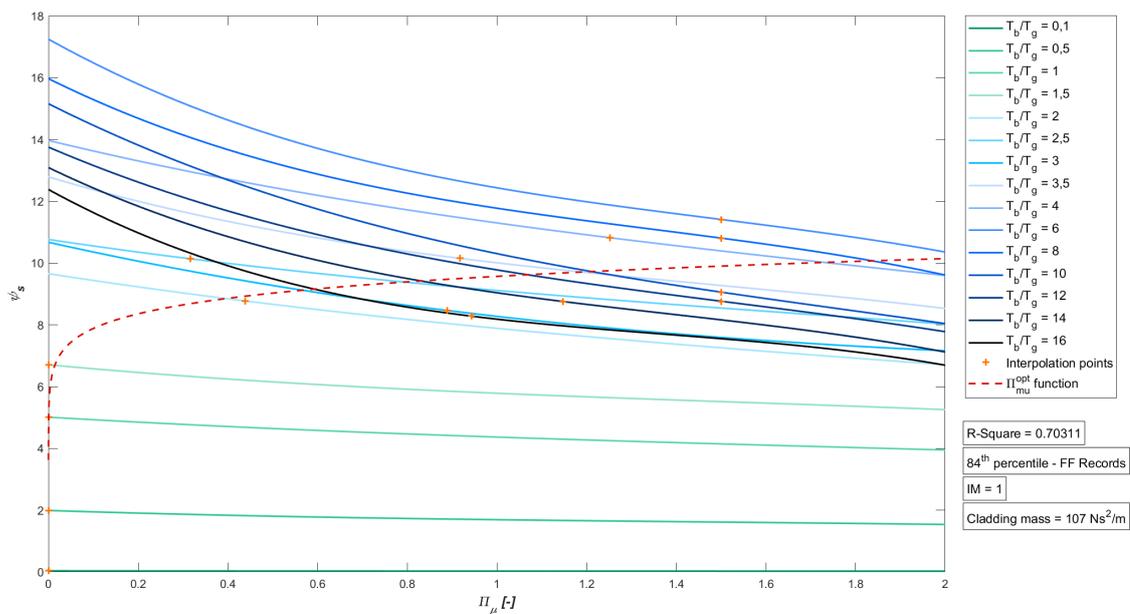


Figura 9.411: Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

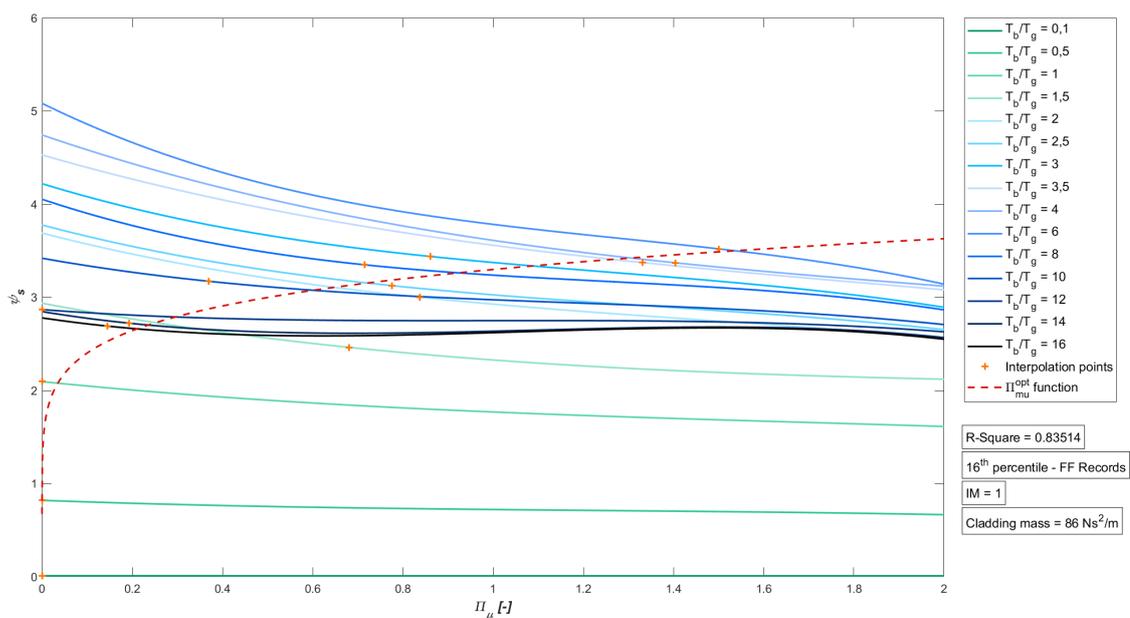


Figura 9.412: Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

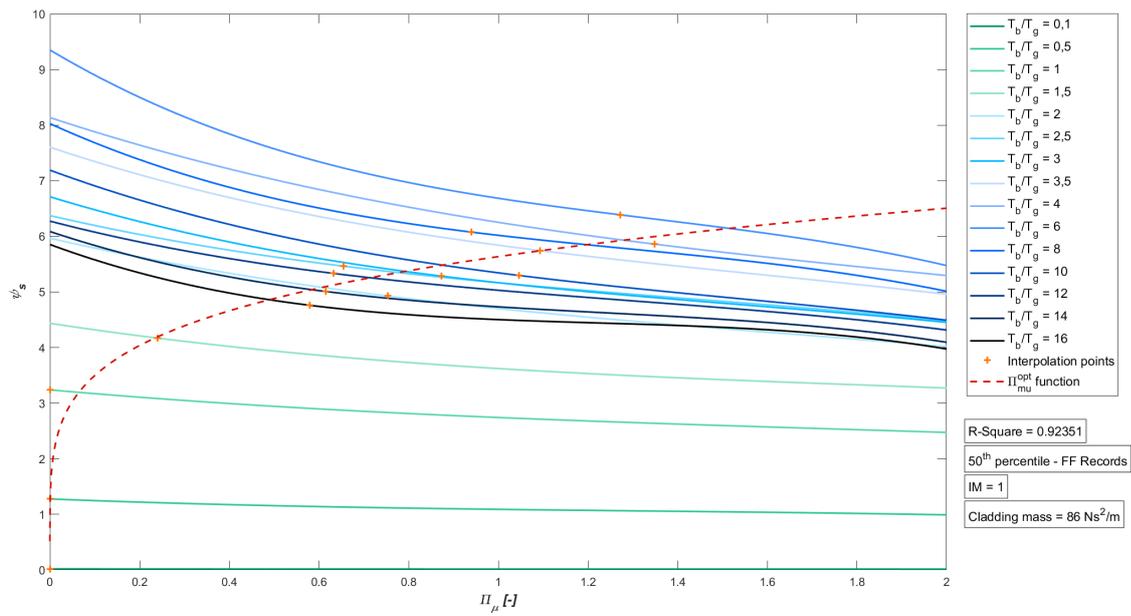


Figura 9.413: Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

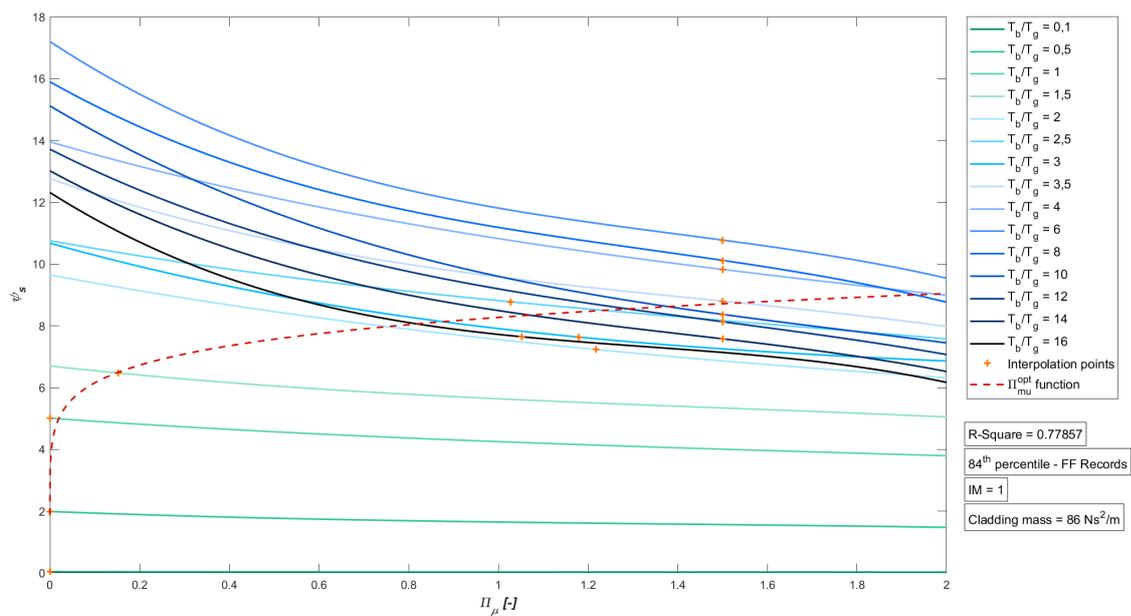


Figura 9.414: Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

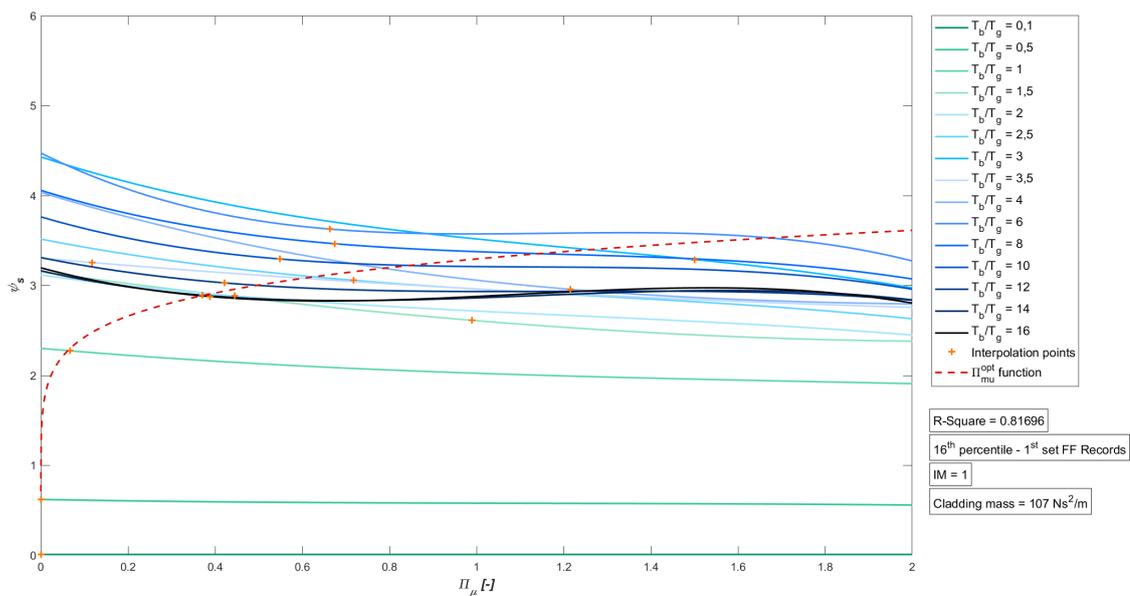


Figura 9.415: 1°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

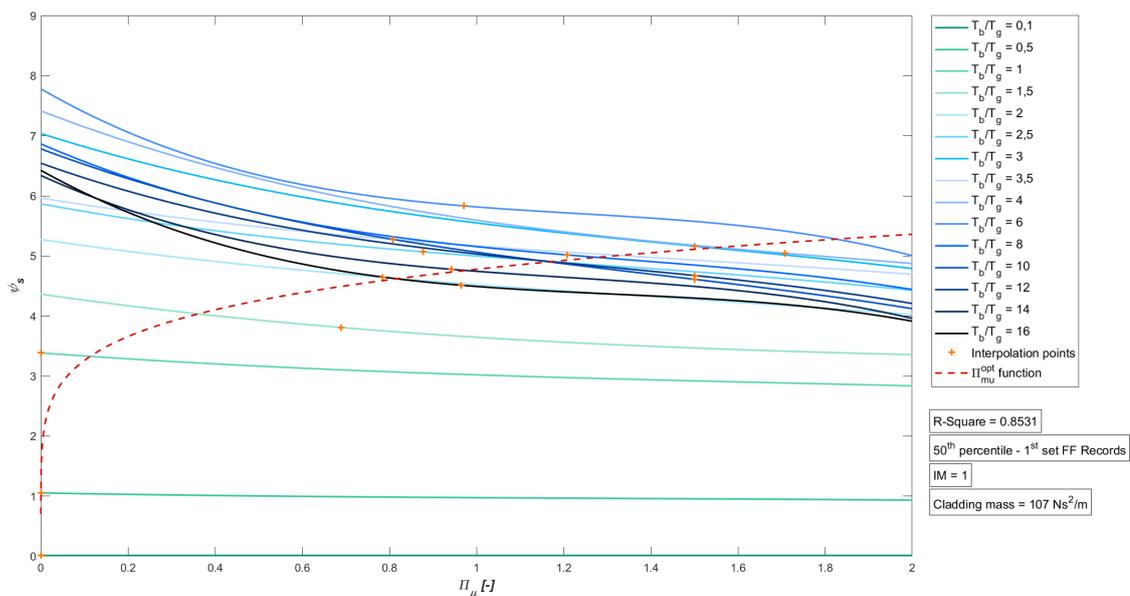


Figura 9.416: 1°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

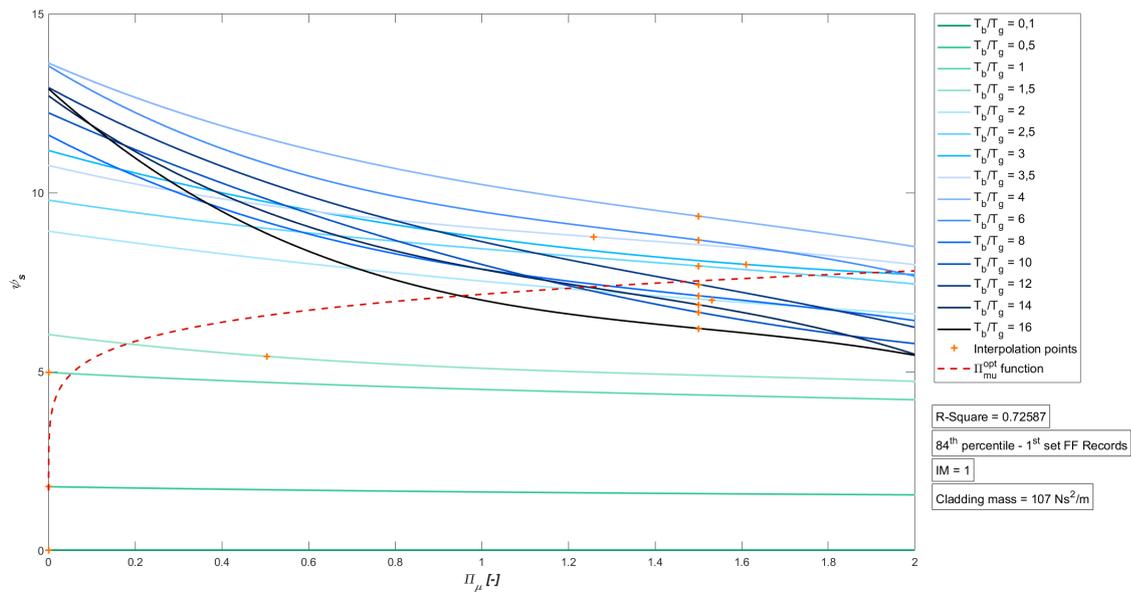


Figura 9.417: 1°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

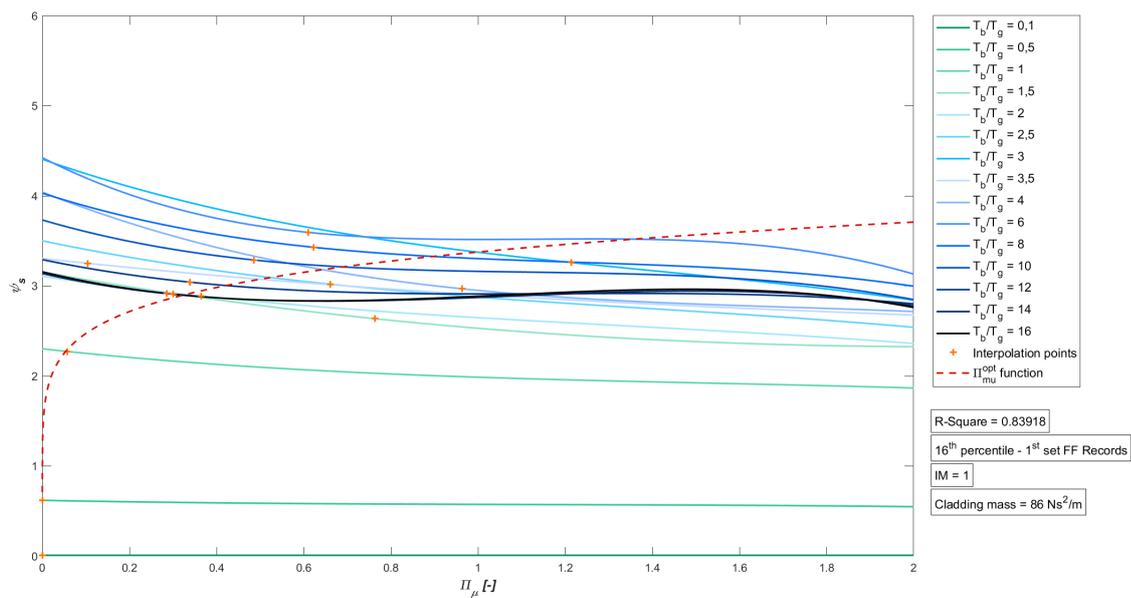


Figura 9.418: 1°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

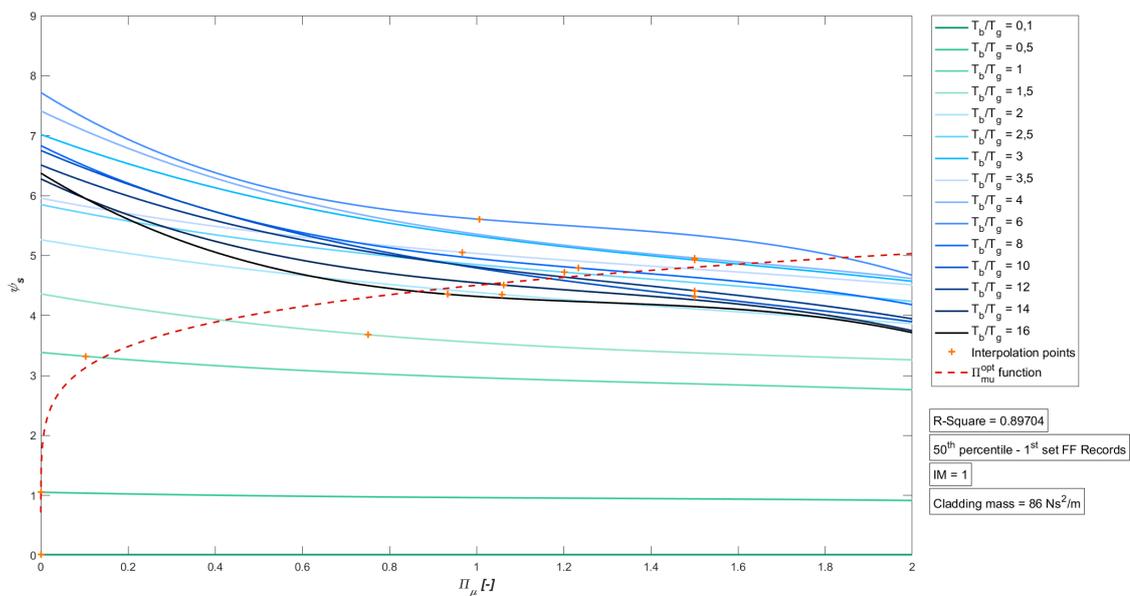


Figura 9.419: 1°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

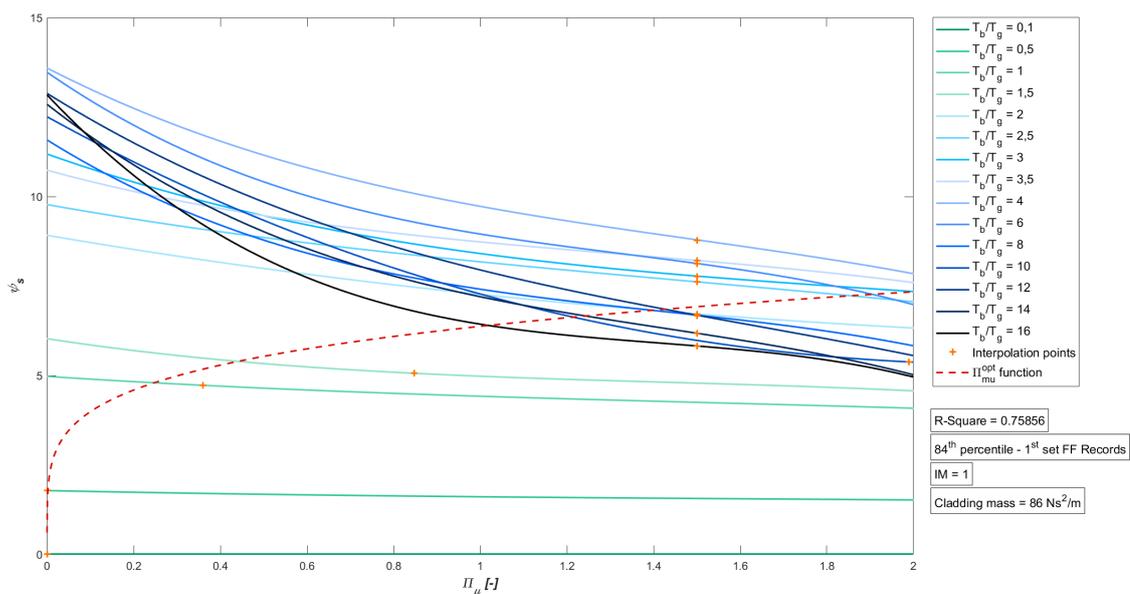


Figura 9.420: 1°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

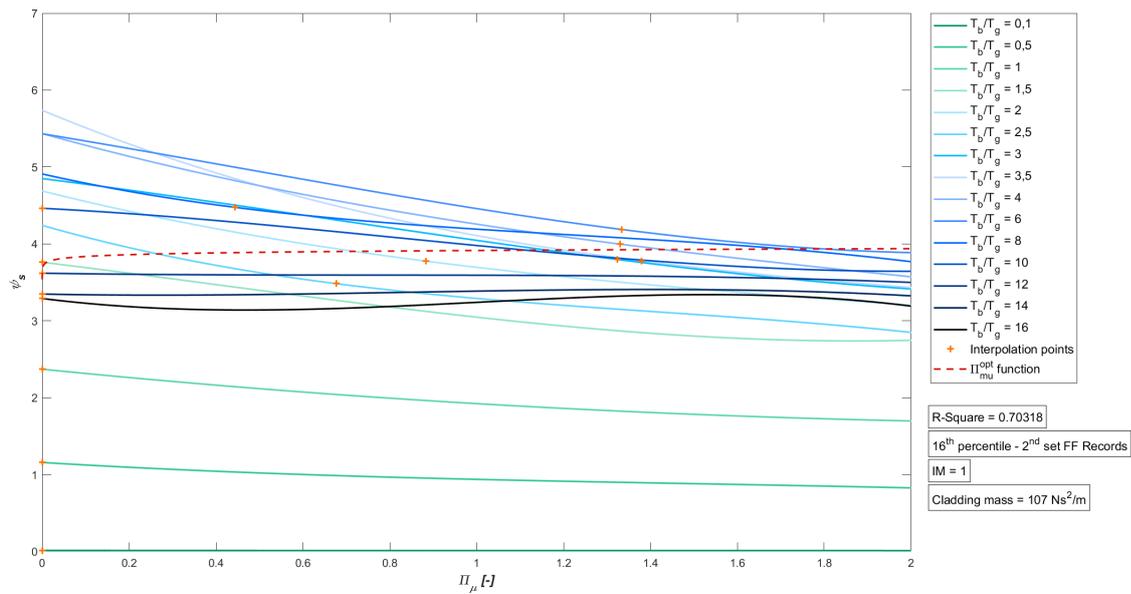


Figura 9.421: 2°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

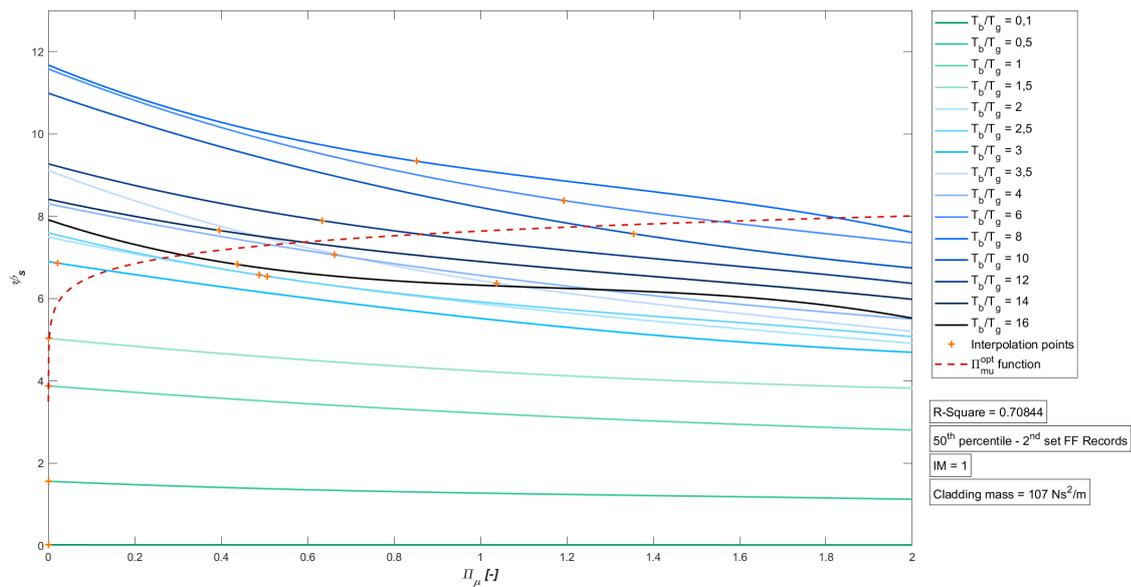


