Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Curriculum Strutture
A.a. 2020/2021
Sessione di Laurea Dicembre 2021

Le reti neurali nella progettazione dell'isolamento sismico di viadotti ad impalcato continuo

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. Paolo Castaldo

Laureanda:
Andreas Piva

Correlatore:
Dott. Ing. Massimiliano De Iuliis

Matricola:
S277615

Ai miei nonni,

fonte del sapere più puro e prezioso che esista.

Alla mia famiglia,

per avermi insegnato ad essere la persona che sono diventata.

Al mio fidanzato Andrea,

mio più grande sostenitore e amore incondizionato.

A me stessa,

per aver imparato che nessun ostacolo è invalicabile se c'è passione e volontà.

Sommario

ABSTRACT

Lo scopo della seguente tesi riguarda la definizione e la verifica di una strategia di progettazione innovativa relativa a dispositivi di protezione sismica di tipo *Double Concave Friction Pendulum* (DCFP), utilizzati per l'isolamento di ponti e viadotti, per tramite di una rete neurale artificiale (ANN) testata mediante dati provenienti da analisi numeriche e la cui affidabilità sia stata opportunamente verificata.

Negli ultimi anni, infatti, l'adeguamento sismico di strutture e viadotti sta acquisendo sempre più rilevanza, motivo per cui si è alla costante ricerca di metodi automatici in grado di assistere il progettista nelle proprie scelte aventi come obiettivo il conseguimento di prestazioni sismiche stringenti, anche nel caso di interventi su strutture esistenti.

La scelta dell'utilizzo di dispositivi DCFP, piuttosto che di altre tipologie di isolatori è dettata dai grandi vantaggi offerti da tale tecnologia: essi non solo garantiscono un'elevata dissipazione di energia grazie alle cospicue proprietà di smorzamento, ma svolgono anche una funzione di isolamento sismico che risulta essere indipendente dalla massa della sovrastruttura. Tale caratteristica li rende molto versatili, qualunque sia la tipologia strutturale presa in considerazione. L'innovazione rappresentata dalla tesi in esame riguarda dunque la possibilità di utilizzare tecniche informatiche avanzate, quali le reti neurali artificiali, in contesti legati alla progettazione e alla verifica di opere di ingegneria civile, nel caso specifico l'isolamento sismico di ponti e viadotti.

Lo studio si svilupperà in due macro sezioni: la prima avrà come oggetto principale la modellazione e caratterizzazione dinamica del sistema analizzato; la seconda invece si occuperà dello studio, la creazione e l'inversione di una specifica rete neurale artificiale creata appositamente al fine di restituire i parametri di progetto ottimi.

L'oggetto delle analisi condotte sarà un viadotto modello, multicampata, a campata continua, poggiante su una spalla e una pila, entrambe caratterizzate dalla presenza di due DCFPs all'interfaccia tra sovra e sottostruttura, per il quale si effettuerà una modellazione sintetica basata su di un sistema ad 8 gradi di libertà. Si considereranno successivamente 45 registrazioni sismiche, risultate di particolare rilevanza in termini di rapporto PGA/PGV, per poter eseguire le analisi dinamiche aventi come obiettivo lo studio della risposta sismica del sistema e la sua caratterizzazione in base ad una serie di parametri non-dimensionali.

Attraverso i risultati ottenuti da tali analisi dinamiche si passerà alla realizzazione e lo studio della rete neurale artificiale in esame in grado di correlare i valori ottimali dei coefficienti di attrito dei dispositivi DCFP alle entità sismiche studiate, per tramite dell'utilizzo di tecniche di inversione dirette e indirette della rete creata.

Lo scopo finale della tesi è dunque quello di poter fornire indicazioni progettuali relative alla progettazione di un intervento di retrofit, avendo assegnate le proprietà del sistema, quali rapporto di massa pila-impalcato e periodo della pila stessa, che si concretizzino

nella scelta del valore del coefficiente di attrito e dei parametri di progetto attribuibili ai dispositivi isolanti, per un generico ponte, qualunque sia il valore PGA/PGV atteso per il sisma in ingresso, imponendo che la risposta dinamica rientri nei parametri prestazionali individuati dalla normativa tecnica.

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Premessa

A partire dagli anni ’80, in particolare a seguito di eventi sismici ad elevata intensità, sono stati studiati possibili sistemi di protezione sismica per strutture esistenti e nuove costruzioni, in grado di limitare i danni dovuti a tali fenomeni naturali caratterizzati da un elevato livello di aleatorietà. In particolare, con lo sviluppo della tecnologia, si sono progettati, analizzati e creati dispositivi di isolamento sismico sempre più efficaci in grado di aumentare le capacità dissipative di strutture esistenti, la cui efficacia è stata ampiamente dimostrata tramite un significativo numero di esperimenti e modelli teorici.

Nell’ambito delle strutture impiegate nella viabilità, come ad esempio ponti e viadotti, lo scopo principale della progettazione antisismica consiste nella realizzazione di un sistema strutturale in cui l’impalcato rimanga in campo elastico, in modo tale da localizzare eventuali danneggiamenti sismici in corrispondenza di elementi non strutturali quali giunti di dilatazione o parapetti. In generale, possiamo dunque affermare che lo scopo primario sia quello di far in modo che la sovrastruttura accompagni i moti dinamici orizzontali imposti dal sisma, pur controllando e limitando eventuali danneggiamenti. Alla base del corretto design antisismico per ponti e viadotti, come per le strutture in ambito civile, è possibile elencare una serie di indicazioni preliminari, quali diminuire il più possibile il peso proprio dell’impalcato, impiegando elementi strutturali alleggeriti o prefabbricati piuttosto che solette strutturali piene e gettate in opera, oppure, ove possibile, cercare di mantenere la continuità dell’impalcato al di sopra delle pile, preferendo dunque schemi iperstatici in grado di ridistribuire le sollecitazioni agenti dalle zone maggiormente sollecitate a quelle meno interessate, al posto di schemi isostatici che prevedano campate in semplice appoggio. Assieme alle accortezze appena elencate, è possibile inoltre aumentare la sicurezza antisismica di strutture esistenti o di nuova progettazione, inserendo, in corrispondenza della superficie che separa sovrastruttura e sottostruttura, appositi dispositivi dissipativi, in modo tale da garantire una riduzione sostanziale della risposta dinamica nel caso in cui dovesse presentarsi un sisma in ingresso.

1.2 Obiettivo

La presente tesi ha come oggetto lo studio di un sistema strutturale tipo, rappresentativo di un impalcato da ponte isolato in corrispondenza dei suoi appoggi [1], con l'obiettivo di individuare i parametri ottimali di progetto per dispositivi di isolamento a scorrimento con attrito di tipo *friction pendulum*, associati a viadotti generici, schematizzati tramite l'ausilio di modelli dinamici multiple degree of freedom (mdofs).

In particolare (mentre in [1] è stata eseguita una parametrizzazione delle equazioni del moto governanti il sistema, prendendo poi in considerazione un range di 30 entità sismiche record per caratterizzare i valori ottimali di coefficiente di attrito da attribuire ai dispositivi isolanti) durante lo sviluppo della tesi in esame il processo di ricerca dell'ottimo progettuale riguarda il coefficiente di attrito dei *friction pendulum*, al variare sia delle caratteristiche dinamiche del sistema strutturale che delle proprietà delle eccitazioni in ingresso, modellata attraverso il parametro PGA/PGV il cui legame con il carattere impulsivo near-fault è validato in letteratura da diversi studi [2]. La procedura di ottimizzazione farà uso di innovative tecniche di machine learning, tramite l'ausilio, lo sviluppo e l'inversione di una rete neurale artificiale.

1.3 Organizzazione del testo

La seguente tesi consta di una prima parte teorica introduttiva, all'interno della quale verranno esaminati i principi di funzionamento dei dispositivi di isolamento sismico, con particolare riferimento ai sistemi *friction pendulum,* seguita da un secondo e un terzo capitolo, entrambi esplicativi, inerenti rispettivamente le reti neurali e la conseguente spiegazione delle tecniche basilari più comunemente utilizzate per la loro inversione e degli strumenti utilizzati per la ricerca dei parametri ottimali da poter attribuire ai dispositivi antisismici, scopo principe della suddetta tesi di laurea. A seguire, all'interno del capitolo 5, ci si addentrerà nelle specifiche strutturali del sistema analizzato, andando ad elencare le principali proprietà geometriche e grandezze adimensionalizzate utilizzate al fine di perseguire lo scopo precedentemente esplicato. Nei paragrafi successivi verranno successivamente commentati ed esplicati i codici di calcolo Matlab utilizzati al fine di analizzare la costruzione della rete neurale artificiale eseguita e la sua inversione. Nella parte conclusiva ci si concentrerà infine sulla visualizzazione dei risultati ottenuti e nell'elencazione di futuri ambiti di implementazione della suddetta trattazione.

CAPITOLO 2

La progettazione antisismica

2.1 L'isolamento sismico

Alla base del concetto dell'isolamento sismico, in particolare per quanto riguarda l'ambito di ponti e viadotti, sta la volontà di ridurre le forze di inerzia sismiche agenti sulla massa principale, ovvero la massa dell'impalcato. A tal uopo, dunque, vengono inseriti specifici dispositivi di isolamento all'interfaccia tra sovrastruttura e sottostruttura, ovvero, nel caso dei ponti, tra impalcato e testapila o testata delle spalle (*base-isolation*), in grado di garantire le seguenti proprietà:

- Agire in direzione verticale come un semplice vincolo di appoggio, dotato di elevata rigidezza;
- Ottimizzare la dissipazione di energia del sistema, aumentandone lo smorzamento.

I dispositivi di protezione sismica più comunemente utilizzati variano in base a geometria e quantità di energia dissipata. A tal proposito, come precedentemente affermato, poiché quest'ultima risulta essere strettamente correlata al fattore di smorzamento, espresso come $\xi = \frac{c}{c_{crit}} = \frac{c}{2m\omega}$, dove *c* rappresenta il coefficiente di smorzamento viscoso, *m* la massa del sistema e ω la pulsazione dello stesso, è comune la scelta di considerare il valore di ξ, espresso in percentuale, come metro di paragone tra i vari dispositivi.

2.2 Tipologie di isolatori sismici

Tra i più comuni sistemi di isolamento esistono i dispositivi elastomerici, detti anche HDRB (*High Damping Rubber Bearing*), composti di un particolare materiale costituito dall'alternanza tra elastomero (gomma naturale, neoprene o materiali artificiali) e lamierini in acciaio aventi l'obiettivo di ampliare il ciclo isteretico del dispositivo e, di conseguenza, la quantità di energia dissipata. Non differiscono molto in aspetto dai semplici apparecchi di appoggio e di connessione impalcato-pila, ma a differenza di questi ultimi, possono presentare un nucleo in piombo che ne aumenta la rigidezza. Il rapporto di smorzamento, per questa tipologia di isolatori si aggira attorno al 10-15%. I vantaggi connessi all'utilizzo di questi dispositivi riguardano i limitati costi soprattutto se rapportati alle elevate prestazioni. Essi, infatti, mantengono le proprie caratteristiche anche per eccitazioni sismiche particolarmente intense, senza conseguenze né a danni degli elementi portanti della struttura e di quelli non strutturali [3]. Si riporta in figura 2-1 un esempio di dispositivo HDRB.

Figura 2-1: Dispositivo di isolamento HDRB.

La seconda tipologia di isolatori che si intende presentare è composta da particolari vincoli di appoggio metallici che possono raggiungere anche elevate dimensioni. Il vantaggio del loro utilizzo sta nell'innovativa modalità di dissipazione di energia, basata sul raggiungimento dello snervamento dell'acciaio di cui sono composti. Possono presentare svariate forme geometriche e, se combinati ad opportuni additivi in gomma, possono raggiungere valori di ξ fino a 10-20%. In figura 2-2 si riporta un esempio di dispositivo isolante metallico a farfalla.

Figura 2-2: Dispositivo isolante metallico a farfalla.

Infine, esistono dei dispositivi di isolamento ad attrito che possono essere a superficie piana oppure a pendolo inverso (*friction pendulum*), riportati in figura 2-3, sui quali ci si soffermerà in particolar modo nell'arco della presente tesi e che verranno descritti in modo specifico nel paragrafo successivo.

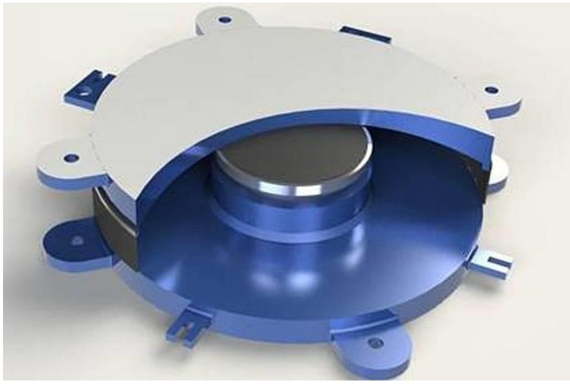

Figura 2-3: Dispositivo a pendolo inverso.

Ciò che accomuna i dispositivi descritti è la possibilità di garantire un sostanziale aumento del periodo della struttura, in modo tale da diminuirne, in caso di evento sismico, l'accelerazione spettrale e quindi le forze inerziali trasmesse alla sovrastruttura, concentrando la domanda di spostamento in corrispondenza degli isolatori. Come mostrato in figura 2-4, infatti, al periodo T_0 corrispondente al modo principale di vibrazione della struttura non isolata, si può associare un'accelerazione spettrale che risulta essere maggiore rispetto a quella associata al periodo T_{eff}, ovvero allo stesso periodo caratterizzante la stessa struttura dotata di isolamento sismico; il contrario avviene invece per quanto riguarda gli spostamenti; infatti: $d(T_0)<d(T_{eff})$.

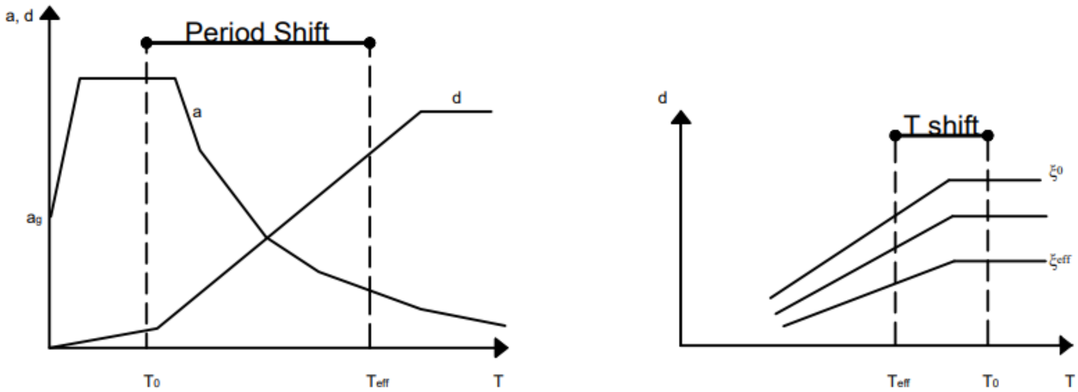

Figura 2-4: Isolamento sismico.

Come mostrato nella porzione destra della figura 2-4, all'aumento di periodo corrisponde dunque anche un aumento del fattore di smorzamento ξ che passerà da ξ_0 (T_0) a ξ_{eff} (T_{eff}), con $\xi_0 < \xi_{eff}$.

La dissipazione dell'energia, per un sistema isolato, avviene dunque in maniera localizzata, in corrispondenza degli isolatori, sottoposti a grande deformazione plastica per tramite di ampi cicli isteretici. In questo modo si garantisce una quasi staticità della struttura in elevazione che può permanere perciò in campo elastico. Tali cicli possono essere caratterizzati e visualizzati tramite grafici forza-spostamento, come rappresentato in figura 2-5:

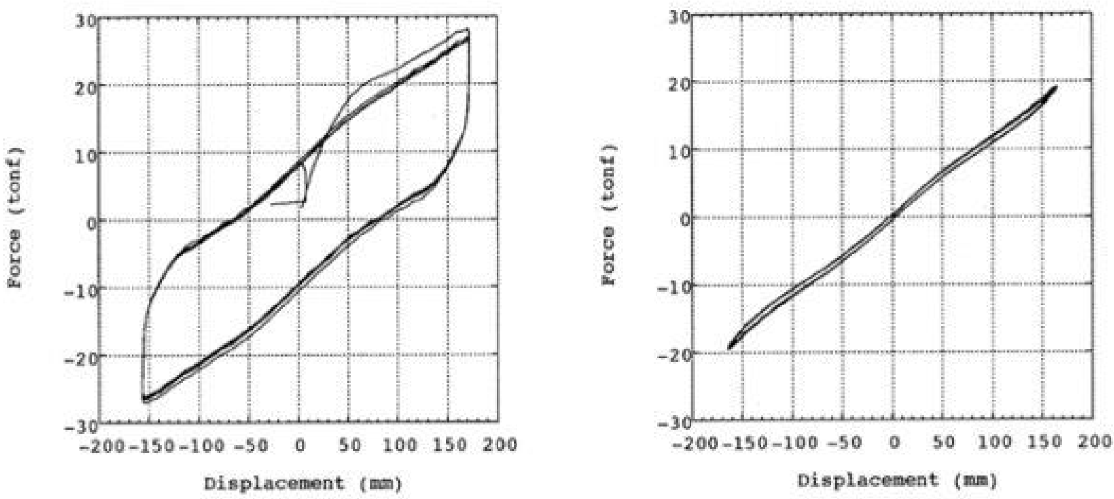

Figura 2-5: Diagrammi isteretici.

In particolare, a grandi aree sottese alla curva di isteresi, corrispondono elevati valori di dissipazione energetica, nonché di smorzamento. Ad esempio, il diagramma posto nella porzione sinistra della figura 2-5 corrisponderà ad un isolatore ad elevato smorzamento, mentre la porzione a destra sarà associato ad un dispositivo a basso smorzamento.

2.3 Friction pendulum

Affinché sia possibile studiare il comportamento di tutti i dispositivi elencati in precedenza, si ricorrerà tuttavia a dei modelli forza-spostamento semplificati, di tipo bilineari che modellano i cicli in questione come rappresentato in figura 2-6:

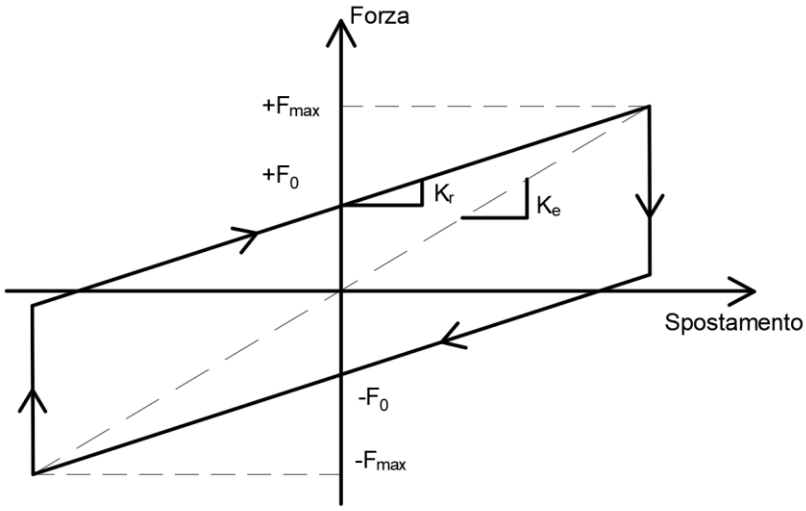

Figura 2-6: Semplificazione bilineare del ciclo isteretico.

In tale figura, si rappresentano con F_0 e K_e rispettivamente la forza di attrito e la rigidezza equivalente del dispositivo, con K_r la rigidezza di richiamo e con F_{max} la massima azione orizzontale applicabile al dispositivo. Dal grafico 2-6 appare chiaro come il dispositivo si comporti dapprima in maniera elastica lineare a partire dalla sollecitazione iniziale applicata $F_{0,}$ comportamento caratterizzato tramite una retta obliqua, il cui coefficiente angolare risulta essere pari a K_R, fino al raggiungimento della massima forza sopportabile dal dispositivo, ovvero F_{max}. A questo punto la forza di richiamo, in altri termini forza di ricentraggio, esercitata dall'accelerazione di gravità grazie alla concavità della superficie di scorrimento, determina la visualizzazione in figura 2-6 di un ramo verticale che termina al raggiungimento delle iniziali prestazioni in campo elastico del sistema di isolamento DCFP.

In conclusione, i vantaggi dell'isolamento sismico sono molteplici e possono essere riassunti nelle seguenti tre proprietà:

- Abbattimento delle forze di inerzia e quindi delle sollecitazioni agenti;
- Elevata protezione del contenuto della struttura oltre che degli elementi non strutturali presenti al suo interno;
- Riduzione degli spostamenti relativi.

Gli apparecchi di isolamento pendolari ad attrito (FP) prendono il proprio nome dal meccanismo a pendolo inverso che ne regola il funzionamento. Si compongono di una o due superfici di scorrimento, che possono essere piane oppure concave, sopra cui scorre un'articolazione circolare, in grado di garantire lo slittamento del dispositivo stesso. Possiamo, in generale, attribuire a tali sistemi due funzioni principali:

1. Funzione dissipativa: essa è garantita dalla superficie di scorrimento dell'articolazione che risulta essere non lubrificata e regolata con materiale ad attrito controllato;
2. Funzione ricentrante: essa è garantita dalla gravità e dalla particolare conformazione della superficie di scorrimento.

In questo caso specifico, la massa pendente, rappresentata dalla struttura stessa in elevazione, non influenza con il suo valore il periodo di oscillazione del dispositivo. Come esplicato infatti nella (2.1), l'unica dipendenza che intercorre risulta essere quella tra il periodo di oscillazione T, R, il raggio di curvatura delle superfici di scorrimento che compongono il dispositivo e l'accelerazione gravitazionale, g.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \qquad (2.1)$$

Tale caratteristica, rende i friction pendulum particolarmente adatti nell'isolamento di qualsiasi tipologia di sovrastruttura.

In figura 2-7 si riporta la schematizzazione del funzionamento a pendolo inverso del dispositivo.

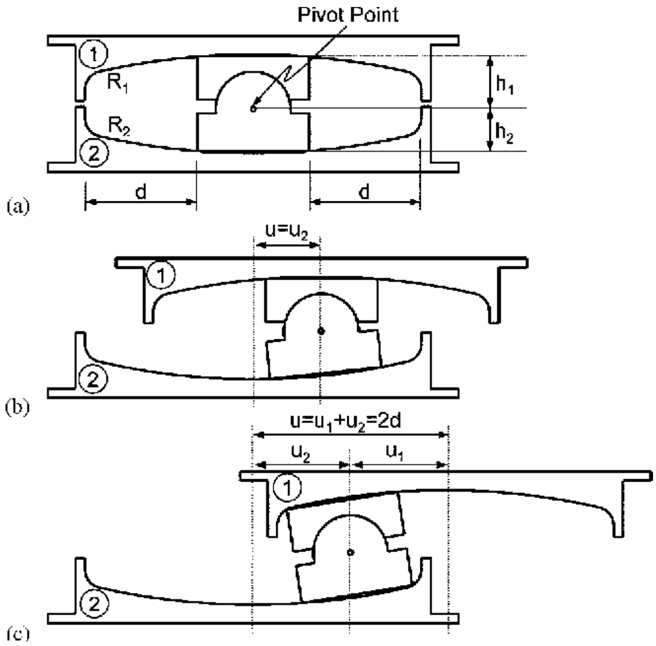

Figura 2-7: Funzionamento a pendolo inverso.

Inoltre, come dimostrato tramite studi [1] [4], l'elevata capacità dissipativa dei friction pendulum e la loro resistenza ai carichi di esercizio, risulta essere dipendente unicamente dall'attrito, strettamente connesso alla velocità relativa tra le due superfici di scorrimento.

In particolare, nell'arco della trattazione si farà riferimento ai ponti multi-campata a impalcato continuo, isolati tramite l'utilizzo di FP a superficie curva, per i quali si individueranno un insieme di parametri rappresentativi della risposta dinamica da ottimizzare.

In generale, si riportano di seguito, in tabella, i principali vantaggi e svantaggi inerenti all'utilizzo di friction pendulum come dispositivi di isolamento sismico.

TIPOLOGIA	VANTAGGI	SVANTAGGI
Scorrimento su superficie curva	Resistenza al carico di servizio	Proprietà funzione della velocità
	Moderato-alto smorzamento	
	Riduzione della risposta torsionale	
Scorrimento su superficie piana	Resistenza al carico di servizio	Elevate accelerazioni di piano
	Elevato smorzamento	Proprietà funzione della velocità
		Assenza di forze di ricentraggio

Tabella 2-1: Vantaggi e svantaggi degli FP.

L'utilizzo di dispositivi FP a doppia curvatura consente inoltre di ridurre l'eccentricità del carico verticale, che risulterà dunque essere pari alla metà dello spostamento del dispositivo stesso. Ciò è reso possibile dal fatto che ciascuna superficie che compone il dispositivo è progettata per accomodare la metà dello spostamento orizzontale previsto, il che determina vantaggi anche da un punto di vista dimensionale, permettendo una notevole riduzione delle misure in pianta degli isolatori stessi.

Lo scopo di questa tesi sarà quello di trovare, tramite l'utilizzo di una modellazione del sistema dinamico basato sulle reti neurali, per le quali si rimanda al paragrafo successivo, i valori di progetto attribuibili al coefficiente di attrito del friction pendulum, al variare delle proprietà dinamiche del sistema principale che consentano di conseguire livelli prestazionali compatibili con gli obiettivi imposti dalla normativa.

CAPITOLO 3

Reti neurali artificiali

3.1 Architettura e funzionamento

Le *Artificial Neural Networks* (ANNs), in italiano *reti neurali artificiali,* sono un'implementazione informatica in grado di riprodurre, tramite codici di attivazione e tramite lo sviluppo di una specifica architettura interna, riportata in figura 3-1, il principio di funzionamento dei collegamenti neurali presenti nel cervello umano. Questi ultimi si configurano attraverso un elevato numero di neuroni collegati gli uni agli altri che comunicano fra loro permettendo il passaggio di informazioni tramite le sinapsi, ovvero tramite terminazioni nervose che trasmettono impulsi elettrici.

Allo stesso modo, possiamo definire reti neurali artificiali che, come nel caso dell'organismo umano, si compongono di un numero limitato di neuroni interconnessi fra loro e disposti ordinatamente su appositi *layer.* Naturalmente, la grande differenza rispetto ai neuroni di natura organica è che l'organizzazione e l'architettura delle ANNs vengono caratterizzate dall'utente, creatore della stessa rete neurale artificiale. Anche in questo caso, tuttavia, esistono dei layer che non possono essere controllati direttamente, ovvero i *layer nascosti*. Infatti, ciò che accomuna tutte le ANNs è il fatto di essere costituite da un unico *layer di input*, ovvero da un insieme di neuroni contenenti i dati di ingresso immessi direttamente dall'operatore; un unico *layer di output*, ovvero un layer in cui sono contenute le informazioni ricavate; e un numero finito di *layer nascosti* che non possono essere direttamente controllati dal creatore della rete neurale artificiale e che consentono la trasmissione di un numero di informazioni sufficienti alla modellazione del legame tra variabili in ingresso ed uscita.

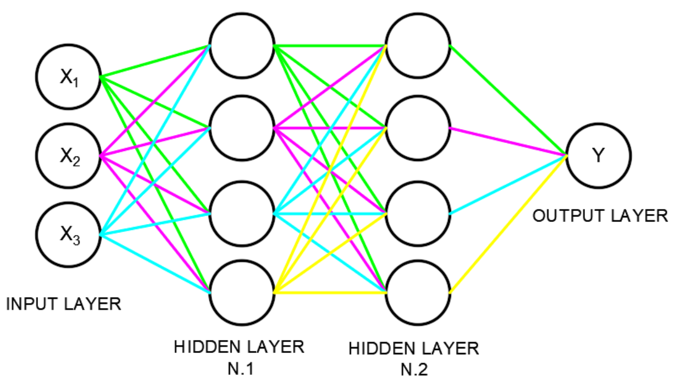

Figura 3-1: Struttura di una ANN.

Prima di poter esaminare in dettaglio il meccanismo che regola il flusso delle informazioni da un layer ad un altro, è necessario tuttavia, soffermarsi sul funzionamento del singolo neurone. Se si volesse procedere in termini di parallelismo con le reti neurali biologiche, si potrebbe affermare che i neuroni artificiali che compongono la ANN dovrebbero coerentemente simulare il funzionamento dei neuroni cerebrali, in grado di trasmettere informazioni al neurone vicino per tramite di impulsi elettrici che fungono da switch e che a seconda della loro lunghezza, definiscono l'output trasmesso. I neuroni artificiali dunque, per poter trasferire le informazioni, necessitano di un "interruttore" che svolga la stessa funzione degli impulsi elettrici esaminati in precedenza. In questo caso, lo switch si compone di una funzione di attivazione assumente differenti espressioni che ha l'obiettivo di filtrare le informazioni di input al neurone e stabilire se le informazioni in ingresso debbano o meno essere traferite al neurone artificiale del layer succcessivo. A tal proposito, si illustra nell'equazione (3.1) l'espressione maggiormente utilizzata come funzione di attivazione, nell'ambito delle ANNs:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \tag{3.1}$$

Tale funzione sigmoidea, come illustrato in figura 3-2, non presenta un andamento a gradini, caratteristico delle funzioni di attivazione a più stadi, bensì uno sviluppo graduale in grado di garantire sempre la presenza di una derivata ben precisa, in ogni punto del dominio, aspetto che risulterà fondamentale nel seguito.

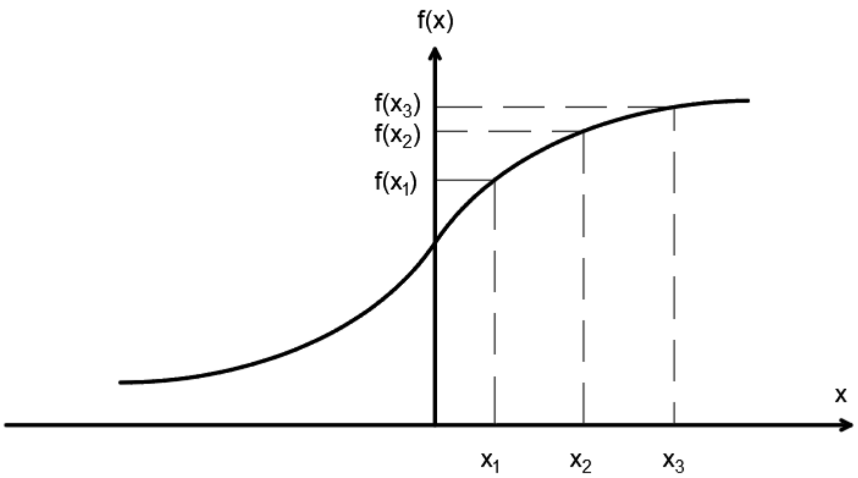

Figura 3-2: La funzione di attivazione.

A questo punto, è possibile passare ad esaminare in dettaglio il funzionamento del singolo neurone. Come affermato precedentemente, quest'ultimo è composto da una funzione di attivazione in grado di elaborare i dati di input e decidere se trasmetterli o meno, sottoforma di output, ai neuroni artificiali che compongono il layer successivo, come illustrato in figura 3-3.

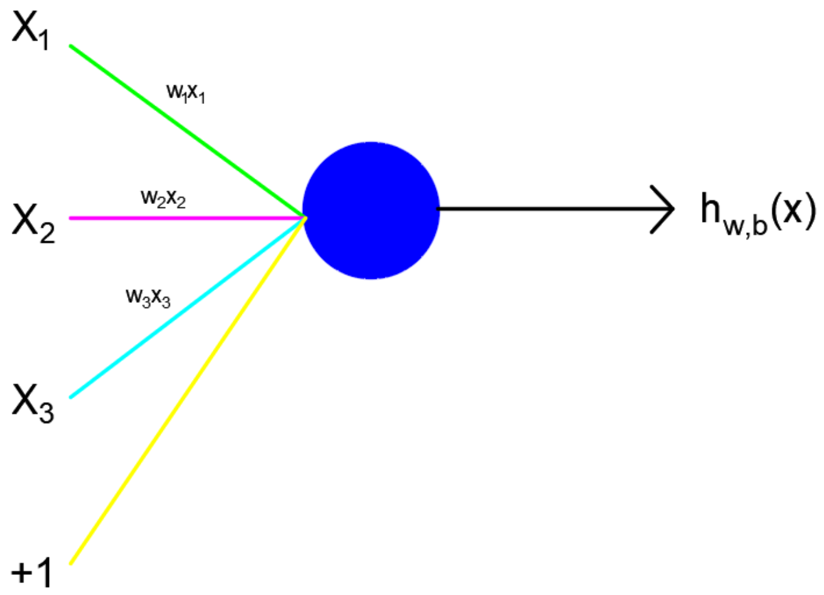

Figura 3-3: Funzionamento di un neurone. [5]

In realtà, i dati iniziali, prima di passare al neurone, vengono pesati e sommati tra loro in modo tale che al neurone arrivi un'unica informazione dipendente da tutte le variabili in ingresso. Supponiamo, ad esempio, che i dati di input siano x1, x2, x3 e +1, essi non giungeranno al neurone in esame in maniera separata, ma verranno combinati tra di loro tramite un'espressione polinomiale del tipo seguente:

$$x1w1 + x2w2 + x3w3 + b \tag{3.2}$$

dove, w1, w2 e w3 corrispondono ai pesi tramite cui vengono combinate le i-esime variabili di input, mentre b rappresenta il peso dell'input +1. In particolare, pesi differenti corrispondono a differenti configurazioni della funzione sigmoidea di attivazione, come mostrato in figura 3-4, proprietà funzionale allo studio della relazione che intercorre tra input e output al variare dei pesi stessi.

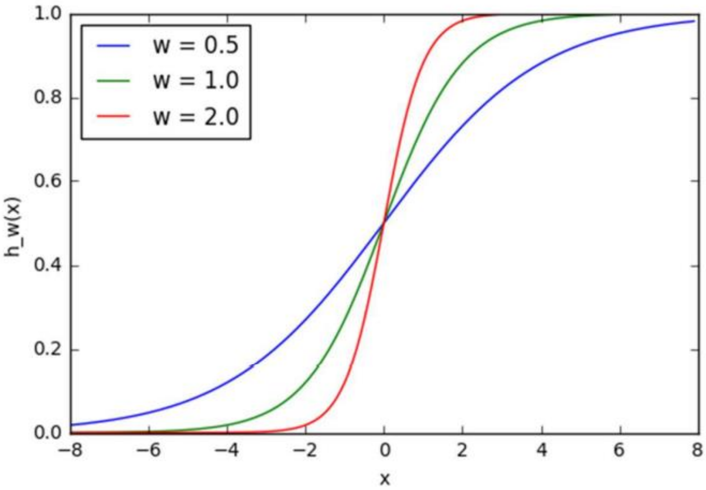

Figura 3-4: La funzione dei pesi. [5]

Il valore +1, detto *bias* invece, modifica, da un punto di vista grafico, l'intorno dello sviluppo della funzione sigmoidea; mentre, da un punto di vista matematico, permette di variare la condizione di attivazione della funzione interna e dunque anche del neurone. Senza elemento +1 dunque, non potremmo variare i parametri di funzionamento della rete neurale artificiale.

Ipotizzando, ad esempio, di progettare una ANN composta di un layer di input a cui appartengono 4 neuroni; un layer nascosto, anch'esso composto da 4 neuroni e un layer di output, l'architettura della rete risulterebbe essere la seguente:

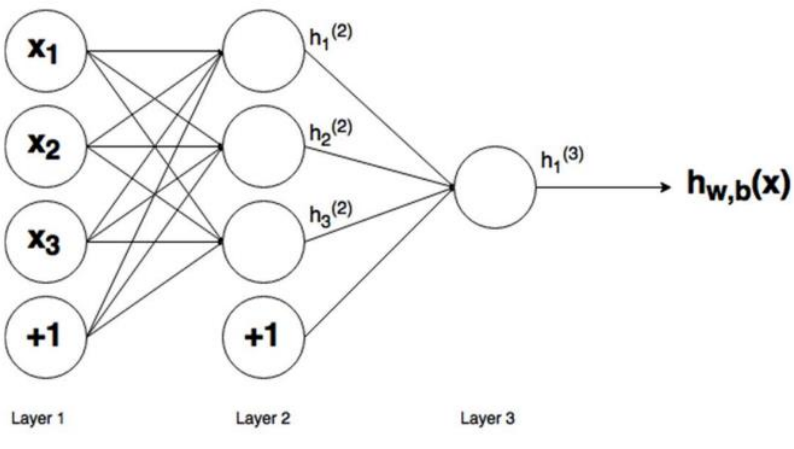

Figura 3-5:Architettura di una ANN. [5]

in cui gli h-esimi elementi, costituiscono i dati di output che saranno perciò funzione delle variabili in ingresso e dei relativi pesi. Si noti come ciascun neurone del layer *i* sia strettamente connesso a ciascun neurone del layer *i+1*, per tramite dei pesi w_i (figura 3-5).

3.2 Scopo delle reti neurali artificiali

Il fine ultimo dell'elaborazione di una rete neurale artificiale è quello di costruire un modello matematico automatizzato, in grado di predire il corretto valore di output y, avendo come input un valore x noto in partenza. Per fare ciò, è necessario modificare iterativamente i pesi, che risultano essere infatti gli unici valori intercambiabili e gestibili direttamente dall'operatore, in quanto gli input sono un dato del problema e i bias risultano essere sempre pari a +1, fino a quando non si raggiunge il valore ottimale in grado di minimizzare l'errore inerente all'output finale. In termini analitici possiamo schematicamente rappresentare la dipendenza dalla funzione errore rispetto ad un unico peso come di seguito:

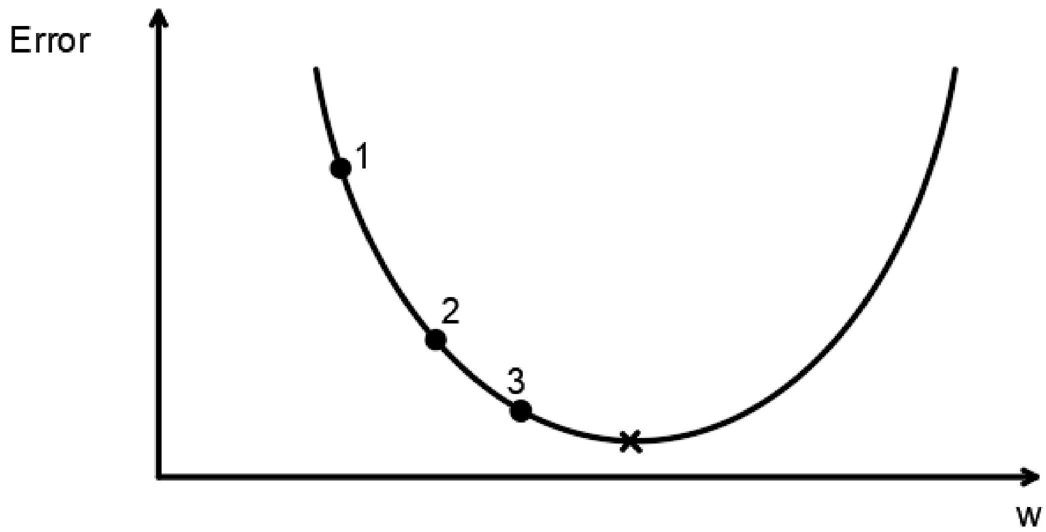

Figura 3-6: La funzione errore. [5]

Il punto 1 in figura 3-6 rappresenta il valore iniziale del peso che risulta essere casuale, in quanto non sappiamo in partenza in quale posizione della curva si troverà il valore di w_{min}, ovvero il punto rappresentato in figura 3-6 con una crocetta nera. Una volta scelto un valore di start, non resta dunque che attuare un processo iterativo tramite il quale ci si sposterà dal punto 1 al punto 2, poi dal punto 2 al punto 3, fino ad arrivare al punto di minimo della curva. Per poter valutare se ci si sta muovendo in direzione concorde o discorde rispetto al minimo, si utilizza una tecnica matematica denominata *del gradiente decrescente.* Nel caso di dipendenza da una variabile, il gradiente non è altro che la derivata della curva di errore, calcolata in corrispondenza del punto preso in esame. Attraverso l'utilizzo di questo espediente matematico è possibile stabilire che: se il valore del gradiente risulta essere positivo, allora ci si sta muovendo in direzione opposta al punto di minimo, dunque, si sta aumentando l'errore commesso; al contrario, se il gradiente assume valori negativi, ci si sta muovendo in direzione corretta. Si può notare che esattamente nel punto di minimo, la tangente alla curva assume una posizione orizzontale, in tal caso si è giunti al valore atteso.

Analiticamente, la relazione tra pesi all'iterazione *i (old),* pesi all'iterazione *i+1 (new)* e l'errore commesso durante la suddetta iterazione, è espresso mediante la formulazione che segue:

$$w_{new} = w_{old} - \alpha \cdot \nabla error \qquad (3.3)$$

in cui α è un parametro indicante quanto velocemente si sta giungendo verso il minimo valore di errore.

In particolare, nell'ambito delle ANNs, è possibile ovviare al problema iterativo, introducendo una nuova funzione, detta *funzione costo* (*J*) che rappresenta una generalizzazione matematica e più funzionale del gradiente decrescente, essendo anch'essa rappresentativa dell'errore commesso. Tale funzione è esprimibile mediante la (3.4):

$$J(W, b, x, y) = \frac{1}{2} \left\| y - y_{pred}(x) \right\|^2 \qquad (3.4)$$

in cui y rappresenta il vettore contenente l'output atteso e y_{pred} il vettore contenente l'output calcolato dalla rete, funzione di x, vettore delle variabili di input. Poiché è necessario ritrovare il valore minimo di tale funzione, corrispondente ad un insieme di "m" casi ingresso-uscita, possiamo dunque definire il seguente indice di performance:

$$J(w, b) = \sum_{z=0}^{m} J\,(W, b, x^z, y^z) \qquad (3.5)$$

rappresentativo della media quadratica degli errori, relativamente ai casi considerati. Ritornando alla (3.3), specializzando per un singolo w e per un singolo b e sostituendovi la (3.5) si ottiene dunque:

$$w_{new} = w_{old} - \alpha \frac{\partial}{\partial w} J(w, b) \qquad (3.6a)$$

$$b_{new} = b_{old} - \alpha \frac{\partial}{\partial b} J(w, b) \qquad (3.6b)$$

In cui la funzione gradiente $\nabla error$ è stata sostituita dalla sua equivalente funzione derivata per i motivi esplicati in precedenza.

3.3 Training delle ANNs

Volendo controllare la modellazione di un fenomeno mediante rete neurale artificiale, il problema più rilevante è che la presenza degli *hidden layers* evita all'operatore di effettuare un controllo diretto sulla determinazione dei coefficienti *w*, in quanto come visto precedentemente, egli è in grado di lavorare unicamente sui layers di input e di output. Per ovviare a questa problematica, è possibile tuttavia ricorrere alla *backpropagation,* ovvero un procedimento a ritroso in grado di determinare l'effetto sull'errore finale causato da ciascun singolo peso utilizzato all'interno della ANN. L'algoritmo di *backpropagation* fa parte di quella categoria di algoritmi denominati di "apprendimento" (o *training*) della rete neurale, il suo compito cioè è quello di istruire la rete neurale artificiale tramite una serie di esempi, affinché essa possa ricondurre ad un valore di output desiderato (y_d), denominato *target.* Sulla base della differenza tra y, ovvero il dato in uscita ottenuto, e y_d, l'algoritmo di propagazione a ritroso modifica i pesi della ANN affinchè si possa raggiungere la convergenza della soluzione. Ad esempio, consideriamo una rete artificiale composta da un unico neurone (N), un solo input (x) a cui viene associato un peso (p_t) e un unico output (y_t); l'obiettivo della ANN è quello di far coincidere il più possibile il valore y_t con un valore y_d target tramite l'utilizzo della backpropagation esaminata nella figura 3-7

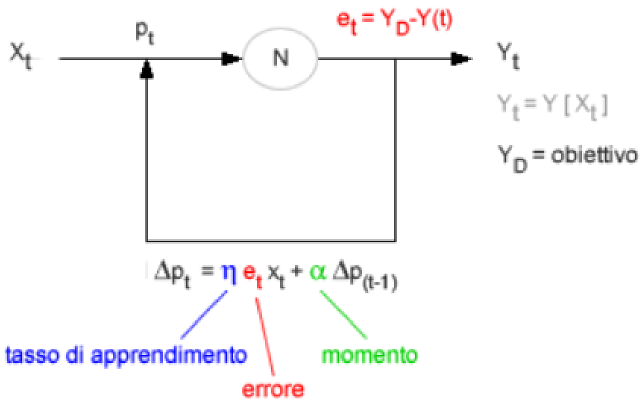

Figura 3-7: L'algoritmo di backpropagation.

Come possiamo notare, una volta ottenuto il valore y_t, utilizzando l'algoritmo di propagazione a ritroso, lo si confronta con il valore target tramite la quantità e_t, ovvero tramite il quantitativo di errore commesso durante il ciclo. Quest'ultimo verrà inserito all’interno della formulazione utilizzata all’interno della backpropagation, affinché si possa calcolare un nuovo peso Δp_t attribuibile nel ciclo neurale successivo. Il procedimento continua fino al raggiungimento della totale (o quasi, a meno di errori di entità trascurabili) convergenza del risultato finale.

Come possiamo notare, inoltre, l’algoritmo utilizza anche i parametri η e α, ovvero rispettivamente il tasso di apprendimento e il momento. Entrambi hanno valori che variano tra 0 e 1 e hanno lo scopo, rispettivamente, di influenzare la velocità del processo di apprendimento della rete neurale (tanto più η è elevato, tanto più è veloce l’apprendimento) e di favorire la convergenza dei risultati.

3.4 Utilizzo delle ANNs nell’ambito dell’ingegneria civile

Nei termini relativi al problema di progetto del sistema di isolamento sismico in oggetto, l’approccio presentato nel corrente paragrafo può essere impiegato allo scopo di trovare i valori ottimali in termini di coefficienti di attrito, da assegnare ai dispositivi friction pendulum in maniera tale che il sistema strutturale possa conseguire i livelli prestazionali prescritti dalle attuali normative per le strutture di importanza strategica. L’utilizzo delle ANNs, in realtà, non risulta essere inesplorato in ambito strutturale in quanto sono già state utilizzate apposite reti neurali in grado di predire il comportamento dinamico di una generica struttura sottoposta a sisma, oppure per controllare l’effetto dinamico di ponti [4]. L’innovazione presentata all’interno della presente tesi consterà dunque nell’individuazione tramite ANN, e relativa inversione, di parametri ottimali da assegnare a dispositivi DCFPs, tenendo in esplicita considerazione le caratteristiche impulsive dei sismi in ingresso (near-fault), il cui effetto risulta essere particolarmente critico per il sistema di protezione sismica studiato.

CAPITOLO 4

Inversione della rete neurale

4.1 Teoria generale

Come affermato nel capitolo 3, le reti neurali si compongono di uno o più layers nascosti che risultano essere essenziali affinché la si possa correttamente tarare ed utilizzare per eseguire delle previsioni. Ciò implica che, non potendo agire su tali raggruppamenti di neuroni, potrebbero presentarsi una serie di errori di rete, non direttamente controllabili dal creatore della stessa.

A tal proposito, esistono dei metodi che sono stati studiati appositamente per comprendere il meccanismo interno, l'architettura e il funzionamento delle ANNs in modo tale da poterle testare e verificare la loro corretta versatilità. Uno dei metodi che possono essere utilizzati è proprio la *backpropagation* esaminata nel precedente capitolo, che si avvale dello strumento di gradiente decrescente al fine di quantificare l'errore commesso all'interno dello sviluppo della ANN. Tuttavia, tale operazione non risulta essere la più efficace, in quanto non consente il ritrovamento di minimi locali di errore, bensì si sofferma su un unico minimo globale. Ciò potrebbe rappresentare un limite nel caso in cui si volessero ritrovare più pattern di input e non un unico valore.

Un altro metodo potrebbe essere quello di creare un'apposita rete neurale artificiale "invertita", nella quale vengono inseriti manualmente come input i dati di output restituiti dalla ANN che si vuole testare. In questo caso però, non avremmo un valore di output comparabile con quello di input della rete neurale iniziale, bensì un valore medio.

L'ultimo, e più efficace, metodo di inversione della rete neurale, consiste nell'utilizzo di particolari algoritmi evolutivi in grado di lavorare con più input pattern per volta, anziché uno solo, il quale verrà approfondito al paragrafo successivo.

Va detto infatti che affinché il metodo di inversione si possa ritenere efficace, è necessario che vengano rispettate due condizioni fondamentali:

1. Si deve poter lavorare con più input pattern per volta, corrispondenti però ad un unico output;
2. Si deve consentire il ritrovamento di minimi locali e non globali all'interno della funzione di errore.

4.2 Algoritmi evolutivi

Questo meccanismo di inversione delle reti neurali si basa, ancora una volta, sul parallelismo con l'ambiente biologico. Infatti, come all'interno del DNA umano sono presenti genotipo (le informazioni) e fenotipo (ovvero l'organismo ospitante), così all'interno di questi particolari algoritmi sono presenti dei vettori o delle matrici (corrispondenti ai precedenti genotipi), ospitati all'interno di *datastructures* (corrispondenti ai fenotipi).

Secondo le teorie evolutive, inoltre, in base all'adattamento con l'ambiente circostante, solo alcuni fenotipi proseguiranno con il loro processo evolutivo, mentre gli altri si andranno via via ad estinguere. All'interno degli algoritmi evolutivi, tale procedimento è espresso mediante un valore di *fitness*, ovvero un valore limite oltre il quale i relativi dati verranno scartati e non utilizzati.

Tra gli algoritmi evolutivi i più conosciuti sono gli algoritmi genetici. Essi operano per mezzo di stringhe binarie, motivo per cui si otterranno un numero limitato di soluzioni (dovuto al fatto che il numero di stringhe è anch'esso limitato) e motivo per cui il variare di anche solo un bit all'interno della stessa stringa può portare a risultati completamente differenti.

I vantaggi dell'utilizzo di tali algoritmi genetici, come precedentemente affermato, stanno nell'individuazione dunque di una popolazione di punti che si andrà a localizzare negli intorni dei minimi della funzione errore esplorata. Tuttavia, per poter trovare tutti i minimi locali, è necessario andare a differenziare le possibili soluzioni all'interno di nicchie, che consentono l'individuazione di più soluzioni. Tutto ciò è effettuato tramite l'utilizzo di apposite funzioni di *sharing*, direttamente implementate all'interno degli algoritmi genetici, per le quali tuttavia, va dato un valore iniziale, in modo da poter velocizzare e ottimizzare l'analisi in intorni di minimo locale ben stabiliti.

4.3 Utilizzo dell'inversione delle ANN all'interno della trattazione

Durante lo sviluppo della trattazione, l'utilizzo delle tecniche di inversione delle reti neurali non verrà utilizzato tuttavia come metodo di verifica del buon funzionamento della ANN in quanto già precedentemente testata, bensì svolgerà il ruolo di strumento di progetto, in modo tale da restituire i parametri ottimali da attribuire ai dispositivi di isolamento DCFP, una volta assegnata una certa entità sismica e un certo schema strutturale.

Un simile approccio risulta avere un forte carattere di innovatività,essendo presenti pochi studi specifici sull'applicazione delle reti neurali ai problemi di ingegneria civile [5]. In essi viene sviluppata e invertita un'apposita ANN con l'obiettivo di ottenere le proprietà geometriche ottimali, in termini di costo, da poter attribuire ad una struttura in cemento armato sottoposta a sisma. In effetti, sono già presenti in commercio una serie di software che per mezzo di appositi algoritmi, forniscono dei limiti geometrici, coerenti con le normative vigenti in ambito di costruzioni, da poter assegnare agli elementi strutturali portanti, in grado di assicurare il corretto funzionamento antisismico della struttura. L'innovazione proposta dalla letteratura recente sta proprio nell'utilizzo delle ANN e della loro inversione, con lo scopo di trovare una serie di combinazioni geometriche assegnabili alla struttura per poter garantire le prestazioni previste dalla normativa antisismica, vincolandoli però alla minimizzazione dei costi di realizzazione e gestione. L'ulteriore innovazione proposta all'interno della presente trattazione è da ricondursi all'individuazione dei parametri ottimali da attribuire a dispositivi di isolamento sismico, in modo tale da poter eseguire un'operazione di retrofit per qualsiasi tipo di viadotto e per qualsiasi specifica condizione sismica locale presa in esame. Nello specifico sarà privilegiato un approccio di carattere ingegneristico più che numerico al problema di inversione. Nel capitolo 10 si mostrerà in maniera formale l'espressione matematica generata mediante la rete neurale e si studierà il contributo dei singoli termini in essa presenti, evidenziando le criticità legate alla ricerca dei minimi della funzione di costo e proponendo una soluzione numerica diretta al problema.

CAPITOLO 5

Descrizione del sistema analizzato

5.1 Introduzione al problema esaminato

L'applicazione della procedura di ottimizzazione progettuale presentata nei precedenti capitoli verrà implementata su di un sistema strutturale rappresentato da un ponte multi-campata, ad impalcato continuo discretizzato tramite un sistema ad 8 gradi di libertà, nel quale sono stati inseriti due dispositivi friction pendulum, dotati di due superfici curve di scorrimento ad attrito (da qua in avanti denominati come DCFP), una inferiore (indicata con il numero 1) e una superiore (indicata con il numero 2). In particolare, 5 gdl sono stati impiegati nella discretizzazione della pila; 2 gdl sono rappresentativi dei sistemi di isolamento DCFP, posti sia in sommità della pila stessa che della spalla; mentre il restante grado di libertà è stato utilizzato per modellare la dinamica dell'impalcato della struttura.

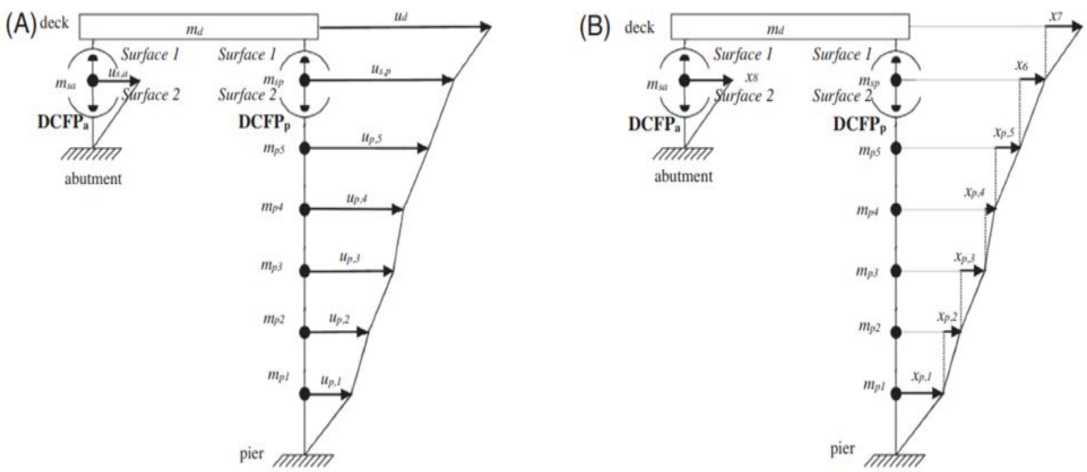

Figura 5-1: schematizzazione del sistema analizzato. [1]

Come mostrato in figura 5-1, il sistema in esame viene analizzato senza considerare i dettagli costruttivi, in quanto interessati al meccanismo generale di risposta dinamico generale del viadotto soggetto a sisma. La trattazione sarà dunque il più essenziale possibile, trascurando una serie di effetti, tra cui quelli benefici dati dall'interazione con il terreno di riporto su spalla.

Tale discretizzazione 8-dofs permette dunque di analizzare e tenere in conto anche della flessibilità intrinseca dell'elemento pila in cemento armato, considerata perciò come un elemento elastico, contrastata dalla rigidezza dell'impalcato e della spalla, anch'essi composti di cemento armato.

Da ultimo, il comportamento degli isolatori attritivi a doppia curvatura (DCFP) è stato rappresentato combinando due friction pendulum a singola superficie di attrito posizionati in serie.

Sotto queste condizioni, si può perciò assumere che l'impalcato si comporti come un corpo rigido e che, di conseguenza, supponendo che sul sistema agisca una eccitazione sismica $\ddot{u_g}(t)$ agente in direzione longitudinale, le equazioni del moto possano essere scritte nella forma seguente:

$$m_d[\ddot{u}_d(t) + \ddot{u}_g(t)] + F_{1a}(t) + F_{1p}(t) = 0 \tag{5.1a}$$

$$m_{sa}\,[\ddot{u}_{sa}(t) + \ddot{u}_g(t)] - F_{1a}(t) + F_{2a}(t) = 0 \tag{5.1b}$$

$$m_{sp}\,[\ddot{u}_{sp}\,(t) + \ddot{u}_g(t)] - F_{1p}(t) + F_{2p}(t) = 0 \tag{5.1c}$$

$$\begin{aligned} m_{p5}\,[\ddot{u}_{p5}(t) + \ddot{u}_g(t)] + c_{p5}[\dot{u}_{p5}(t) - \dot{u}_{p4}(t)] + k_{p5}[u_{p5}(t) - u_{p4}(t)] \\ - F_{2p}(t) = \ 0 \end{aligned} \tag{5.1d}$$

$$\begin{aligned} m_{pi}\big[\ddot{u}_{pi}(t) + \ddot{u}g(t)\big] + c_{pi}\big[\dot{u}_{pi}(t) - \dot{u}_{p(i-1)}(t)\big] + k_{pi}\big[u_{pi}(t) - u_{p(i-1)}(t)\big] \\ - c_{p(i+1)}\big[\dot{u}_{p(i+1)}(t) - \dot{u}_{pi}(t)\big] - k_{p(i+1)}\big[u_{p(i+1)}(t) - u_{pi}(t)\big] \\ = 0 \end{aligned} \tag{5.1e}$$

per $i = 1,\ldots, 4$

dove:

- u_d *è* lo spostamento dell'impalcato;
- u_{sp} è lo spostamento del dispositivo FP posto sulla pila;
- u_{sa} è lo spostamento del dispositivo FP posto sulla spalla;
- u_{pi} è lo spostamento relativo della i-esima massa della pila;
- m_{sp} e m_{sa} sono le masse dei FP a doppia curvatura posti rispettivamente su pila e su spalla;
- m_d *è* la massa dell'impalcato;
- m_{pi} è la massa i-esima della pila;
- k_{pi} e c_{pi} sono rispettivamente la costante di rigidezza e il coefficiente di smorzamento dell'i-esimo elemento della pila;
- *t* è la variabile tempo.

$F_{ja}(t)$ e $F_{jp}(t)$ sono le reazioni vincolari esercitate dai DCFP rispettivamente posti sulla spalla e sulla pila, in cui l'indice j=1 rappresenta la superficie superiore, mentre j=2 rappresenta quella inferiore.

In particolare, le F_j possono essere valutate tramite le seguenti espressioni:

$$F = F_1 = F_2 = \frac{m_d g}{R_1 + R_2}(u) + \frac{m_d g(R_1\mu_1(\dot{u_1})sgn(\dot{u_1}) + R_2\mu_2(\dot{u_2})sgn(\dot{u_2})}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

in cui appare chiara la stretta dipendenza che intercorre tra le reazioni vincolari esercitate dai DCFP e:

- i raggi di curvatura superiore (R_1) e inferiore (R_2) delle superfici di scorrimento dei dispositivi;
- la massa dell'impalcato m_d;
- lo spostamento globale del dispositivo di isolamento u;
- lo spostamento globale della superficie superiore u_1 e inferiore u_2;
- i coefficienti di attrito delle due superfici μ_i (con i=1,2) correlati alle rispettive velocità di slittamento $\ddot{u_\iota}$ (con i=1,2).

Con l'obiettivo di limitare il numero di parametri da cui dipende la risposta dinamica del sistema, si è proceduto ad una operazione di "non dimensionalizzazione" delle equazioni del moto sopra descritte [1].

5.2 Il teorema di Buckingham

L'approccio "non-dimensionale" ha il suo fondamento teorico nel teorema di Buckingham (o del Π). Esso, infatti, cita: "*Assegnato un processo fisico dipendente da n grandezze, è sempre possibile esprimerlo con una funzione di (n-k) gruppi adimensionali, dove k è il numero di grandezze fondamentali"*. Nel caso in esame, infatti, il processo fisico trattato è rappresentato dall'insieme delle equazioni del moto descritte nelle (5.1a, b, c, d, e), all'interno delle quali possiamo riconoscere la presenza di una base, ovvero di grandezze che risultano essere tra loro indipendenti, quali m_d e m_{pi}. In particolare, il teorema di Buckingham permette di passare da un processo fisico regolato dall'equazione

$$f\,(a_1, a_2,..., a_n)=0 \qquad (5.3)$$

ad un sistema del tipo:

$$f\,(a_1, a_2,..., a_k, a_{k+1}, a_{k+2}, \ldots ,a_n)=0 \qquad (5.4)$$

dove $a_1,...,a_k$ rappresentano le grandezze fondamentali del problema, mentre $a_{k+1},...,a_n$ sono le grandezze residue, dipendenti dalle fondamentali.