Figura 9.422: 2°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

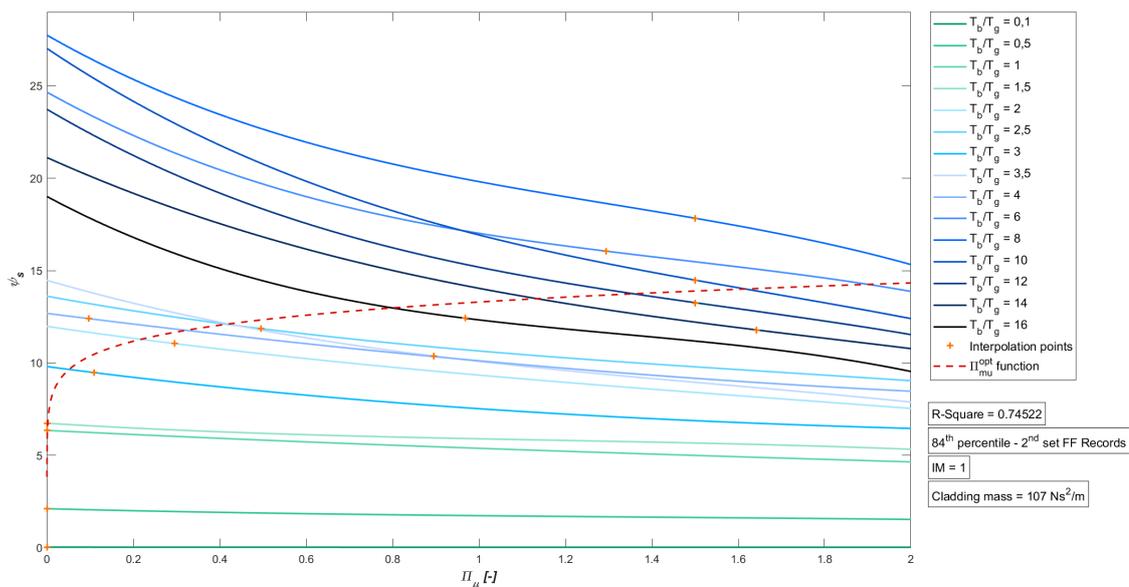


Figura 9.423: 2°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

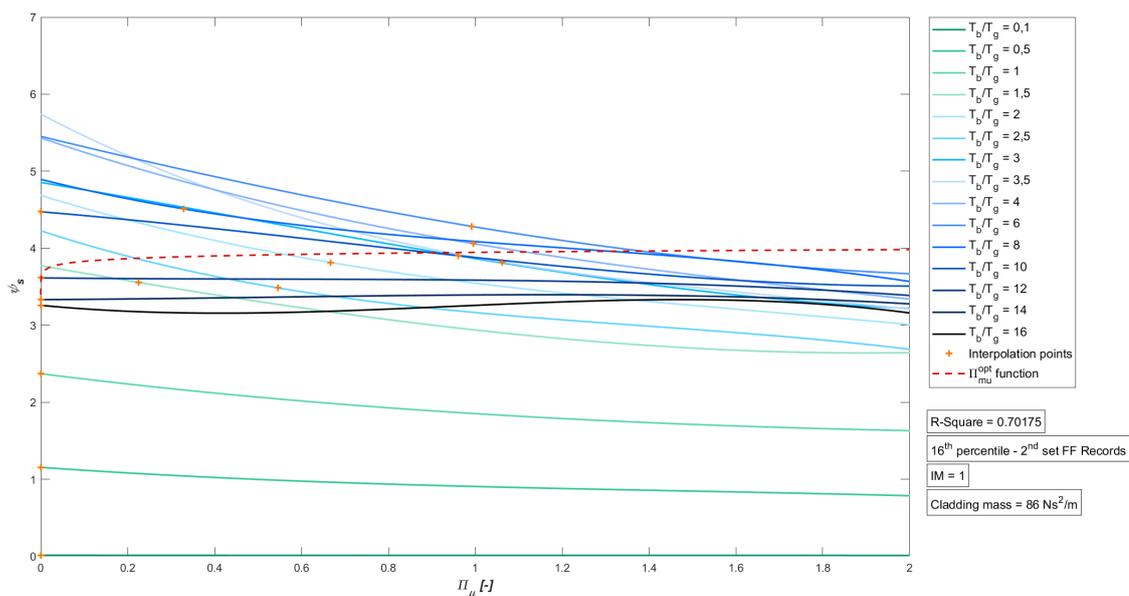


Figura 9.424: 2°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

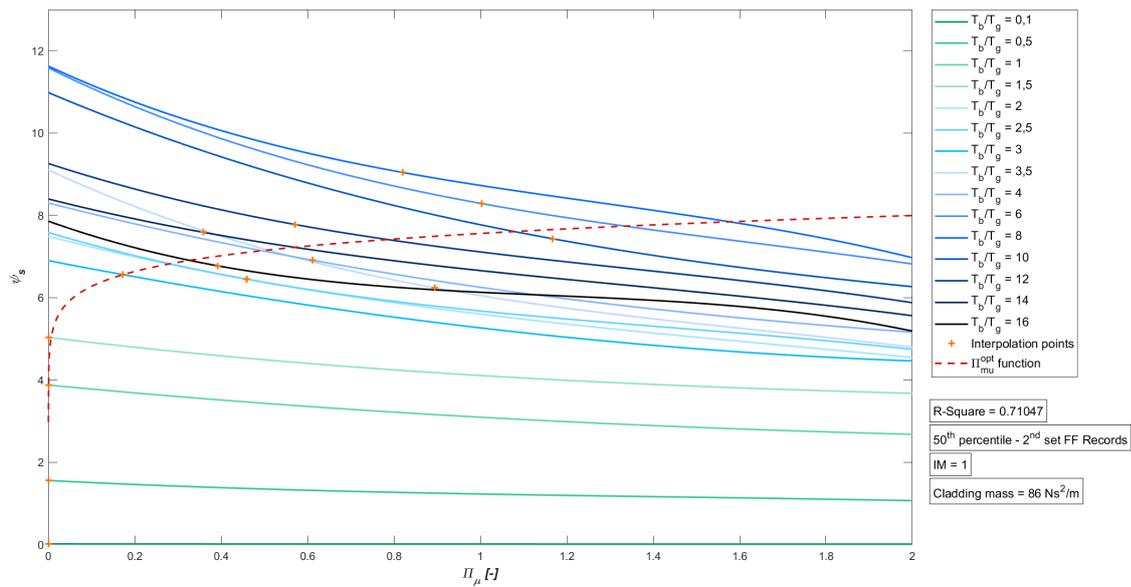


Figura 9.425: 2°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

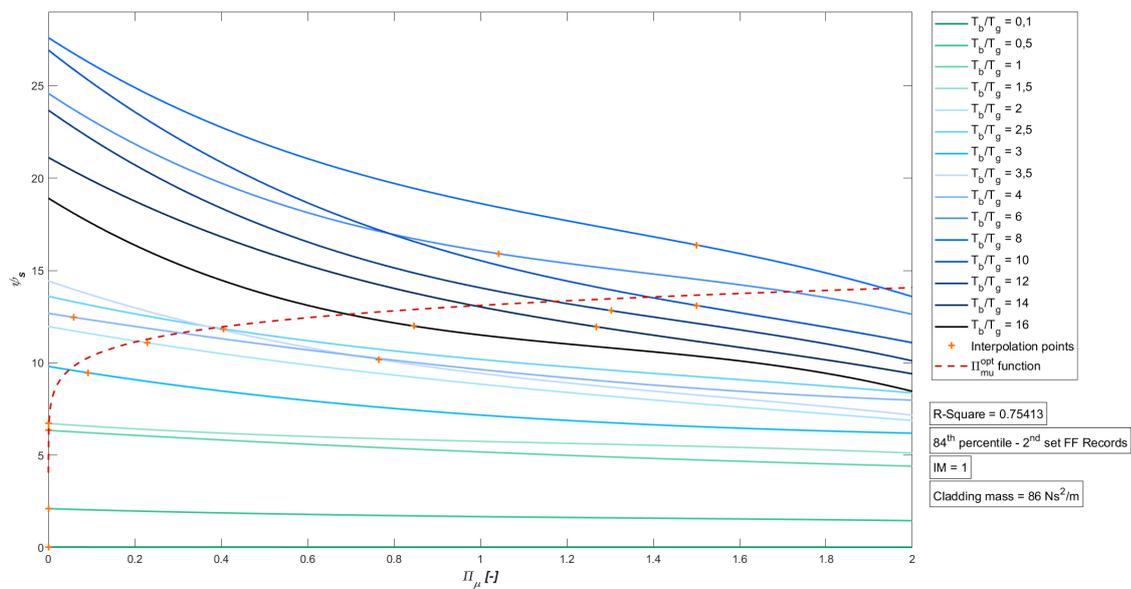


Figura 9.426: 2°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

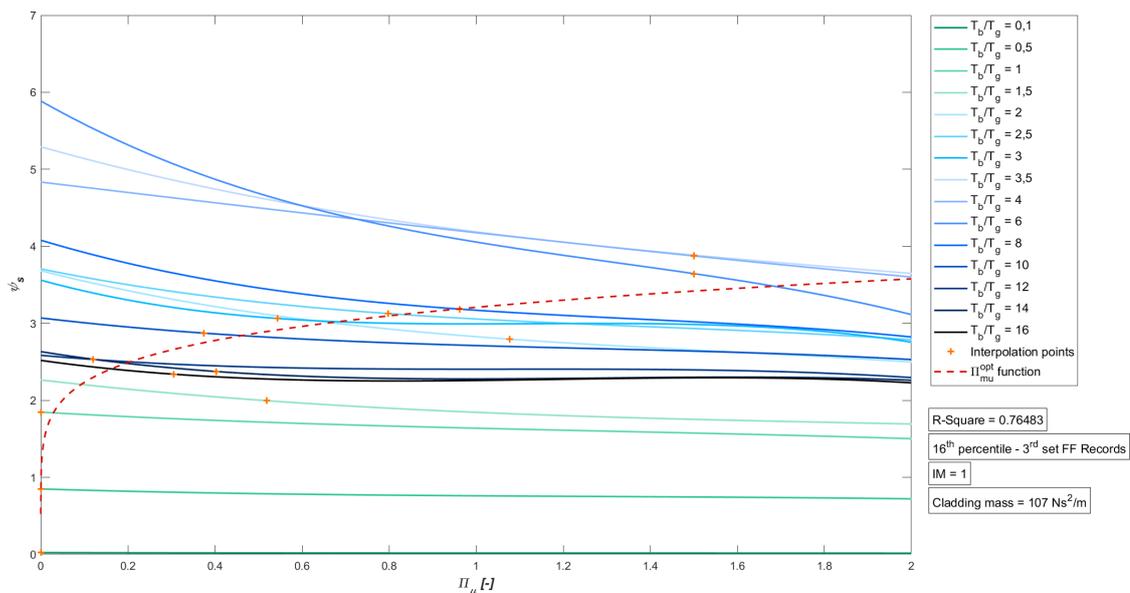


Figura 9.427: 3°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

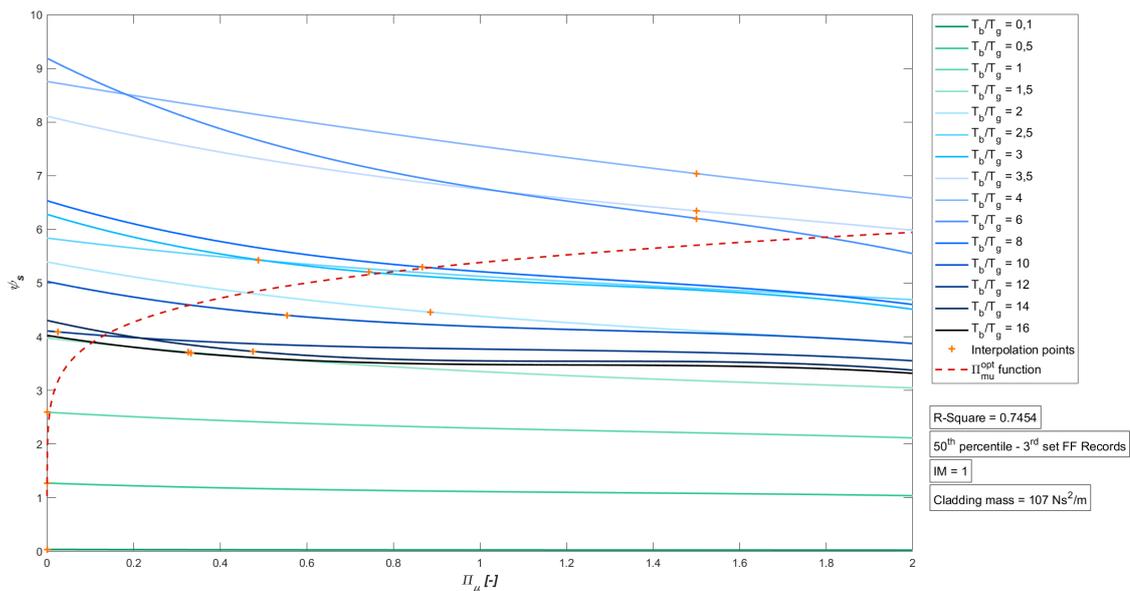


Figura 9.428: 3°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

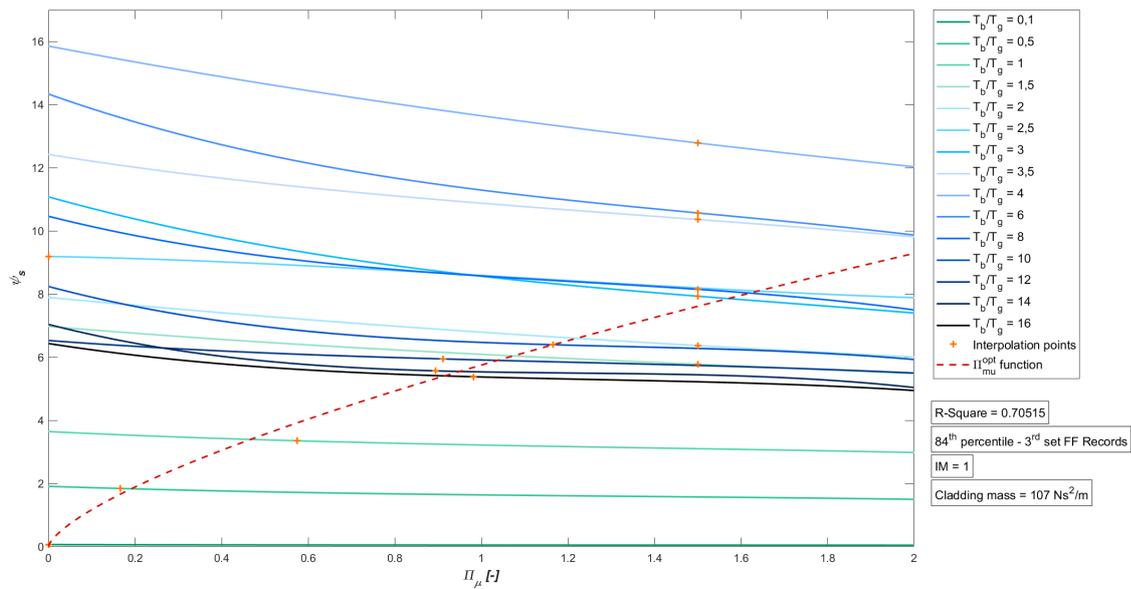


Figura 9.429: 3°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

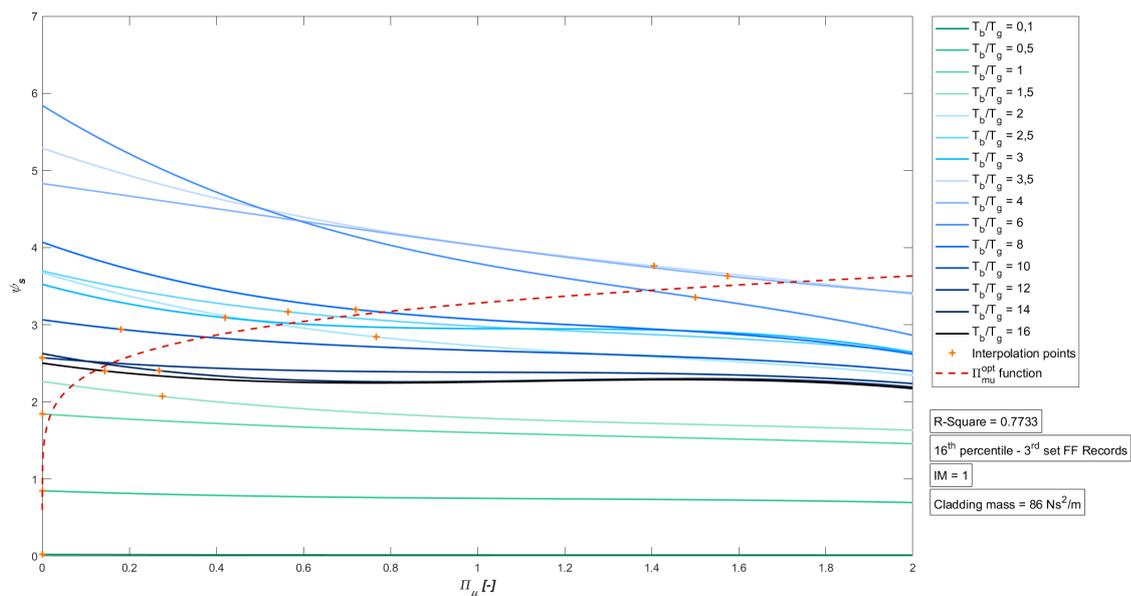


Figura 9.430: 3°set Sismi FF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

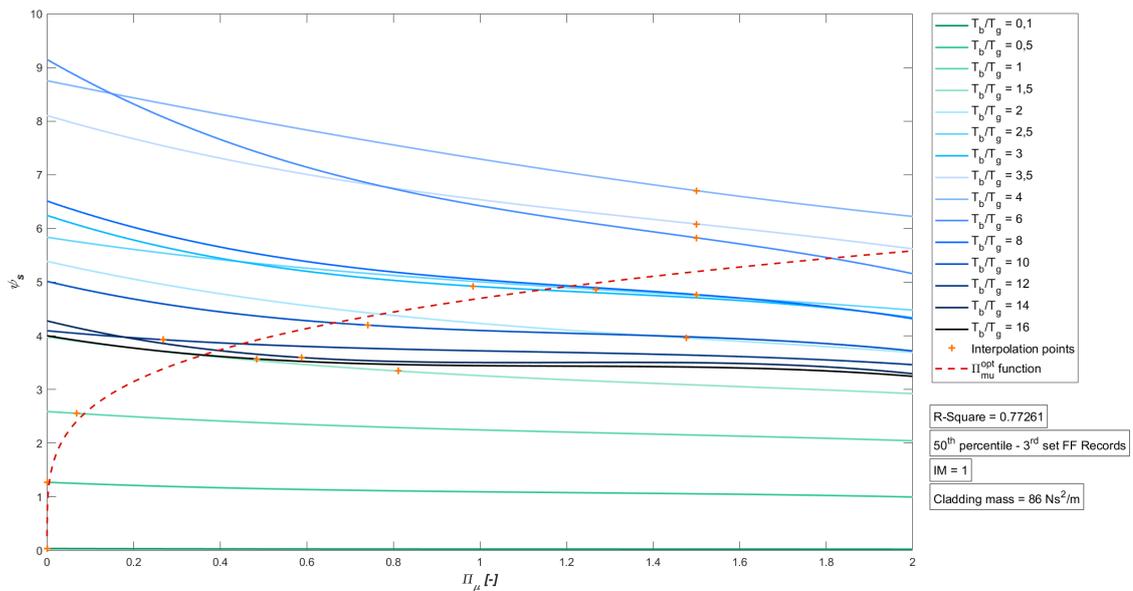


Figura 9.431: 3°set Sismi FF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

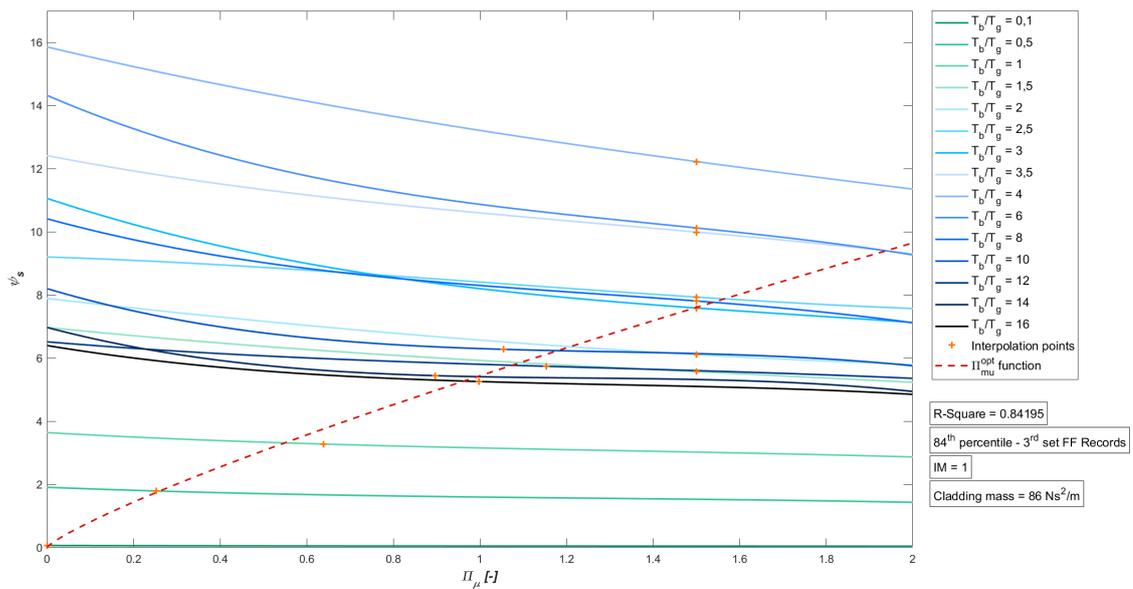


Figura 9.432: 3°set Sismi FF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