Il processo espresso nella (5.3) può perciò essere riformulato mediante la seguente espressione

$$\tilde{f}\,(a_1, a_2,..., a_k, \Pi_1,..., \Pi_{n-k})=0 \qquad (5.5)$$

in cui i termini Π_i sono adimensionali e dipendenti dalle grandezze $a_1, \ldots, a_k$, ovvero dalle grandezze che compongono la *base* all'interno dell'equazione (5.3). Tali termini possono essere espressi mediante la seguente forma:

$$\Pi_i = \frac{a_i}{a_1^{\alpha_i} \cdot a_2^{\beta_i} \cdot \ldots \cdot a_k^{\delta_i}} \qquad (5.6)$$

con $i=1, 2, \ldots , n\text{-}k$ e α_i, β_i e δ_i esponenti tali che la quantità risulti adimensionale. Tramite il teorema in esame, dunque, nel caso in cui fosse necessario passare ad un altro sistema di misura, solo i termini adimensionali del processo fisico non muterebbero il loro valore numerico, cosicché la nuova funzione $\tilde{f}$ dipenderebbe unicamente dai termini adimensionali, ovvero:

$$\tilde{f}\,(\Pi_i)=0 \qquad (5.7)$$

5.3 Parametrizzazione delle equazioni del moto

Attraverso l'approccio presentato è possibile effettuare una parametrizzazione del sistema dinamico, per prima cosa si riscrivono le (5.1a, b, c, d, e) non più in termini di spostamenti globali, denominati con la lettera *u*, bensì in termini di spostamenti relativi tra le differenti masse concentrate con cui viene discretizzato il sistema 8-dofs, denominati nel seguito con la lettera *x*. In tal modo si ottengono le seguenti equazioni:

$$m_d\ddot{x}_7(t) + m_d\ddot{x}_6(t) + m_d\ddot{x}_{p5}(t) + m_d\ddot{x}_{p4}(t) + m_d\ddot{x}_{p3}(t) + m_d\ddot{x}_{p2}(t) + m_d\ddot{x}_{p1}(t) + F_{1a}(t) + F_{1p}(t) = -m_d\ddot{u}_g(t) \tag{5.8a}$$

$$m_{sp}\ddot{x}_6(t) + m_{sp}\ddot{x}_{p5}(t) + m_{sp}\ddot{x}_{p4}(t) + m_{sp}\ddot{x}_{p3}(t) + m_{sp}\ddot{x}_{p2}(t) + m_{sp}\ddot{x}_{p1}(t) - F_{1p}(t) + F_{2p}(t) = -m_{sp}\ddot{u}_g(t) \tag{5.8b}$$

$$m_{sa}\ddot{x}_8(t) - F_{1a}(t) + F_{2a}(t) = -m_{sa}\ddot{u}_g(t) \tag{5.8c}$$

$$m_{p5}\ddot{x}_{p5}(t) + m_{p5}\ddot{x}_{p4}(t) + m_{p5}\ddot{x}_{p3}(t) + m_{p5}\ddot{x}_{p2}(t) + m_{p5}\ddot{x}_{p1}(t) + c_{p5}\dot{x}_{p5}(t) + k_{p5}x_{p5}(t) - F_{2p}(t) = -m_{p5}\ddot{u}_g(t) \tag{5.8d}$$

$$m_{p4}\ddot{x}_{p4}(t) + m_{p4}\ddot{x}_{p3}(t) + m_{p4}\ddot{x}_{p2}(t) + m_{p4}\ddot{x}_{p1}(t) - c_{p5}\dot{x}_{p5}(t) - k_{p5}x_{p5}(t) + c_{p4}\dot{x}_{p4}(t) + k_{p4}x_{p4}(t) = -m_{p4}\ddot{u}_g(t) \tag{5.8e}$$

$$m_{p3}\ddot{x}_{p3}(t) + m_{p3}\ddot{x}_{p2}(t) + m_{p3}\ddot{x}_{p1}(t) - c_{p4}\dot{x}_{p4}(t) - k_{p4}x_{p4}(t) + c_{p3}\dot{x}_{p3}(t) + k_{p3}x_{p3}(t) = -m_{p3}\ddot{u}_g(t) \tag{5.8f}$$

$$m_{p2}\ddot{x}_{p2}(t) + m_{p2}\ddot{x}_{p1}(t) - c_{p3}\dot{x}_{p3}(t) - k_{p3}x_{p3}(t) + c_{p2}\dot{x}_{p2}(t) + k_{p2}x_{p2}(t) = -m_{p2}\ddot{u}_g(t) \tag{5.8g}$$

$$m_{p1}\ddot{x}_{p1}(t) - c_{p2}\dot{x}_{p2}(t) - k_{p2}x_{p2}(t) + c_{p1}\dot{x}_{p1}(t) + k_{p1}x_{p1}(t) = -m_{p1}\ddot{u}_g(t) \tag{5.8h}$$

Con la stessa logica è possibile modificare la (5.2) come segue:

$$F_{1a} = \frac{m_d g}{2}[\frac{1}{R_{1a}}(\sum_{i=1}^{5} x_{pi} + x_6 + x_7 - x_8) + \mu_{1a}(\dot{x_9})(sgn(\dot{x_9}))] \tag{5.9a}$$

$$F_{2a} = \left(\frac{m_d}{2} + m_{sa}\right) g[\frac{1}{R_{2a}}(x_8) + \mu_{2a}(\dot{x_8})(sgn(\dot{x_8}))] \tag{5.9b}$$

$$F_{1p} = \frac{m_d g}{2}[\frac{1}{R_{1p}}(x_7) + \mu_{1p}(\dot{x_7})(sgn(\dot{x_7}))] \tag{5.9c}$$

$$F_{2p} = \left(\frac{m_d}{2} + m_{sp}\right) g[\frac{1}{R_{2p}}(x_6) + \mu_{2p}(\dot{x_6})(sgn(\dot{x_6}))] \tag{5.9d}$$

rimandando alle (5.2) per l'espressione primitiva delle forze F_j.

In seguito, si dividono le equazioni (8) per la massa dell'impalcato m_d e si introducono i seguenti rapporti:

$$\lambda_{pi} = \frac{m_{pi}}{m_d} \quad (5.10a)$$

$$\lambda_{sa} = \frac{m_{sa}}{m_d} \quad (5.10b)$$

$$\lambda_{sp} = \frac{m_{sp}}{m_d} \quad (5.10c)$$

$$\omega_d = \sqrt{\frac{k_{comb}}{m_d}} \quad (5.10d)$$

$$\omega_{pi} = \sqrt{\frac{k_{pi}}{m_d}} \quad (5.10e)$$

$$\xi_{pi} = \frac{c_{pi}}{2m_{pi}\omega_{pi}} \quad (5.10f)$$

(con i=1, …, 5)

dove i primi tre termini denotano i rapporti di massa, il quarto, il quinto e il sesto rappresentano rispettivamente la frequenza dell'impalcato isolato, la frequenza e il coefficiente di smorzamento viscoso della i-esima massa.

Infine, introducendo la scala temporale $\tau = t\omega_d$ e la scala di intensità sismica a_0, come $\ddot{u_g} = a_0 l(\tau)$ dove $l(\tau)$ rappresenta l'input sismico adimensionalizzato, si può passare alla parametrizzazione degli spostamenti relativi, appena introdotti:

$$\psi_{pi} = \frac{x_{pi}\omega_d^2}{a_0} \quad \text{per i gdl della pila} \quad (5.11a)$$

$$\psi_{di} = \frac{x_i\omega_d^2}{a_0} \quad \text{per l'impalcato isolato} \quad (5.11b)$$

Otteniamo così il seguente sistema di otto equazioni:

$$
\begin{aligned}
&\ddot{x}_7(t) + \ddot{x}_6(t) + \ddot{x}_{p5}(t) + \ddot{x}_{p4}(t) + \ddot{x}_{p3}(t) + \ddot{x}_{p2}(t) + \ddot{x}_{p1}(t) \\
&\qquad + \frac{g}{2}\left[\frac{1}{R_{1a}}\left(\sum_{i=1}^{5} x_{pi} + x_6 + x_7 - x_8\right)\right. \\
&\qquad \left. + \mu_{1a}(\dot{x}_9)\left(sgn\left(\sum_{i=1}^{5} \dot{x}_{pi} + \dot{x}_6 + \dot{x}_7 - \dot{x}_8\right)\right)\right] \\
&\qquad + \frac{g}{2}\left[\frac{1}{R_{1p}}(x_7) + \left(\mu_{1p}(\dot{x}_7)\right)\left(sgn(\dot{x}_7)\right)\right] = \ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12a}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lambda_{sp}(\ddot{x}_6(t) + \ddot{x}_{p5}(t) + \ddot{x}_{p4}(t) + \ddot{x}_{p3}(t) + \ddot{x}_{p2}(t) + \ddot{x}_{p1}(t)) - \frac{g}{2}[\frac{1}{R_{1p}}(x_7) \\
&\qquad + \mu_{1p}(\dot{x}_7)(sgn(\dot{x}_7))] + \ (\frac{1}{2} + \lambda_{sp})g\ [\frac{1}{R_{2p}}(x_6) \\
&\qquad + (\mu_{2p}(\dot{x}_6))(sgn(\dot{x}_6))] = -\ \lambda_{sp}\ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12b}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lambda_{sp}\ddot{x}_8(t) - \ \frac{g}{2}[\frac{1}{R_{1a}}\left(\sum_{i=1}^{5} x_{pi} + x_6 + x_7 - x_8\right) + \\
&+\mu_{1a}(\dot{x}_9)(sgn(\sum_{i=1}^{5} \dot{x}_{pi} + \dot{x}_6 + \dot{x}_7 - \dot{x}_8))] + \ (\frac{1}{2} + \lambda_{sa})g[\frac{1}{R_{2a}}(x_8) \\
&\qquad + \mu_{2a}(\dot{x}_8)(sgn(\dot{x}_8))] = -\lambda_{sa}\ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12c}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lambda_{p5}\left(\ddot{x}_{p5}(t) + \ddot{x}_{p4}(t) + \ddot{x}_{p3}(t) + \ddot{x}_{p2}(t) + \ddot{x}_{p1}(t)\right) + 2\xi_{p5}\omega_{p5}\lambda_{p5}\dot{x}_{p5}(t) \\
&\qquad + \omega_{p5}^2\lambda_{p5}x_{p5}(t) \\
&\qquad - \ \left(\frac{1}{2} + \lambda_{sp}\right)g\left[\frac{1}{R_{2p}}(x_6) + \left(\mu_{2p}(\dot{x}_6)\right)\left(sgn(\dot{x}_6)\right)\right] \\
&\qquad = -\ \lambda_{p5}\ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12d}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lambda_{p5}(\ddot{x}_{p4}(t) + \ddot{x}_{p3}(t) + \ddot{x}_{p2}(t) + \ddot{x}_{p1}(t)) - 2\xi_{p5}\omega_{p5}\lambda_{p5}\dot{x}_{p5}(t) \\
&\qquad - \omega_{p5}^2\lambda_{p5}x_{p5}(t) + 2\xi_{p4}\omega_{p4}\lambda_{p4}\dot{x}_{p4}(t) \ + \omega_{p4}^2\lambda_{p4}x_{p4}(t) \\
&\qquad = -\lambda_{p4}\ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12e}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lambda_{p3}\left(\ddot{x}_{p3}(t) + \ddot{x}_{p2}(t) + \ddot{x}_{p1}(t)\right) - 2\xi_{p4}\omega_{p4}\lambda_{p4}\dot{x}_{p4}(t) - \omega_{p4}^2\lambda_{p4}x_{p4}(t) \\
&\qquad + 2\xi_{p3}\omega_{p3}\lambda_{p3}\dot{x}_{p3}(t) + \omega_{p3}^2\lambda_{p3}x_{p3}(t) = -\lambda_{p3}\ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12f}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lambda_{p2}(\ddot{x}_{p2}(t) + \ddot{x}_{p1}(t)) - 2\xi_{p3}\omega_{p3}\lambda_{p3}\dot{x}_{p3}(t) - \omega_{p3}^2\lambda_{p3}x_{p3}(t) \\
&\qquad + 2\xi_{p2}\omega_{p2}\lambda_{p2}\dot{x}_{p2}(t) \ + \omega_{p2}^2\lambda_{p2}x_{p2}(t) = -\lambda_{p2}\ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12g}
$$

$$
\begin{aligned}
&\lambda_{p1}\ddot{x}_{p1}(t) - 2\xi_{p2}\omega_{p2}\lambda_{p2}\dot{x}_{p2}(t) - \omega_{p2}^2\lambda_{p2}x_{p2}(t) + 2\xi_{p1}\omega_{p1}\lambda_{p1}\dot{x}_{p1}(t) \\
&\qquad + \omega_{p1}^2\lambda_{p1}x_{p1}(t) = -\lambda_{p1}\ddot{u}_g(t)
\end{aligned} \tag{5.12h}
$$

Ne deriva che il sistema iniziale, composto da un viadotto ad impalcato continuo, multispanna, discretizzato tramite ausilio di 8 gradi di libertà, risulta governato dai seguenti parametri adimensionali, nel rispetto del precedentemente esplicato teorema di Buckingham:

$$\Pi_{\omega i} = \frac{\omega_{pi}}{\omega_d} \tag{5.13a}$$

$$\Pi_{\lambda i} = \lambda_{pi} = \frac{m_{pi}}{m_d} \tag{5.13b}$$

$$\Pi_{\lambda sa} = \lambda_{sa} \tag{5.13c}$$

$$\Pi_{\lambda sp} = \lambda_{sp} \tag{5.13d}$$

$$\Pi_{\mu 1a}(\dot{\psi}_9) = \frac{\mu_{1a}(\dot{\psi}_9)g}{a_0} \tag{5.13e}$$

$$\Pi_{\mu 1p}(\dot{\psi}_7) = \frac{\mu_{1p}(\dot{\psi}_7)g}{a_0} \tag{5.13f}$$

$$\Pi_{\mu 2a}(\dot{\psi}_8) = \frac{\mu_{2a}(\dot{\psi}_8)g}{a_0} \tag{5.13g}$$

$$\Pi_{\mu 2p}(\dot{\psi}_6) = \frac{\mu_{2p}(\dot{\psi}_6)g}{a_0} \tag{5.13h}$$

$$\Pi_{\xi pi} = \xi_{pi} \tag{5.13i}$$

Come possiamo notare, la (5.13i) non è definita come un rapporto, ma risulta unicamente un'assunzione semplificativa; differentemente i rapporti (13e, f, g, h) dipendono dalla velocità, motivo per cui è utile considerarne i valori massimi (che risultano essere quelli di maggiore interesse), in termini progettuali definiti come:

$$\Pi_{\mu 1a} = \frac{\mu_{1,max,a}\ g}{a_0} \tag{5.14a}$$

$$\Pi_{\mu 1p} = \frac{\mu_{1,max,p}\ g}{a_0} \tag{5.14b}$$

$$\Pi_{\mu 2a} = \frac{\mu_{2,max,a}\ g}{a_0} \tag{5.14c}$$

$$\Pi_{\mu 2p} = \frac{\mu_{2,max,p}\ g}{a_0} \tag{5.14d}$$

CAPITOLO 6

Valutazione dell'intensità sismica

6.1 Principali parametri di misurazione utilizzati

Nelle analisi numeriche condotte si farà riferimento a 45 eventi sismici registrati negli ultimi anni caratterizzati da elevati valori di magnitudo e un ampio range di valori del rapporto PGA/PGV. Quest'ultimo in particolare sarà un parametro fondamentale della trattazione in quanto, andando a relazionare il picco di accelerazione massimo del suolo con il picco stesso di velocità, è possibile ottenere una rappresentazione sintetica ddel contenuto energetico in frequenza del sisma.

Come noto, i due parametri in esame, ovvero PGA e PGV, nonostante siano tra loro correlati, non presentano lo stesso grado di precisione nell'ambito della misura dell'intensità sismica. Mentre la PGA (*Peak Ground Acceleration*) risulta essere calcolata in maniera diretta, estrapolando il massimo valore indicato dai rilevatori accelerometrici, la PGV (*Peak Ground Velocity*) viene calcolata in maniera indiretta a partire dall'intera time-history. Infatti, proprio come nel caso di accelerazione e velocità, anche in questo caso il valore di PGV viene ottenuto per integrazione della PGA.

Attualmente le norme tecniche per le costruzioni prevedono l'utilizzo della sola PGA per quanto attiene alla procedura di calcolo legata alla progettazione di strutture in zona sismica. Le disposizioni normative, tramite dei range di valori PGA, definiscono diverse zone sismiche che coprono il territorio italiano, sulla base di una serie di valori di soglia relativi alla probabilità di superamento del valore della stessa PGA in un periodo di tempo fissato. Tali valori limite di PGA sono stati definiti tramite analisi probabilistiche, a seguito delle quali si sono poi successivamente costruite le cosiddette mappe di rischio sismico. Il parametro PGA, tuttavia, non è in grado di fornire, da solo, le informazioni necessarie affinché si possa caratterizzare frequenza e durata dell'evento sismica, motivazione per la quale si fa molto spesso riferimento anche alla PGV. Quest'ultima, a differenza della prima, il cui valore è strettamente legato alle forze dinamiche introdotte dal sisma sulla struttura, risulta essere caratterizzante nei confronti dell'ampiezza del moto sismico, nonché nei confronti della valutazione del danneggiamento imposto nel caso in cui la frequenza propria di oscillazione della struttura presenti valori intermedi intermedi.

6.2 Presentazione dei 45 sismi record

Si riporta di seguito la lista dei 45 sismi oggetto di esame, suddivisi per l'appunto, in tre categorie al variare del rapporto PGA/PGV.

1. PGA(g)/PGV > 1.2 :

terremoto	data	magnitudo	distanza epicentrale [km]	PGA (g)	PGV [m/s]	PGA(g)/PGV
Parkfield California	27/06/1966	5.6	7	0.269	0.145	1.86
Parkfield California	27/06/1966	5.6	5	0.434	0.255	1.7
San Francisco California	22/03/1957	5.25	11	0.105	0.046	2.28
San Francisco California	22/03/1957	5.25	17	0.085	0.051	1.67
Helena Montana	21/10/1935	6	8	0.146	0.072	2.03
Lytle Creek	21/09/1970	5.4	15	0.198	0.096	2.06
Oroville California	01/08/1975	5.7	13	0.084	0.044	1.91
San Fernando California	09/02/1971	6.4	4	1.075	0.577	1.86
San Fernando California	09/02/1971	6.4	26	0.146	0.085	1.72
Nahanni N. W. T., Canada	23/12/1985	6.9	7.5	1.101	0.462	2.38
Central Honshu, Giappone	26/02/1971	5.5	27	0.151	0.059	2.56
Near East Coast of Honshu, Giappone	11/05/1972	5.8	33	0.146	0.06	2.43
Honshu, Giappone	05/04/1966	5.4	4	0.27	0.111	2.43
Monte Negro Yugoslavia	09/04/1979	5.4	12.5	0.042	0.016	2.63
Banja Luka Yugoslavia	13/08/1981	6.1	8.5	0.074	0.032	2.31

Tabella 6-1

2. 0.8 < PGA(g)/PGV < 1.2 :

terremoto	data	magnitudo	distanza epicentrale [km]	PGA (g)	PGV [m/s]	PGA(g)/PGV
Imperial Valley California	18/05/1940	6.6	8	0.348	0.334	1.04
Kern County California	21/07/1952	7.6	56	0.179	0.177	1.01
Kern County California	21/07/1952	7.6	56	0.156	0.157	0.99
Borrego Mtn. California	08/04/1968	6.5	122	0.046	0.042	1.1
Borrego Mtn. California	08/04/1968	6.5	122	0.041	0.037	1.11
San Fernando California	09/02/1971	6.4	24	0.15	0.149	1.01
San Fernando California	09/02/1971	6.4	35	0.211	0.211	1
San Fernando California	09/02/1971	6.4	39	0.165	0.166	0.99
San Fernando California	09/02/1971	6.4	31	0.18	0.205	0.88
San Fernando California	09/02/1971	6.4	41	0.199	0.167	1.19
Near East Coast of Honshu, Giappone	16/11/1974	6.1	38	0.07	0.072	0.97
Near East Coast of Honshu, Giappone	02/08/1971	7	196	0.078	0.068	1.15
Monte Negro Yugoslavia	15/04/1979	7	17	0.171	0.194	0.88
Mexico Earthquake	19/09/1985	8.1	230	0.105	0.116	0.91
Mexico Earthquake	19/09/1985	8.1	44	0.123	0.105	1.17

Tabella 6-2

3. PGA(g)/PGV < 0.8 :

terremoto	data	magnitudo	distanza epicentrale [km]	PGA (g)	PGV [m/s]	PGA(g)/PGV
Long Beach California	10/03/1933	6.3	59	0.097	0.237	0.41
Long Beach California	10/03/1933	6.3	59	0.064	0.173	0.37
Lower California	30/12/1934	6.5	58	0.16	0.209	0.77
San Fernando California	09/02/1971	6.4	40	0.101	0.193	0.52
San Fernando California	09/02/1971	6.4	39	0.132	0.216	0.61
San Fernando California	09/02/1971	6.4	41	0.129	0.186	0.69
San Fernando California	09/02/1971	6.4	39	0.114	0.186	0.61
San Fernando California	09/02/1971	6.4	38	0.117	0.215	0.54
San Fernando California	09/02/1971	6.4	41	0.119	0.173	0.69
San Fernando California	09/02/1971	6.4	32	0.106	0.17	0.62
Near East Coast of Honshu, Giappone	16/05/1968	7.9	290	0.226	0.334	0.68
Near East Coast of Honshu, Giappone	17/16/1973	7.4	112	0.205	0.275	0.75
Mexico Earthquake	19/09/1985	8.1	135	0.103	0.159	0.65
Mexico Earthquake	19/09/1985	8.1	333	0.052	0.074	0.7
Mexico Earthquake	19/09/1985	8.1	379	0.04	0.11	0.36

Tabella 6-3

Come si può notare, gli eventi considerati presentano una magnitudo variabile da 5.6 a 8.1, mentre il parametro di caratterizzazione prescelto, ovvero il rapporto PGA/PGV, varia da 0.36 a 2.63.

All'interno delle tabelle sopra riportate sono stati inclusi inoltre le date di occorrenza degli avvenimenti sismici, le geolocalizzazioni dei luoghi in cui si sono verificati, nonché le distanze misurate degli epicentri.

CAPITOLO 7

Elaborazione dei dati di input

7.1 Creazione dello script Matlab

Come riportato nei capitoli precedenti, i dati di input della rete neurale artificiale, riportati in versione integrale all'interno dell'Appendice A, saranno composti da un insieme di parametri puramente descrittivo della struttura, della quale faranno parte, ad esempio, massa dell'impalcato, numero di gradi di libertà utilizzati per la discretizzazione del sistema strutturale, rapporti di massa e di smorzamento come descritti nelle (5.10). Una componente di tali dati, invece, caratterizzerà le eccitazioni sismiche, così come descritte nel capitolo precedente.

In particolare, l'elaborazione dei dati effettuata utilizzando il software di calcolo Matlab, ha preso in considerazione, i seguenti parametri:

```
g = 9.81;
n = 5;
```

rispettivamente l'accelerazione di gravità, a cui è attribuito il valore canonico pari a 9.81 m/s^2 e il numero di gradi di libertà della pila posto pari a 5.

Per quanto concerne invece i parametri scelti per modellare il sistema isolato si sono considerate le seguenti grandezze:

- T_d, ovvero il periodo del sistema isolato tramite dispositivi DCFPs, che varia da 2s a 4s con un passo pari a 0.5s (esso assumerà dunque i valori di 2s, 2.5s, 3s, 3.5s e 4s);
- T_p, ovvero il periodo della pila, variabile da 0.05s a 0.2s con un passo pari a 0.05s (assumerà dunque valori pari a 0.05s, 0.1s, 0.15s, 0.2s);
- λ_p, ovvero il rapporto fra la massa della pila e dell'impalcato isolato, con valori variabili pari a 0.1, 0.15 e 0.2;
- il coefficiente di attrito delle superfici dei DCFPs, f, vettore di 95 elementi (dal valore 0 a 0.3, con un passo di 0.005; dal valore 0.35 a 2, con un passo pari a 0.05) in cui, il valore 0 corrisponde ad assenza di attrito, mentre f=2 corrisponde ad attrito superficiale molto elevato.

Va detto inoltre, che il range di variazione dei parametri sopra elencati, non è stato scelto in modo casuale, bensì si sono considerati dei valori tipici, in linea con quanto studiato all'interno dei riferimenti [6] [7] [8] [9] [10] [11].

Proseguendo con l'analisi dei parametri dello schema strutturale utilizzato, sono stati poi introdotti massa e peso del solo impalcato, denominati come m_d e W, dopodiché si sono esplicitate le proprietà dei DCFPs tramite le masse m_s e i rapporti di massa λ_s procedendo a ritroso. Per motivi numerici, infatti, si è dapprima fissato il valore di λ_s pari a 0.005, per poi definire la massa degli isolatori, per tramite di m_d, parametro già noto e pari a 771120 kg, come riportato nell'appendice A.

Infine, si è assunto un coefficiente di smorzamento della pila pari al 5% e un valore nullo per lo smorzamento ξ_d. Sono stati infine definiti i parametri geometrici, inerenti al rapporto dei raggi di curvatura e dei fattori di smorzamento delle due superfici di scorrimento che compongono i DCFPs i cui valori tipici per tali dispositivi si sono posti pari a:

$$\frac{R1}{R2} = 2;$$

$$\frac{\mu_{j,max}}{\mu_{j,min}} = 3;$$

$con\ j = 1,2\ (1\ se\ superficie\ superiore, 2\ se\ superficie\ inferiore);$

Al fine di realizzare le analisi numeriche previste, vengono definiti i seguenti parametri:

- ω_d: pulsazione naturale del sistema isolato, denominato all'interno dello script come wd;
- ω_p: frequenza della pila, denominato all'interno dello script come wp;
- ω_{d1} e ω_{d1}: rispettivamente frequenza della superficie superiore e inferiore degli isolatori, denominati all'interno dello script come wd1 e wd2;
- K_d: rigidezza di ripristino dei dispositivi isolanti;
- K_{d1} e K_{d2}: rispettivamente rigidezza di ripristino superiore e inferiore delle due superfici di scorrimento;
- K_p: rigidezza della pila;
- m_p: massa della pila (notiamo come a differenza di m_d, il peso della pila non sia un valore prestabilito, bensì variabile);
- ε: inverso della radice quadrata del rapporto di isolamento.

i quali saranno funzione esplicita del periodo degli isolatori, del periodo della pila e del rapporto di massa.

7.2 Risultati ottenuti tramite analisi dinamica

Le elaborazioni effettuate prevedono il calcolo dei valori di spostamenti e velocità relative, identificate rispettivamente come x e $\dot{x}$, non solo dell'impalcato, ma anche delle cinque masse concentrate con le quali è stata discretizzata la pila presa in esame. Successivamente, da questi ultimi è stato possibile, come riassunto all'interno del capitolo 5, ricavare gli spostamenti e le velocità massime di picco, denominate con le lettere u e $\dot{u}$.

Per quanto concerne invece le forze di reazione vincolare esercitate a livello degli isolatori sismici DCFPs posti sia sulla spalla che sulla pila, esse sono state dapprima differenziate in forze elastiche (F_e) e, dopo aver definito i coefficienti di attrito denominati con le lettere mi, forze attritive (F_a). Successivamente, tali due azioni sono state sommate in un'unica forza totale (F), definita per ciascuno dei due dispositivi. La definizione delle forze appena discusse, è stata realizzata tramite l'utilizzo delle stesse formule riportate nella (5.2).

Questo stesso procedimento è stato condotto per ciascuno dei 95 coefficienti di attrito (parametro denominato con la lettera *d*), i cui valori sono stati già definiti al precedente paragrafo.

Una volta terminato il processo iterativo al variare di *d,* si è proceduto con il calcolo degli spostamenti e delle velocità massime assolute, ovvero rispetto al suolo, dell'impalcato e delle 5 masse concentrate della pila; il che ha reso possibile anche la valutazione del valore di spostamento e di velocità e relativa tra impalcato e testapila.

Procedendo con l'analisi, è stata poi successivamente introdotta nel codice di calcolo la non-dimensionalizzazione dei valori di spostamento e velocità, consentendo così il calcolo dei parametri ψ e $\dot{\psi}$, come descritto dalle (5.11) e dalle (5.13). Per quanto concerne invece le forze totali massime agenti sugli isolatori, dopo averne parametrizzati i massimi valori, è stato distinto il valore ottenuto in base alla superficie considerata (superficie di scorrimento superiore denominata tramite il numero 1, inferiore tramite il numero 2).

Alla fine dell'intero procedimento si perviene dunque ai massimi valori parametrizzati e non-dimensionalizzati per le grandezze:

- spostamento dell'impalcato;
- spostamento delle masse discretizzanti la pila in esame;
- velocità dell'impalcato;
- velocità delle masse della pila;
- forze totali agenti sui dispositivi isolanti DCFPs.

Il procedimento elencato all'interno del presente paragrafo è stato successivamente ripetuto per ciascuna delle 60 possibili combinazioni dei parametri periodo dell'impalcato, periodo della pila e rapporto di massa, mantenendo invariati, per ciascun ciclo di calcolo, unicamente i valori delle accelerazioni spettrali ricavate dallo studio dei 45 sismi registrati e i 95 valori di coefficienti di attrito precedentemente imposti.

I 60 vettori uscenti da ciascuno dei cicli esaminati di dimensione [95x45] sono rappresentativi dei massimi valori di ottenuti per ciascuna grandezza dinamica di interesse. Nella presente tesi l'oggetto è quello di far variare unicamente i parametri dei sismi in ingresso, mantenendo, per ogni caso, fissate le caratteristiche intrinseche della struttura analizzata, quali i periodi di impalcato e pila e i rapporti di massa, il che ha reso necessario l'utilizzo di un ulteriore codice di calcolo, in grado di combinare ciascuno dei 60 vettori individuati in precedenza tramite lo sviluppo di un'unica matrice 5D.

Per fare ciò è stato necessario dapprima riordinare il vettore contenente i rapporti di PGA\PGV caratterizzanti i 45 sismi in ordine crescente, in modo tale da poter visualizzare i valori di spostamento e velocità massime dell'impalcato e della pila al solo variare del parametro *f,* ovvero del coefficiente di attrito dei DCFPs. Successivamente, operando in maniera uguale a quella appena esplicata, si sono ricavate le forze totali agenti sugli isolatori.

In conclusione, a seguito della creazione di un'unica matrice 5D è stato possibile ricavare i dati di input totali da poter inserire all'interno dell'apposita rete neurale artificiale, in modo tale da poterne iniziare la procedura di training, descritta e commentata nel seguente paragrafo.