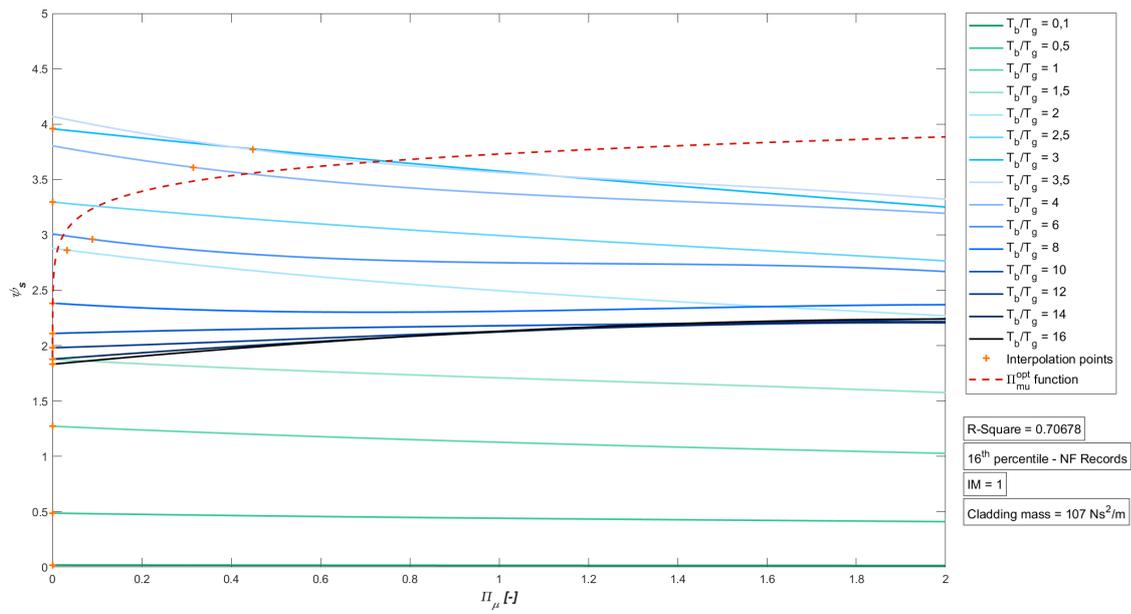


Figura 9.433: Sismi NF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

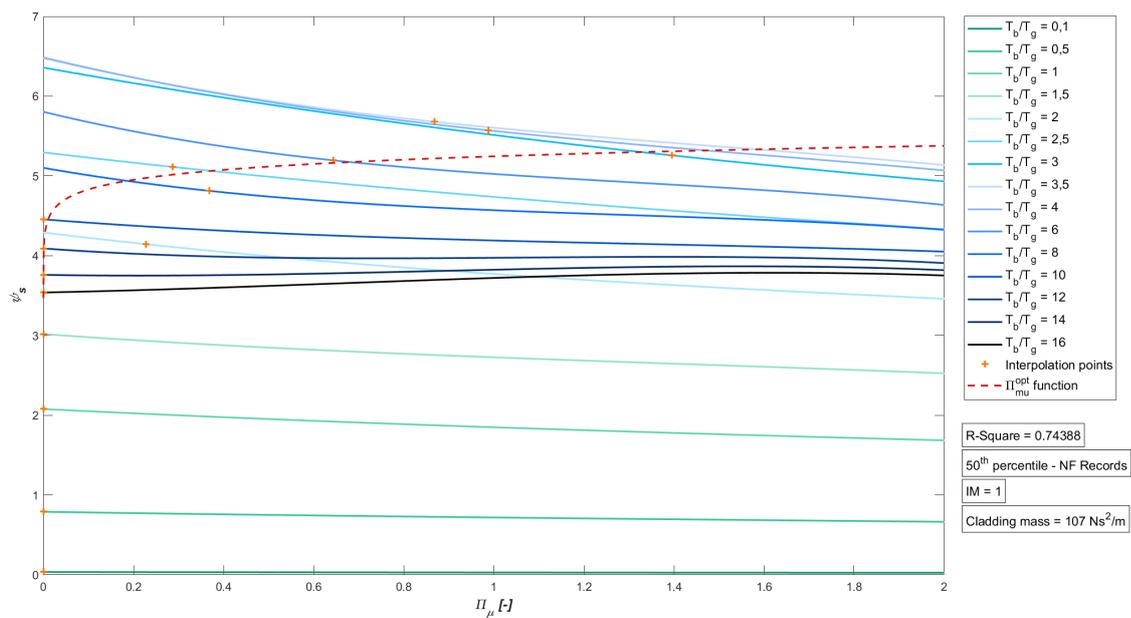


Figura 9.434: Sismi NF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

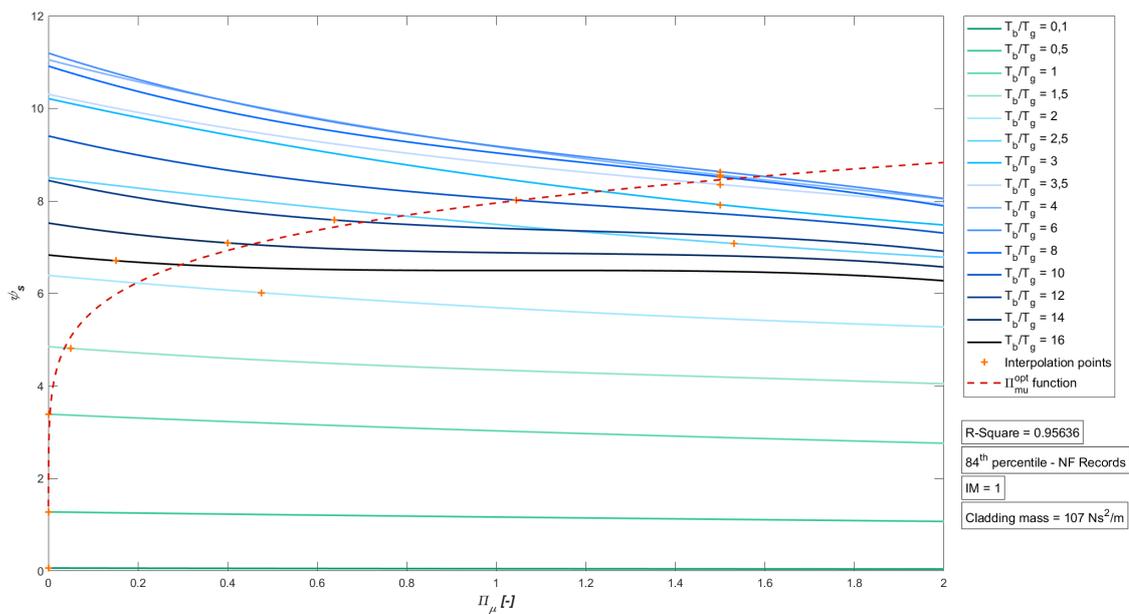


Figura 9.435: Sismi NF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

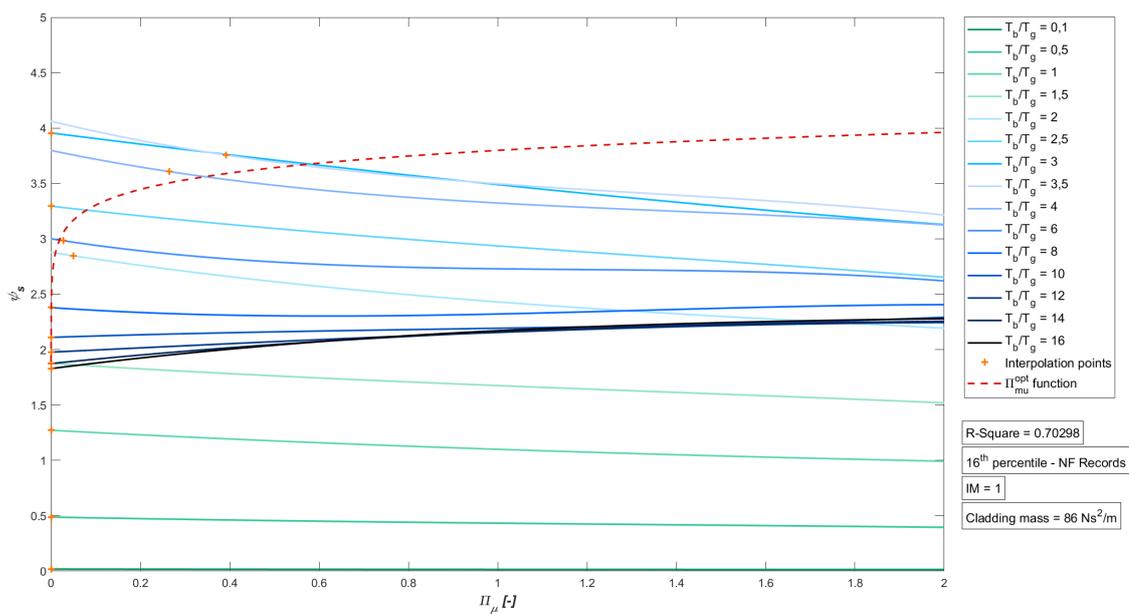


Figura 9.436: Sismi NF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

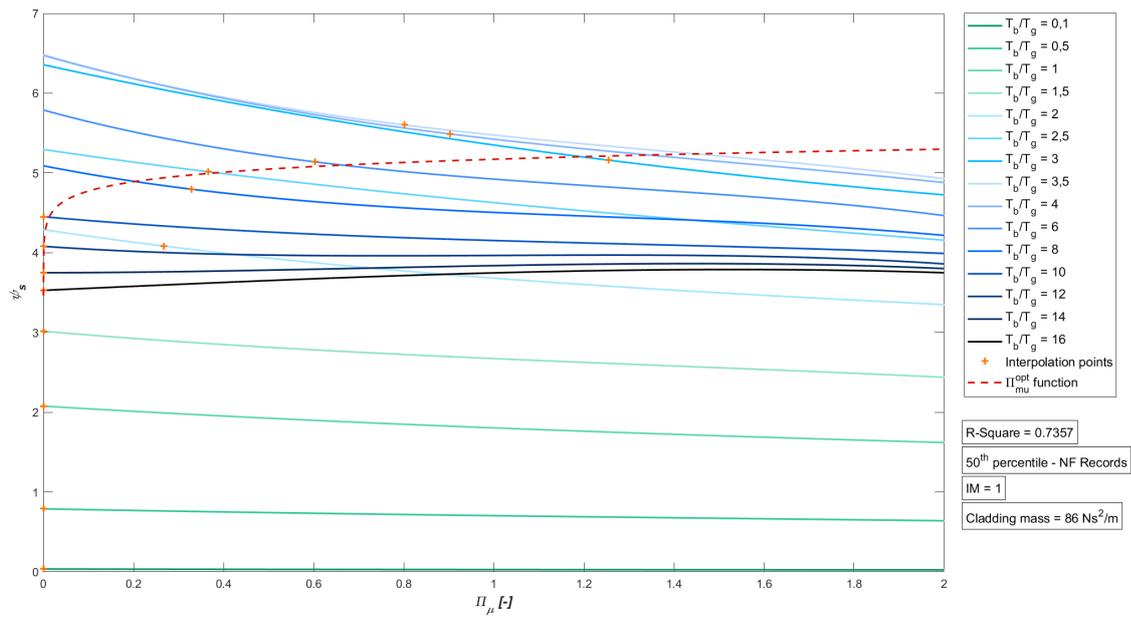


Figura 9.437: Sisimi NF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

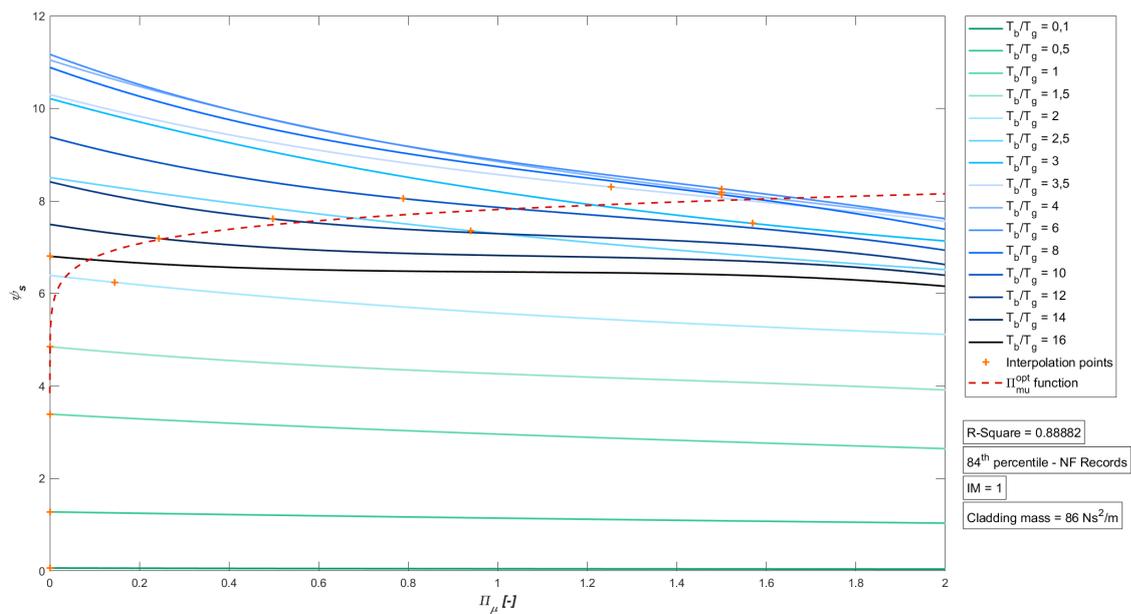


Figura 9.438: Sisimi NF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

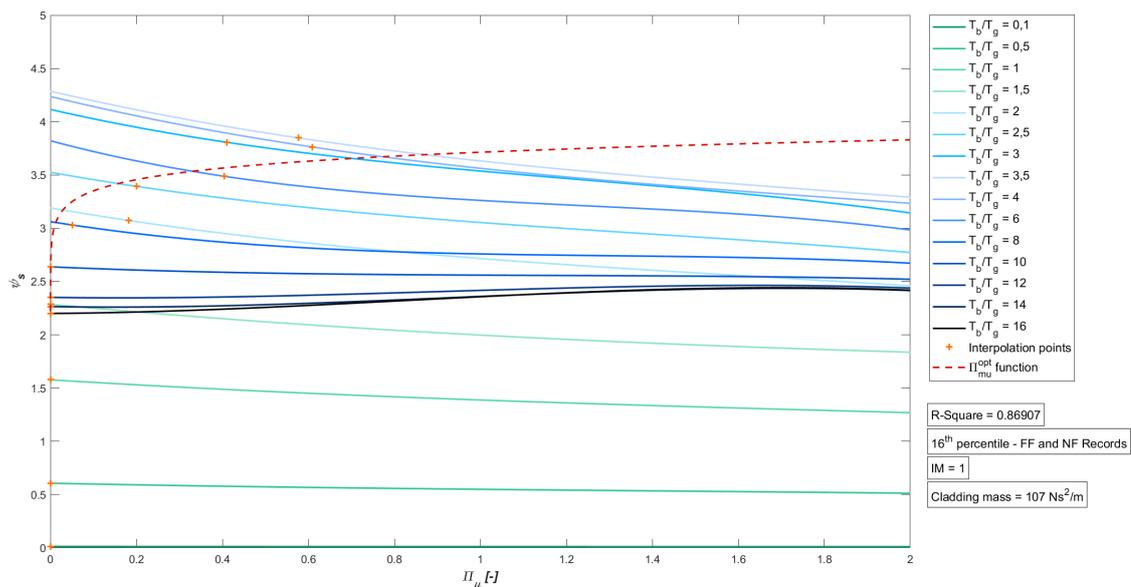


Figura 9.439: Sismi FF + NF - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

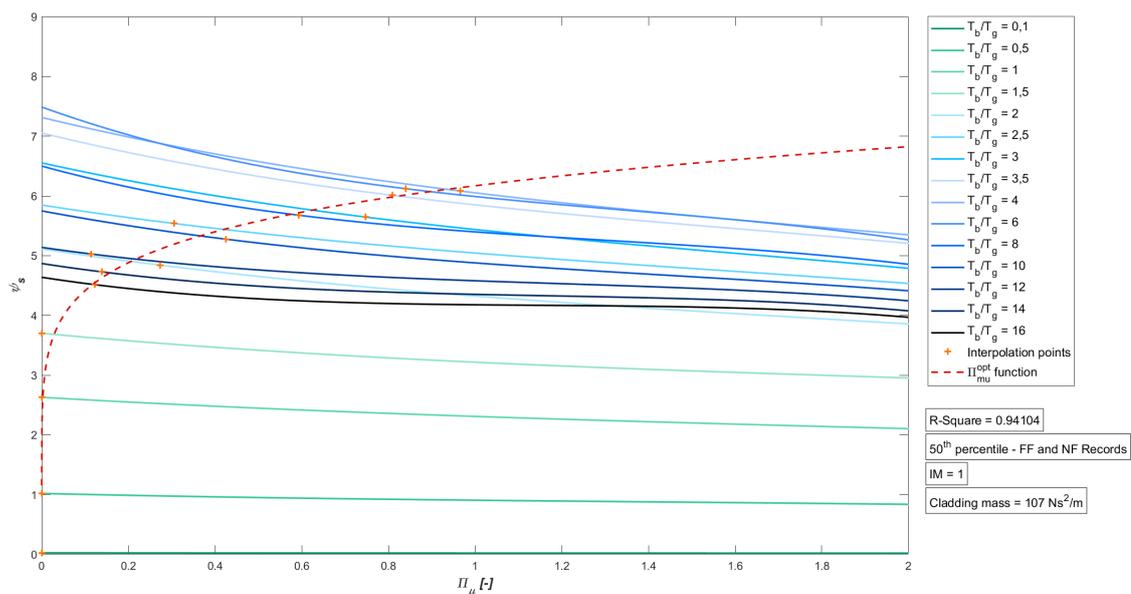


Figura 9.440: Sismi FF + NF - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

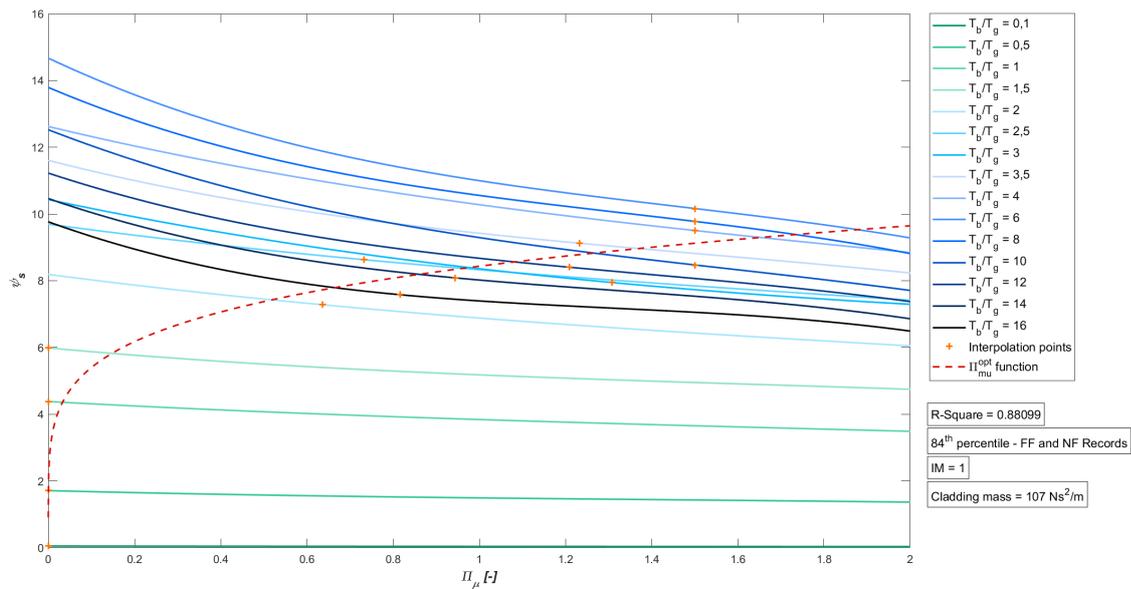


Figura 9.441: Sismi FF + NF - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

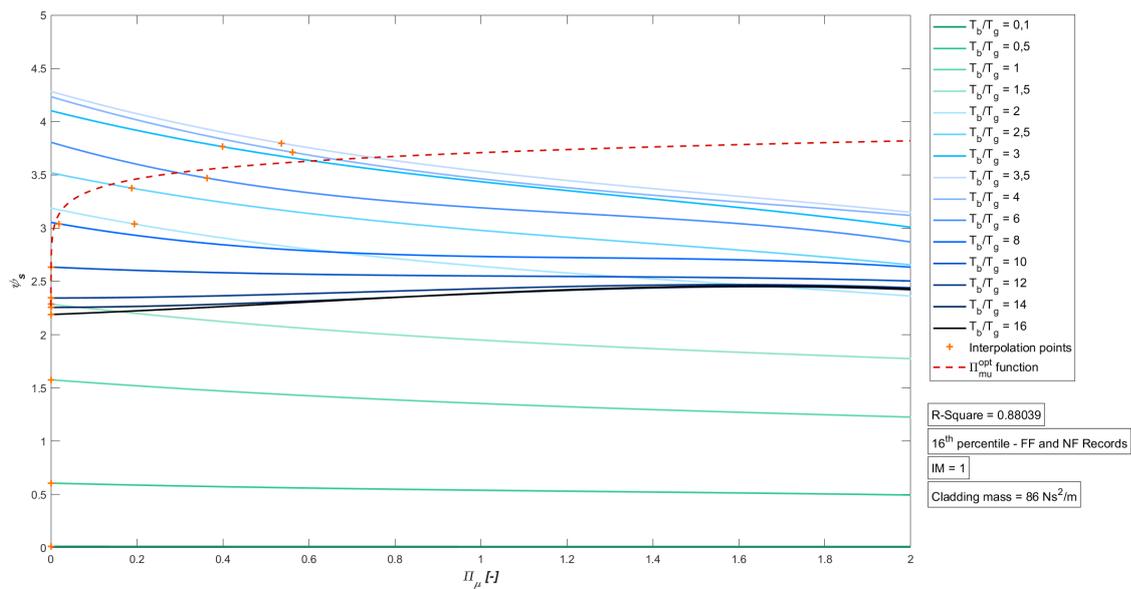


Figura 9.442: Sismi FF + NF - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

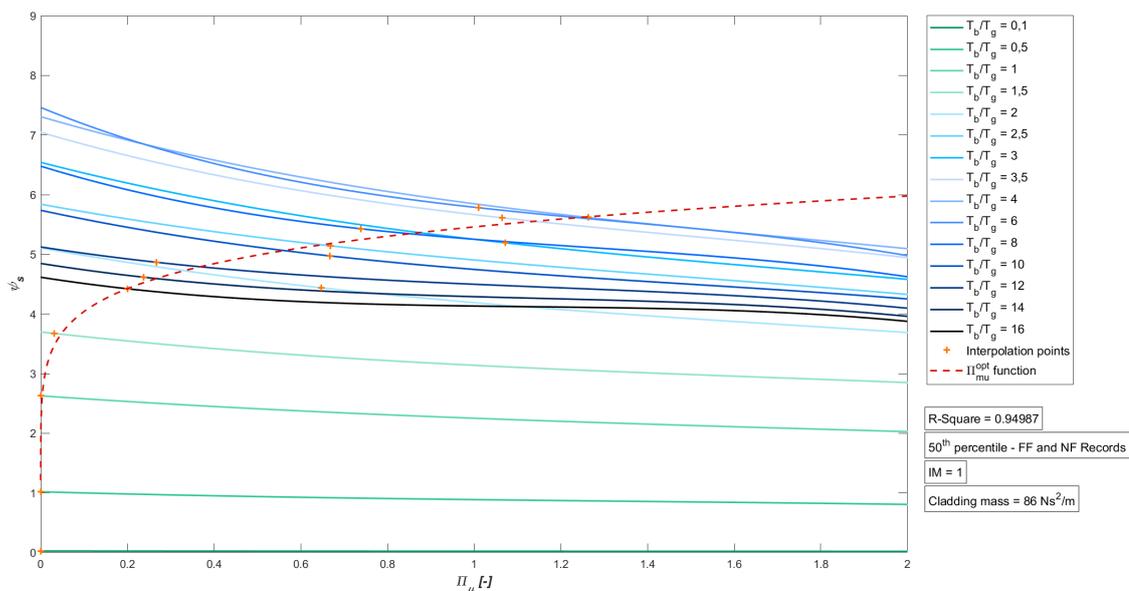


Figura 9.443: Sisimi FF + NF - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

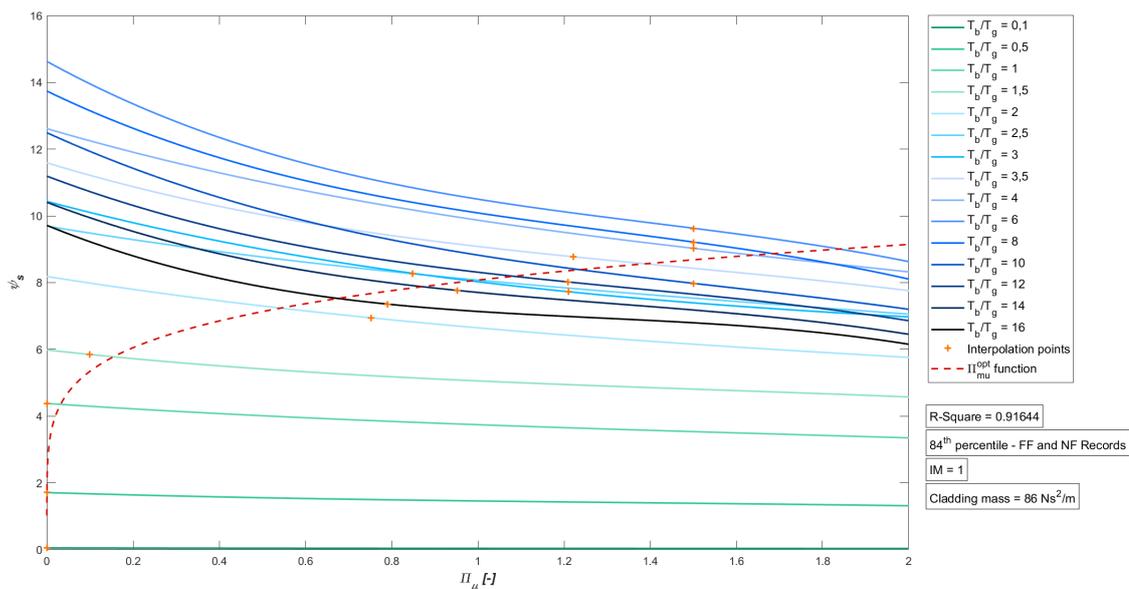


Figura 9.444: Sisimi FF + NF - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