CAPITOLO 8

Creazione della Rete Neurale Artificiale

8.1 Analisi di sensibilità della rete

Il primo passo nella definizione dell'architettura di una rete neurale artificiale consiste nella taratura della rete stessa, per tramite di un apposito procedimento, denominato di *training*. Lo scopo di quest'ultimo è quello di garantire il raggiungimento di una soglia minima di efficienza della ANN attraverso l'inserimento degli effettivi input reali e tramite lo studio del grado di performance raggiunto dalla rete, misurato in base alla capacità di riprodurre gli output reali, al variare dei parametri in ingresso e dei numeri di neuroni che compongono i layer nascosti, proprietà che si ricorda essere facilmente gestibili dal progettista, come riportato all'interno delle prime righe dell'appendice B. Tale procedura permette l'automatizzazione della rete neurale artificiale che, al termine del training, avrà raggiunto il grado di accuratezza richiesto, grazie alla definizione dei corretti pesi e biases attribuibili a ciascun dato di input inserito e sarà in grado di simulare il comportamento dinamico del sistema qualunque siano le variabili in ingresso.

Il procedimento esemplificativo di training è stato svolto tramite il software di calcolo Matlab, mediante lo script riportato integralmente nell'appendice B. Per quanto concerne la gestione del numero di neuroni appartenenti all'unico hidden layer utilizzato, si è eseguito un processo iterativo tramite il quale si è posto un valore iniziale pari a 2 neuroni e uno finale di 50, avendo scelto un passo di iterazione variabile da caso a caso.

Si riporta, in figura 8-1, la schermata di processing di un generico procedimento iterativo di training (nel caso presentato 5 neuroni nascosti) eseguito.

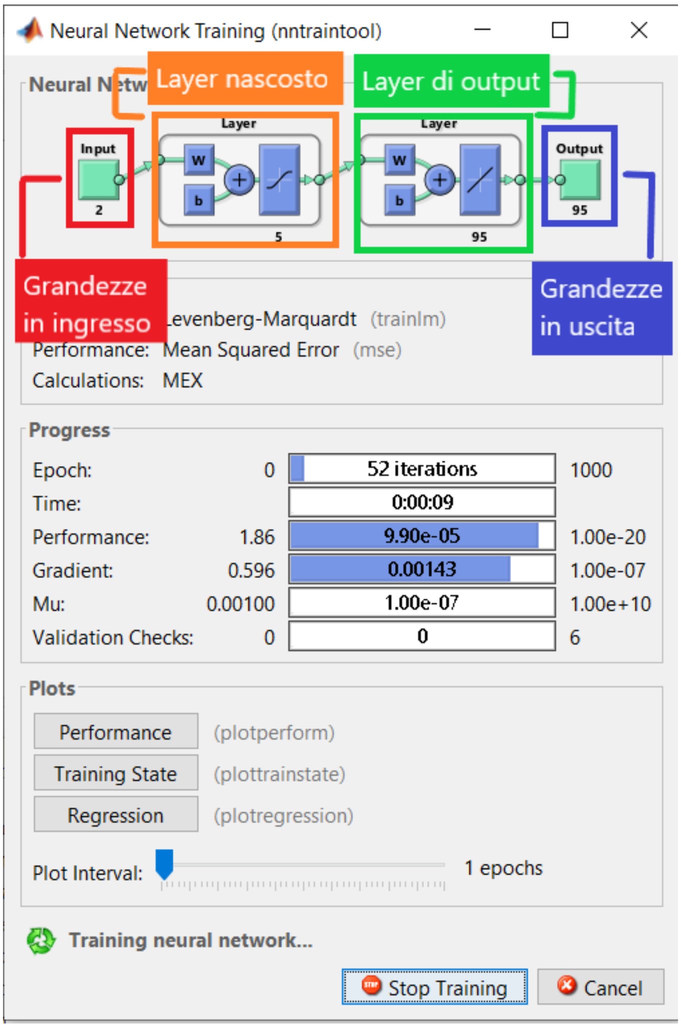

Figura 8-1:schermata di training.

Come evidenziato in figura 8-1, sono stati inseriti 2 vettori di input differenti: uno inerente al periodo dell'impalcato T_d e un secondo rappresentante i coefficienti di attrito superiore e inferiore del dispositivo DCFP, *f*. Tali vettori provengono dall'analisi dinamica precedentemente effettuata (capitolo 7) e riportata all'interno dell'appendice A. Per quanto riguarda l'output in uscita, si è scelto di prendere in esame la grandezza di maggiore interesse progettuale, ovvero lo spostamento massimo del testapila, riportato all'interno dello script in appendice B come *Tpsiud_max*. Il valore di questo parametro, come risultato dello studio tramite ANN, viene fornito attraverso un vettore di 95 valori di spostamento adimensionalizzato del testapila, uno per ciascun valore del coefficiente di attrito f.

La scelta dell'utilizzo di un solo layer nascosto è stata dettata dalla volontà di poter ottenere al contempo una ANN che fosse efficiente da un punto di vista di accuratezza degli output pervenuti, di rapida elaborazione automatica e di semplice architettura; aspetti fondamentali data la prospettiva di voler invertire successivamente la rete (più la ANN risulta semplificata, più il procedimento di inversione risulta essere efficiente) al fine di ottenere i parametri di progetto in maniera diretta, in funzione dei vincoli prestazionali imposti sulla risposta dinamica. Va ricordato inoltre che la ricerca di una ANN performante ma anche di semplice architettura comporta una migliore lettura e comprensione da parte dell'operatore dei dati elaborati, dati non facilmente gestibili nel caso di reti neurali artificiali sempre più complesse.

Si riportano di seguito, in figura 8-2, le architetture iterative della rete studiate ed esaminate, al variare del numero di neuroni componenti l'hidden layer con i relativi schemi delle funzioni di attivazione utilizzate.

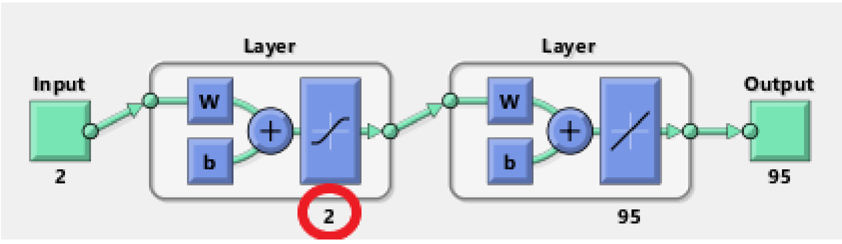

Figura 8-2: ANN con 2 neuroni nascosti.

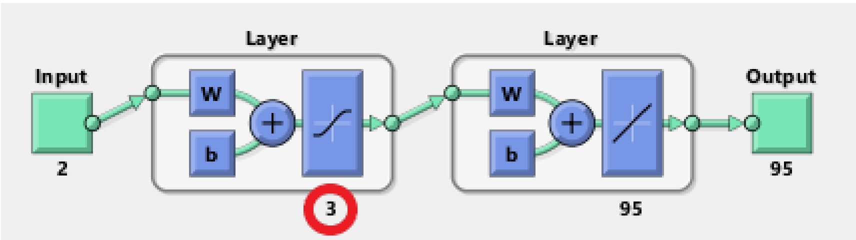

Figura 8-3:ANN con 3 neuroni nascosti.

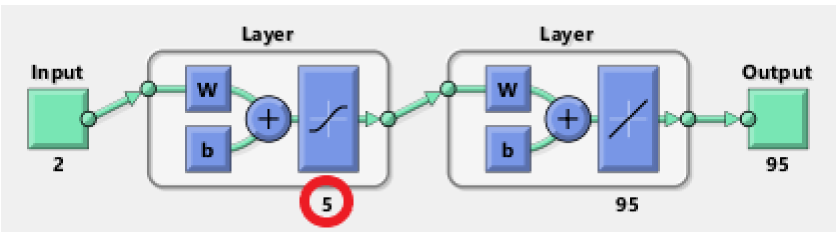

Figura 8-4:ANN con 5 neuroni nascosti.

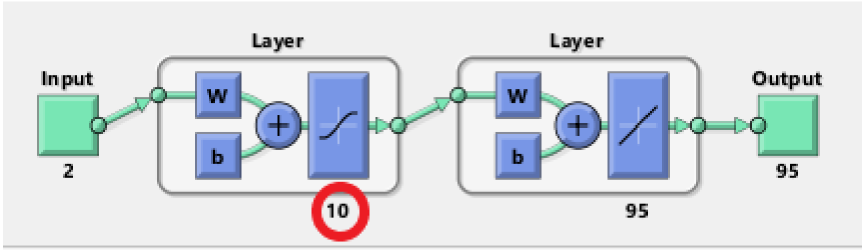

Figura 8-5:ANN con 40 neuroni nascosti.

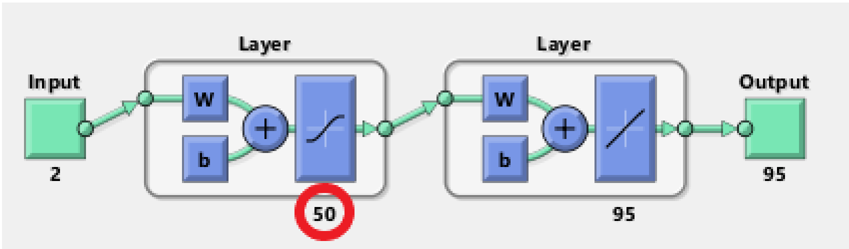

Figura 8-6:ANN con 50 neuroni nascosti.

Una ulteriore scelta fondamentale, affinché la ANN creata potesse portare agli output desiderati, è ricaduta sull'algoritmo di ottimizzazione. Nello specifico, per il caso in esame, come da figura 8-1, è stata scelta come modalità di backpropagation, ovvero come strumento di controllo e di ottimizzazione della rete, quella basata sull'algoritmo di Levenberg-Marquardt [13]. Il vantaggio dell'utilizzo di tale tecnica sta nella facile rappresentazione del gradiente della funzione errore. Al contrario degli altri algoritmi di backpropagation, infatti, anziché calcolare analiticamente la matrice Hessiana inerente ai vettori di input, procedimento che richiederebbe una rete più complessa e tempi di elaborazione maggiorati, essa esegue un'approssimazione tale per cui tale matrice può essere rappresentata matematicamente come:

$$H = J^T \cdot J \tag{8.1}$$

e il gradiente della funzione come:

$$g = J^T \cdot e \tag{8.2}$$

dove J rappresenta lo Jacobiano della matrice contenente le derivate prime degli errori commessi, nel rispetto dei pesi e dei biases utilizzati, mentre e rappresenta il vettore degli errori commessi. In questo modo si perviene al grado di performance della rete neurale artificiale in modo più diretto ed efficiente.

Poiché lo scopo della procedura di training è quello di ricercare un'architettura della ANN adatta al raggiungimento dei parametri previsti, commettendo un valore di errore minimo, ovvero garantendo un grado di performance sufficientemente elevato, si è scelto di porre come soglia minima di errore, per tramite dello scarto quadratico medio, nonché della deviazione standard, il valore di $1 \cdot 10^{-5}$.

A tal proposito, si sono considerate sei terne di valori attribuiti ai parametri k, t ed s, ovvero periodo della pila, rapporto di massa e rapporto PGA/PGV, attraverso le quali si è operato in termini di infittimento dei neuroni nascosti della rete, procedendo iterativamente da 2 neuroni nascosti fino a 50.

I sei casi considerati sono di presso elencati in tabella 8-1, abbinando ad ognuno di essi un'etichetta numerica che caratterizzi la terna prescelta:

Terna	Valori
1	Tp=0.05s, λ=0.1, PGA/PGV=0.36
2	Tp=0.1s, λ=0.1, PGA/PGV=0.36
3	Tp=0.05s, λ=0.15, PGA/PGV=0.36
4	Tp=0.05s, λ=0.2, PGA/PGV=0.36
5	Tp=0.05s, λ=0.2, PGA/PGV=2.43
6	Tp=0.05s, λ=0.15, PGA/PGV=0.75

Tabella 8-1: Elenco dei casi analizzati per la definizione dell'architettura della rete

Quest'analisi di sensibilità, quantificata per tramite della variazione della deviazione standard al variare del numero di neuroni, ha permesso il training della rete, nonché il raggiungimento di risultati sempre più accurati ed attendibili a mano a mano che si è proceduto verso il numero massimo dei neuroni nascosti utilizzati. Nella tabella 8-2 si riportano i risultati ottenuti.

	2 neuroni	3 neuroni	5 neuroni	10 neuroni	50 neuroni
Tp=0.05s, λ=0.1, PGA/PGV=0.36	1.2227	1.02	0.3041	0.0999	0.0151
Tp=0.1s, λ=0.1, PGA/PGV=0.36	1.1739	0.9588	0.4265	0.1835	0.0332
Tp=0.05s, λ=0.15, PGA/PGV=0.36	1.2238	1.0205	0.4164	0.0868	0.038
Tp=0.05s, λ=0.2, PGA/PGV=0.36	1.2246	1.0209	0.2811	0.1154	0.0148
Tp=0.05s, λ=0.2, PGA/PGV=2.43	1.7476	0.8708	0.4016	0.1135	0.0119
Tp=0.05s, λ=0.15, PGA/PGV=0.75	2.504	1.7103	0.4243	0.1338	0.014

Tabella 8-2: Deviazione standard della ANN al variare della terna k, t, s e del numero di neuroni scelto.

Da un punto di vista grafico, come riportato in figura 8-7, appare evidente come all'aumentare del numero di neuroni utilizzati, l'errore commesso dalla rete neurale artificiale diventi sempre più effimero, tendendo asintoticamente verso gli output target derivati dall'analisi dinamica precedentemente svolta.

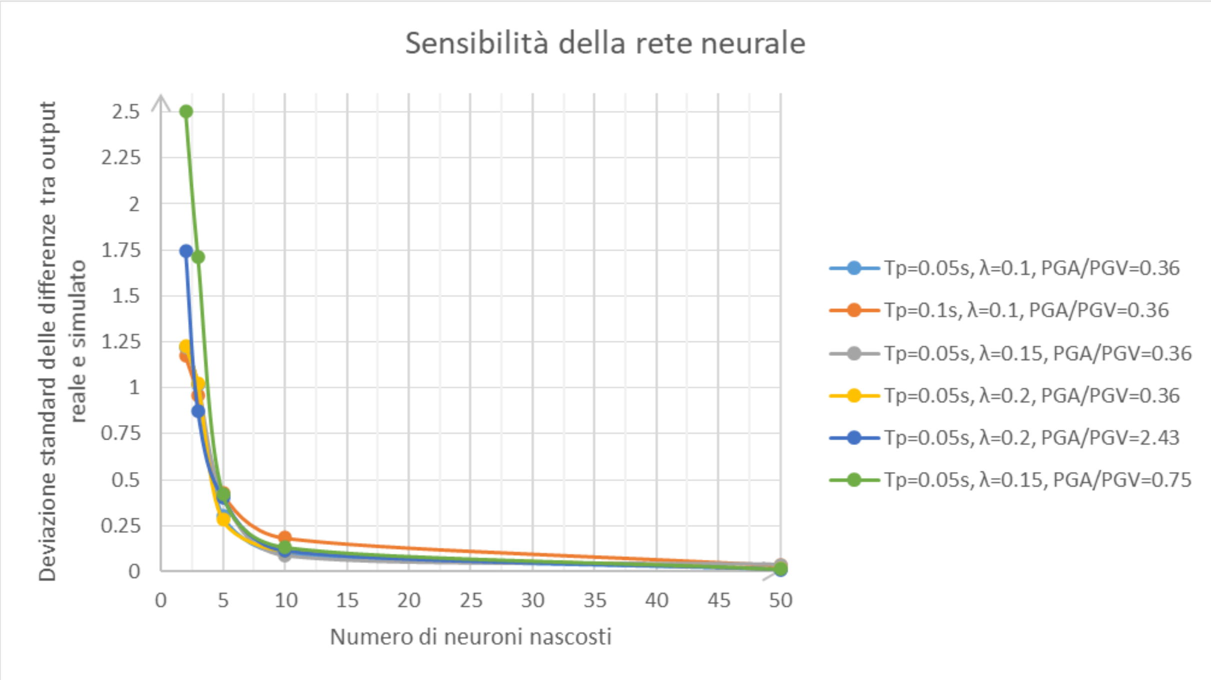

Figura 8-7: Analisi di sensibilità della rete neurale artificiale, al variare di f e di Td.

In figura 8-8 per ognuna delle sei terne scelte, etichettato come indicato in tabella 8-1, si è valutata la deviazione standard della risposta prodotta dalla rete rispetto al modello dinamico utilizzato per la taratura. Essa evidenzia come già a partire dall'utilizzo di soli 5 neuroni la rappresentazione grafica della deviazione standard tende ad un andamento pressoché costante e decrescente, indice di maggiore accuratezza della rete rispetto all'utilizzo di un numero inferiore di neuroni nascosti e indice anche del fatto che la variazione del valore dei parametri in ingresso tenda a non avere più una rilevanza così importante nella lettura dei dati di output, che risultano essere dunque già rappresentativi di valori coerenti con le analisi svolte.

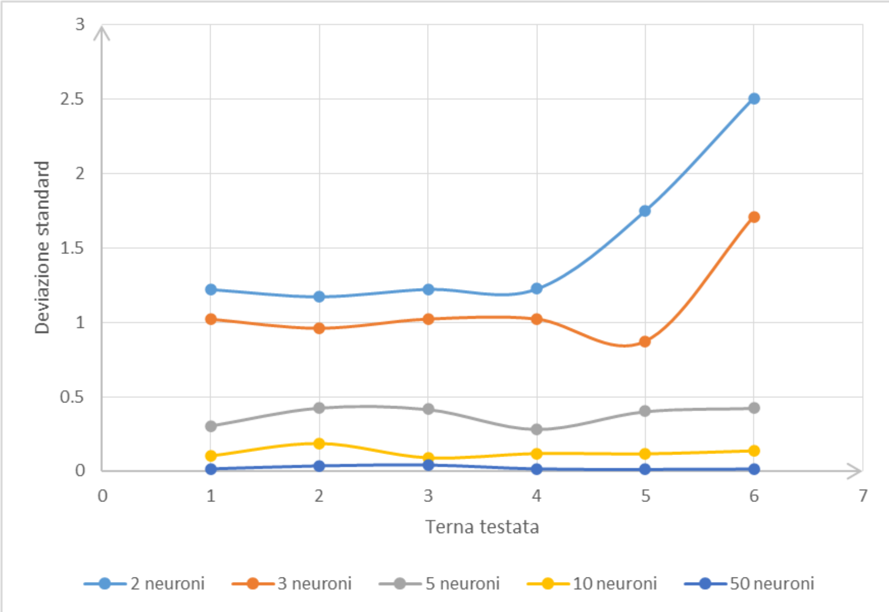

Figura 8-8: Variazione della deviazione standard all'aumentare del numero di neuroni.

Da un punto di vista intuitivo, la soluzione ottimale parrebbe dunque quella di utilizzare una ANN composta da un unico layer nascosto al cui interno risiedano 50 neuroni. In realtà, tuttavia, poiché lo scopo della presente analisi è quello di raggiungere dei risultati affidabili tramite elaborazioni di rapida esecuzione, commettendo errori di automatizzazione minimi, la scelta di compromesso più adatta risulta quella di considerare 5 neuroni nascosti. Tale considerazione permette infatti, come mostrato in figura 8-7, di ottenere una deviazione standard attorno allo 0.25, valore che, considerato come minimo errore il valore di 0.014 corrispondente a 50 neuroni e come massimo 2.504, corrispondente all'utilizzo di 2 neuroni, risulta essere sufficientemente basso al fine di garantire il ritrovamento di output plausibili con il contesto analizzato.

8.2 Architettura e specifiche della ANN

In forza di quanto discusso nel precedente paragrafo, la rete neurale artificiale creata si presenta come in figura 8-9.

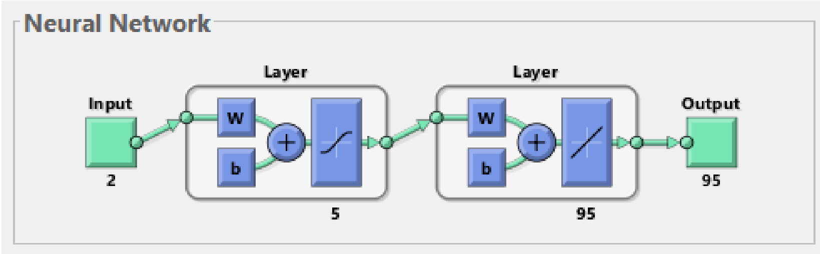

Figura 8-9: la ANN utilizzata.

Dove, come dati di input sono stati considerati, in due diverse fasi, il coefficiente di attrito f e il periodo dell'impalcato T_d, ovvero f e il rapporto PGA/PGV.

Per quanto riguarda la scelta degli algoritmi e delle funzioni di attivazione dei singoli neuroni si è fatto riferimento alle funzioni espresse di seguito:

1. *tansig*: funzione di attivazione dei neuroni contenuti sia nel layer di input che in quello nascosto. Il suo andamento, riportato in figura 8-10, è di tipo iperbolico tangente sigmoidale.

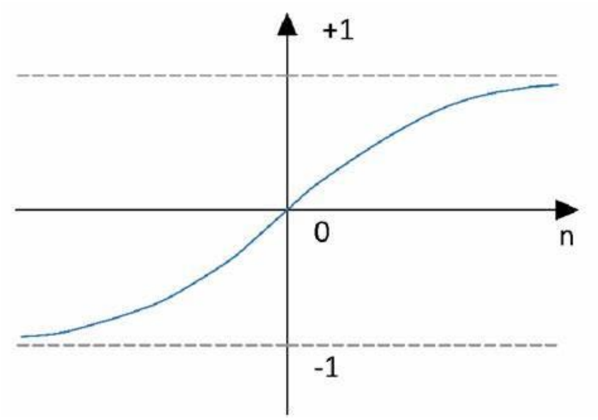

Figura 8-10: la funzione di attivazione tansig.

2. *purelin*: funzione di attivazione che identifica il solo neurone del layer di output. Come rappresentato in figura 8-11 esso identifica la semplice somma di tipo lineare.

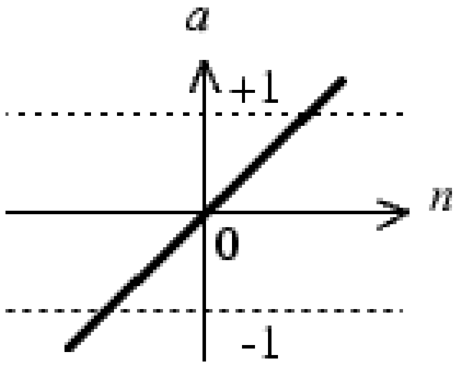

Figura 8-11: la funzione di attivazione purelin.

Tramite lo sviluppo della ANN esaminata, è stato possibile ricavare 95 valori di spostamento adimensionale in funzione del periodo dell'impalcato oppure del rapporto PGA/PGV; uno per ciascuno dei valori di coefficiente di attrito *f*. I risultati ottenuti vengono illustrati nel capitolo successivo.

CAPITOLO 9

Risultati della sperimentazione numerica

9.1 Presentazione dei risultati finali

Attesa la corposa dote di dati ottenuti, con l'obiettivo di favorirne la leggibilità, si è ritenuto utile andare a rappresentare la variabile in uscita prodotta dalle simulazioni eseguita con la rete neurale artificiale mediante grafici a linee di livello. Tali grafici indicheranno il valore dello spostamento adimensionalizzato del testapila in funzione del periodo della pila stessa e del coefficiente di attrito, oppure, nella seconda analisi, in funzione del coefficiente di attrito e del rapporto PGA/PGV. In particolare, poiché la rete neurale artificiale è risultata essere di notevole efficienza e di verificata affidabilità nel caso in cui le variabili in ingresso non siano superiori a due, ogni singola analisi prevede che le restanti variabili che caratterizzano la risposta del sistema risultino assegnate. In particolare, si sono fissate di volta in volta 2 delle variabili a disposizione, ovvero Tp e λp, mentre il coefficiente di attrito *f* dei DCFPs è stato fatto variare in coppia dapprima con il periodo dell'impalcato e poi con il rapporto PGA/PGV. Si sono dunque analizzati i seguenti casi specifici:

1. periodo della pila e rapporto di massa fissi e minimi, ovvero Tp=0.05s e λ_p=0.1;
2. periodo della pila e rapporto di massa fissi e massimi, ovvero Tp=0.2s e λ_p=0.2;
3. periodo della pila e rapporto di massa fissati, intermedi, ovvero Tp=0.15s e λ_p=0.15;
4. periodo della pila fisso e minimo e rapporto di massa massimo fissato, ovvero Tp=0.05s e λ_p=0.2;
5. periodo della pila massimo e rapporto di massa minimo, entrambi fissati, ovvero Tp=0.2s e λ_p=0.1;

ovvero, come riportato in tabella 9-1:

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Tp [s]	2	4	3	2	4
λ	0.1	0.2	0.15	0.2	0.1

Tabella 9-1: Casi analizzati.

dove T_p rappresenta il periodo della pila e λp il rapporto di massa, coerentemente con la denominazione di tali variabili negli script Matlab.

9.2 Prima analisi

Come prima analisi, per ciascuno dei 5 casi presentati in tabella 9-1, sono stati scelti dei valori specifici attribuibili al rapporto PGA/PGV, così come indicato in tabella 9-2, in modo tale da poter eseguire delle considerazioni di natura globale e generica inerenti alla variazione dello spostamento adimensionale di picco del testapila.

Valore n.	PGA/PGV	Valore variabile Matlab (s)
1	0.36	1
2	0.69	11
3	1.00	22
4	1.72	33
5	2.63	45

Tabella 9-2: Valori considerati per la variabile PGA/PGV

È necessario specificare inoltre, che l'ottenimento dei risultati riportati all'interno del suddetto e del seguente paragrafo è dovuto alla riuscita del procedimento di training esplicato all'interno del capitolo 8. Infatti, grazie all'analisi di sensibilità della rete neurale artificiale, è stato possibile ottenere in maniera automatizzata i valori di $\xi ud,max$ per qualunque coppia di valori del periodo dell'impalcato e del coefficiente di attrito (o, nel caso della seconda tipologia di analisi effettuata, rapporto PGA/PGV e coefficiente di attrito), compresi nel loro dominio, ottenendo dei risultati validi e coerenti con quelli percepiti grazie all'analisi dinamica parametrica eseguita precedentemente.

Come metodo di rappresentazione si è scelto di utilizzare le linee di livello che identificano, in questo specifico caso studio, lo spostamento di picco $\xi_{ud,max}$ in funzione della variazione dei parametri T_d e *f*. L'andamento tridimensionale delle linee di livello verrà riportato all'inizio di ciascun caso studio, tuttavia, per poter eseguire delle considerazioni univoche, si è poi proceduto alla raffigurazione di tale dominio di esistenza mediante grafici bidimensionali.

Si ricorda infine che, poiché i parametri in ingresso alla rete risultano essere vettori comprensivi di molteplici componenti e, volendo generalizzare la trattazione che segue, si è scelto di riportare e commentare solo 25 dei 540 vettori di spostamento adimensionalizzati di output della ANN: 5 casi ritenuti rilevanti, per ciascuna delle 5 combinazioni riportate in tabella 9-1.

Al fine di una maggiore comprensione degli script in appendice, si riportano inoltre le nomenclature utilizzate:

- s: i-esimo valore del rapporto PGA/PGV, ordinati in maniera crescente;
- t: i-esimo rapporto di massa;

- k: i-esimo periodo della pila.
- f: coefficiente di attrito del dispositivo DCFP.

Di seguito, i risultati ottenuti per ciascun caso riportato in tabella 9-1, mentre all'interno dell'appendice C si riporta la programmazione integrale dell'analisi.

1. **CASO 1**: Valori minimi del periodo della pila e del rapporto di massa, ovvero Tp=0.05s, λ_p=0.1. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

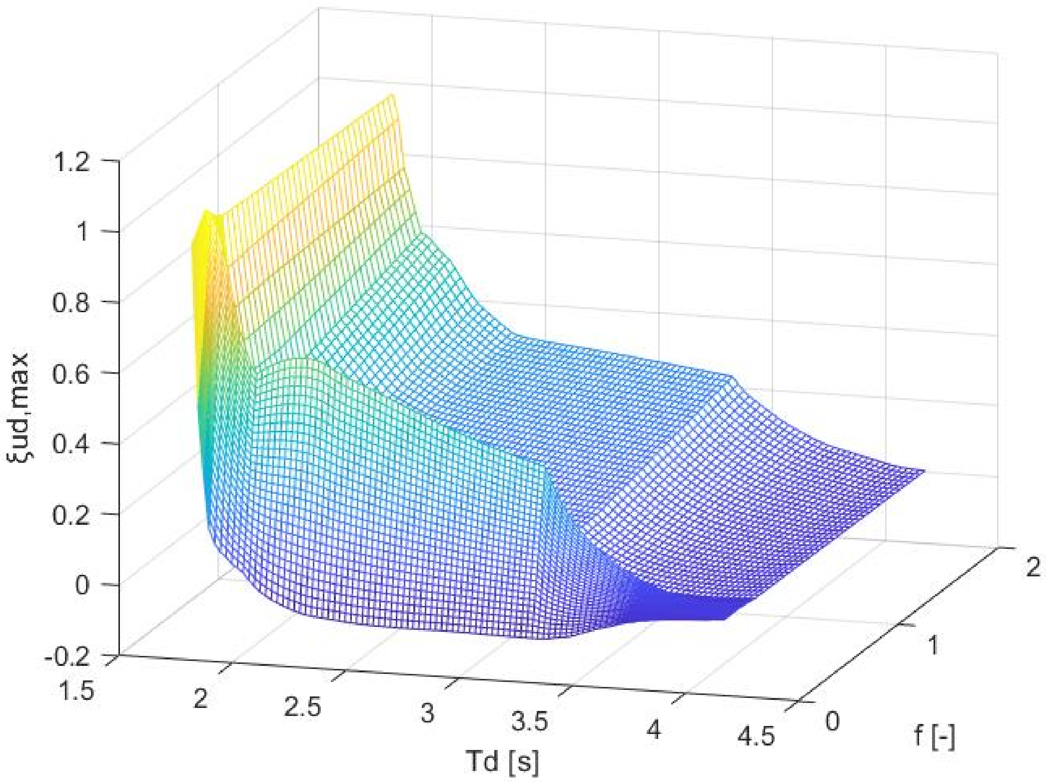

Figura 9-1: Rappresentazione tridimensionale del primo caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro PGA/PGV.