9.4.3 Grafici bidimensionali ($\frac{T_b}{T_g}$; Π_{μ}^{Opt})

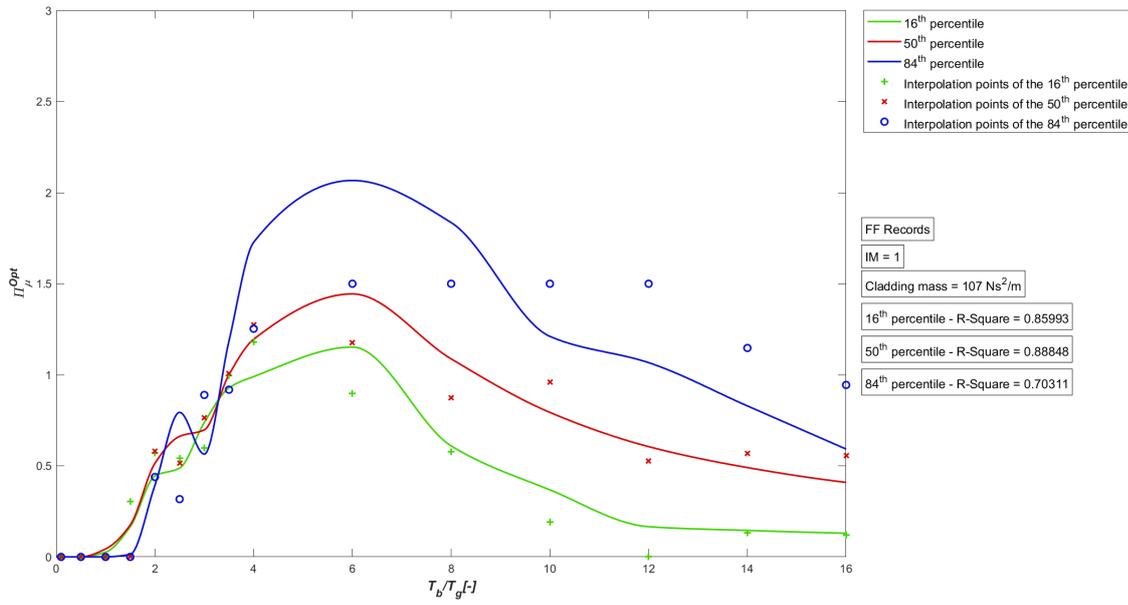


Figura 9.445: Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura monostrato

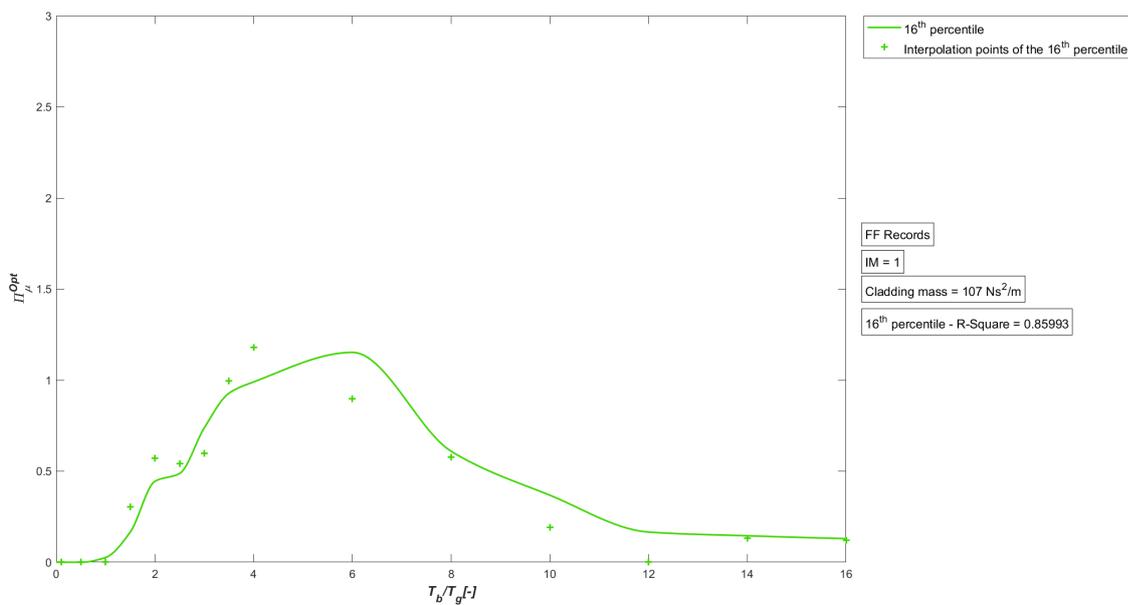


Figura 9.446: Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

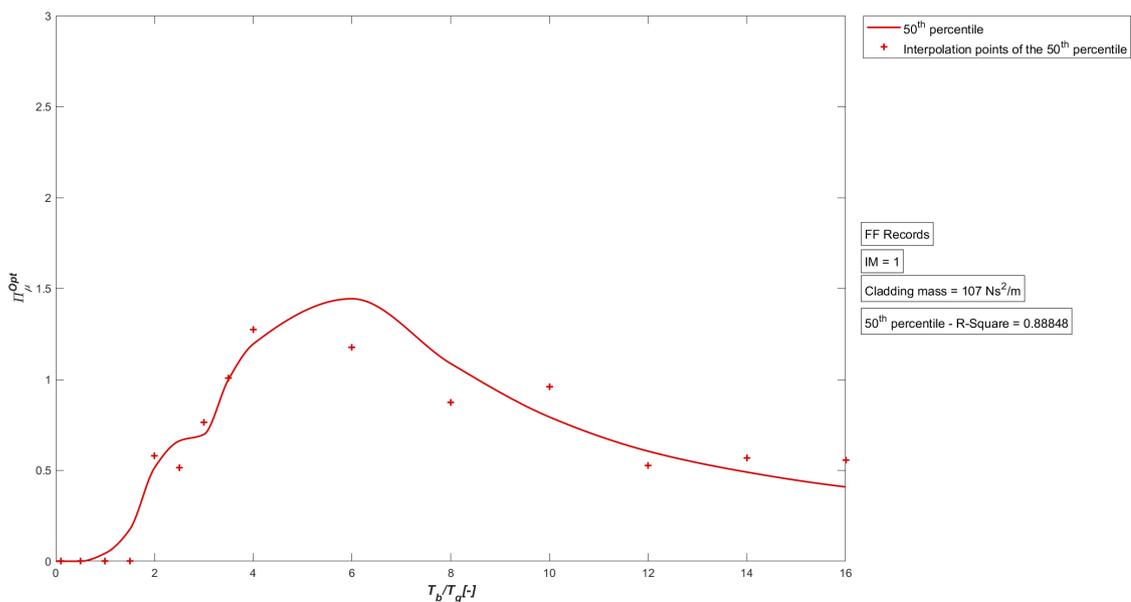


Figura 9.447: Sismi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

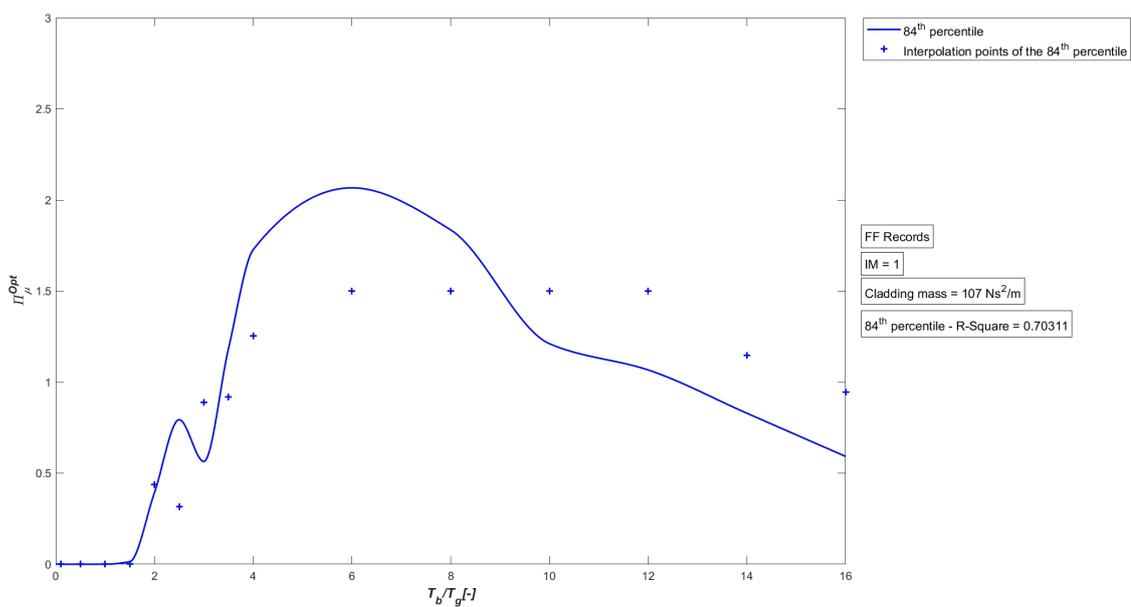


Figura 9.448: Sismi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

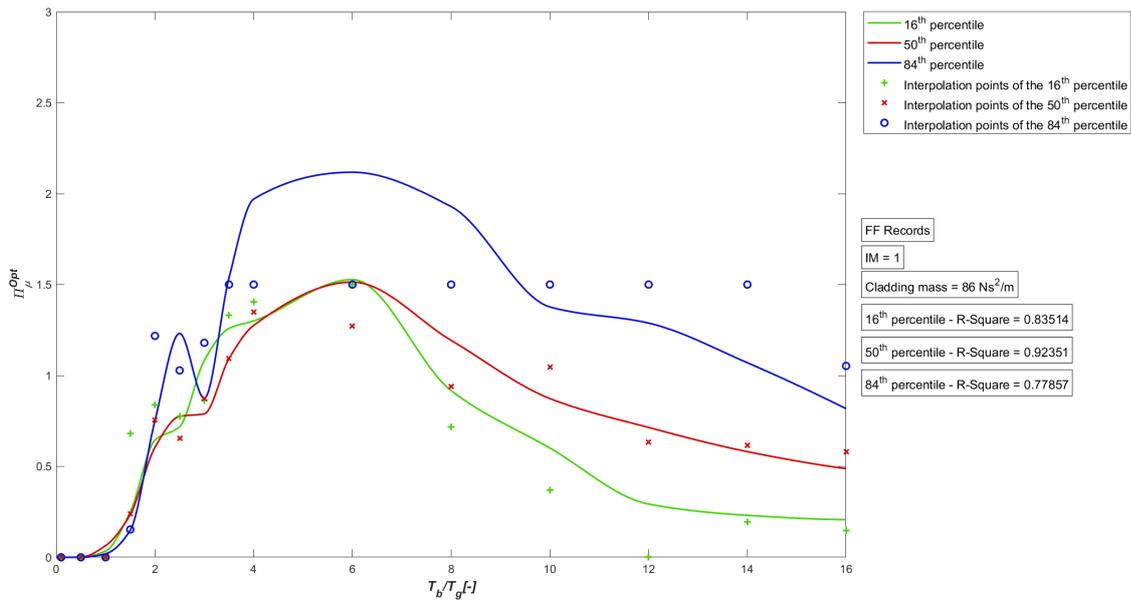


Figura 9.449: Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura pluristrato

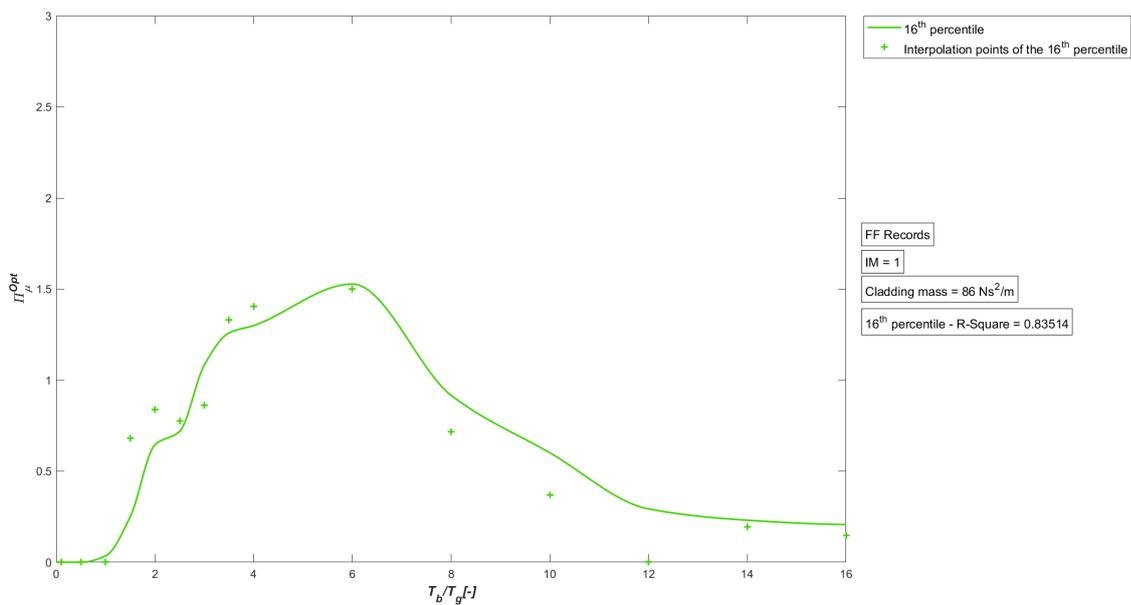


Figura 9.450: Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

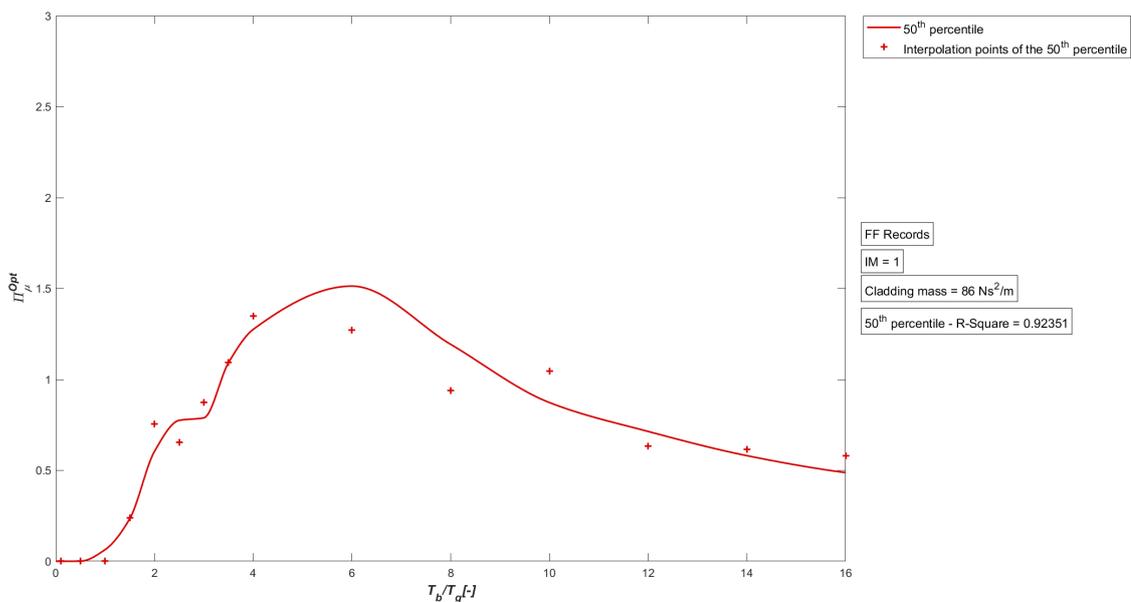


Figura 9.451: Sismi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

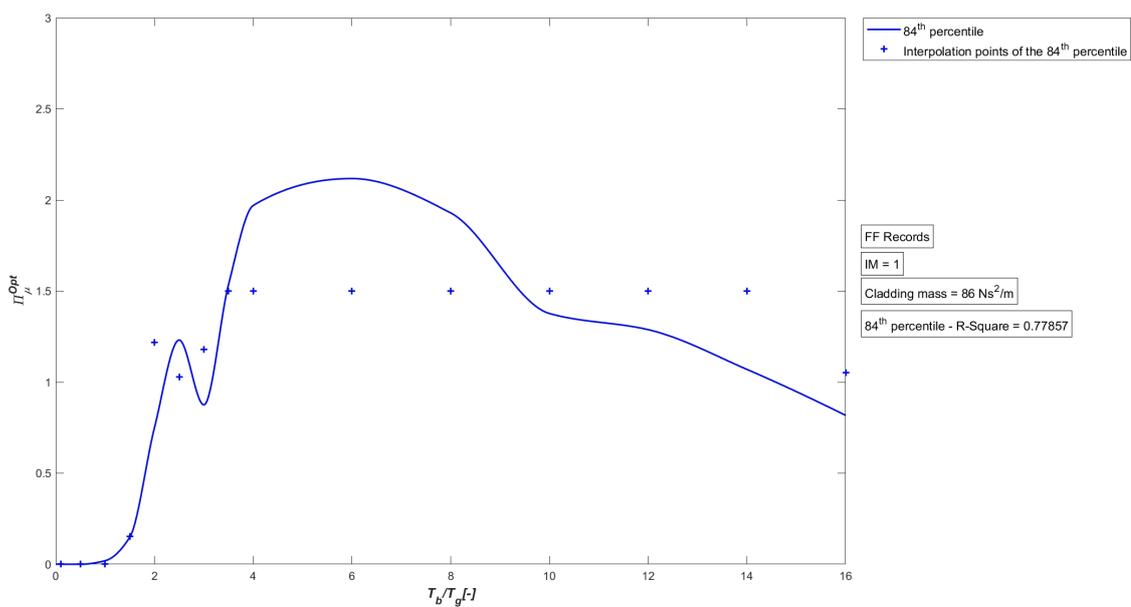


Figura 9.452: Sismi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

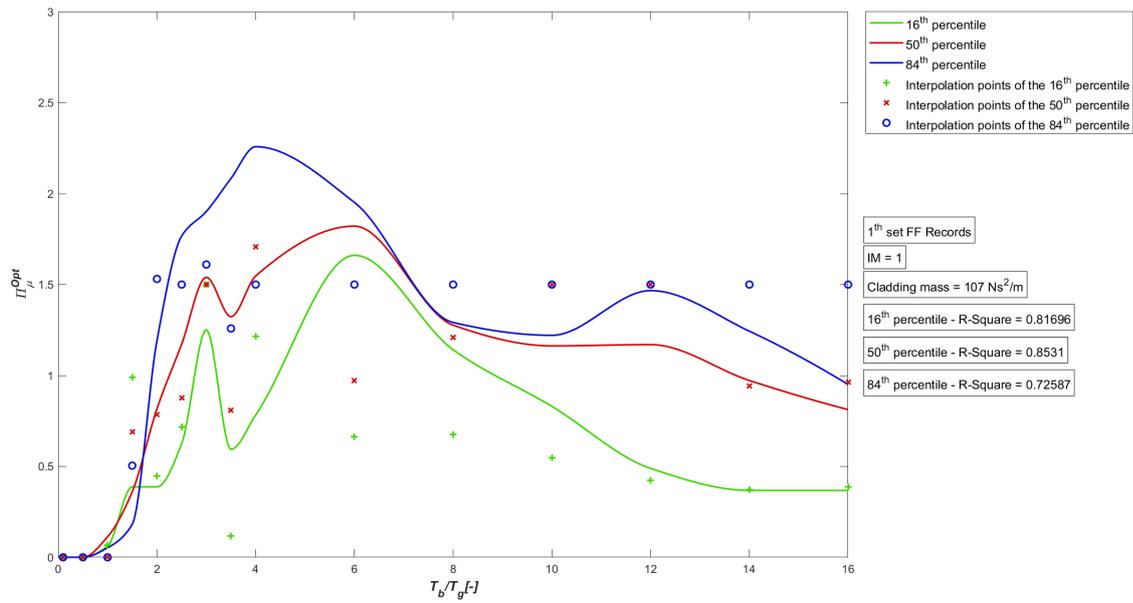


Figura 9.453: 1°set Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura monostrato

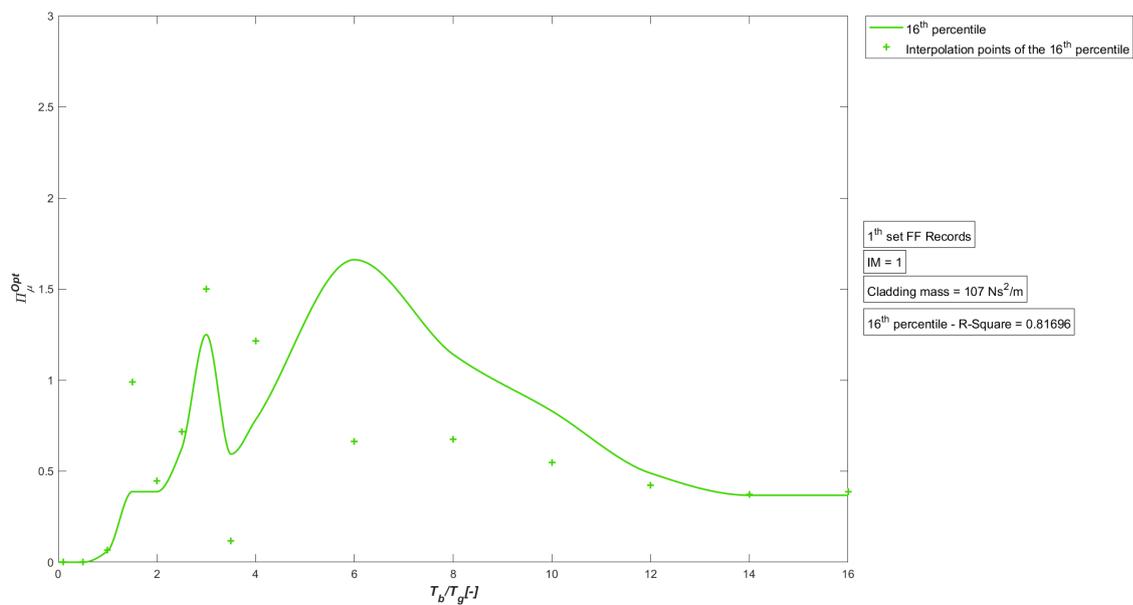


Figura 9.454: 1°set Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

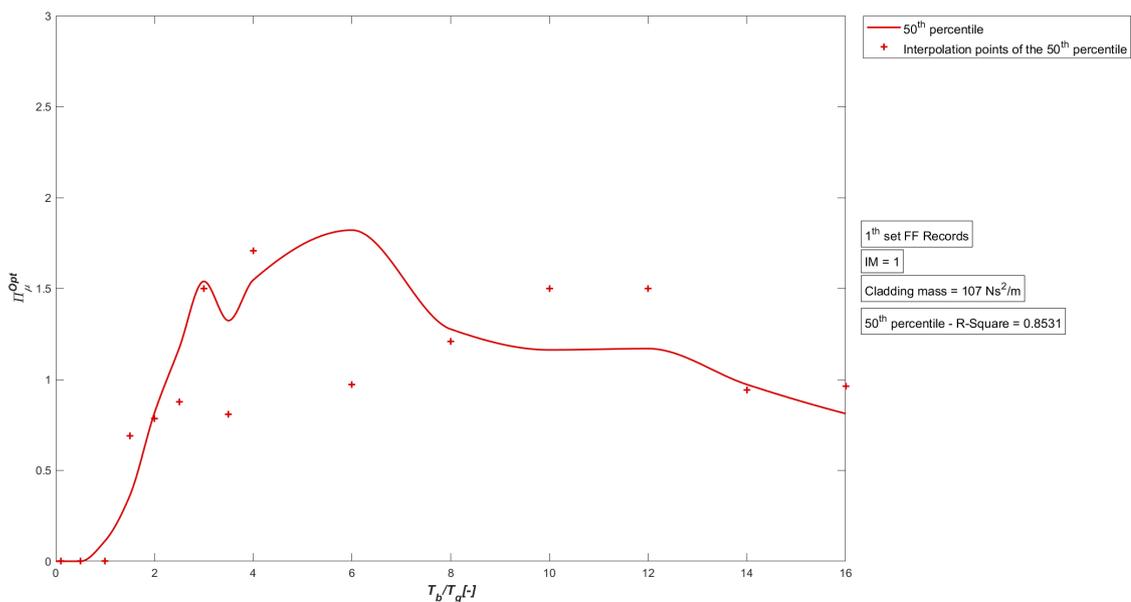


Figura 9.455: 1°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

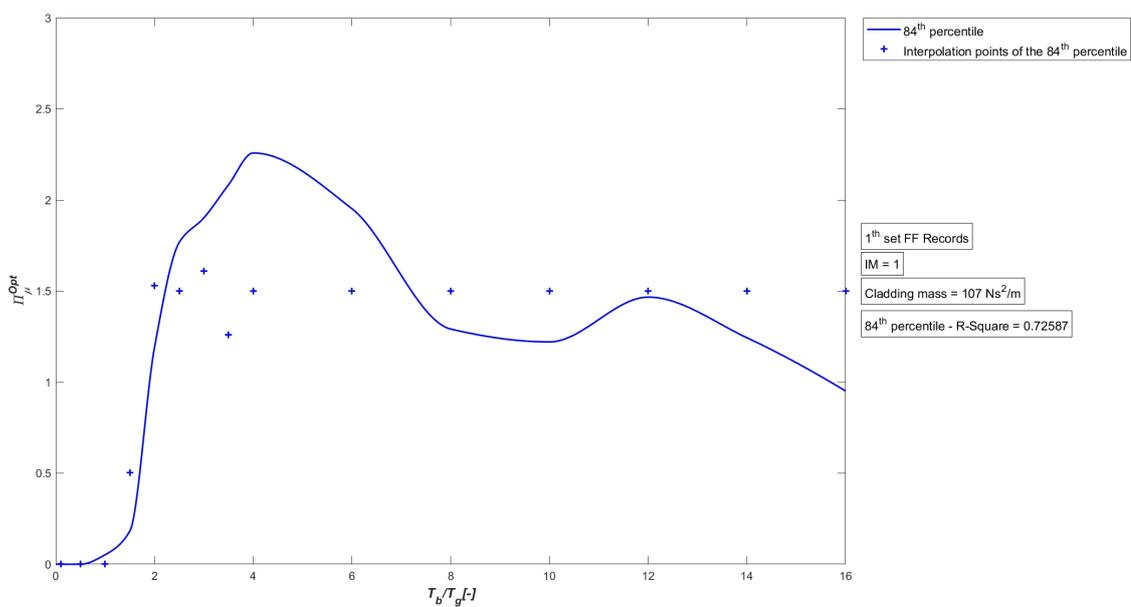


Figura 9.456: 1°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

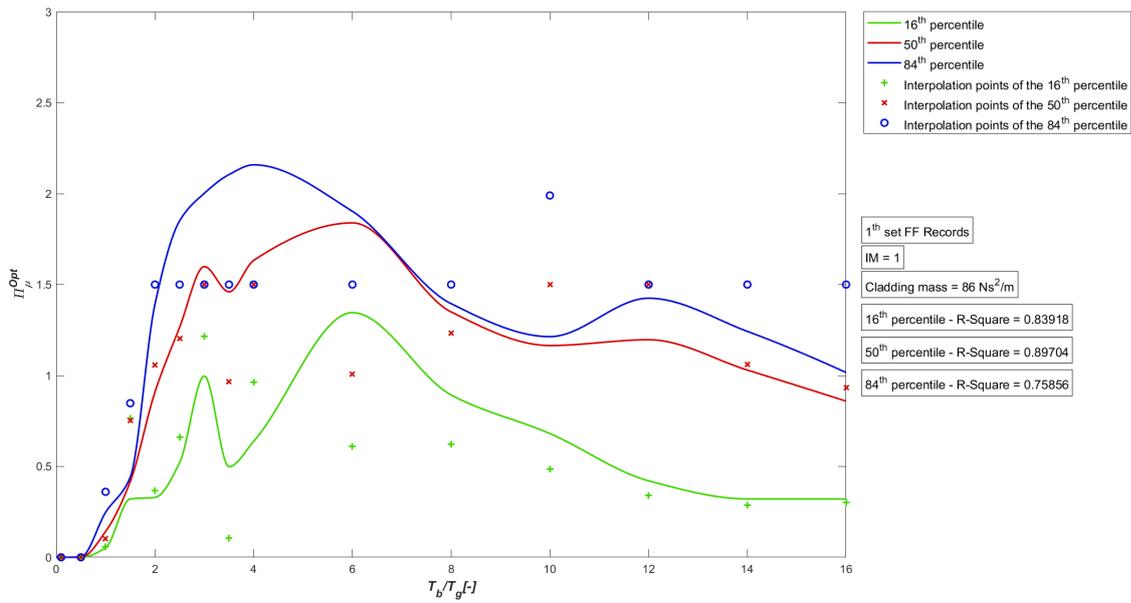


Figura 9.457: 1°set Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura pluristrato

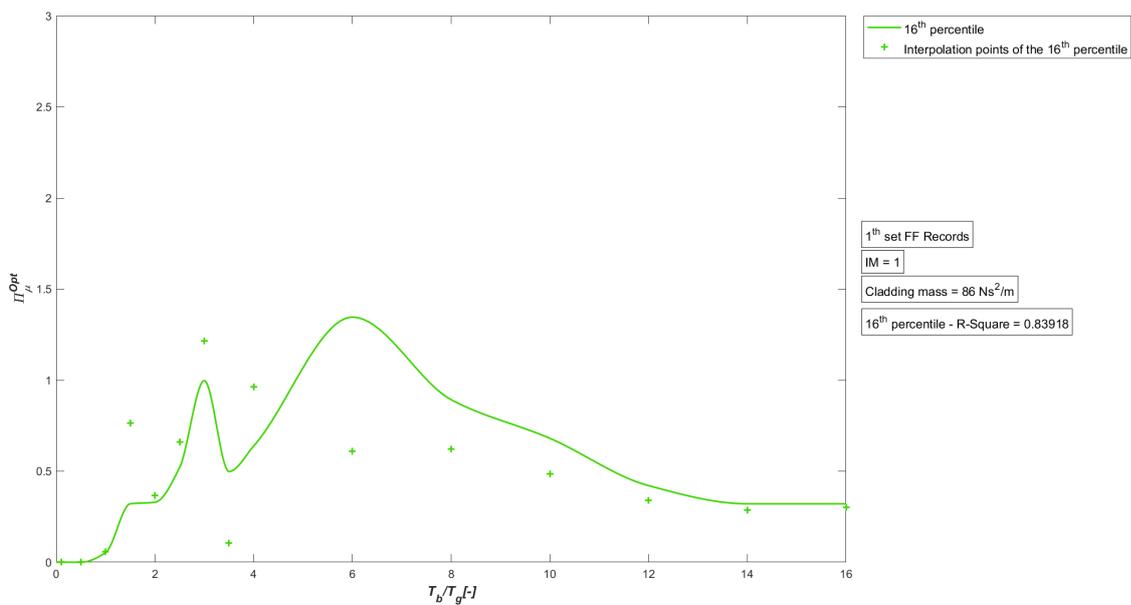


Figura 9.458: 1°set Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

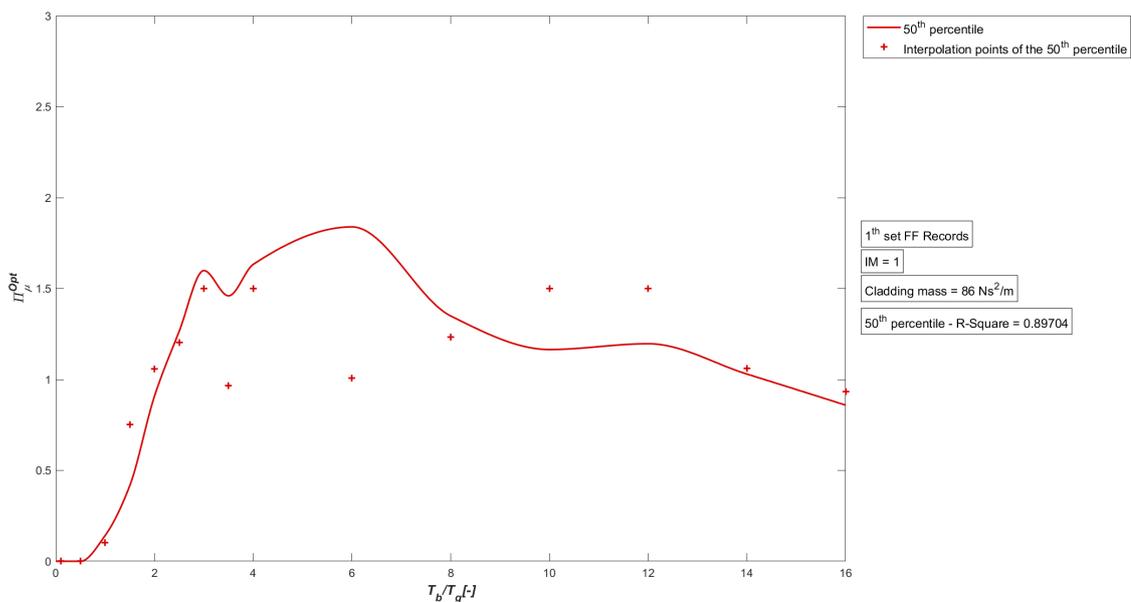


Figura 9.459: 1°set Sismi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

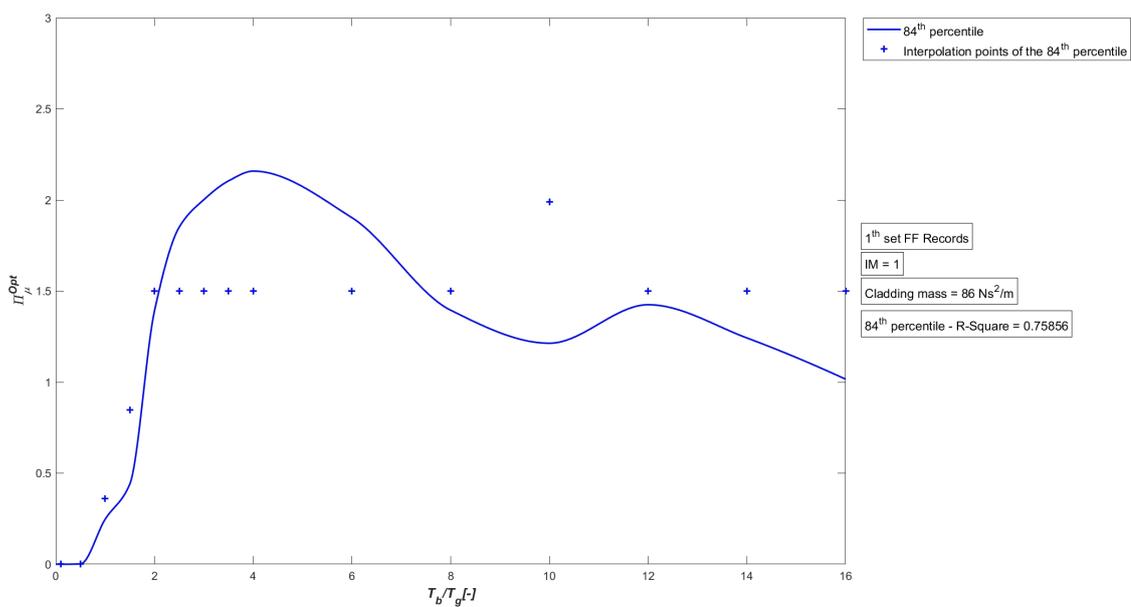


Figura 9.460: 1°set Sismi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

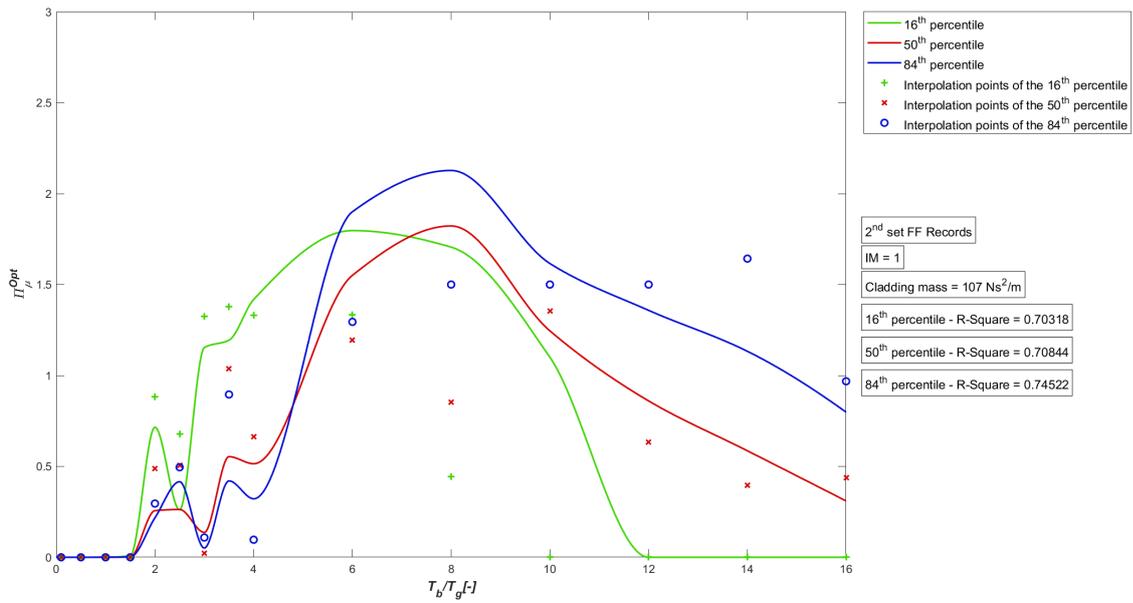


Figura 9.461: 2°set Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura monostrato

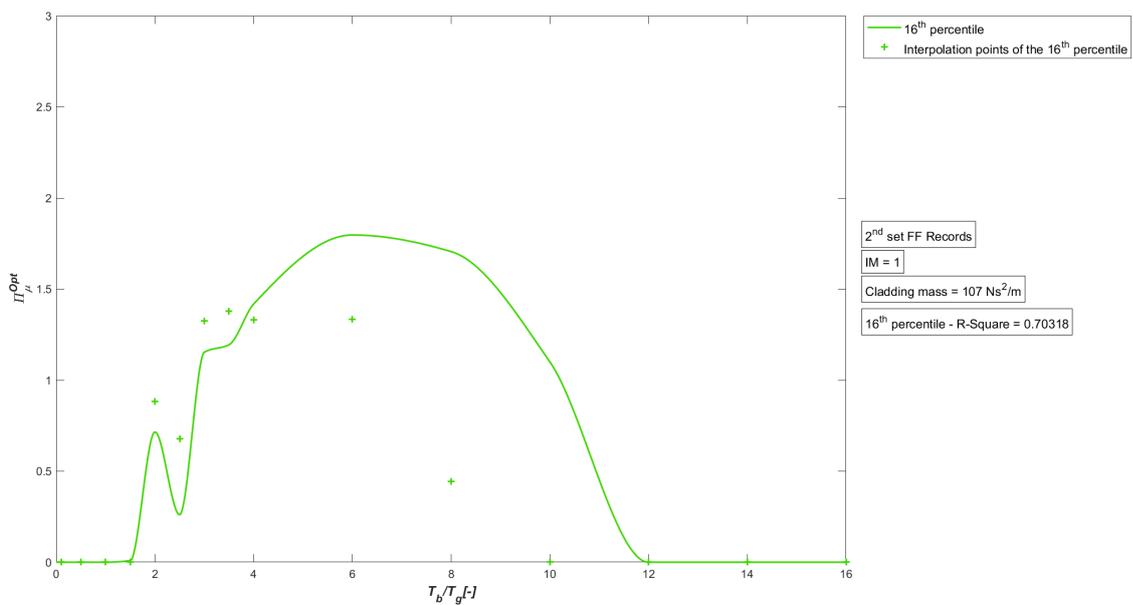


Figura 9.462: 2°set Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

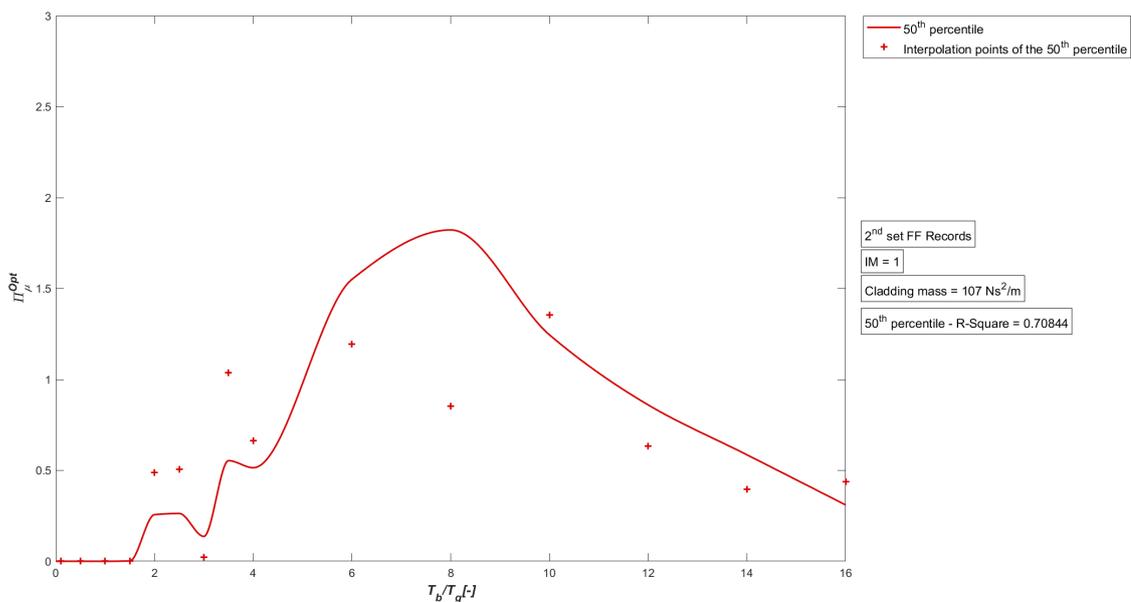


Figura 9.463: 2°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

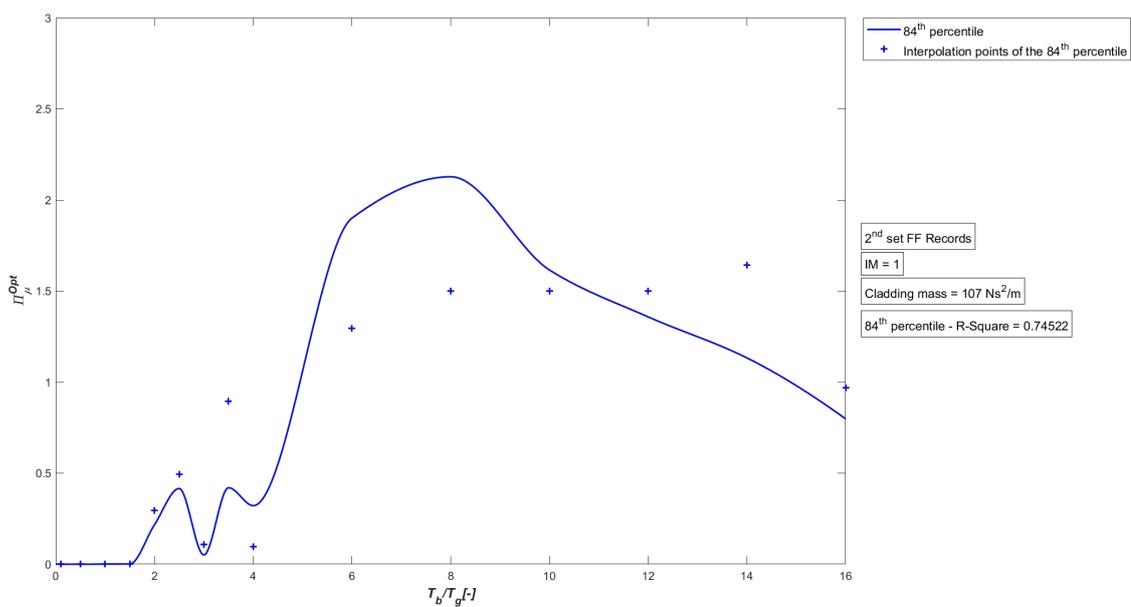


Figura 9.464: 2°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

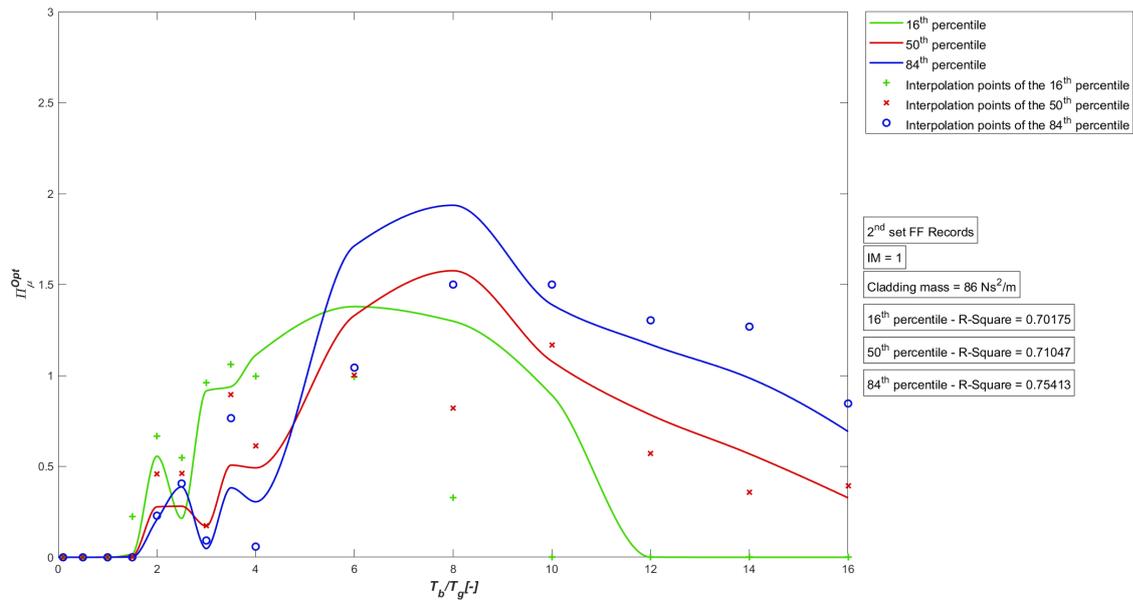


Figura 9.465: 2°set Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura pluristrato