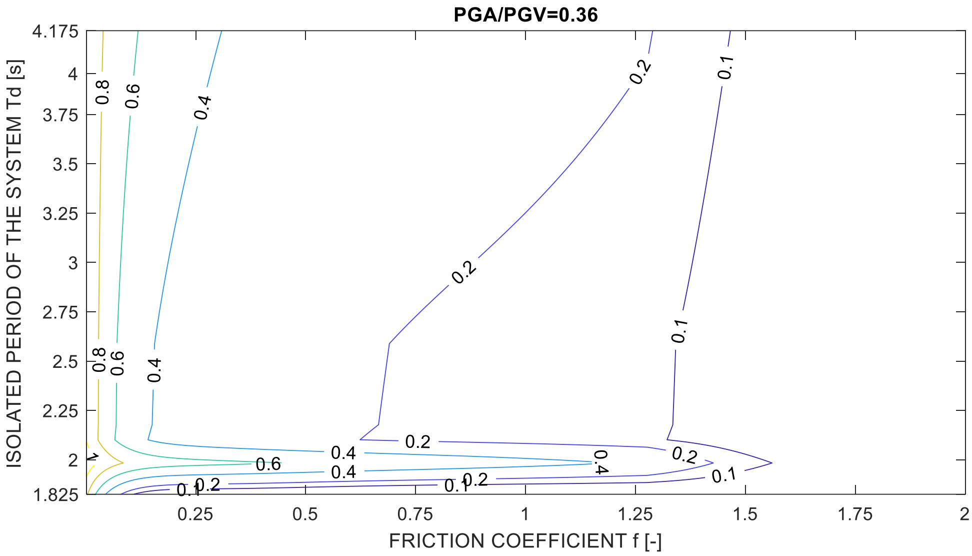

Figura 9-2

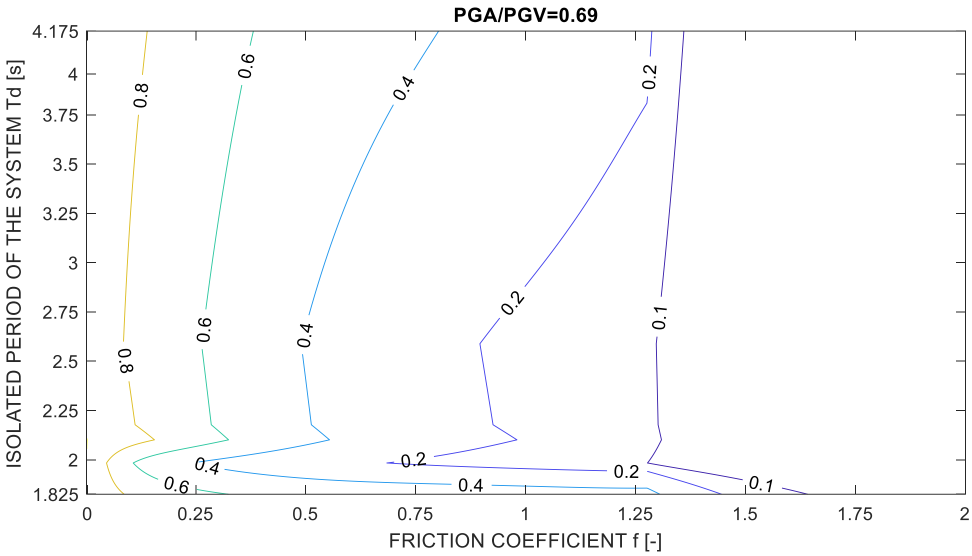

Figura 9-3

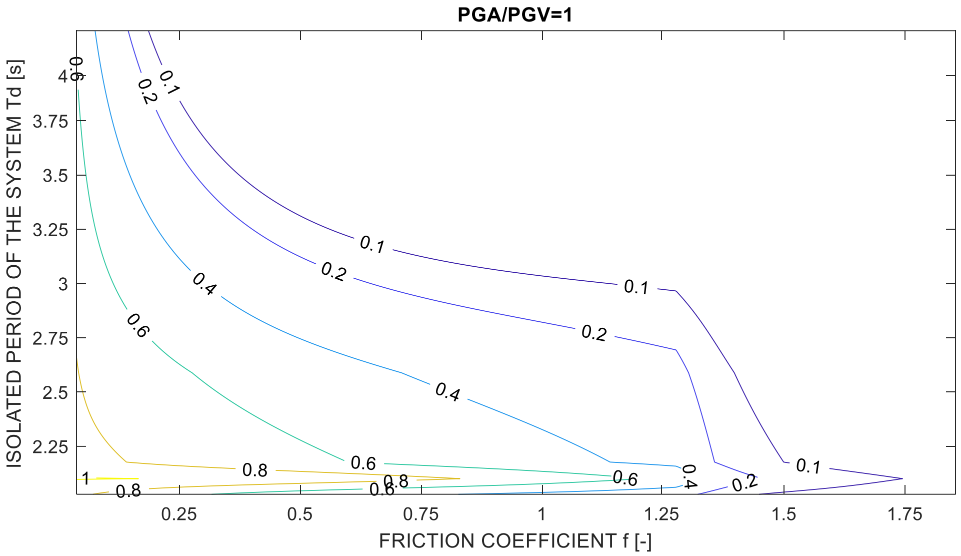

Figura 9-4

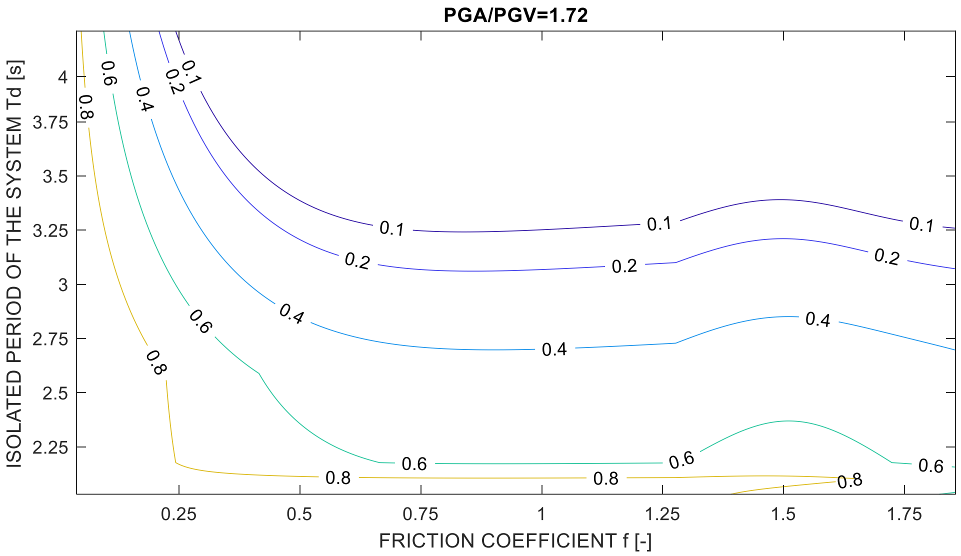

Figura 9-5

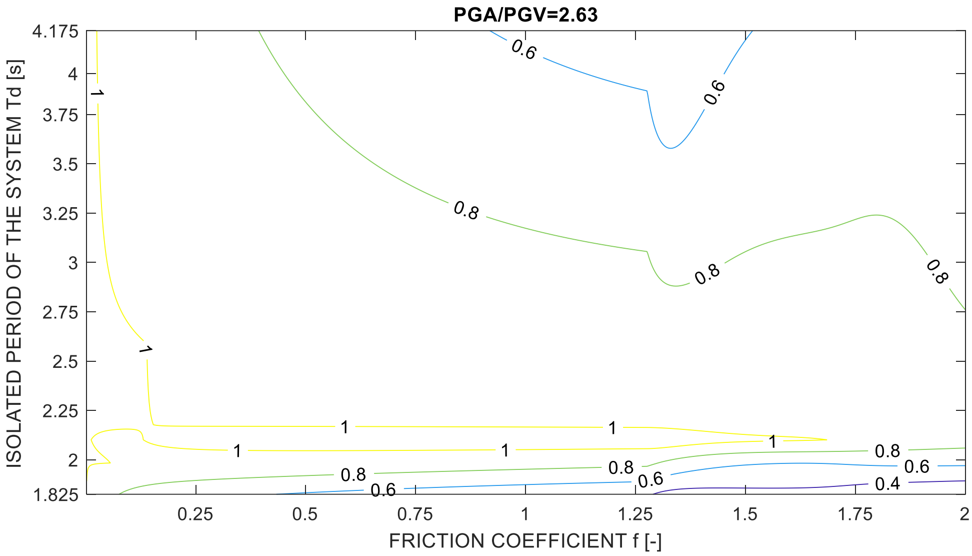

Figura 9-6

Dal confronto con le figure dalla 9-1 alla 9-5 possono essere effettuate due considerazioni rilevanti: in primo luogo, si evidenzia la presenza di linee di livello verticali o pseudo verticali maggiormente fitte per coefficienti di attrito attorno al valore minimo, ovvero 0.25 e per rapporti PGA/PGV bassi; in particolare, nel caso in esame la presenza di tale caratteristica è preponderante fino a valori di PGA/PGV pari a 0.99. In secondo luogo, si può evidenziare la presenza di linee di livello orizzontali, qualunque sia il rapporto PGA/PGV preso in considerazione, il cui andamento è caratterizzato da una espansione verso periodi di isolamento dell'impalcato via via sempre maggiori, all'aumentare di PGA/PGV.

Ne perviene che:

- Il periodo dell'impalcato isolato risulta ininfluente al fine della determinazione dello spostamento adimensionale del testapila, per coefficienti di attrito attorno a 0.25 e per rapporti sismici PGA/PGV relativamente medio-bassi, ovvero che si aggirano attorno a 1.
- Lo spostamento adimensionale di picco del testapila è indipendente dal coefficiente di attrito nel caso in cui il periodo del dispositivo risulti essere inferiore a circa 2.25s, qualunque sia il rapporto PGA/PGV.

2. **CASO 2**: Valori massimi del periodo della pila e del rapporto di massa, ovvero Tp=0.2s, λ_p=0.2.

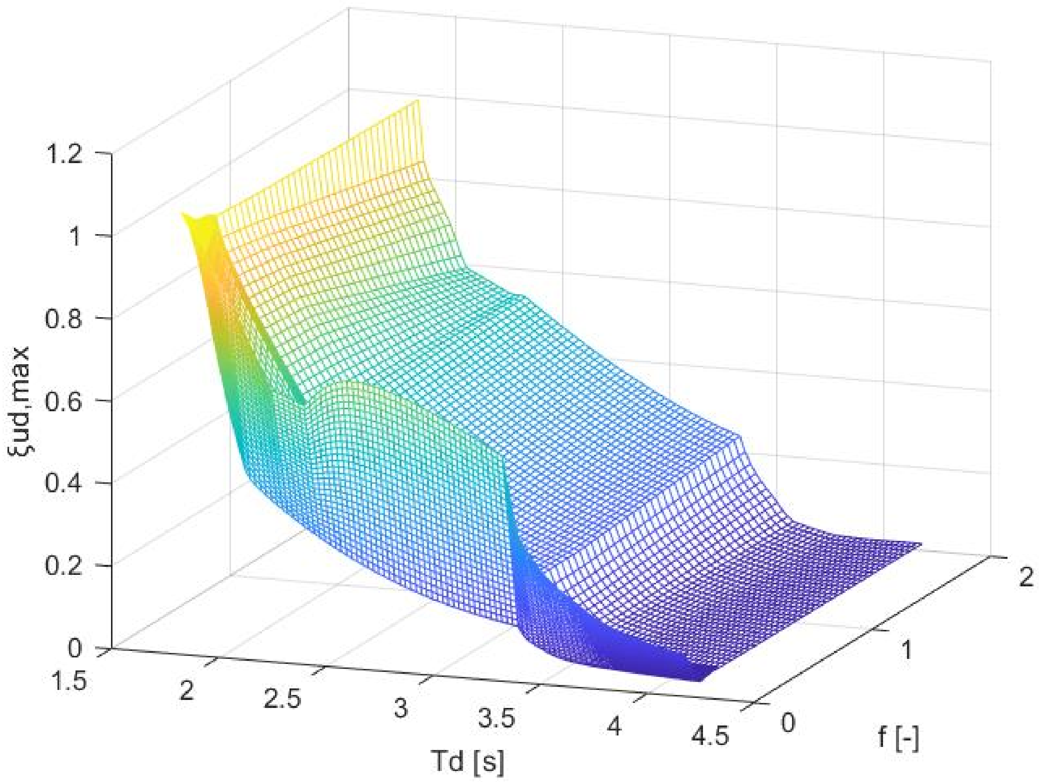

Figura 9-7: Rappresentazione tridimensionale del secondo caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro PGA/PGV.

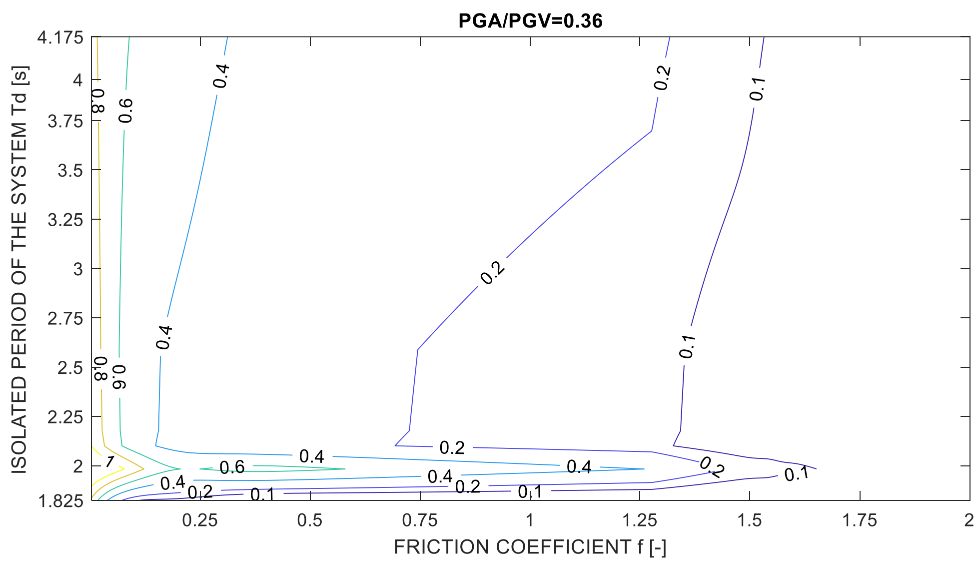

Figura 9-8

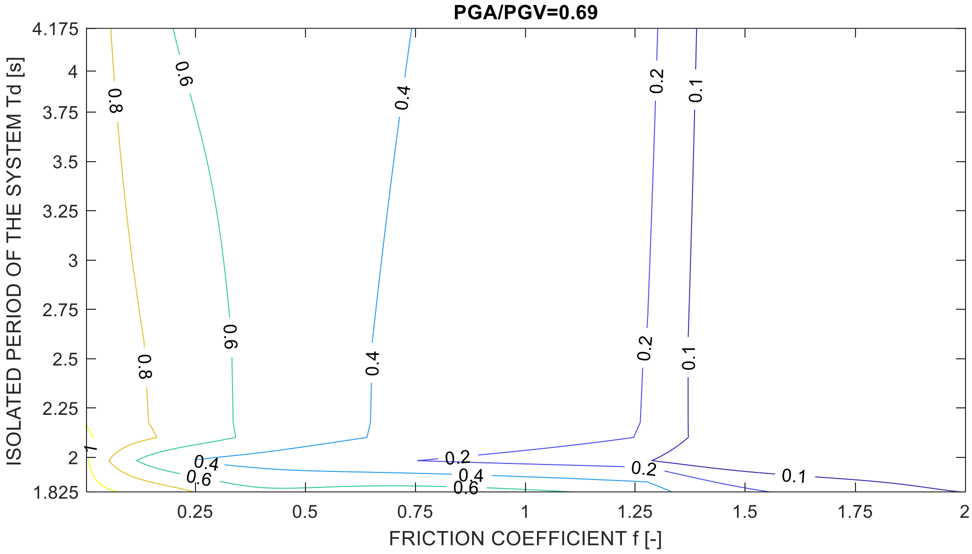

Figura 9-9

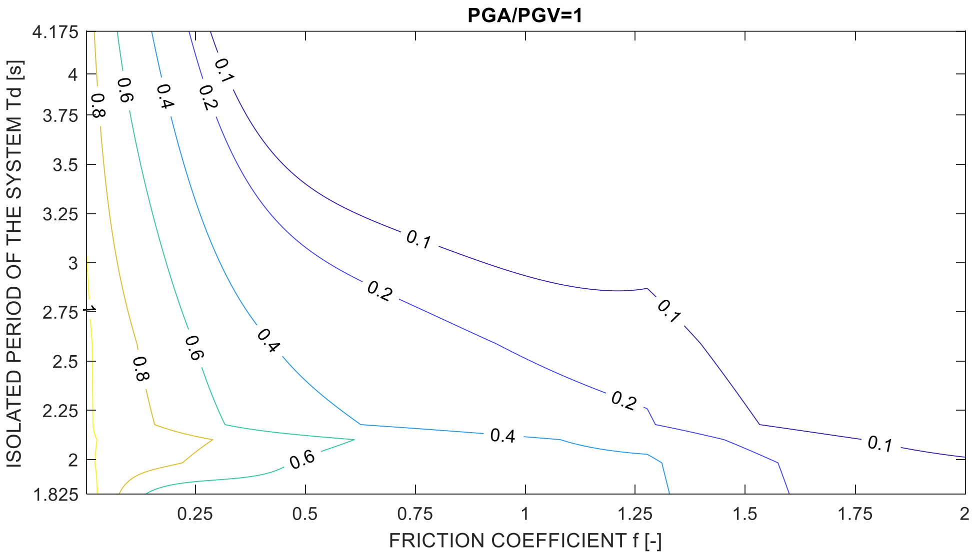

Figura 9-10

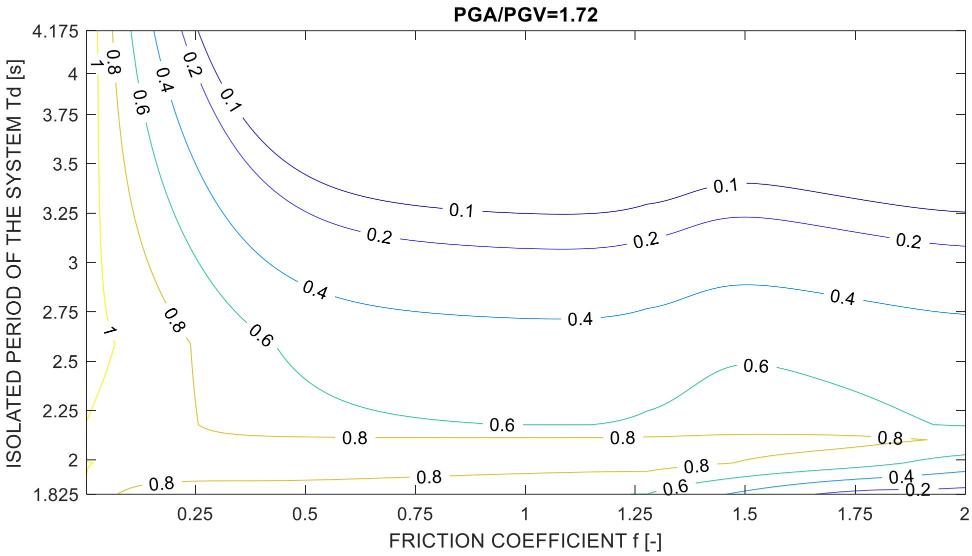

Figura 9-11

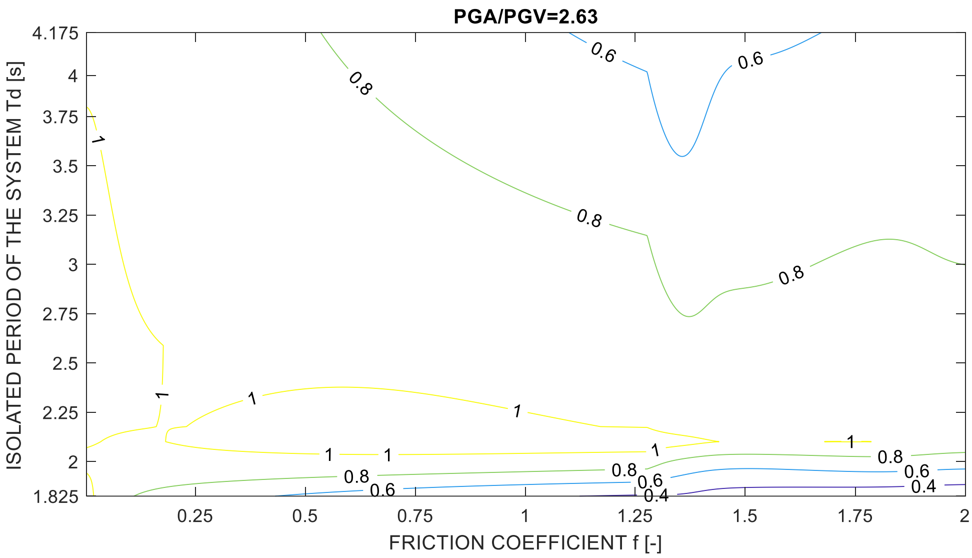

Figura 9-12

Come nel caso 1, anche in questa combinazione di T_d e λ_p, appaiono evidenti sia linee di livello verticali che orizzontali. Tuttavia, a differenza della casistica precedente, questa volta il periodo del dispositivo diventa irrilevante per rapporti di PGA/PGV bassi, ovvero inferiori a 0.8, qualunque sia il valore di f. Inoltre, al contrario del caso 1, il valore di $\xi_{ud,max}$ risulta indipendente dall'attrito esercitato a livello dei DCFPs, solo per Td<2s.

3. **CASO 3**: Valori intermedi del periodo della pila e del rapporto di massa, ovvero Tp=0.15s e λ_p=0.15.

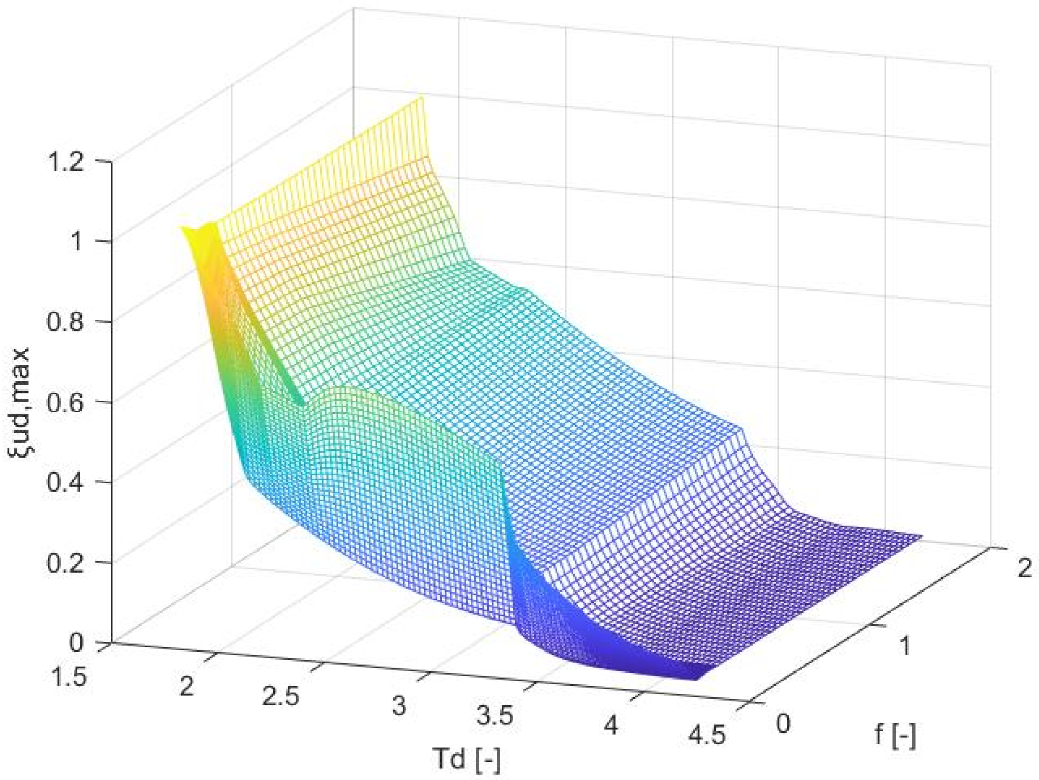

Figura 9-13: Rappresentazione tridimensionale del terzo caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro PGA/PGV.

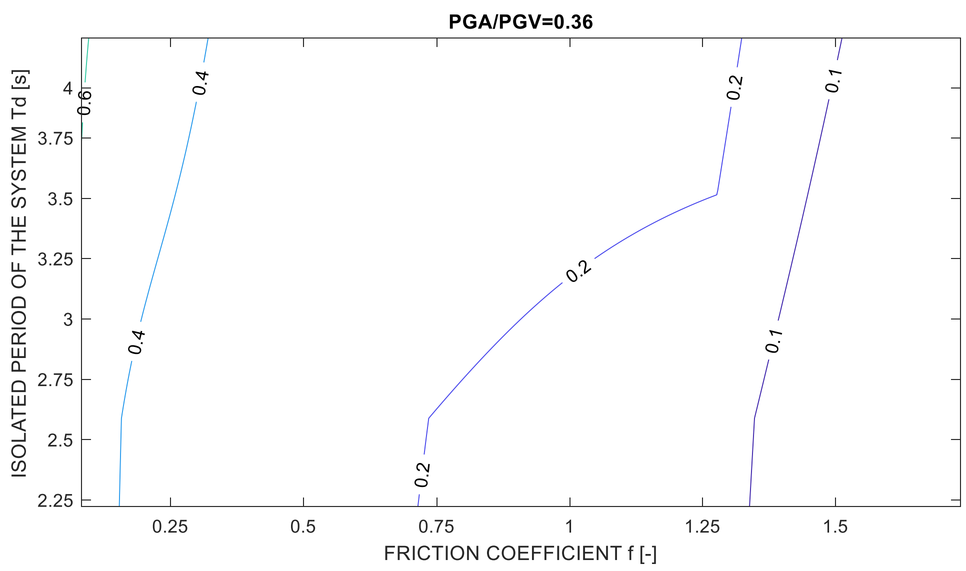

Figura 9-14

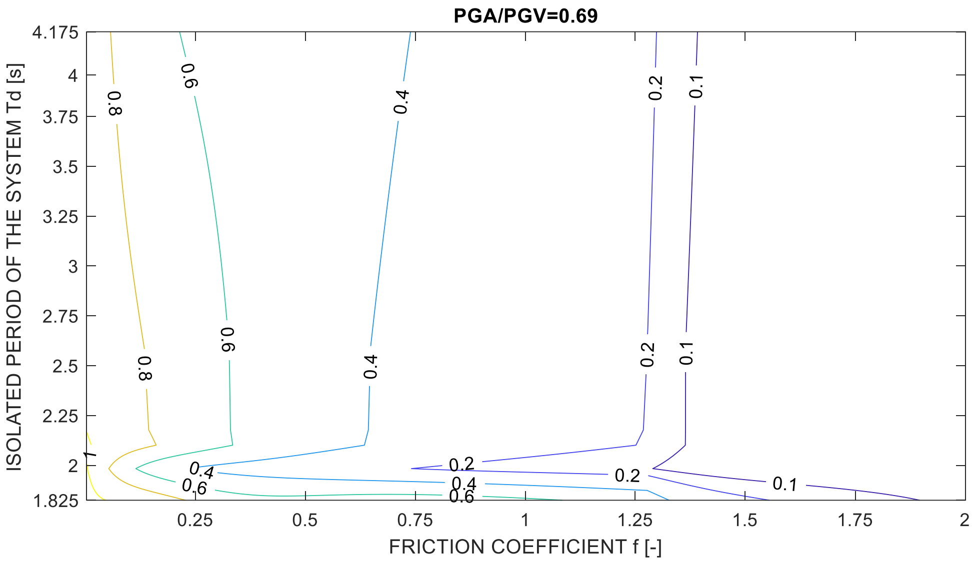

Figura 9-15

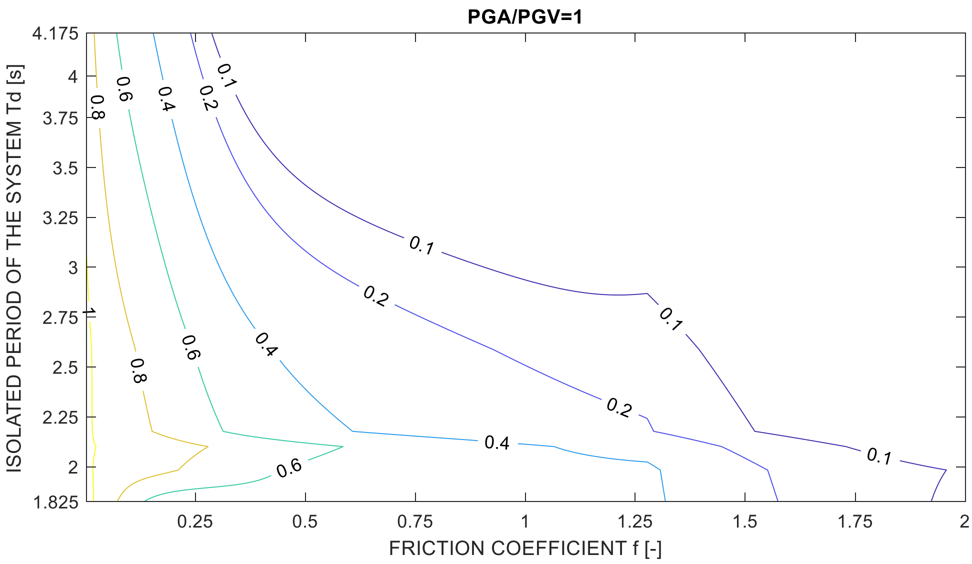

Figura 9-16

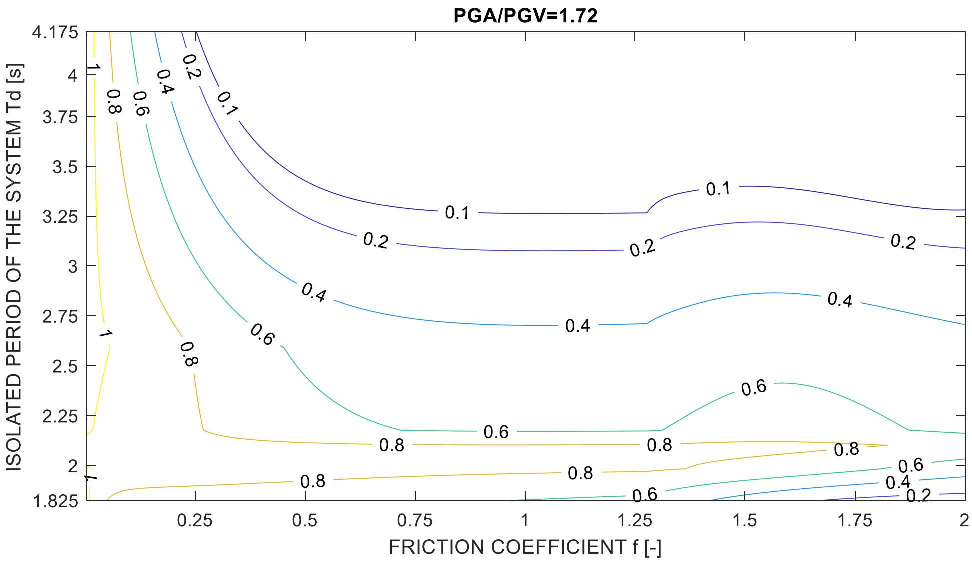

Figura 9-17

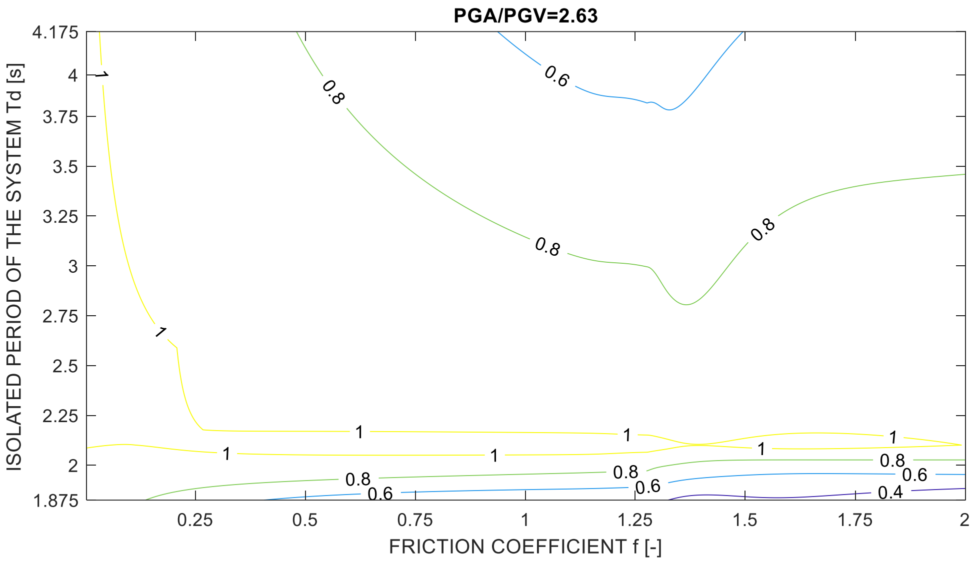

Figura 9-18

In questo caso le considerazioni non risultano essere particolarmente discostanti da quelle del caso 2, a cui si rimanda per ulteriori delucidazioni.