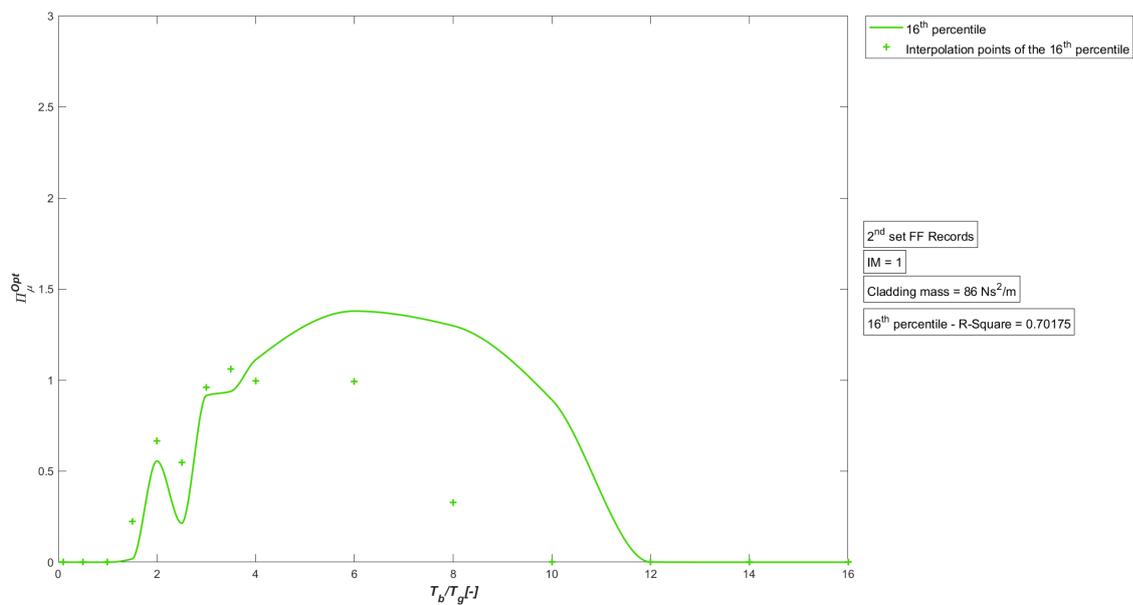


Figura 9.466: 2°set Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

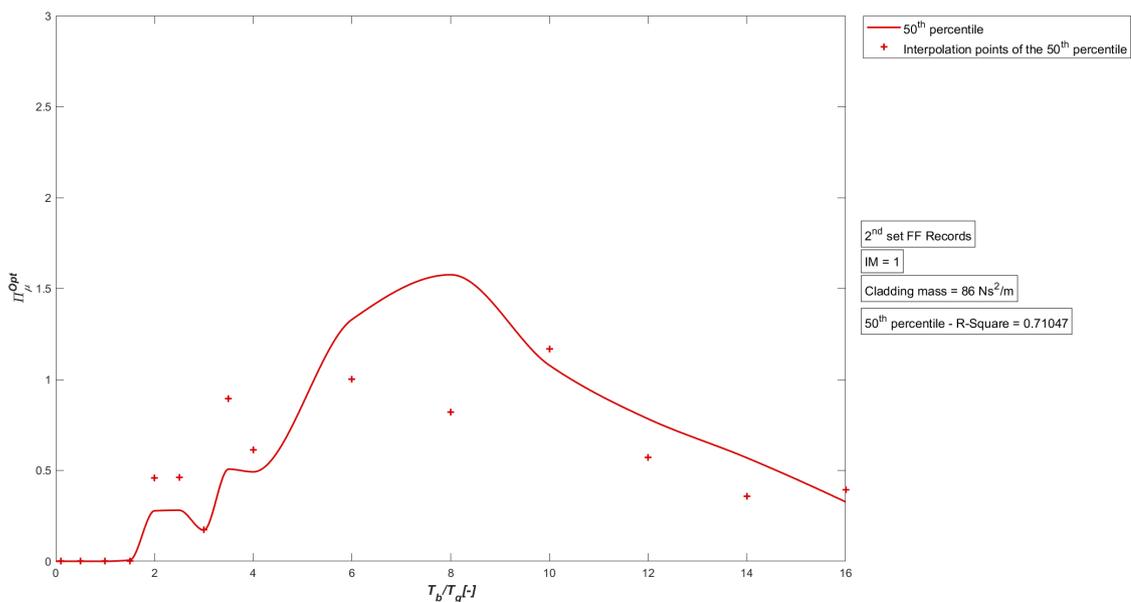


Figura 9.467: 2°set Sismi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

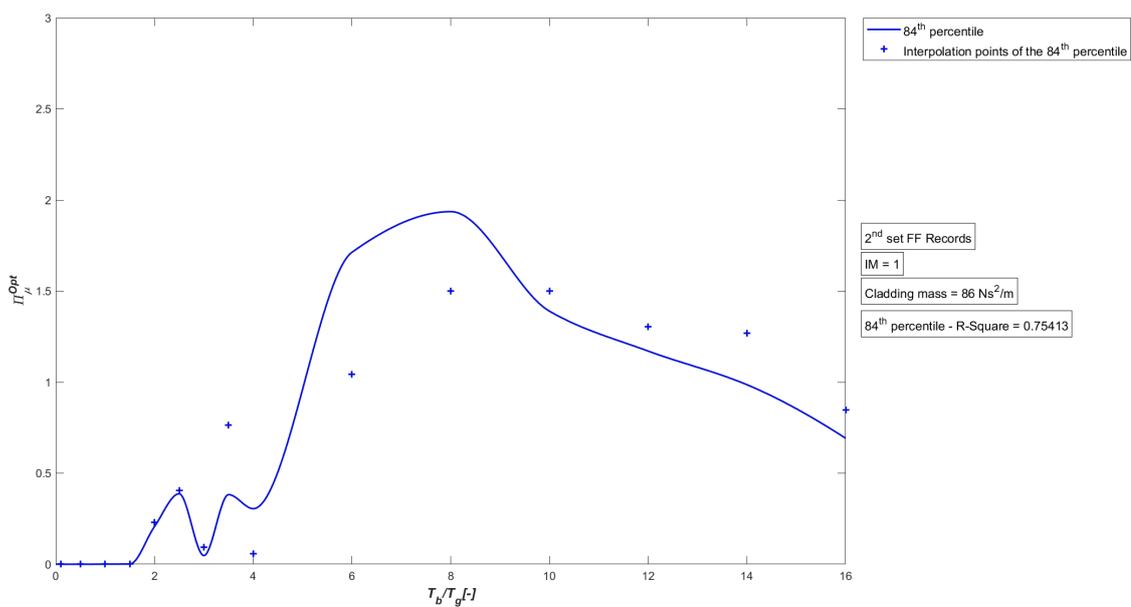


Figura 9.468: 2°set Sismi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

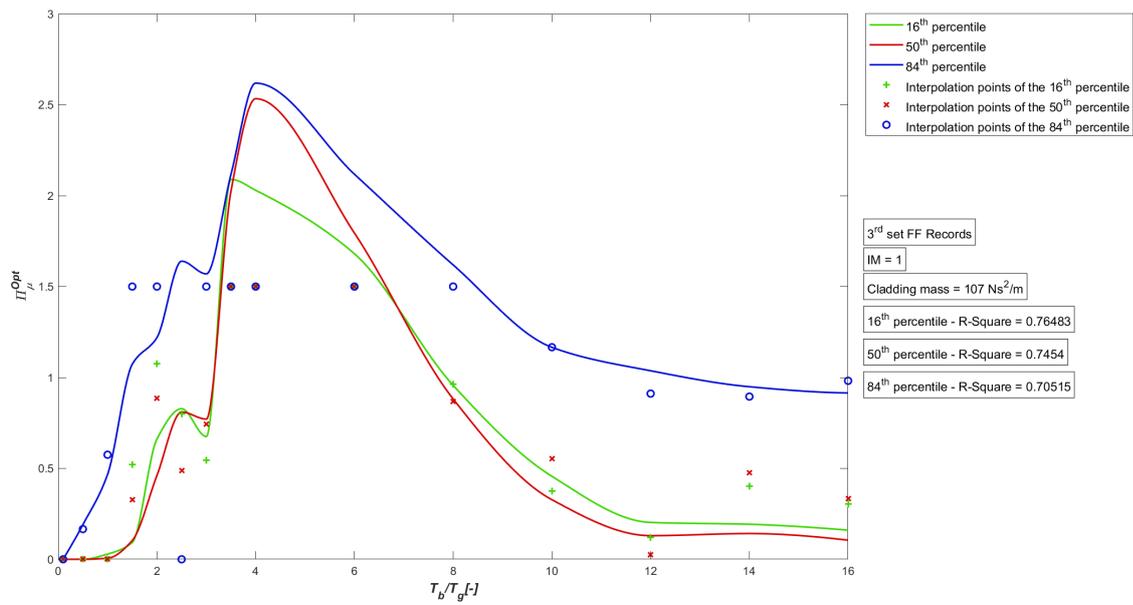


Figura 9.469: 3°set Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura monostrato

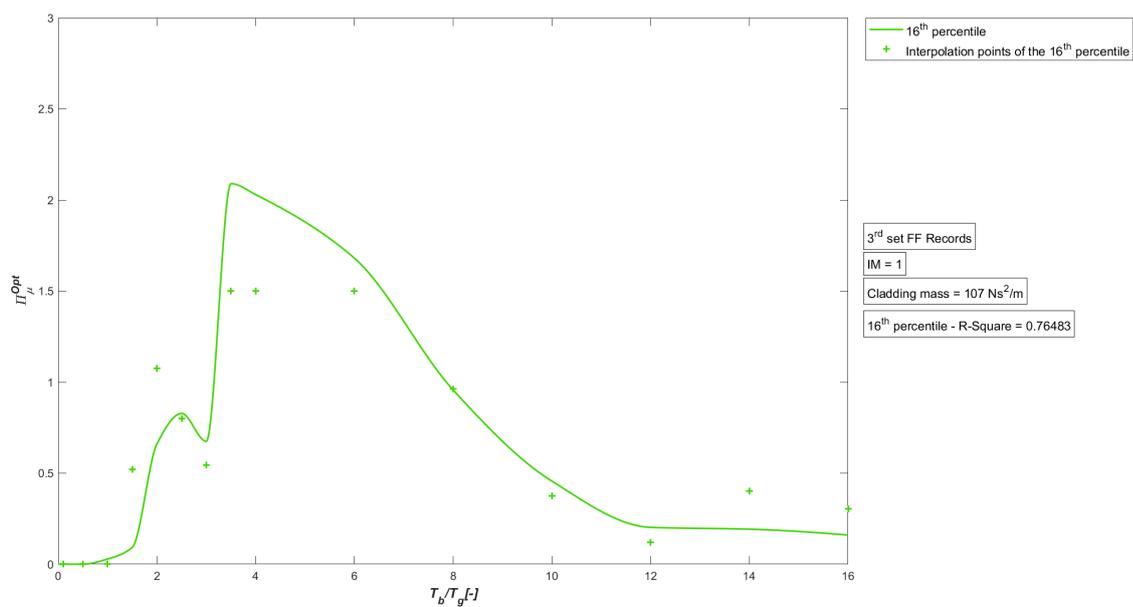


Figura 9.470: 3°set Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

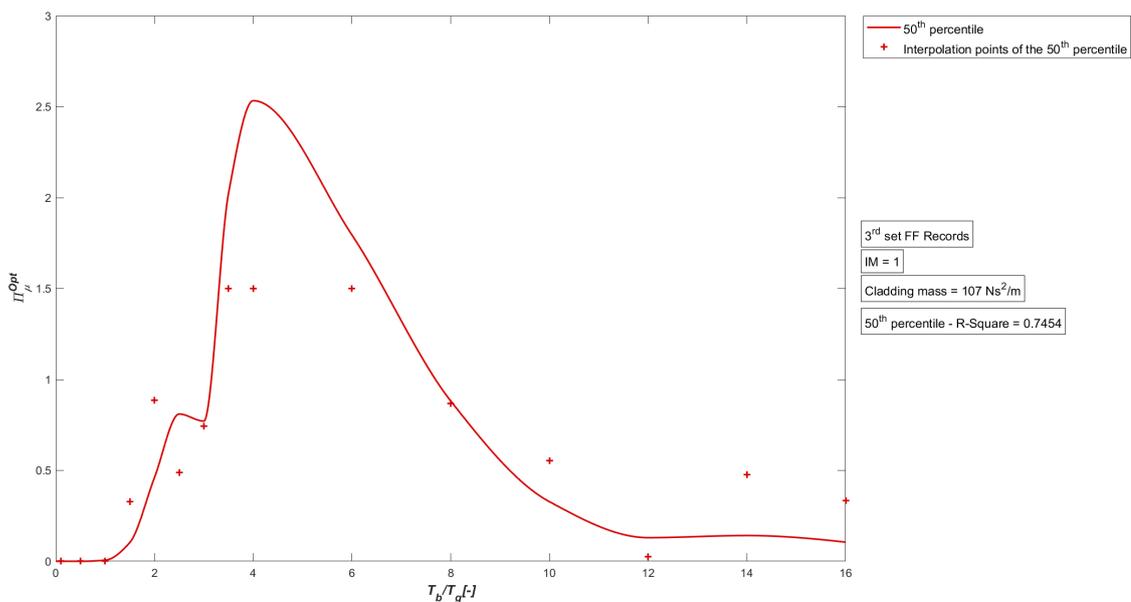


Figura 9.471: 3°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

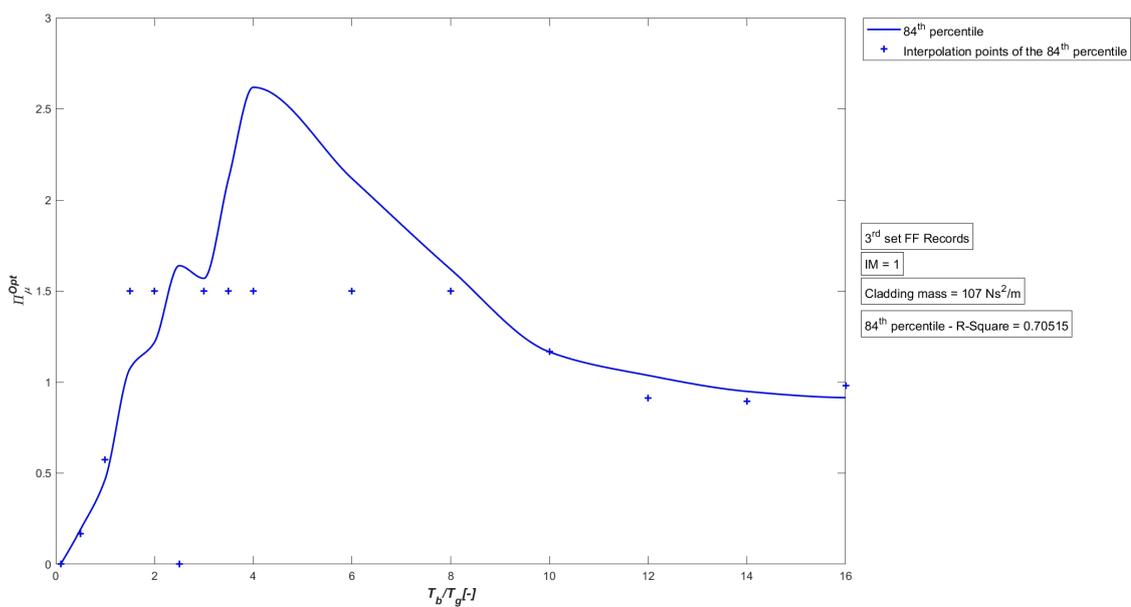


Figura 9.472: 3°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

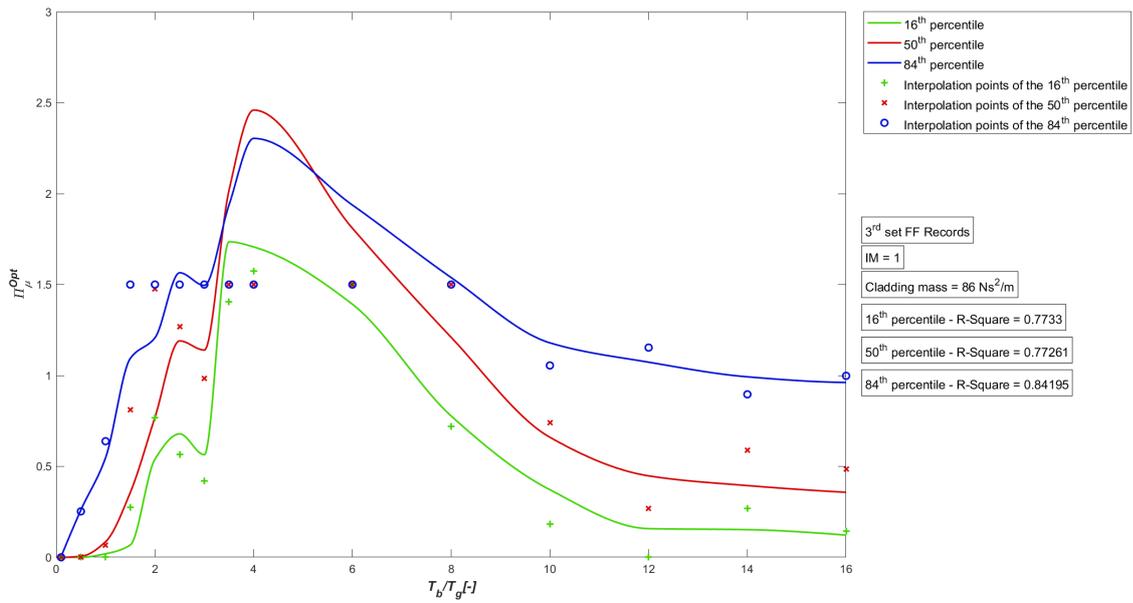


Figura 9.473: 3°set Sismi FF - Attrito ottimale - Tamponatura pluristrato

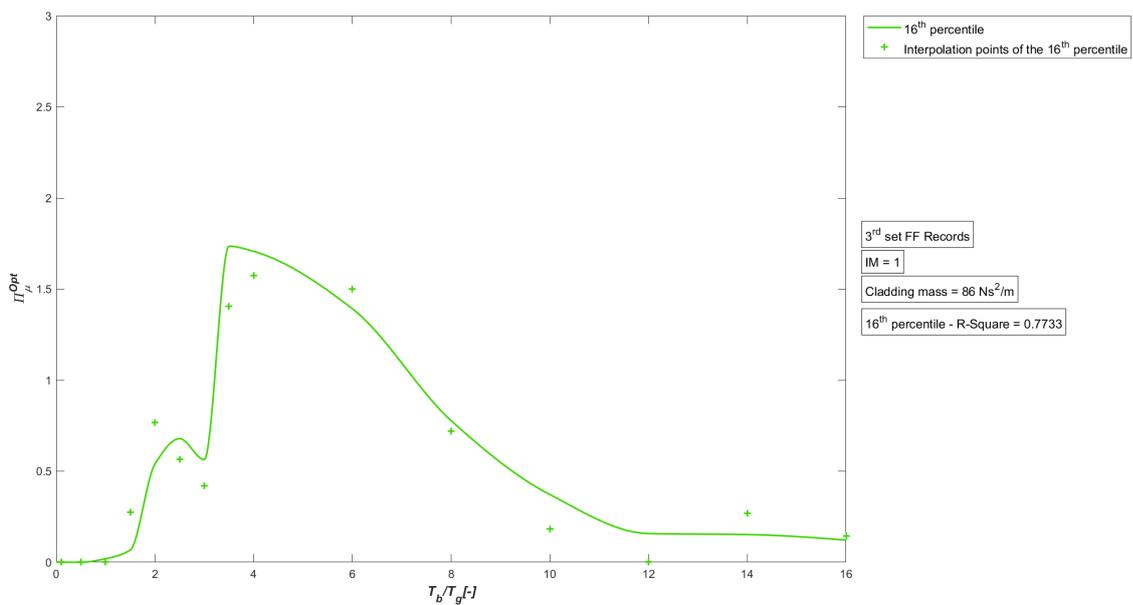


Figura 9.474: 3°set Sismi FF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

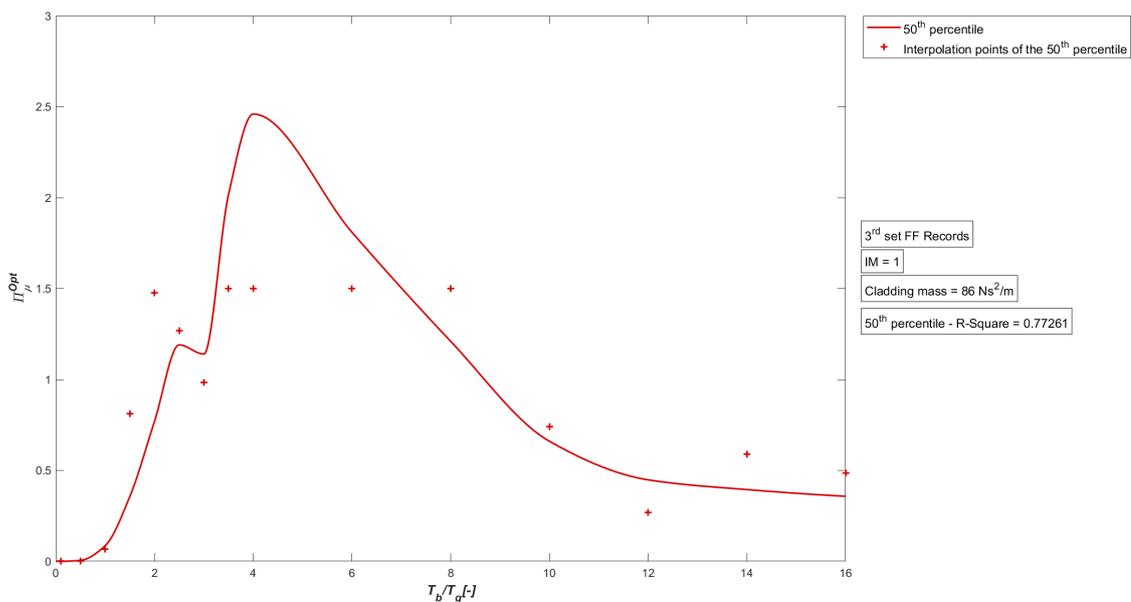


Figura 9.475: 3°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

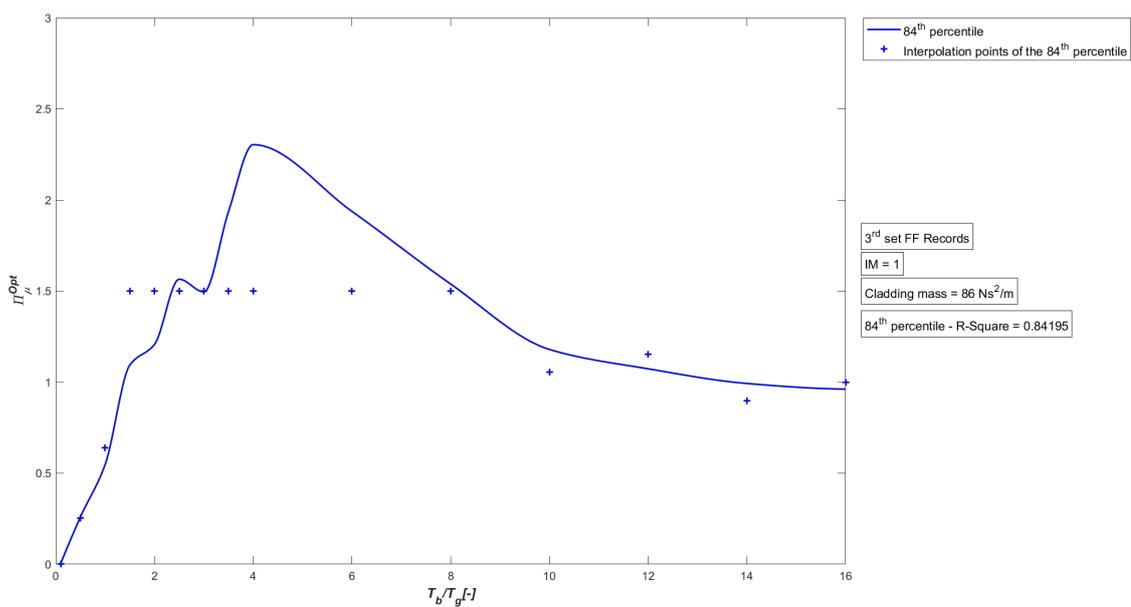


Figura 9.476: 3°set Sisimi FF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