4. **CASO 4**: Valori minimo del periodo della pila e massimo del rapporto di massa, ovvero Tp=0.05s e λ_p=0.2. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

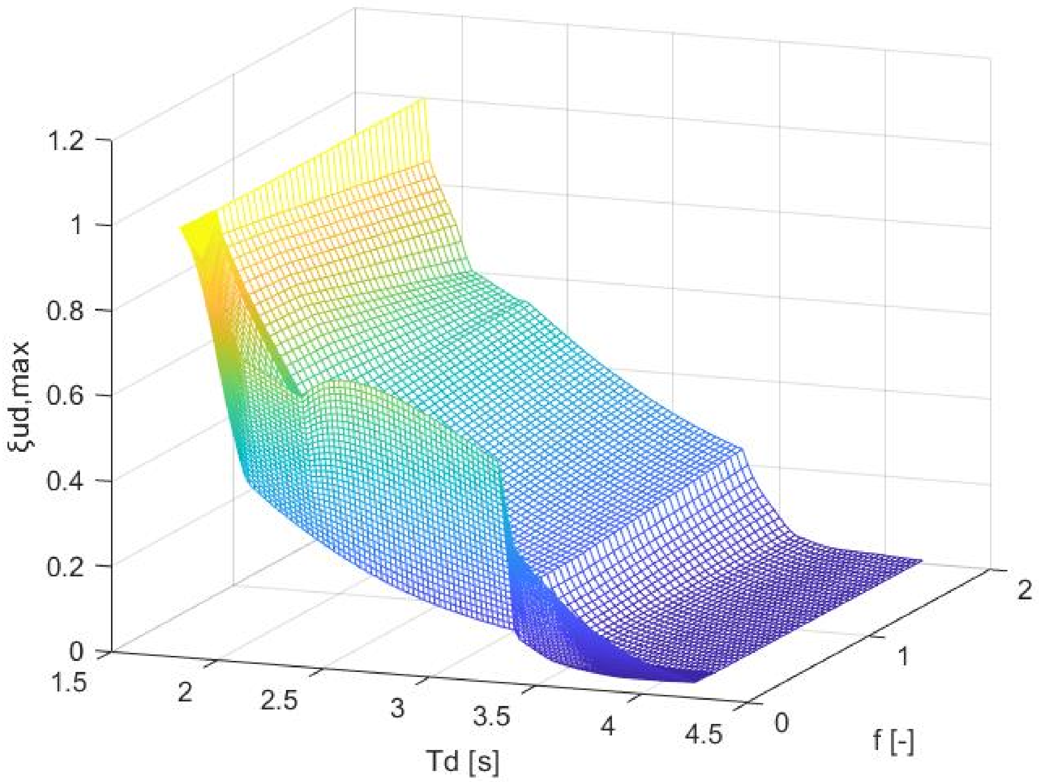

Figura 9-19: Rappresentazione tridimensionale del quarto caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro PGA/PGV.

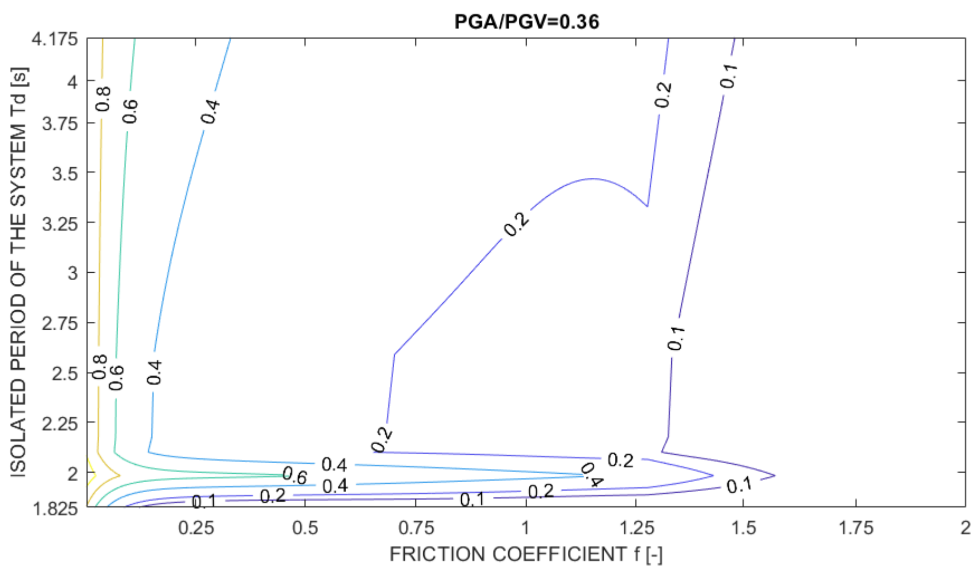

Figura 9-20

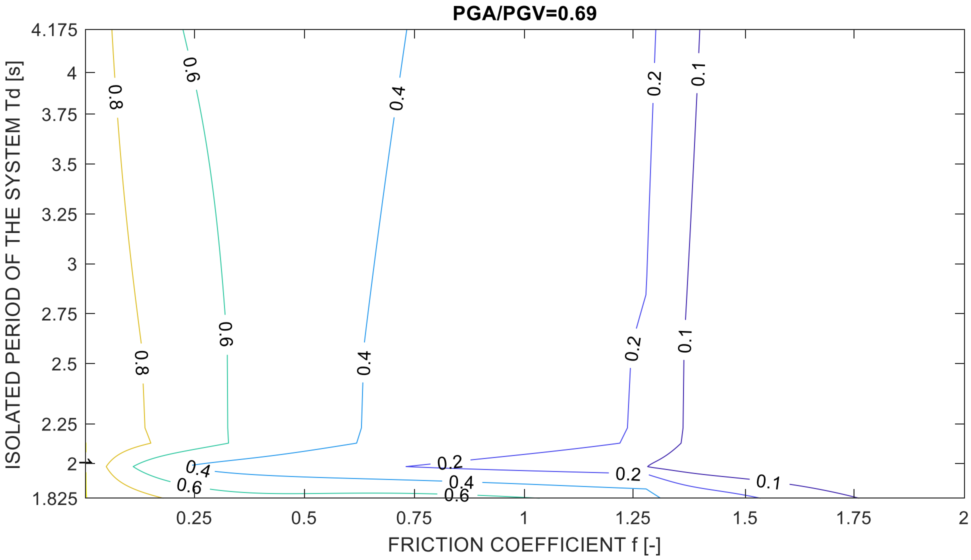

Figura 9-21

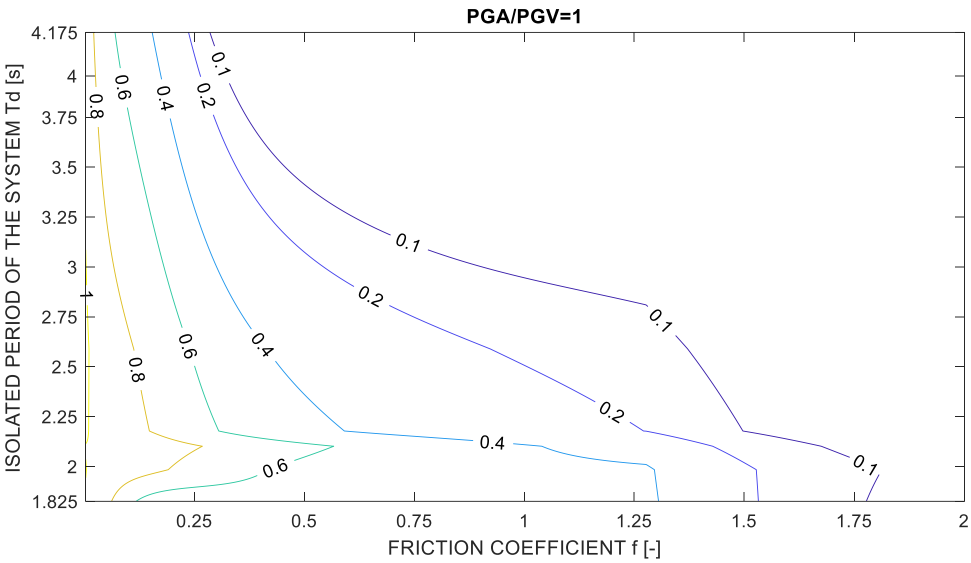

Figura 9-22

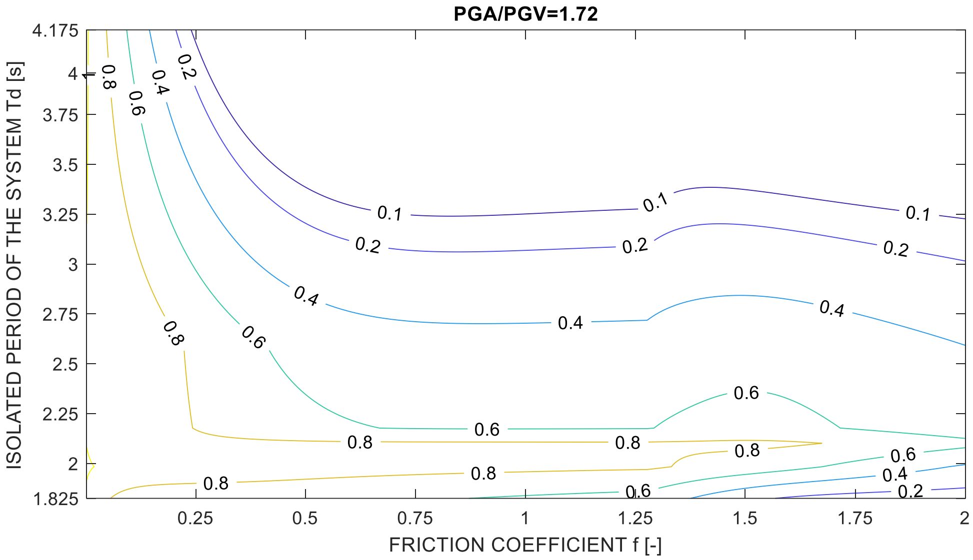

Figura 9-23

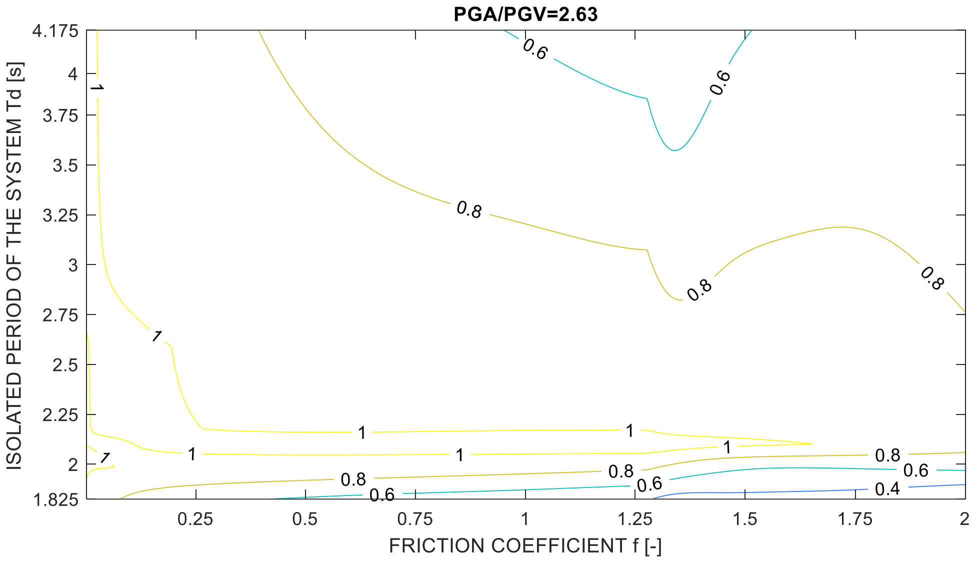

Figura 9-24

Anche a seguito di questa analisi i risultati che si ottengono sono analoghi a quelli dei due casi precedenti, con l'unica differenza che per valori di PGA/PGV elevati, ovvero oltre 1.2, l'ininfluenza di f sul parametro oggetto di analisi, ovvero $\xi_{ud,max}$, risulta evidente già a partire da valori di Td attorno a 2.25s, fino al suo valore di minimo.

5. **CASO 5**: Valori massimo del periodo della pila e minimo del rapporto di massa, ovvero Tp=0.2s e λ_p=0.1.

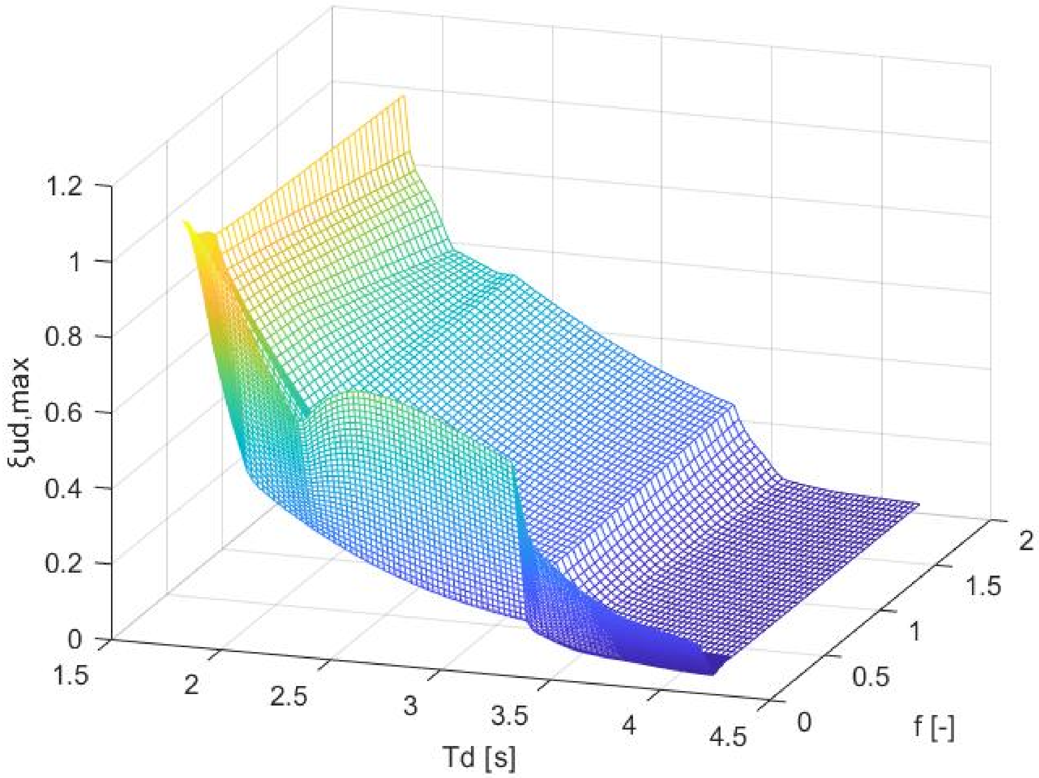

Figura 9-25: Rappresentazione tridimensionale del quinto caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro PGA/PGV.

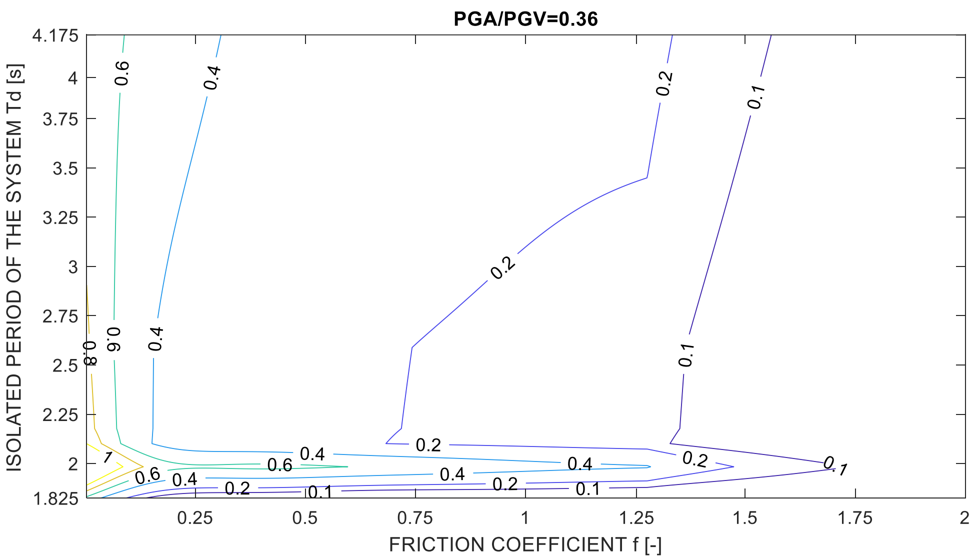

Figura 9-26

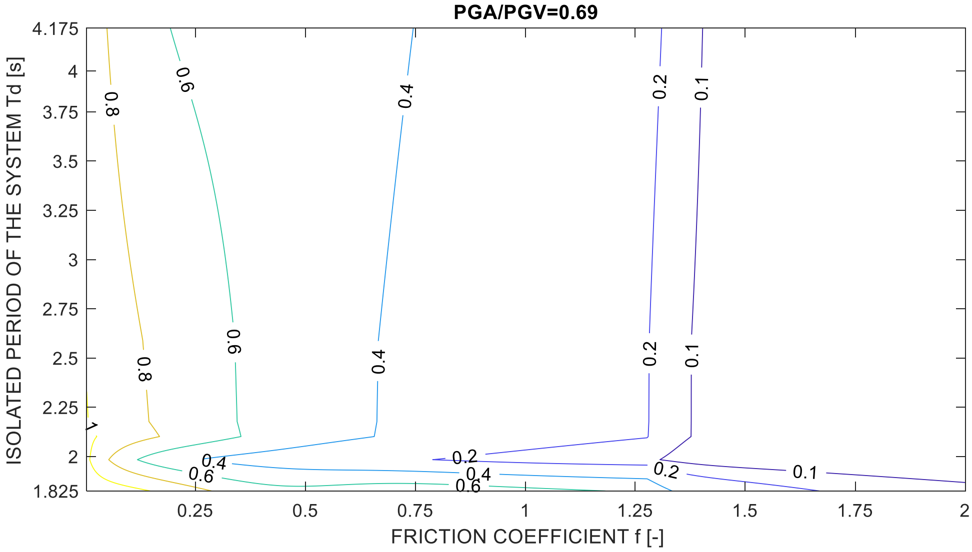

Figura 9-27

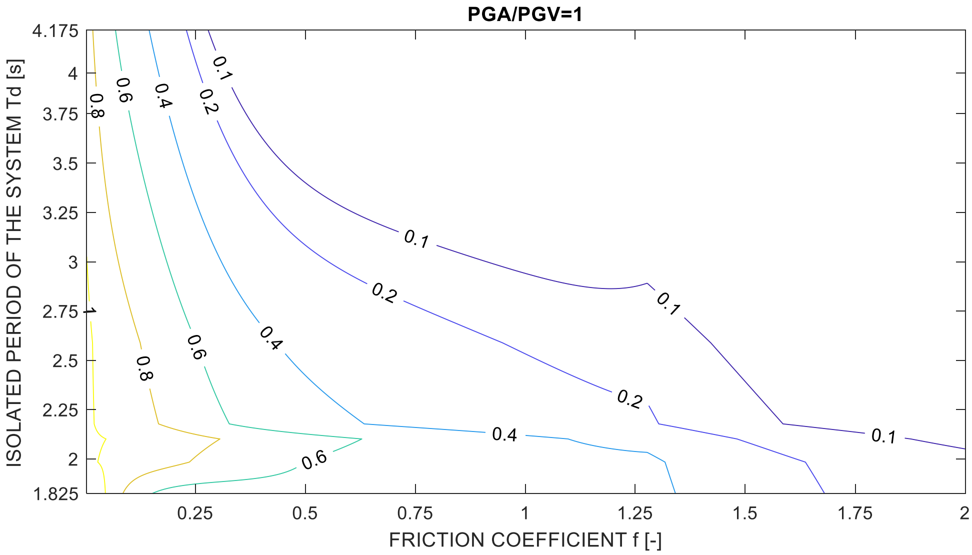

Figura 9-28

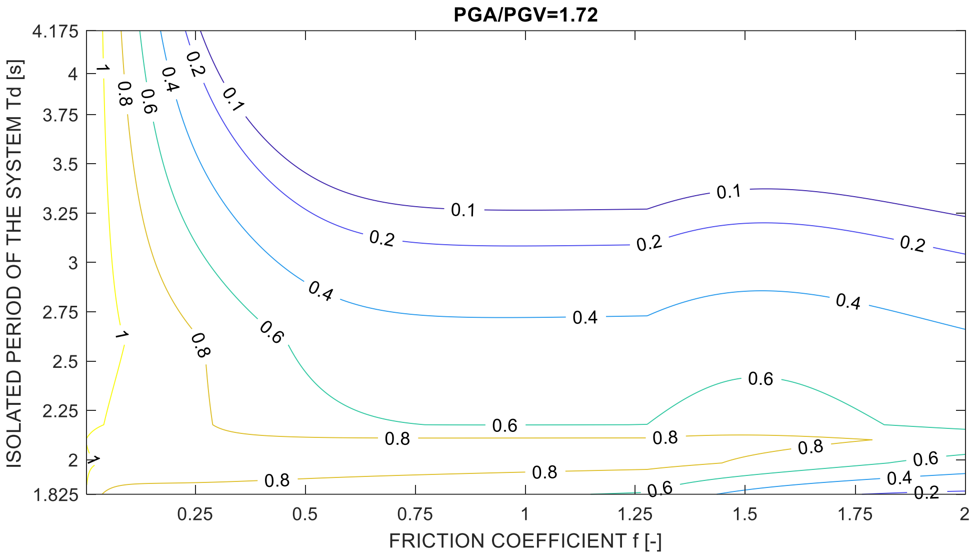

Figura 9-29

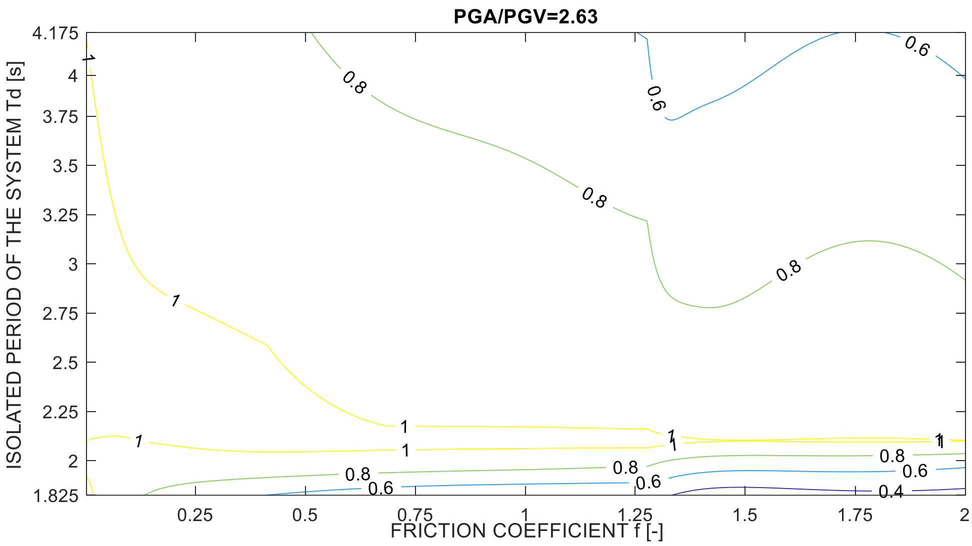

Figura 9-30

Poiché, in generale, si è evinto che la variazione della coppia T_p e λ_p non influenza particolarmente la lettura dei risultati ottenuti, si possono riassumere le conclusioni desunte da questa prima analisi come segue:

1) La presenza di linee grafiche verticali rappresenta la non influenza del parametro in ordinata, ovvero, in questo caso, del periodo dell'impalcato isolato T_d, sul parametro oggetto di indagine ($\xi_{ud,max}$). Tale indipendenza, è evidente per coefficienti di attrito f relativamente bassi, che si aggirano attorno a 0.2, nel caso in cui il rapporto PGA/PGV sia basso (in termini numerici: nel caso in cui

PGA/PGV<0.8[1]); oppure per qualunque valore di *f*, se PGA/PGV presenta valori medio-bassi (ovvero 0.8<PGA/PGV<1.2);

2) Le linee di influenza orizzontali rappresentano invece la completa non dipendenza dello spostamento adimensionale del testapila dal parametro in ascissa, ovvero, in questo caso, dal coefficiente di attrito *f*. Esse, sono evidenti qualunque sia il rapporto PGA/PGV indagato, tuttavia, il loro limite superiore di dominio diventa via via sempre più basso a mano a mano che ci si avvicina a valori di PGA/PGV maggiori (ovvero PGA/PGV>1.2), passando da $T_d \cong 2.25$s a $T_d \cong 2$s.

[1] Valori limite dei rapporti PGA/PGV al fine di stabilire delle classi di appartenenza basse medio-basse, stabiliti sulla base delle tabelle 6-1, 6-2 e 6-3.

9.3 Seconda analisi

Parallelamente a quanto eseguito nell'analisi presentata all'interno del paragrafo precedente, si è ritenuto di ulteriore interesse studiare più nel dettaglio la variazione dello spostamento adimensionale di picco del testapila al variare del periodo dell'impalcato. Infatti, come integralmente riportato all'interno dell'appendice D, in questo secondo caso, mentre i valori del periodo della pila e del rapporto di massa sono stati mantenuti costanti per ciascuna iterazione analizzata e riportata in tabella 9-1, il parametro su cui sono state eseguite le variazioni è T_d, a differenza dell'analisi eseguita precedentemente in cui l'iterazione avveniva per tramite del rapporto PGA/PGV. In questo modo è stato possibile visualizzare da un punto di vista grafico (grazie alle linee di livello) e analitico la dipendenza tra $\xi_{ud,max}$, PGA/PGV ed *f,* questi ultimi variabili all'interno del proprio intervallo di dominio. Se ne riporta di seguito la rappresentazione in tre dimensioni mentre, come nel caso dell'analisi in precedenza, si farà riferimento alla loro semplificazione 2D. A differenza dell'analisi precedente, in questo caso gli output totali provenienti dallo sviluppo dell'apposita ANN sono 60, di cui se ne riportano i 25 casi di maggiore interesse: 5 per ciascuna casistica riportata in tabella 9-1.

1. **CASO 1**: Valori minimi del periodo della pila e del rapporto di massa, ovvero Tp=0.05s, λ_p=0.1. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

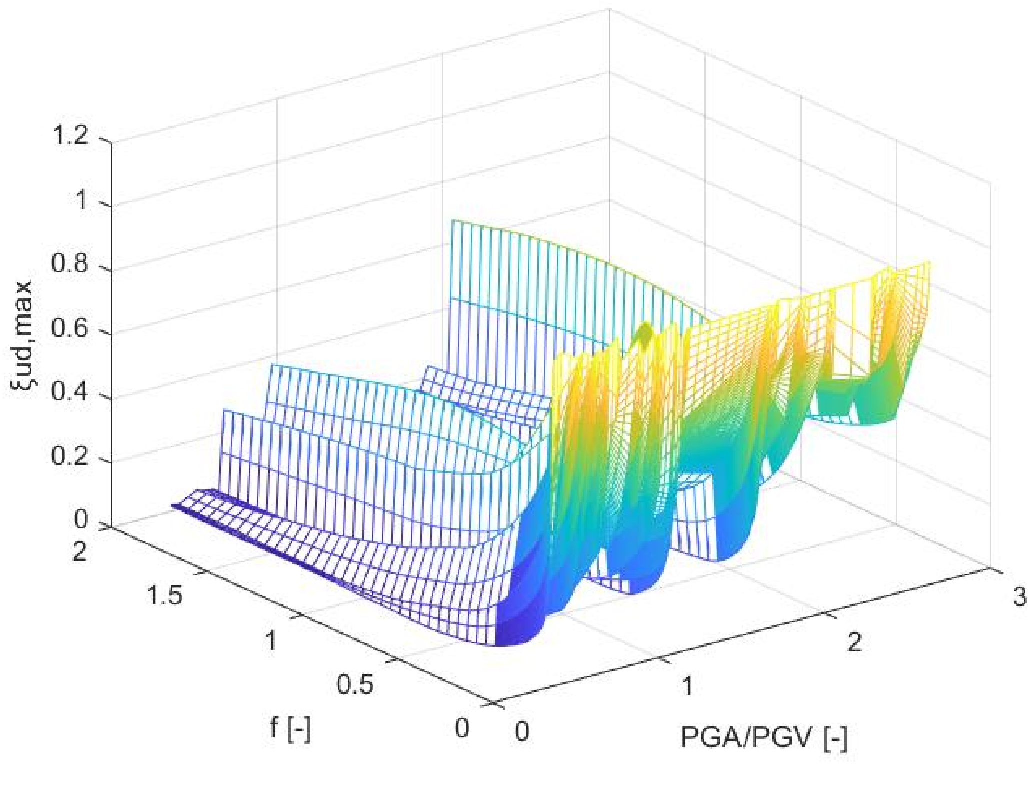

Figura 9-31: Rappresentazione tridimensionale del primo caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro T_d.

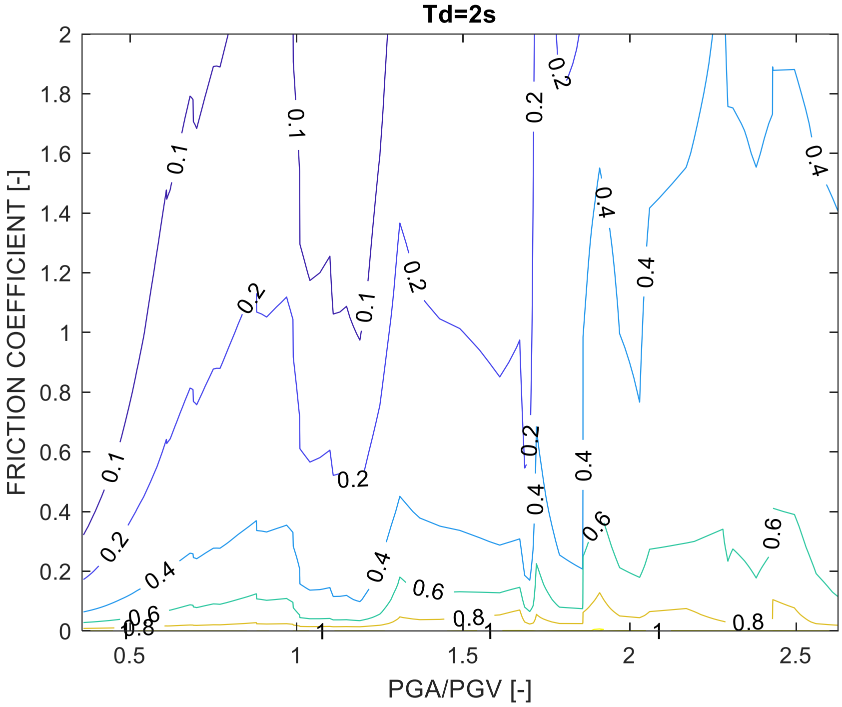

Figura 9-32

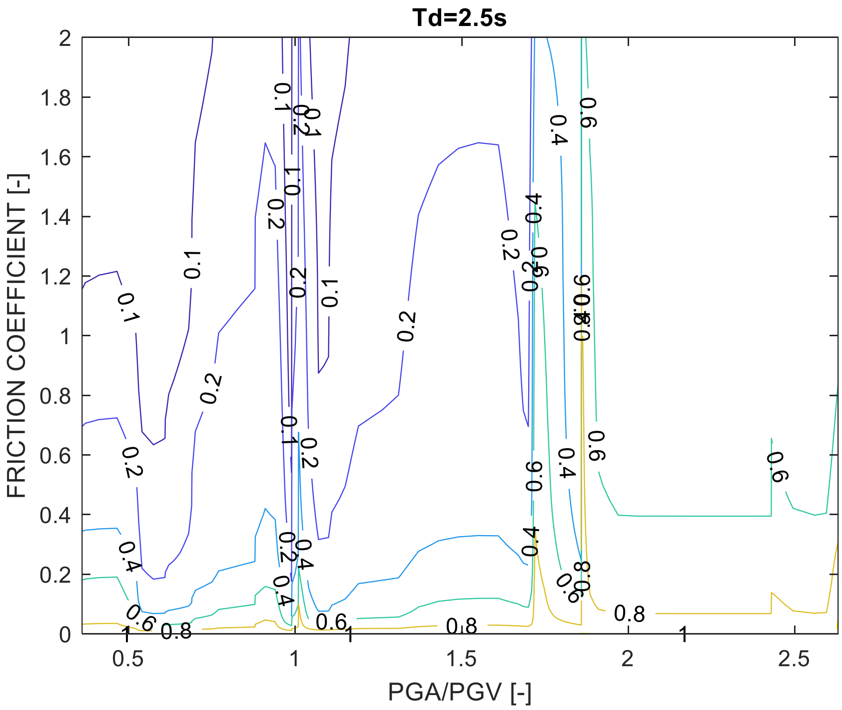

Figura 9-33

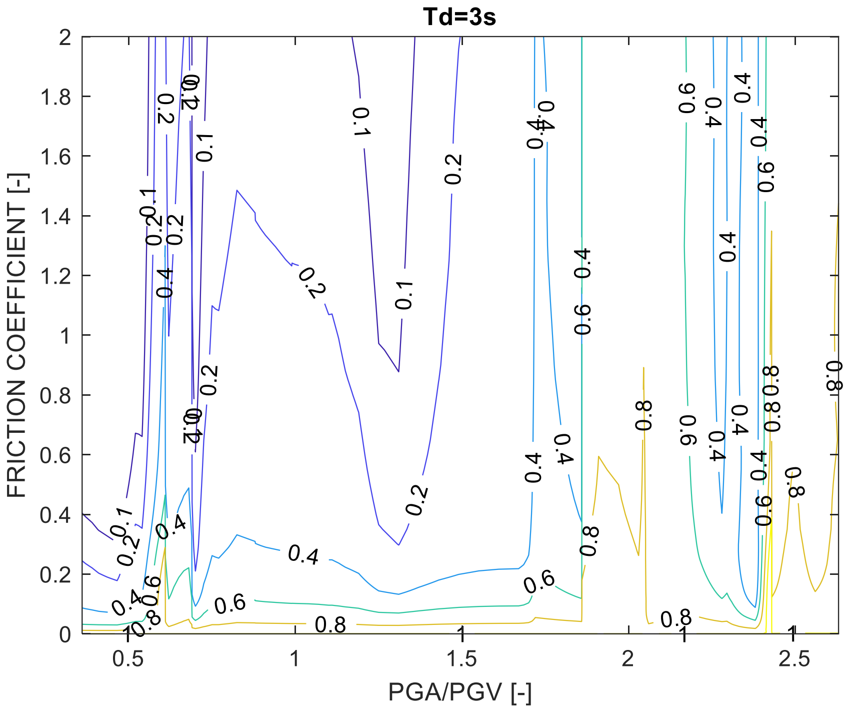

Figura 9-34

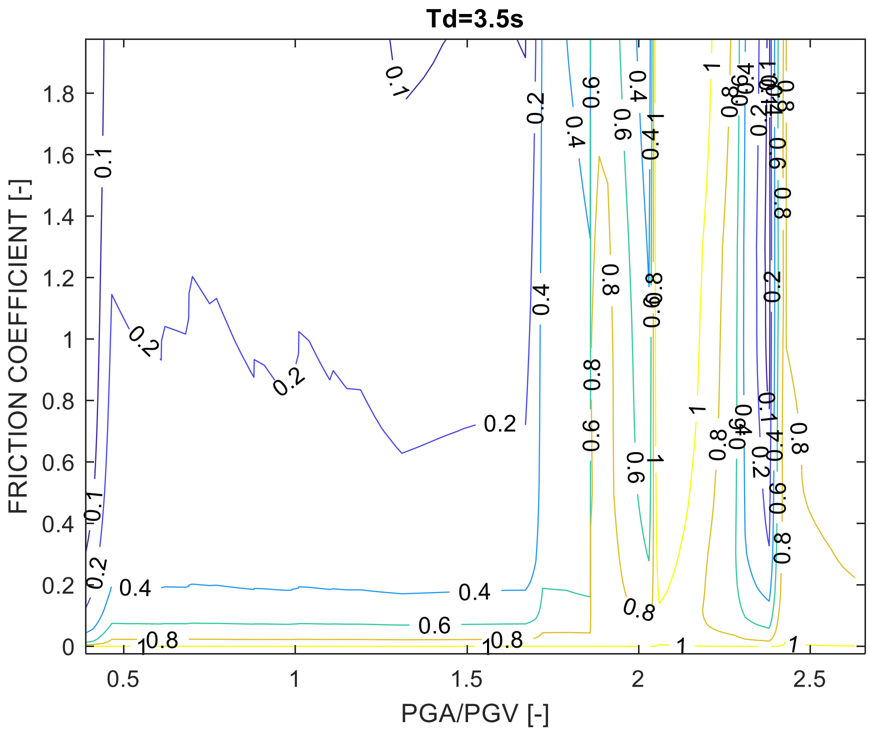

Figura 9-35

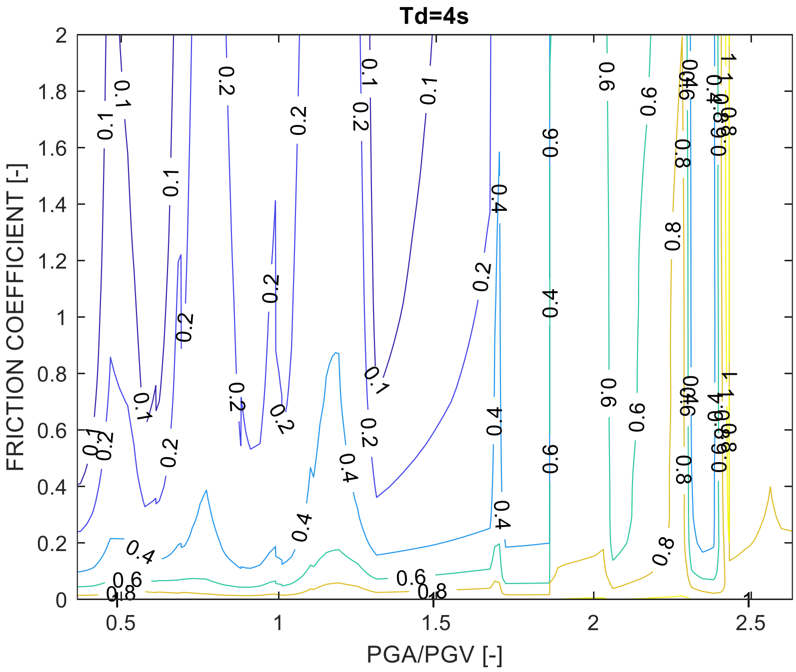

Figura 9-36

2. **CASO 2**: Valori massimi del periodo della pila e del rapporto di massa, ovvero Tp=0.2s, λ_p=0.2. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

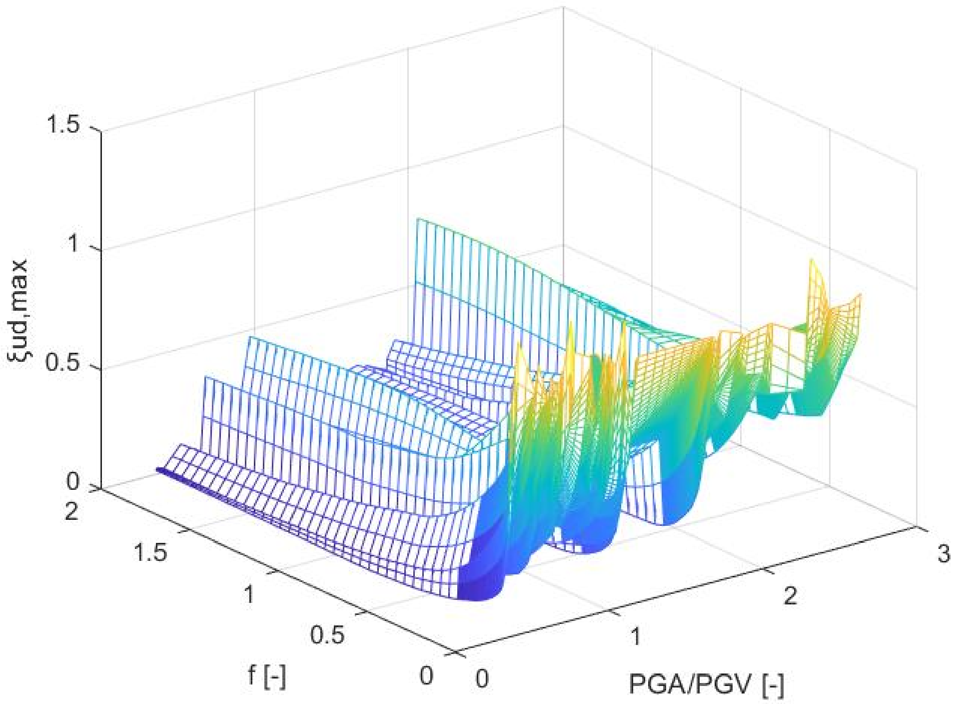

Figura 9-37: Rappresentazione tridimensionale del secondo caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro T_d.

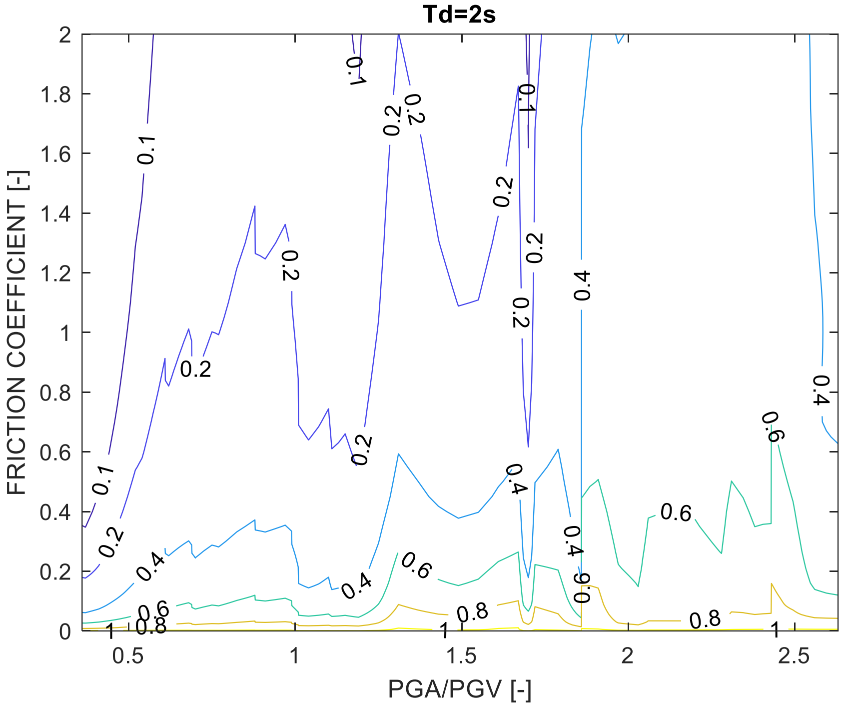

Figura 9-38

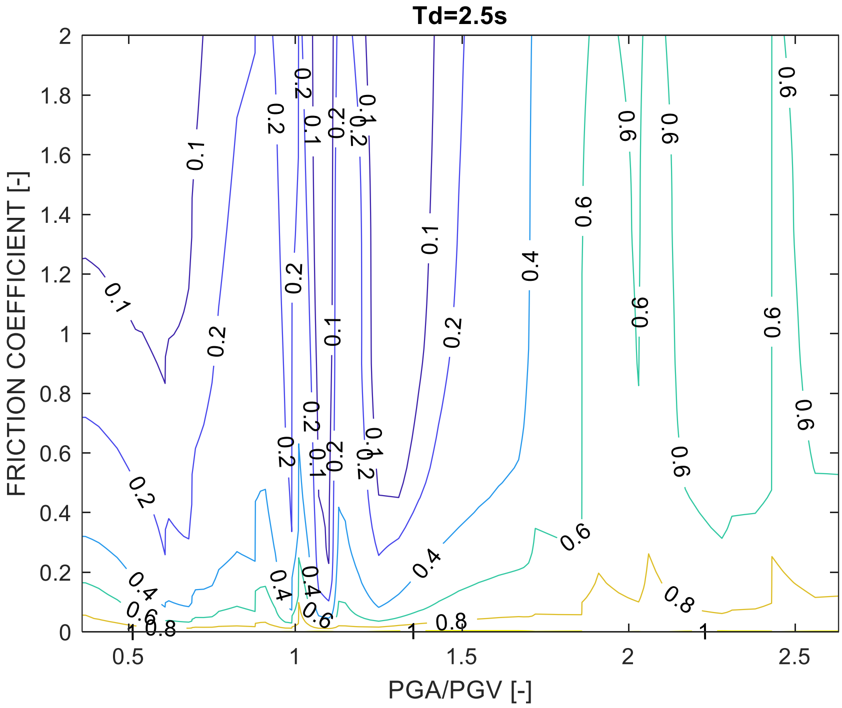

Figura 9-39

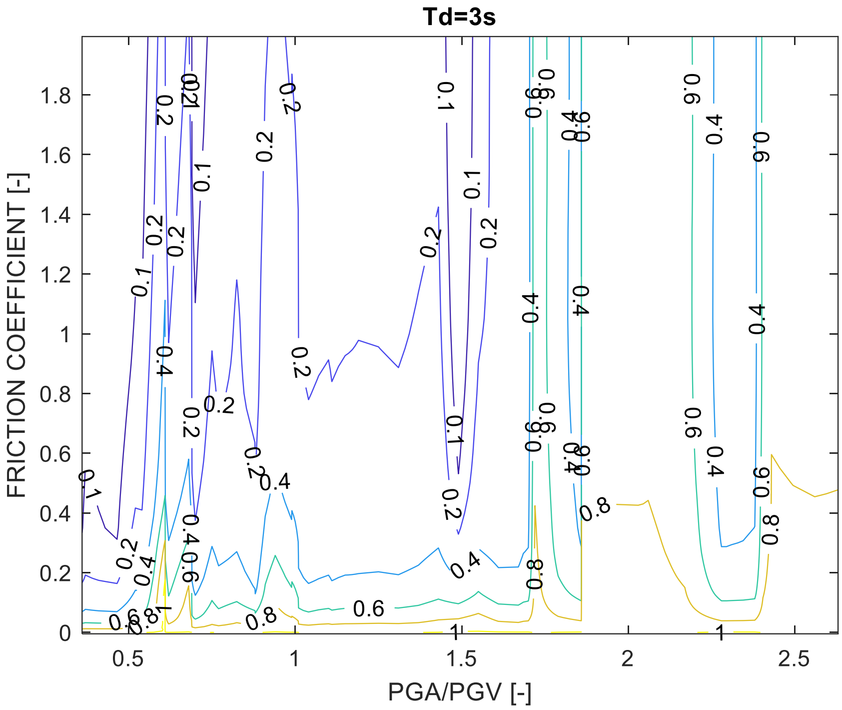

Figura 9-40

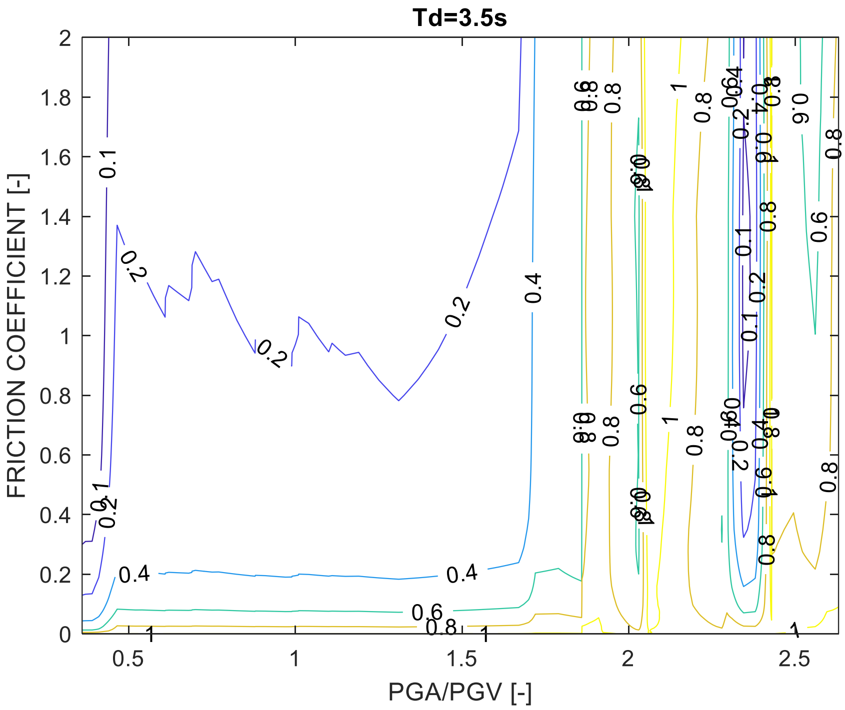

Figura 9-41

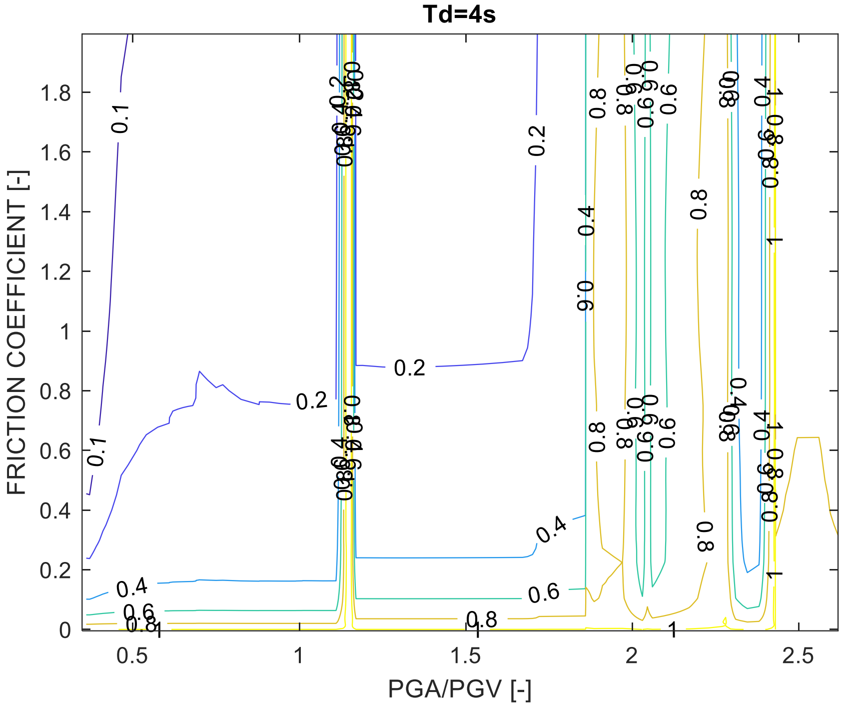

Figura 9-42

3. **CASO 3**: Valori intermedi del periodo della pila e del rapporto di massa, ovvero Tp=0.15s e λ_p=0.15. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

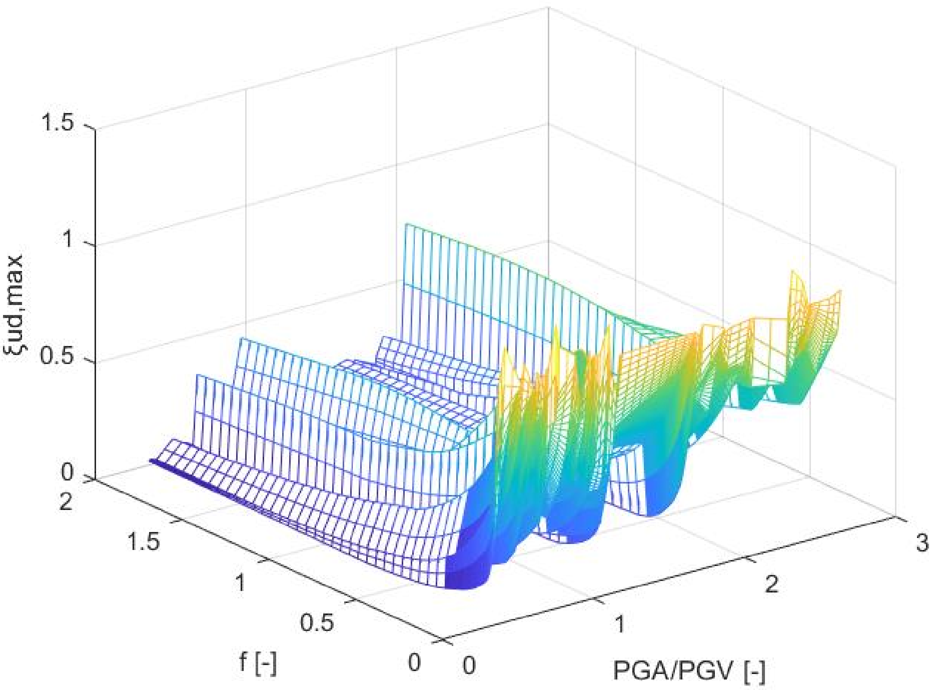

Figura 9-43: Rappresentazione tridimensionale del terzo caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro T_d.