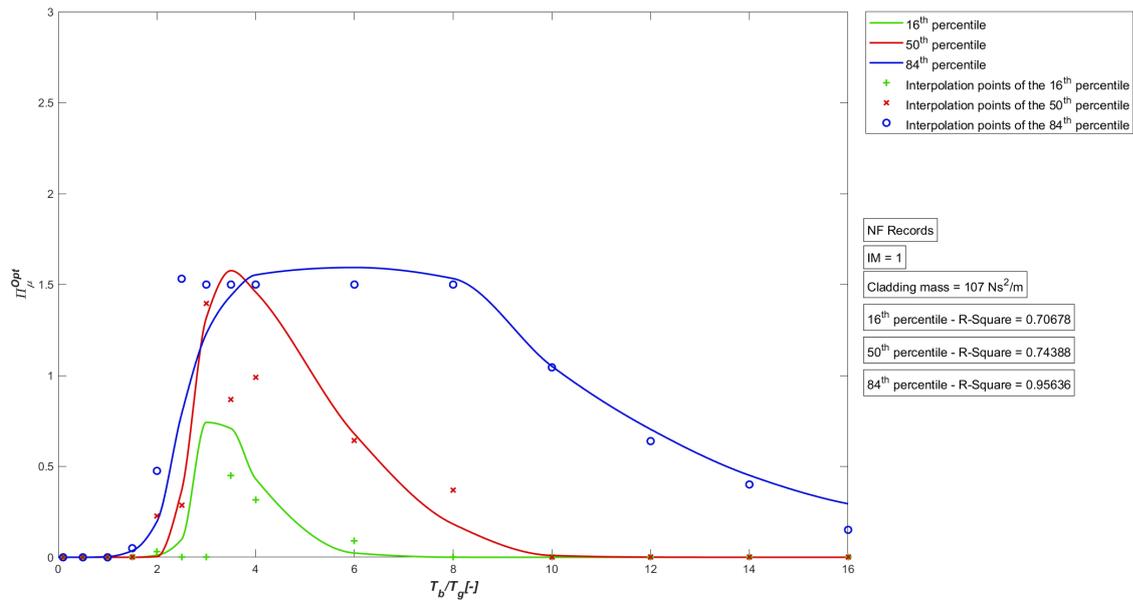


Figura 9.477: Sismi NF - Attrito ottimale - Tamponatura monostrato

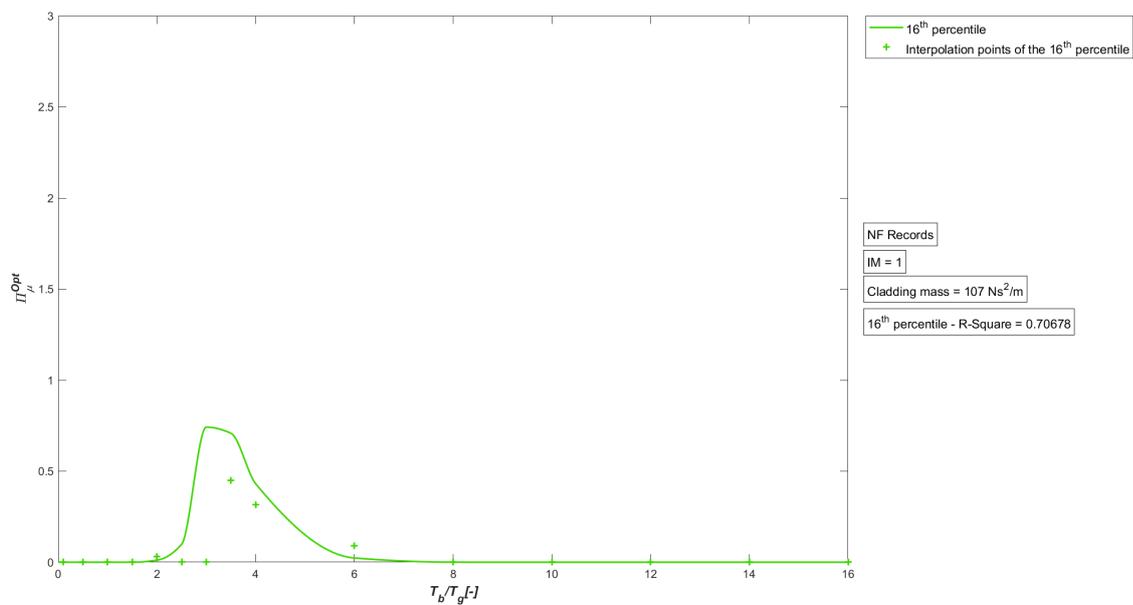


Figura 9.478: Sismi NF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

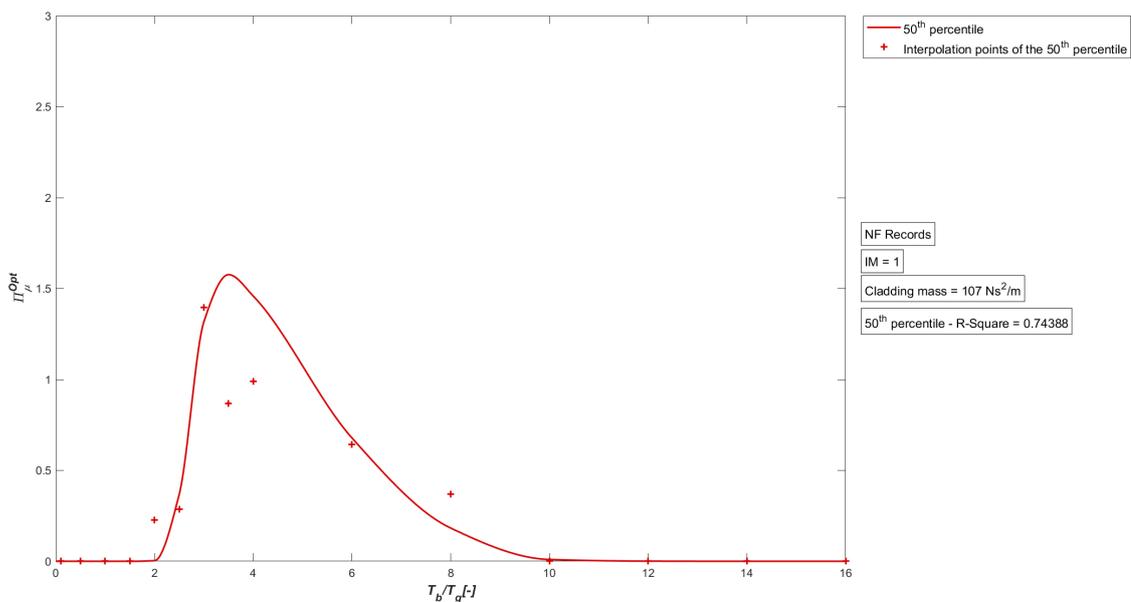


Figura 9.479: Sismi NF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

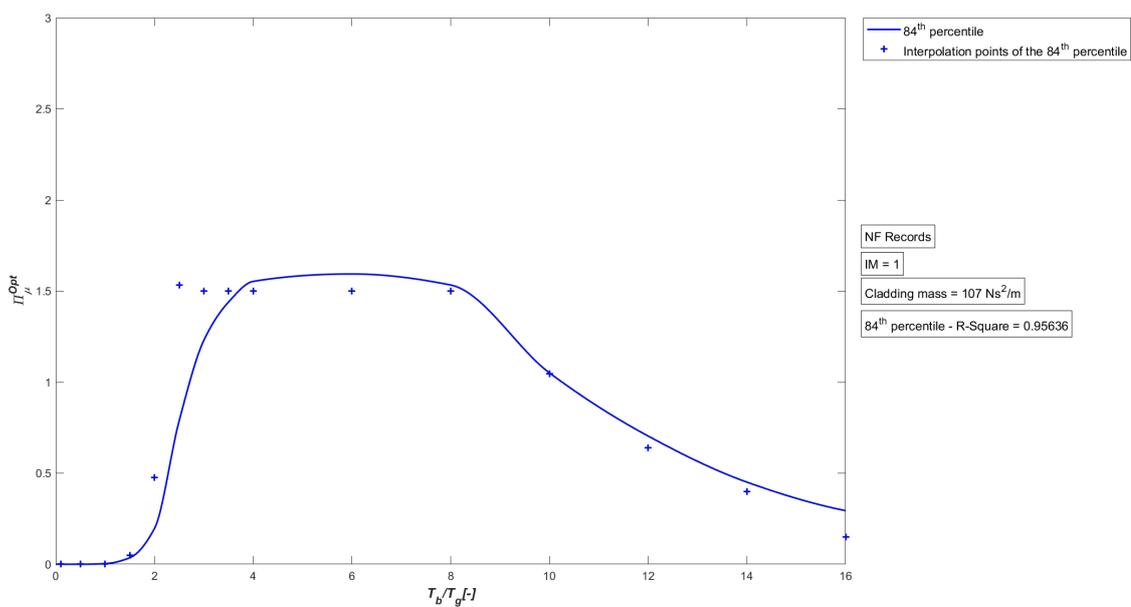


Figura 9.480: Sismi NF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

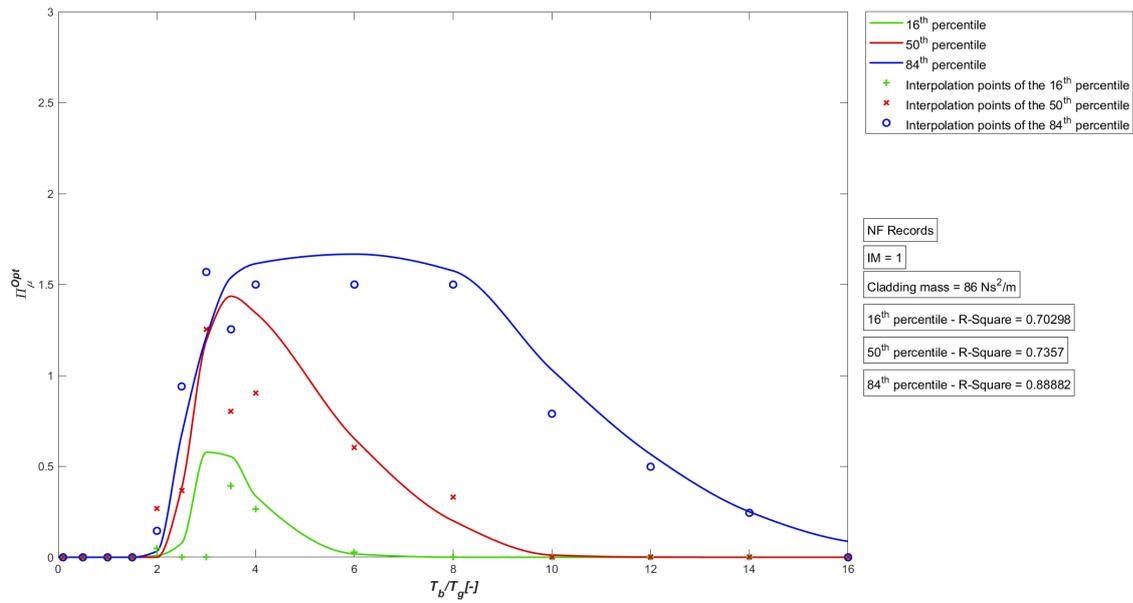


Figura 9.481: Sismi NF - Attrito ottimale - Tamponatura pluristrato

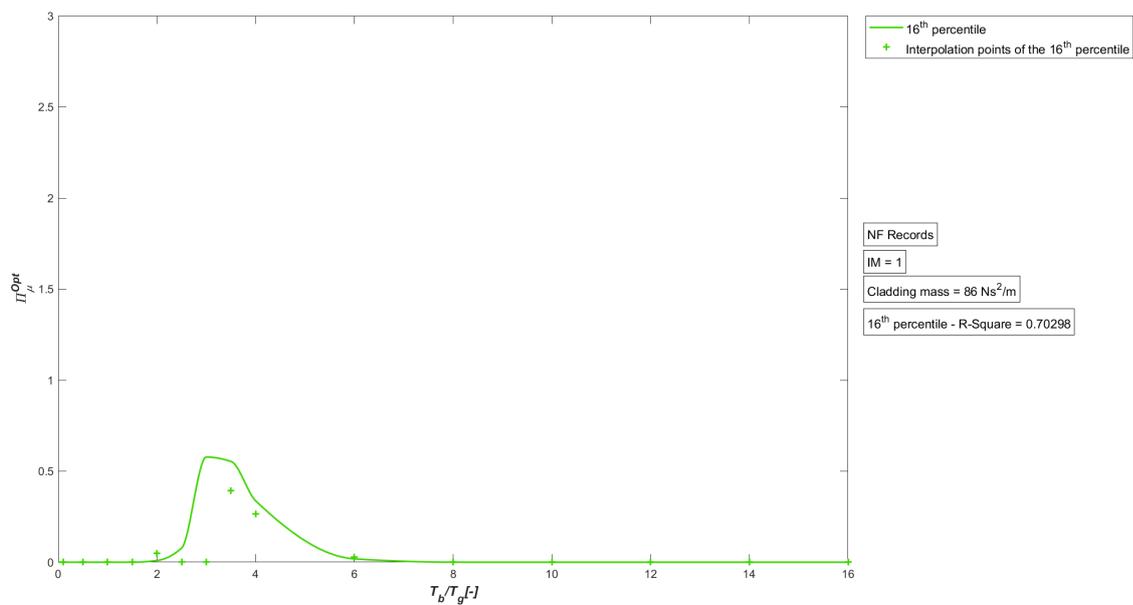


Figura 9.482: Sismi NF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

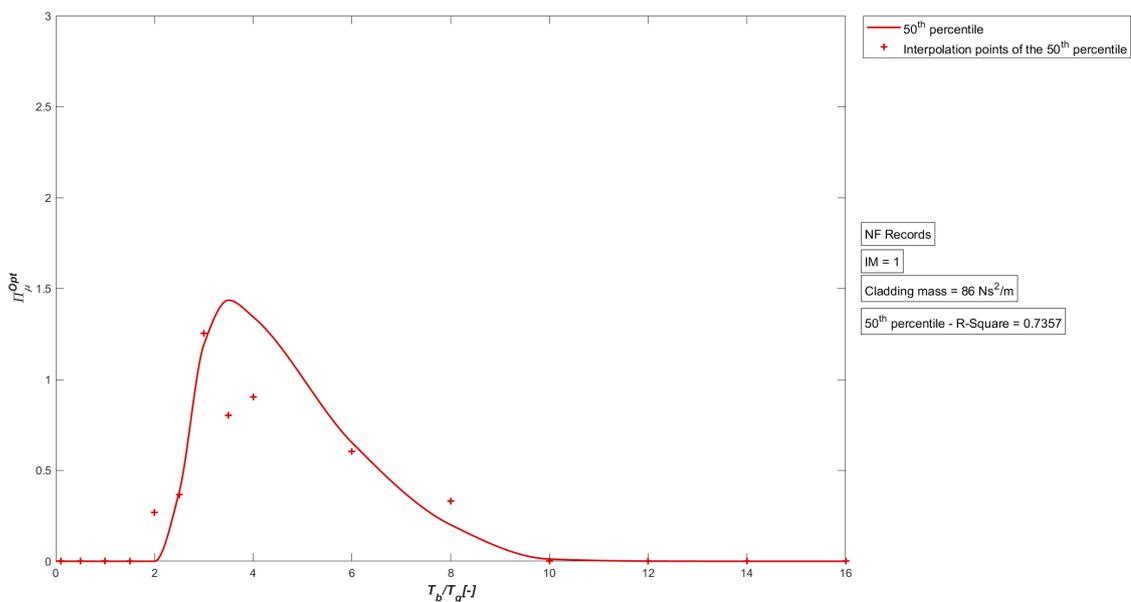


Figura 9.483: Sismi NF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

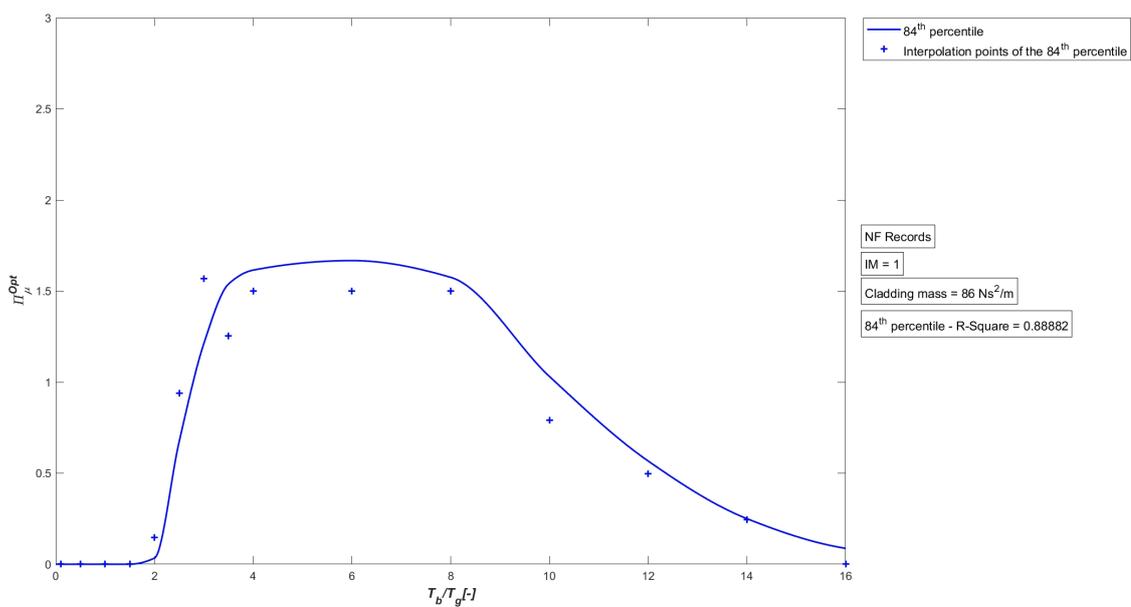


Figura 9.484: Sismi NF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

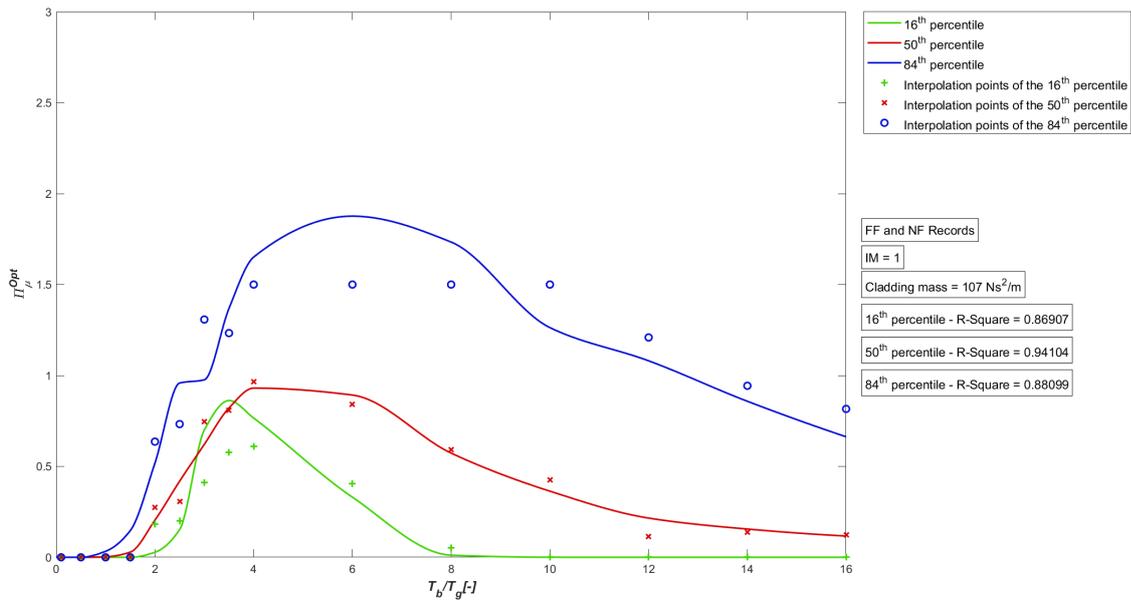


Figura 9.485: Sismi FF + NF - Attrito ottimale - Tamponatura monostrato

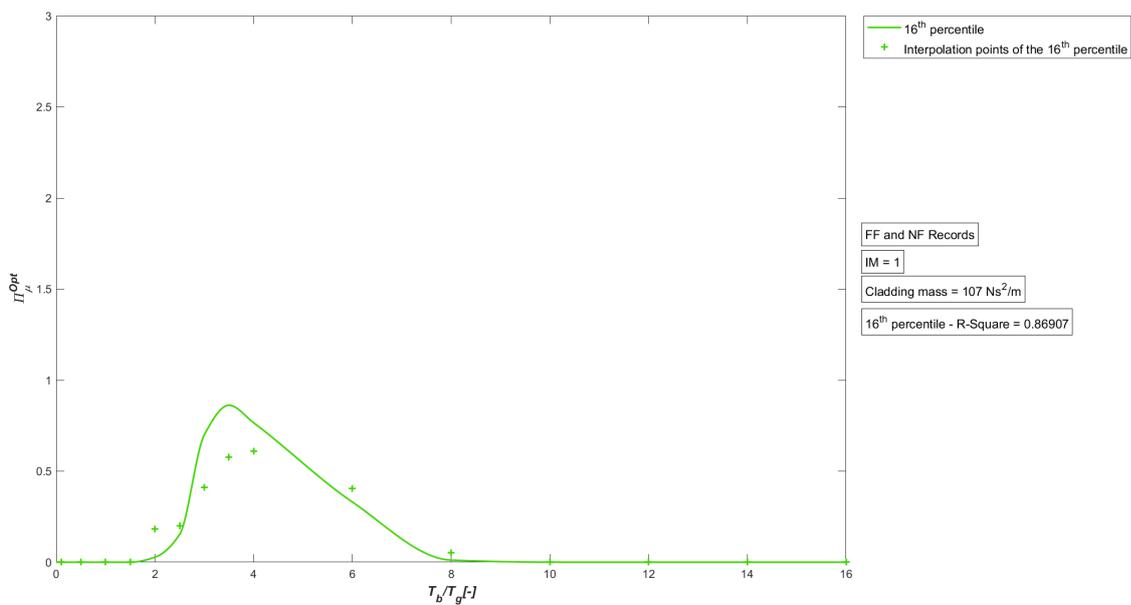


Figura 9.486: Sismi FF + NF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura monostrato

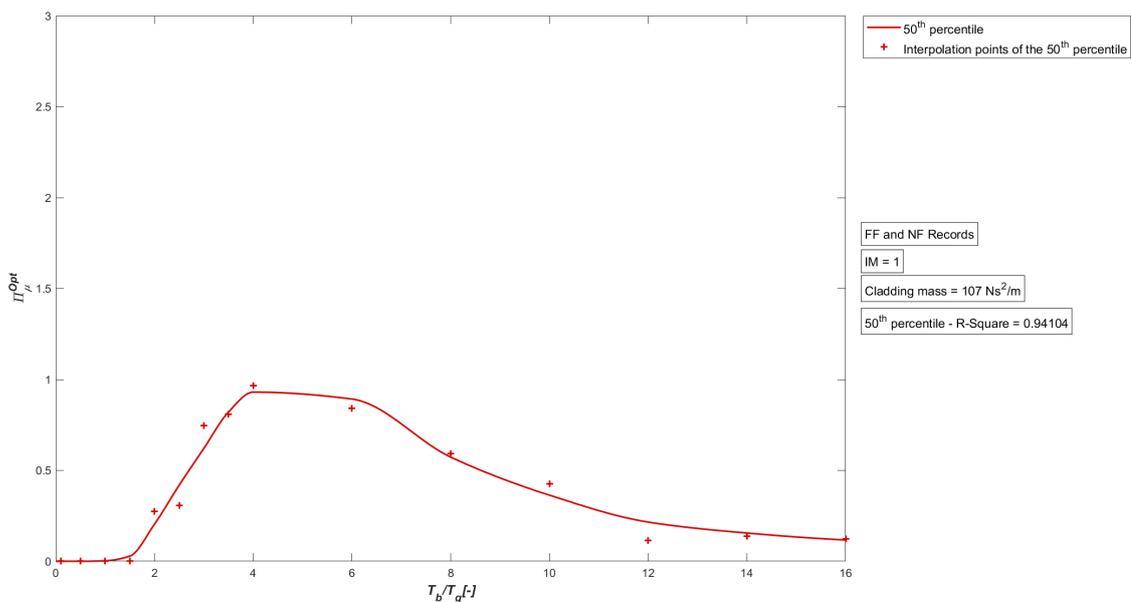


Figura 9.487: Sismi FF + NF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura monostrato

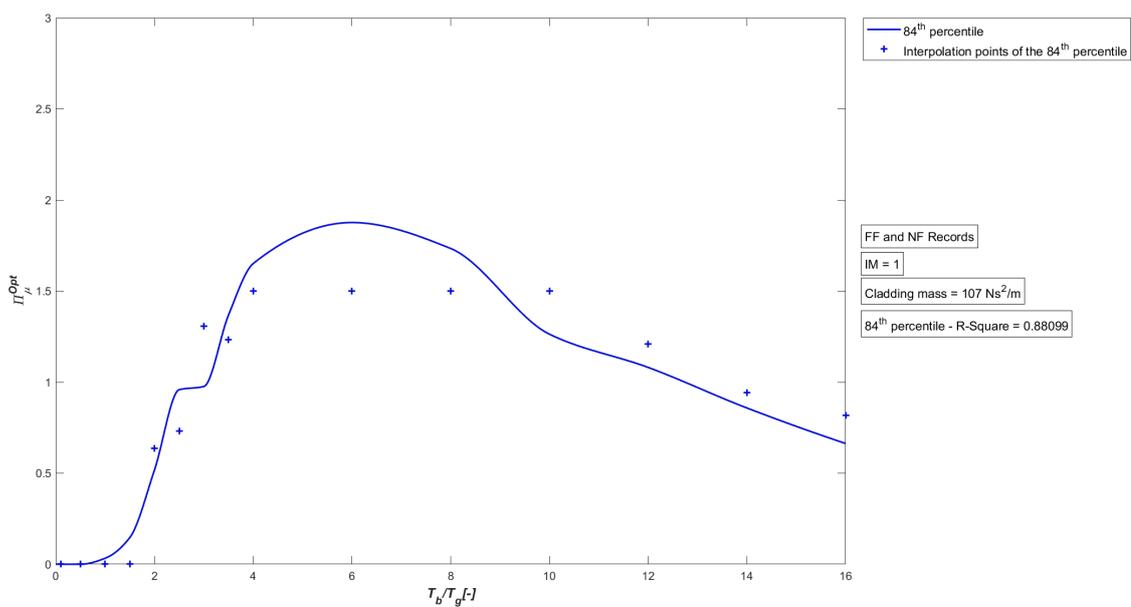


Figura 9.488: Sismi FF + NF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura monostrato

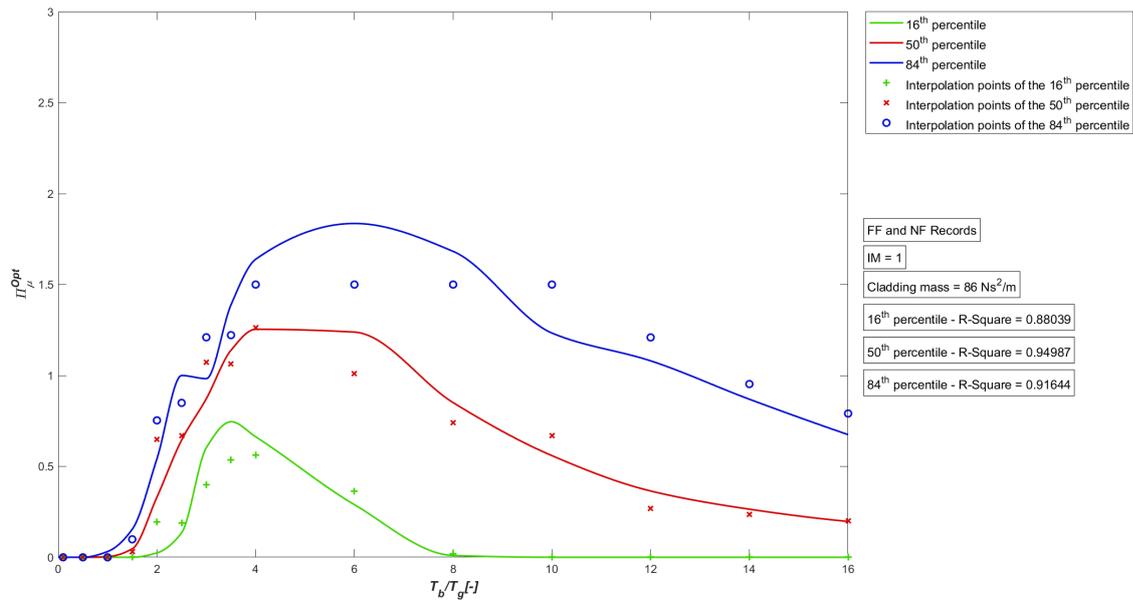


Figura 9.489: Sisimi FF + NF - Attrito ottimale - Tamponatura pluristrato

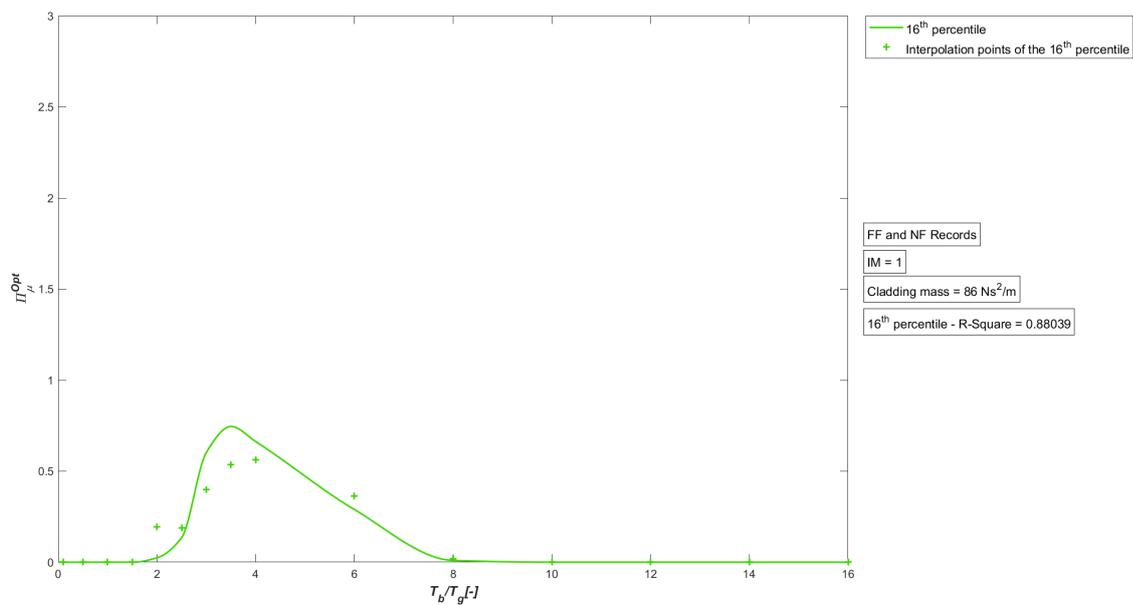


Figura 9.490: Sisimi FF + NF - Attrito ottimale - 16° Percentile - Tamponatura pluristrato

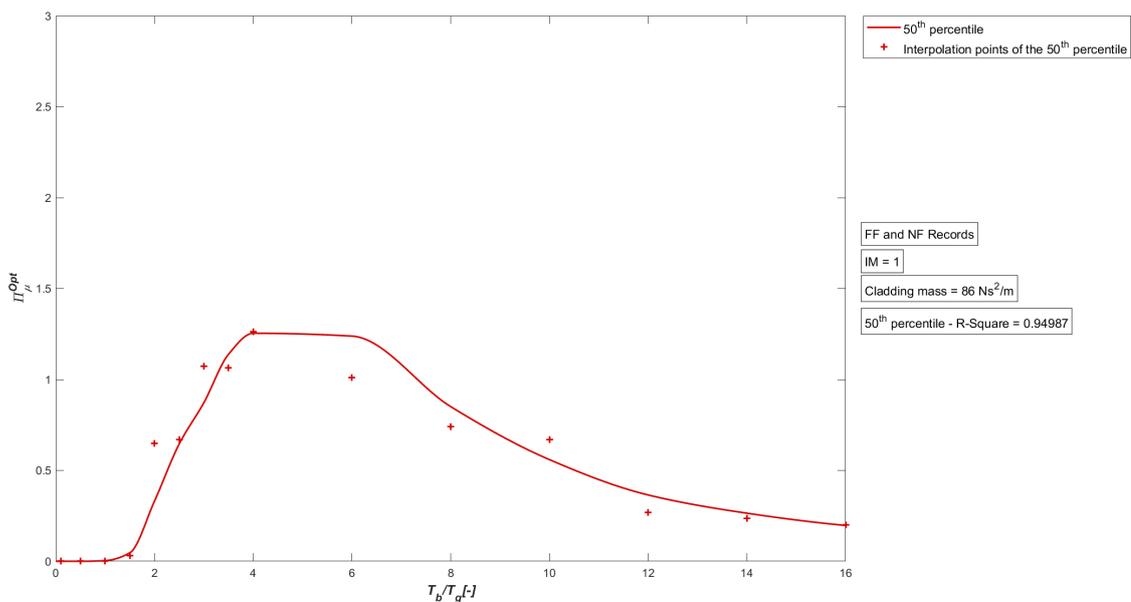


Figura 9.491: Sismi FF + NF - Attrito ottimale - 50° Percentile - Tamponatura pluristrato

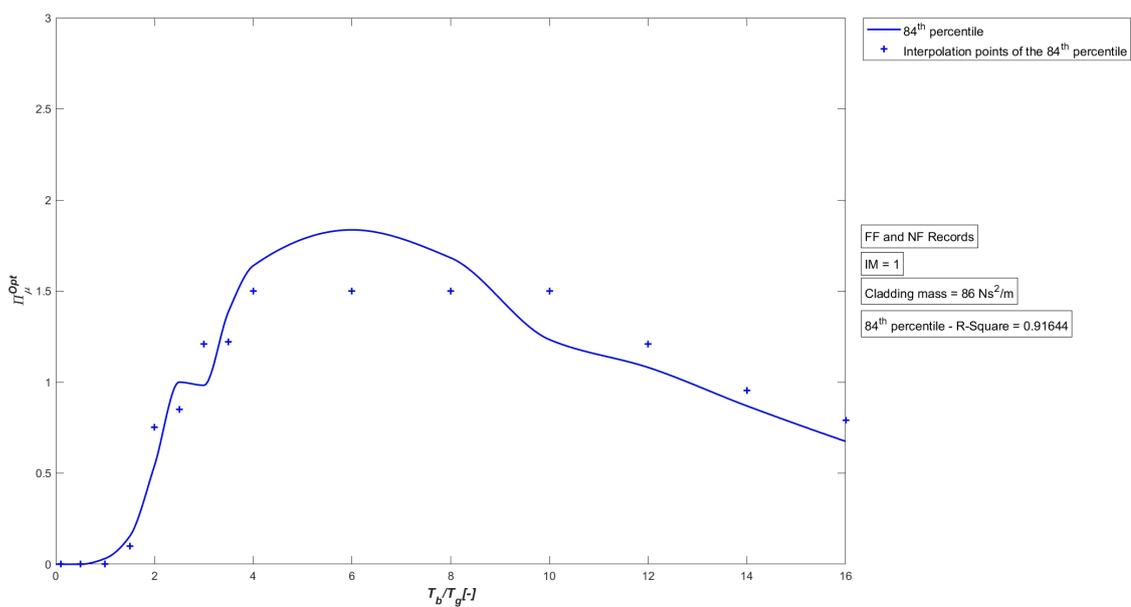


Figura 9.492: Sismi FF + NF - Attrito ottimale - 84° Percentile - Tamponatura pluristrato

Capitolo 10

Conclusioni

Lo scopo del presente studio è stato valutare l'affidabilità sismica in termini prestazionali, di elementi non strutturali isolati alla base con dispositivi attritivi a pendolo scorrevole (FPS: Friction Pendulum System) con la finalità di fornire abachi e metodologie di progetto su base prestazionale e in particolare verificare se il parametro PGA/PGV (PGA: Peak Ground Acceleration; PGV: Peak Ground Velocity) è in grado di governare il sistema descritto nel *capitolo 8*, nel quale viene descritto il caso studio in esame. Dai risultati inerenti all'analisi delle dieci strutture in esame modellate tramite i telai Shear-Type descritti in precedenza, si può affermare che il parametro PGA/PGV è un buon parametro per descrivere il contenuto in frequenza ed altre caratteristiche del moto sismico. A favore di tale affermazione infatti, con riferimento ai grafici mostrati nelle *sezioni 9.1, 9.2, 9.3*, si può osservare come le differenze riscontrate tra i grafici con IM (Intensity Measure) non normalizzata e i grafici con IM normalizzata o tramite PGA o tramite lo spettro di risposta, siano minime e perlopiù assimilabili ad approssimazioni matematiche nei calcoli del programma *Mathworks-MATLAB* utilizzato.

Per quanto riguarda i grafici bidimensionali $(\Pi_\mu ; \psi_s(\tau))$ e $(\frac{T_b}{T_g} ; \Pi_\mu^{Opt})$ inerenti all'analisi del sistema isolato composto dall'isolatore FPS (Friction Pendulum System) e dalla tamponatura, possiamo riscontrare alcune differenze riguardanti il parametro *R-square*, il quale risulta più basso (circa 0.7) nei grafici inerenti ai tre set di sismi FF (Far-Field), pertanto in questi casi la bontà dell'approssimazione risulterà minore, mentre analizzando i set di sismi FF insieme il parametro *R-square* risulta maggiore (circa 0.8) pertanto l'approssimazione risulta migliore. Quanto ai grafici bidimensionali $(\Pi_\mu ; \psi_s(\tau))$ e $(\frac{T_b}{T_g} ; \Pi_\mu^{Opt})$ inerenti ai sismi NF (Near-Fault) e i grafici bidimensionali $(\Pi_\mu ; \psi_s(\tau))$ e $(\frac{T_b}{T_g} ; \Pi_\mu^{Opt})$ inerenti alla totalità dei sismi in esame (considerando sia i sismi FF che NF), possiamo affermare che il valore del parametro *R-square* si aggira intorno al range di valori 0.8-0.9, pertanto tali approssimazioni risultano molto valide.

Inoltre i grafici bidimensionali $(\frac{T_b}{T_g} ; \Pi_\mu^{Opt})$ presentano un andamento che si può definire "spettrale", raggiungendo i valori massimi nell'intorno del range $\frac{T_b}{T_g} = 4 \div 8$.

Infine possiamo affermare che tramite i grafici mostrati nel *capitolo 9*, è possibile valutare i parametri meccanici ottimali dei dispositivi di isolamento FPS applicati ad elementi non strutturali in particolare la loro affidabilità sismica. Partendo dai grafici $(PV/PA - PGV/PGA ; Floor)$ si può individuare il periodo di vibrazione

di ogni piano della nostra struttura in esame tramite il rapporto tra PV/PA, che indica il rapporto tra il valore medio delle risposte massime dei sismi in esame in termini di velocità e il valore medio delle risposte massime dei sismi in esame in termini di accelerazioni. Tale procedimento viene mostrato in *figura 10.1* per la struttura 09 in esame prendendo come riferimento il sesto piano e andando ad analizzare il cinquantesimo percentile ($p_{50}(\%)$), inoltre il valore così trovato viene chiamato T_g che in genere indica il periodo di vibrazione del suolo ma in questo caso indica il periodo di vibrazione del piano considerato, che per le tamponature del piano in esame è come fosse il periodo di vibrazione del suolo.

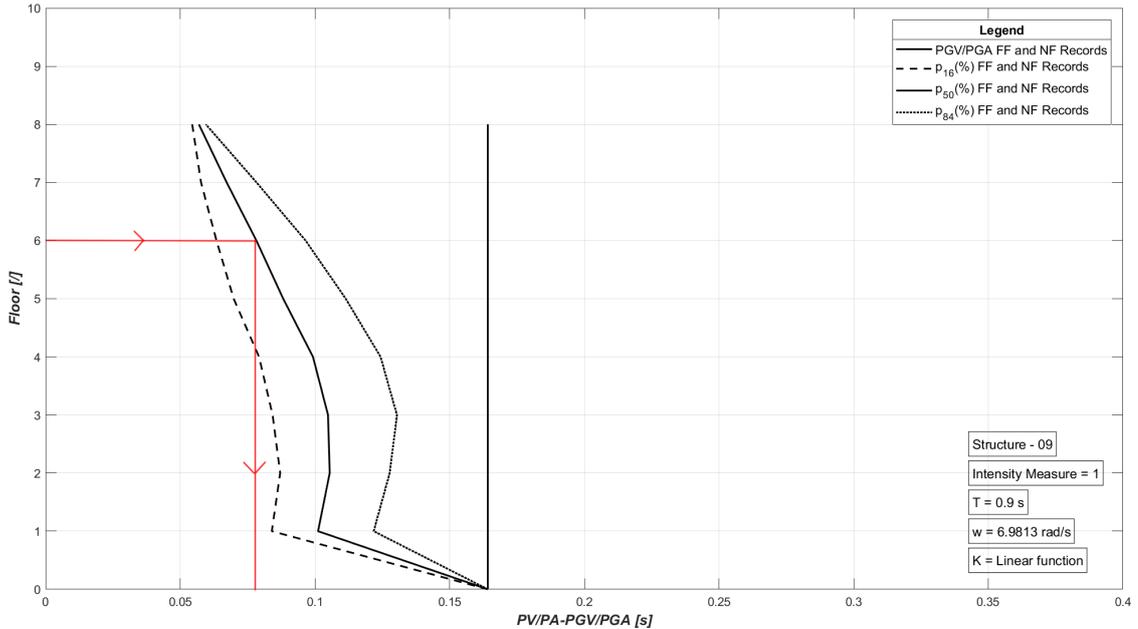


Figura 10.1: Esempio grafico ($PV/PA - PGV/PGA ; Floor$).

Una volta che si ha il valore di T_g è possibile individuare il valore del rapporto $\frac{T_b}{T_g}$, andando a impostare il valore di T_b , che indica il periodo di vibrazione del dispositivo di isolamento. Questo valore può essere stabilito in base alla tipologia del dispositivo e impostato dall'utente in fase sperimentale, se per esempio si vuole avere un rapporto $\frac{T_b}{T_g} = 10$, e si ha un $T_g = 0.07s$ tale valore deve essere $T_b = 0.70s$ (riprendendo il valore individuato nella *figura 10.1*).

Una volta stabilito il rapporto $\frac{T_b}{T_g}$, tramite il grafico mostrato in *figura 10.2*, è possibile individuare la curva avente il rapporto $\frac{T_b}{T_g}$ stabilito e su questa individuare l'intersezione con la curva che interpola i valori adimensionali ottimali, Π_μ^{Opt} , dell'attrito del dispositivo FPS. Dopodichè individuata l'intersezione è possibile muoversi verso il basso per sapere il valore ottimale di attrito, Π_μ^{Opt} , oppure muoversi in orizzontale per scoprire il valore dello spostamento adimensionalizzato, $\psi_s(\tau)$.

Allo stesso modo sapendo il rapporto, $\frac{T_b}{T_g}$, tramite il grafico mostrato in *figura 10.3*, è possibile individuare direttamente il valore adimensionalizzato ottimale di attrito del dispositivo, Π_μ^{Opt} .

Ovviamente l'esempio riportato non è l'unico modo di utilizzo degli abachi trovati, infatti essi possono essere utilizzati anche in modo inverso per esempio sapendo

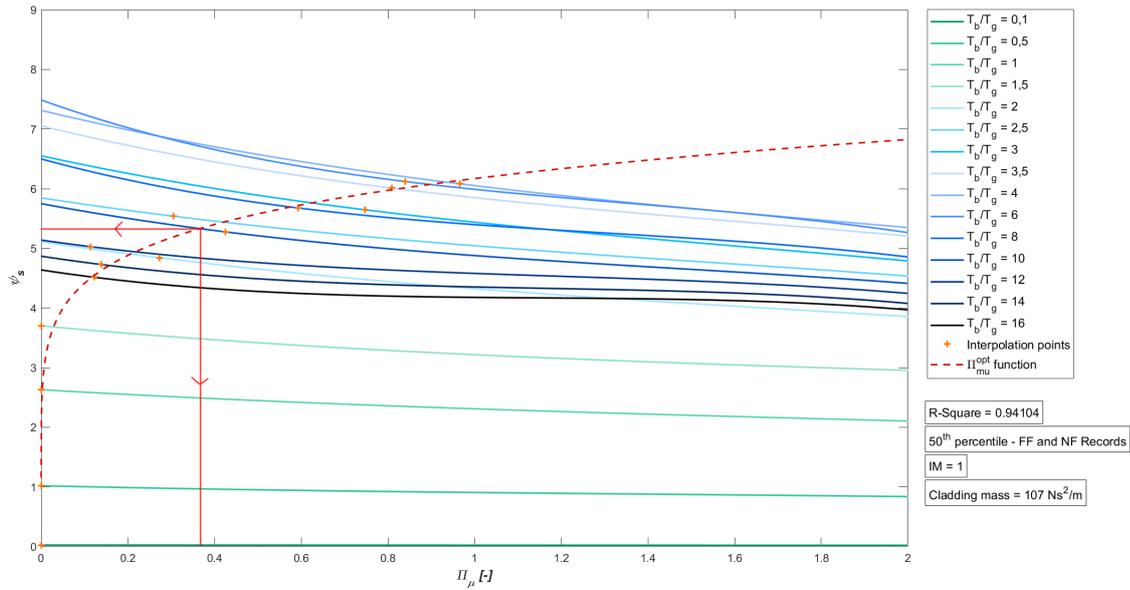


Figura 10.2: Esempio grafico ($\Pi_\mu ; \psi_s(\tau)$).

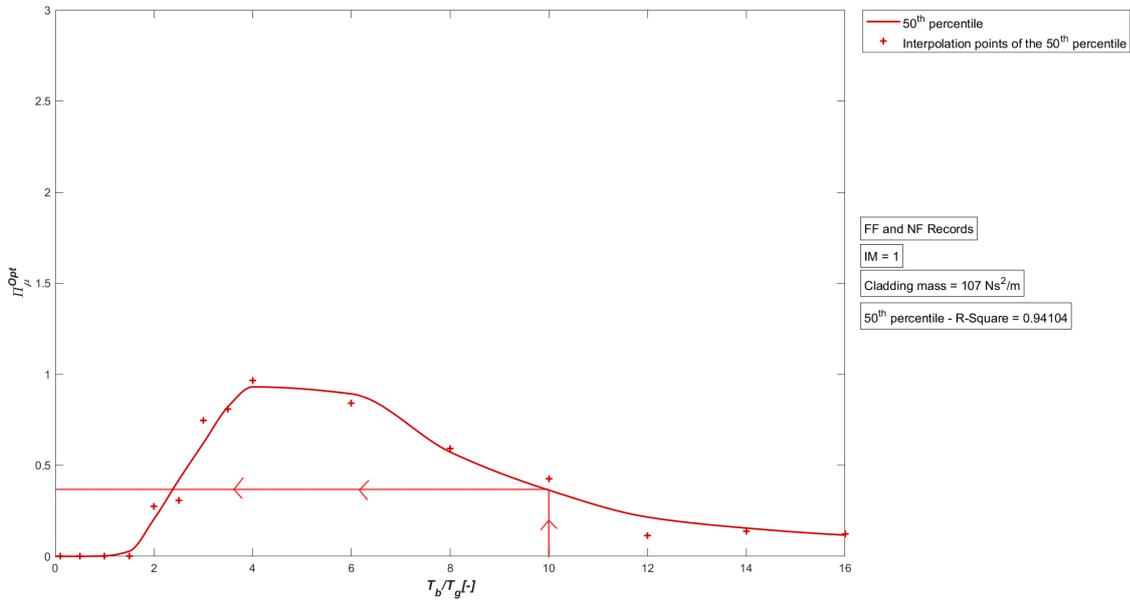


Figura 10.3: Esempio grafico ($\frac{T_b}{T_g} ; ; \Pi_\mu^{Opt}$).

il valore di Π_μ^{Opt} si può individuare il rapporto $\frac{T_b}{T_g}$ che permette di avere tale coefficiente d'attrito, inoltre l'esempio riportato ha riguardato un piano di una struttura e il valore preso in esame è stato il cinquantesimo percentile ($p_{50}(\%)$) ma la stessa dinamica può essere utilizzata per tutte le strutture in esame, per tutti i piani e per ogni valore di percentile. Per questi motivi possiamo affermare che tali grafici possono essere utilizzati per la stima preliminare delle proprietà ottimali dei sistemi di isolamento, avendo effettuato un'analisi adimensionalizzata del sistema.

Bibliografia

- [1] PM Calvi, M Moratti e GM Calvi. “Isolatori sismici a scorrimento con materiali a diverso coefficiente di attrito”. In: *Progettazione Sismica* 1 (2015).
- [2] P Castaldo e E Tubaldi. “Influence of ground motion characteristics on the optimal single concave sliding bearing properties for base-isolated structures”. In: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 104 (2018), pp. 346–364.
- [3] Anil K Chopra e Anil K Chopra. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Vol. 3. Pearson/Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2007.
- [4] *Classificazione sismica*. URL: <http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/classificazione.wp>.
- [5] Michalakis Constantinou, Anoop Mokha e Andrei Reinhorn. “Teflon bearings in base isolation II: Modeling”. In: *Journal of Structural Engineering* 116.2 (1990), pp. 455–474.
- [6] Michalakis C Constantinou et al. “NCEER-Taisei corporation research program on sliding seismic isolation systems for bridges: experimental and analytical study of a friction pendulum system (FPS)”. In: (1993).
- [7] *Descrizione del rischio sismico*. URL: http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/descrizione_sismico.wp?pagtab=1#pag-content.
- [8] ME Hosea e LF Shampine. “Analysis and implementation of TR-BDF2”. In: *Applied Numerical Mathematics* 20.1-2 (1996), pp. 21–37.
- [9] Lydik S Jacobsen. “Damping in composite structures”. In: *II WCEE, Tokyo, 1960* (1960).
- [10] *La sismicità in Italia*. URL: http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/schede_tecniche.wp?contentId=SCT20122.
- [11] Anoop Mokha, Michalakis Constantinou e Andrei Reinhorn. “Teflon bearings in base isolation I: Testing”. In: *Journal of Structural Engineering* 116.2 (1990), pp. 438–454.
- [12] B Palazzo. “Metodologie di controllo di sistemi sismicamente isolati”. In: *Università degli studi di Salerno* (1995).
- [13] Sheldon M Ross. *Probabilità e statistica per l'ingegneria e le scienze*. Apogeo Editore, 2008.
- [14] Wikipedia. *Analisi della regressione* — *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online; in data 31-ottobre-2018]. 2018. URL: http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Analisi_della_regressione&oldid=100597362.

- [15] Wikipedia. *Curve fitting* — *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online; in data 31-ottobre-2018]. 2018. URL: http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Curve_fitting&oldid=95464247.
- [16] Wikipedia. *MATLAB* — *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online; in data 4-settembre-2018]. 2018. URL: <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=MATLAB&oldid=96919851>.
- [17] Wikipedia. *Tamponatura* — *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online; in data 23-agosto-2018]. 2017. URL: <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Tamponatura&oldid=85598594>.

Un ringraziamento speciale alla mia famiglia, in particolare ai miei genitori e a mia sorella, che mi hanno sempre incoraggiato, supportato e sopportato in questo percorso di studi, permettendomi di raggiungere questo importante traguardo.