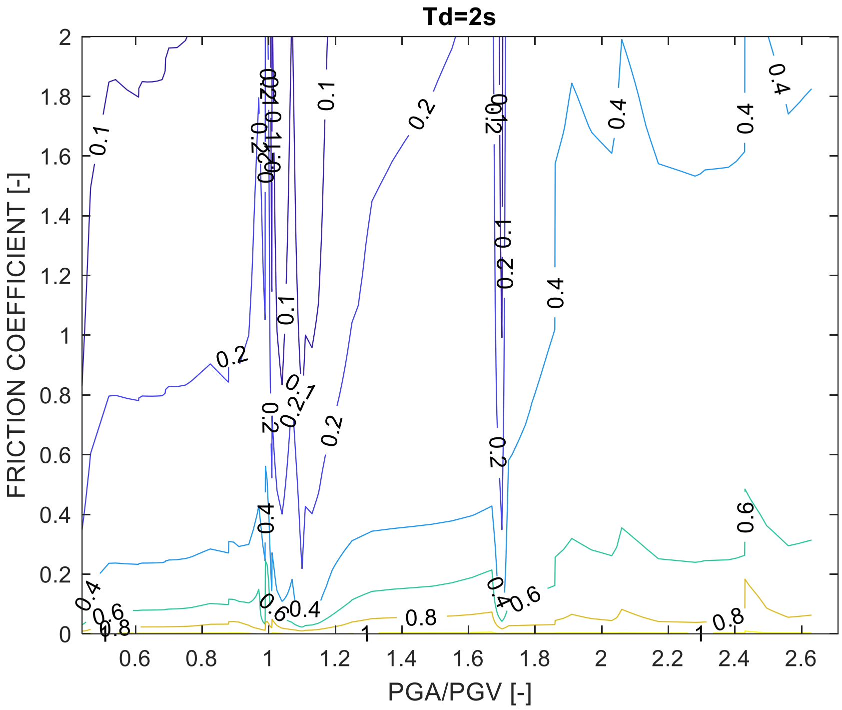

Figura 9-44

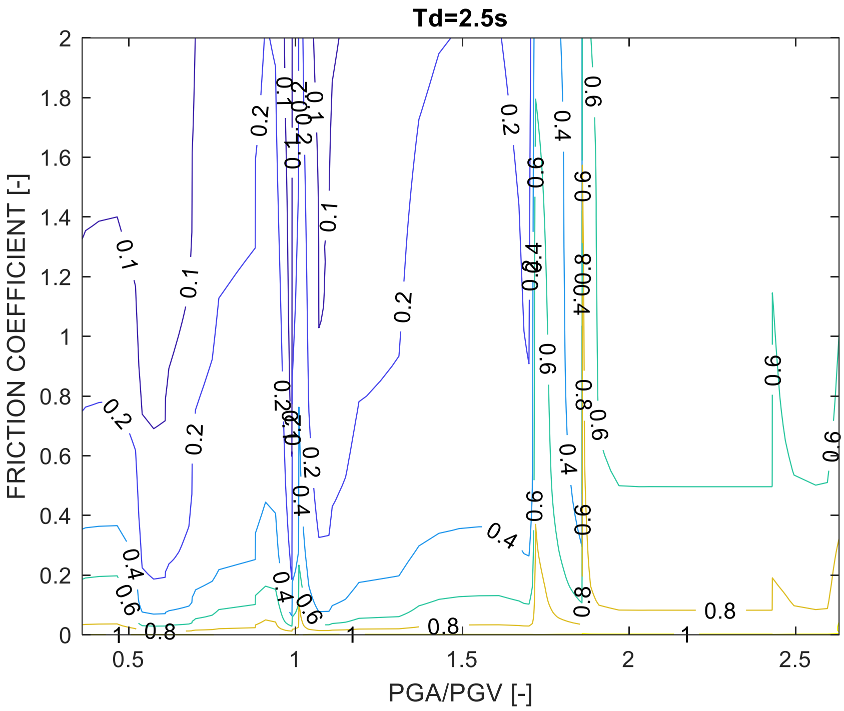

Figura 9-45

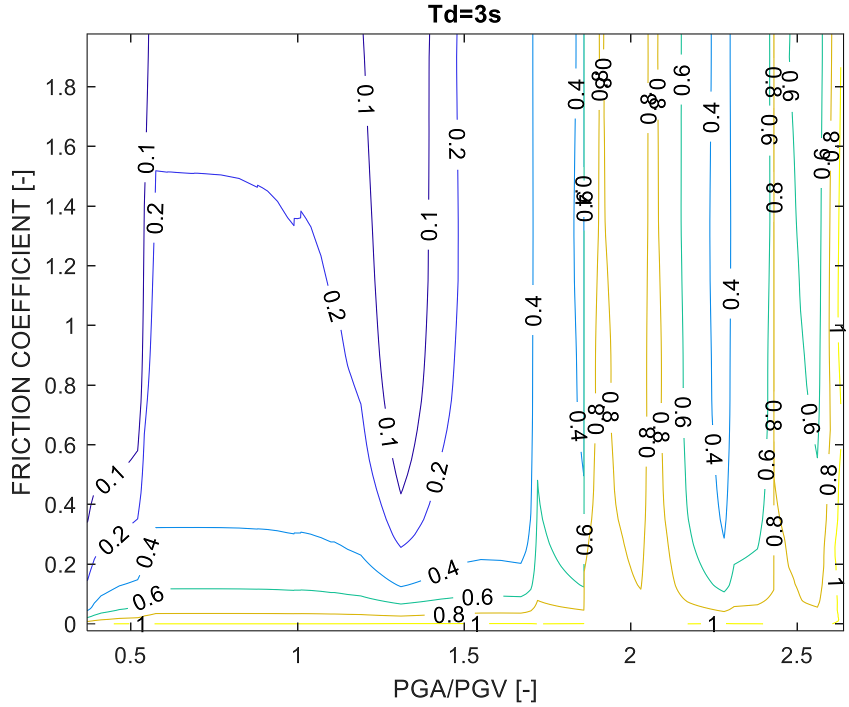

Figura 9-46

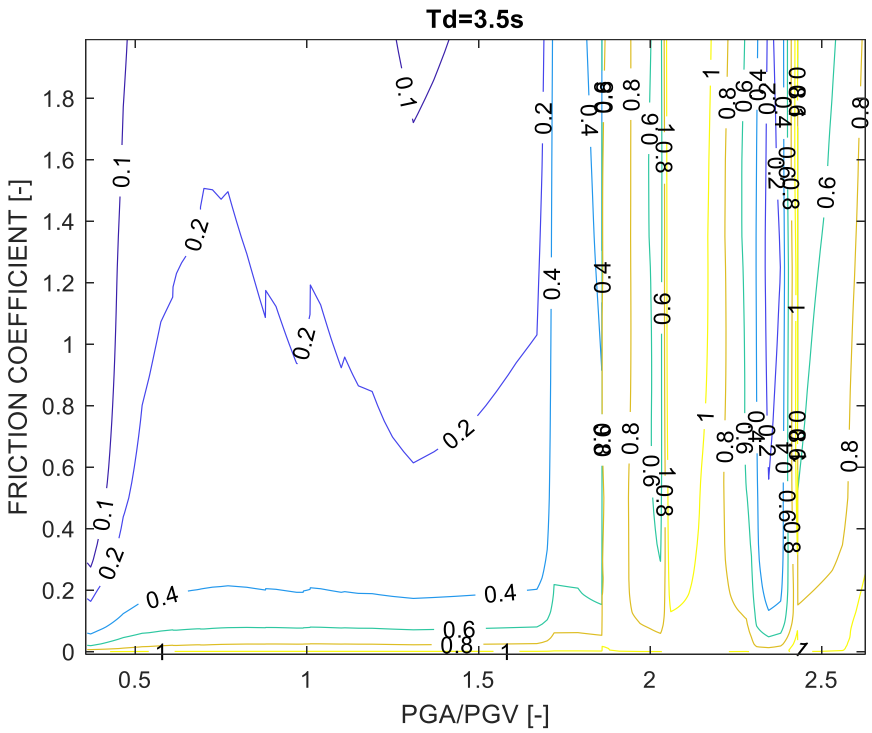

Figura 9-47

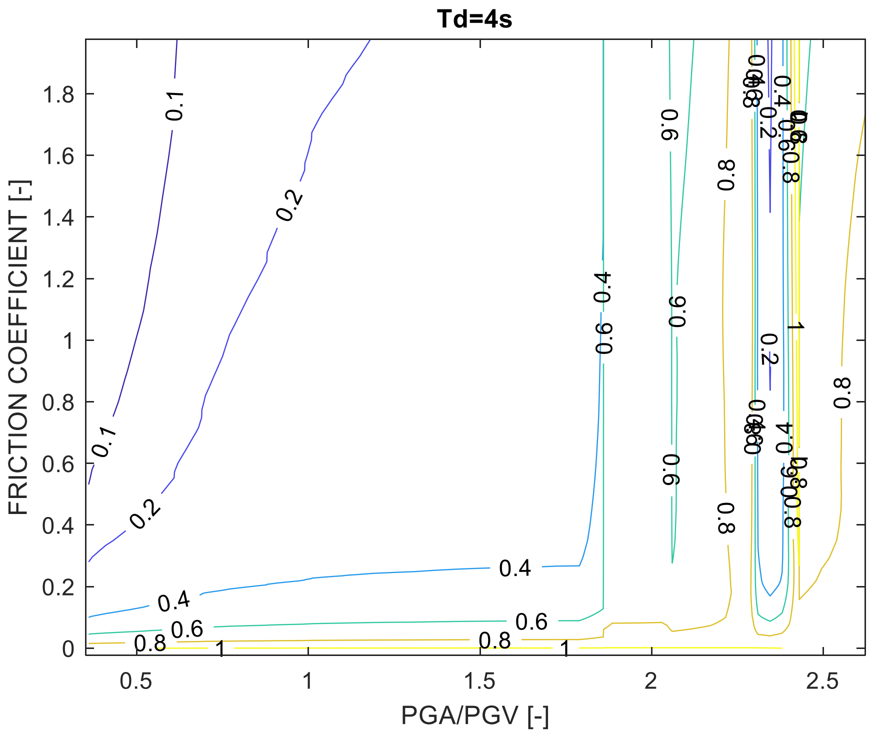

Figura 9-48

4. **CASO 4**: Valori minimo del periodo della pila e massimo del rapporto di massa, ovvero Tp=0.05s e λ_p=0.2. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

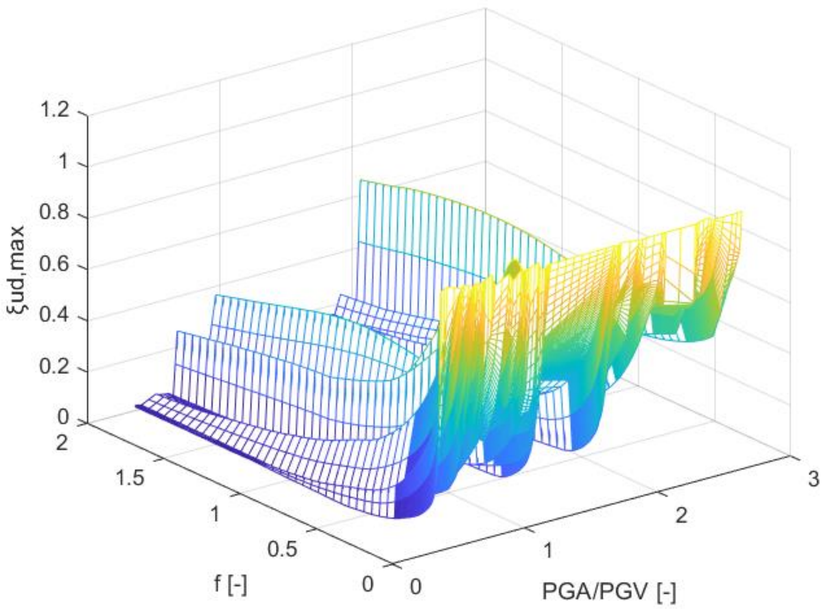

Figura 9-49: Rappresentazione tridimensionale del quarto caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro T_d.

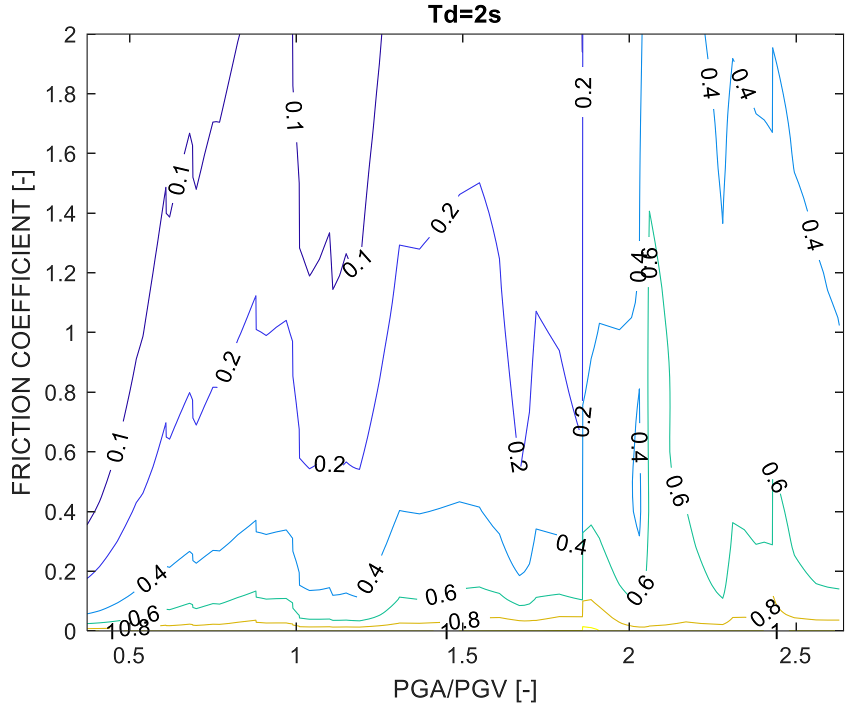

Figura 9-50

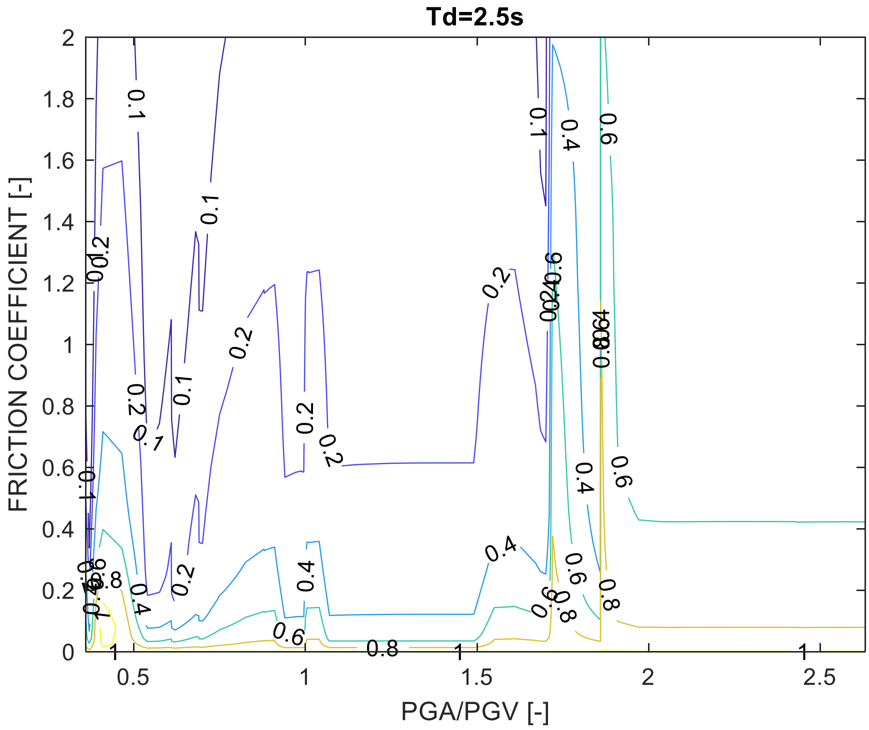

Figura 9-51

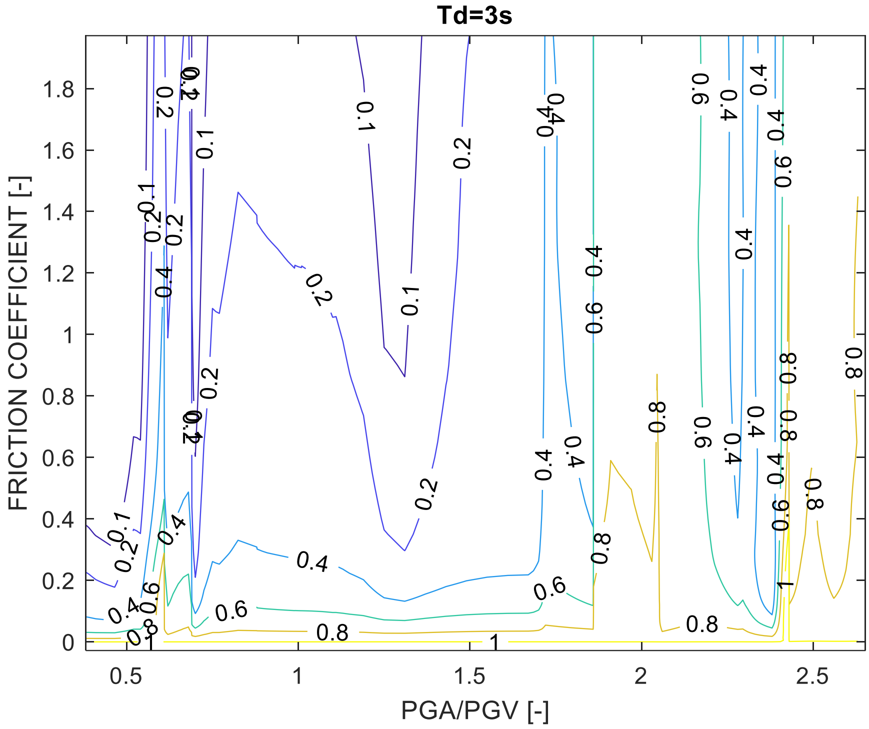

Figura 9-52

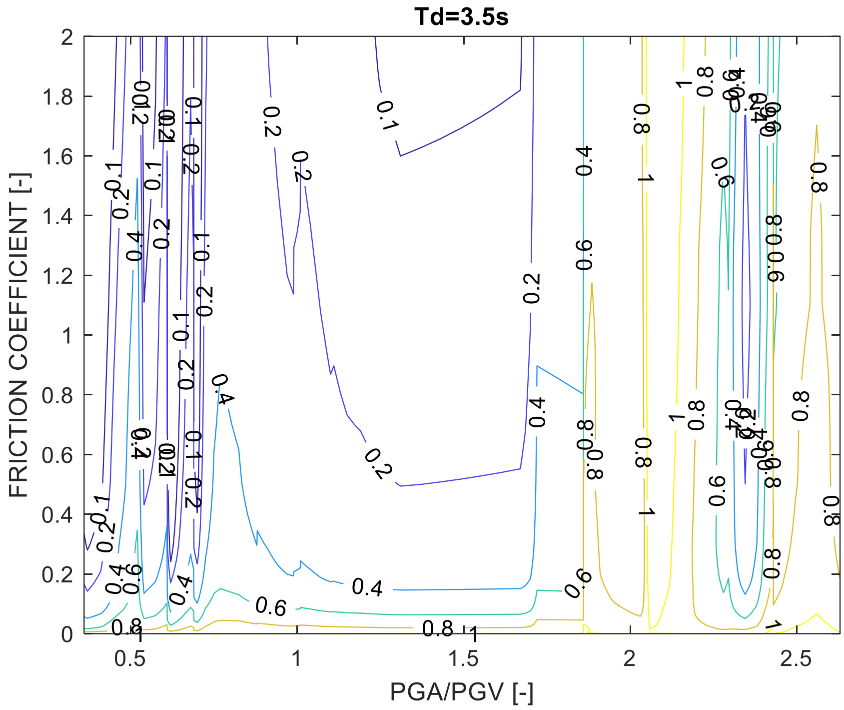

Figura 9-53

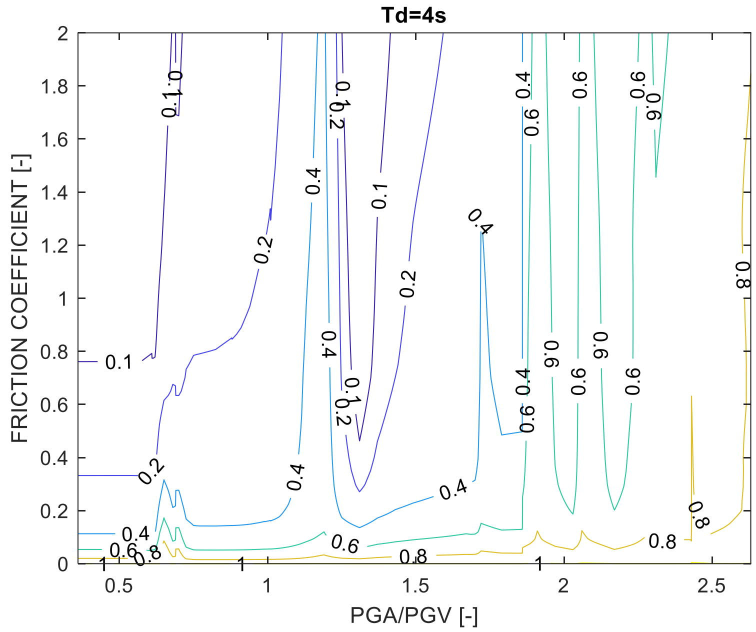

Figura 9-54

5. **CASO 5**: Valori massimo del periodo della pila e minimo del rapporto di massa, ovvero Tp=0.2s e λ_p=0.1. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

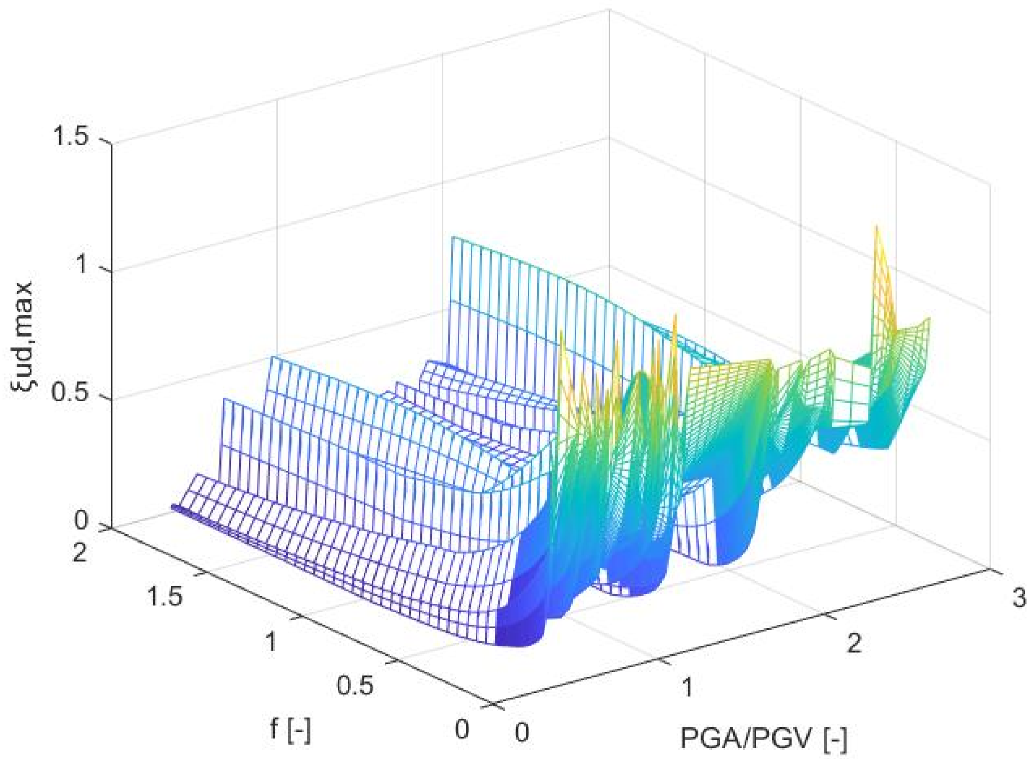

Figura 9-55: Rappresentazione tridimensionale del quinto caso studio.

A seguire le rappresentazioni in bi-dimensione, al variare del parametro T_d.

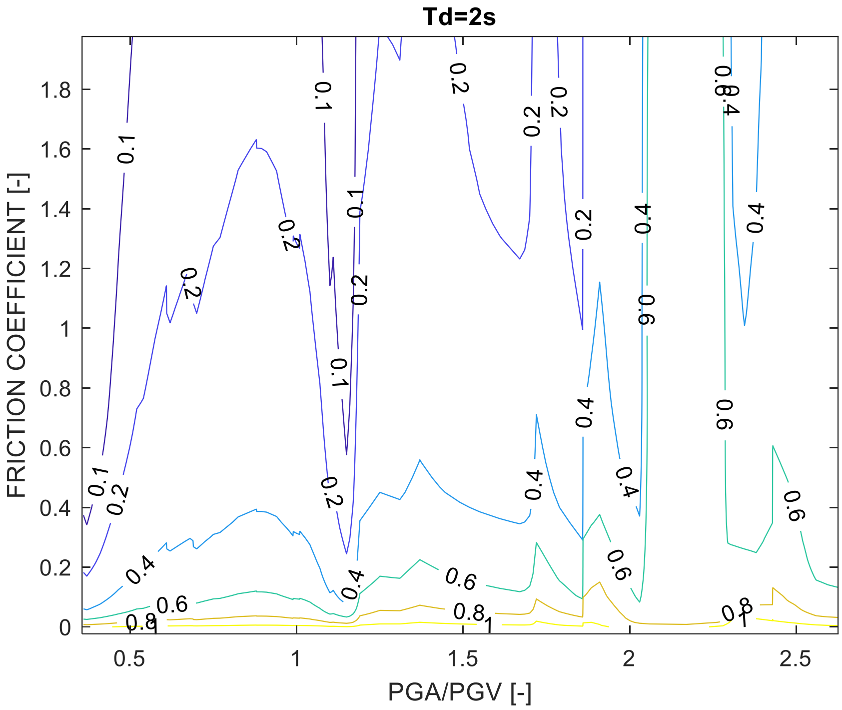

Figura 9-56

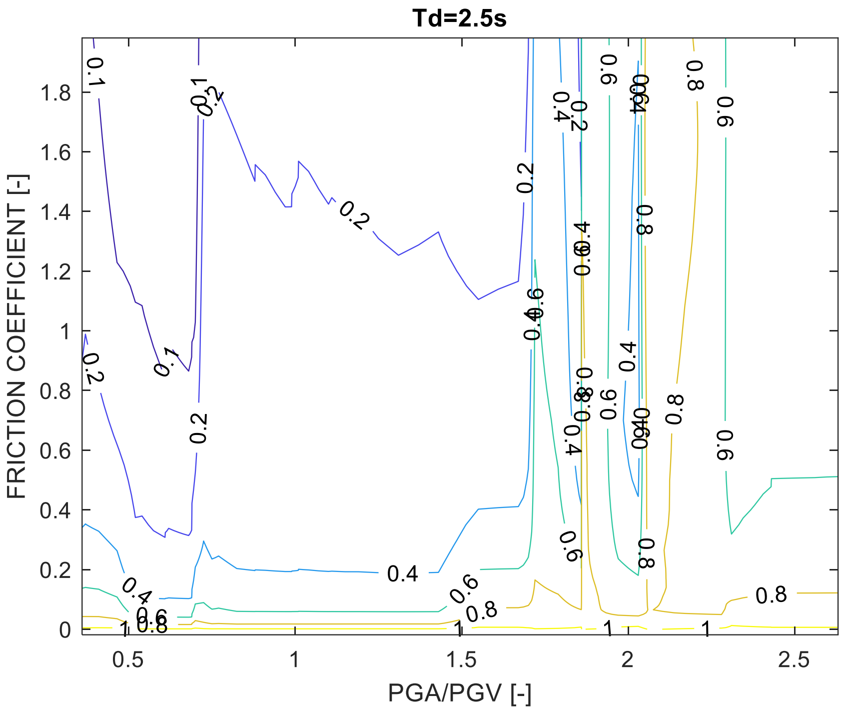

Figura 9-57

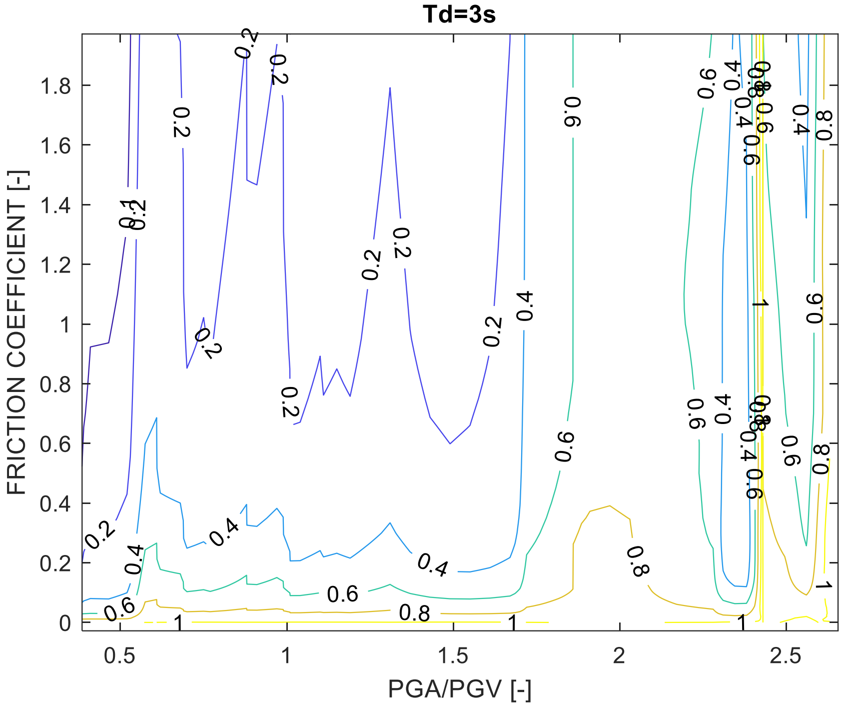

Figura 9-58

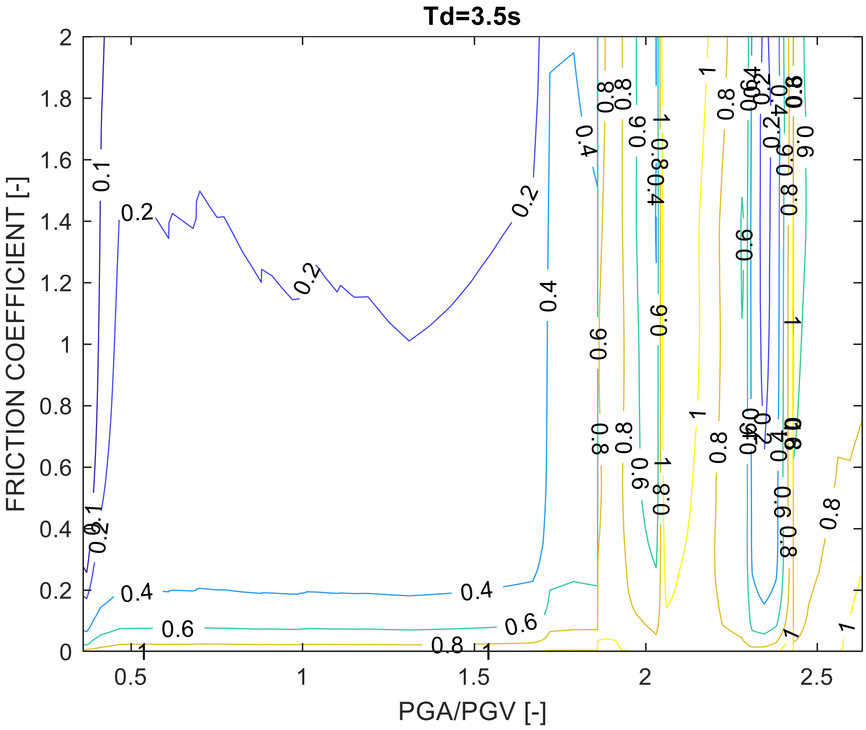

Figura 9-59

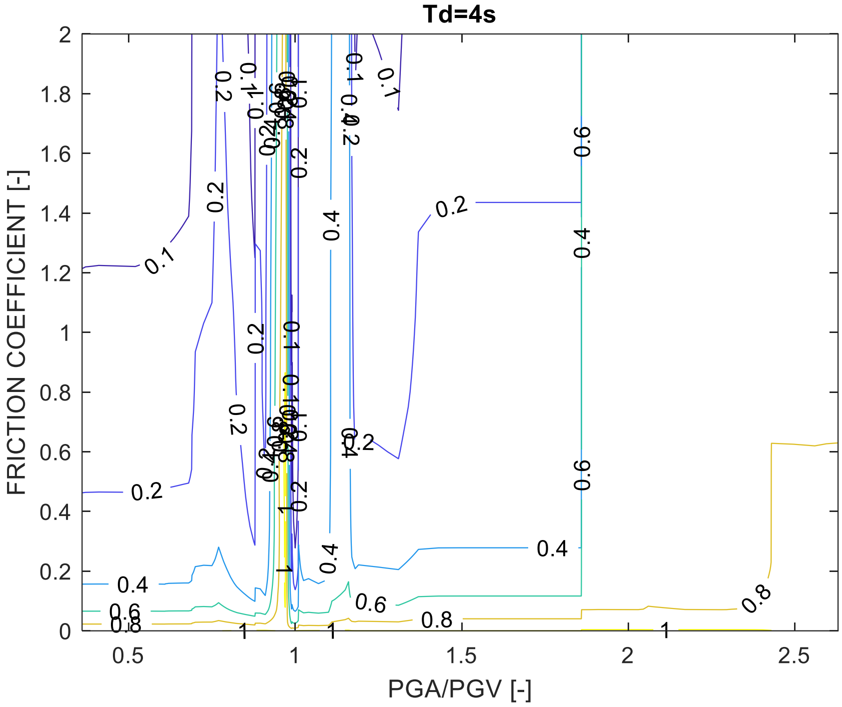

Figura 9-60

In generale, a differenza dell'analisi eseguita all'interno del paragrafo 9-2, non si può affermare che la scelta della coppia di input (Tp;λ_p) non influisca sui risultati finali. Infatti, come esplicato nelle casistiche appena esaminate, l'assegnazione di valori differenti al periodo della pila e al rapporto di massa, comporta la presenza di zone specifiche di indipendenza del picco massimo adimensionalizzato del testapila dai parametri in ascissa e ordinata, in maniera differente a seconda della coppia di input impostata nella ANN e al variare del periodo del dispositivo, esaminato. In particolare, esaminando e confrontando le figure 9-31, 9-36 e 9-41, accomunate tutte da alti valori di Td [2], risulta evidente la presenza di un plateau, ovvero di linee orizzontali per valori del coefficiente di attrito inferiori a 0.2. L'interruzione di tale comportamento, seguito da un infittimento di linee verticali, avviene all'incirca in corrispondenza di rapporti PGA/PGV pari a 1.5-1.7.

Altro comportamento su cui è bene soffermarsi è inoltre la presenza di alcune zone di infittimento specifiche, come mostrato nelle figure 9-39 e 9-45. Tale andamento, visibile rispettivamente nell'intorno di rapporti di PGA/PGV circa pari a 1 e 0.5, è indice del fatto che, a causa dell'inserimento dell'entità sismica analizzata all'interno della ANN, la struttura sarebbe soggetta a fenomeni di risonanza, fenomeni che sappiamo essere di pericolosità rilevante.

[2] Con l'aggettivo "alti" si fa riferimento a dei valori di Td variabili da 2 a 4 secondi, come specificato all'interno dei paragrafi 5 e 6.

9.4 Considerazioni finali sulle analisi

In conclusione, è possibile affermare che il procedimento di training eseguito per la rete neurale artificiale presentata ed utilizzata sia per la prima che per la seconda analisi risulti essere sufficientemente significativo. Infatti, nonostante siano stati inseriti unicamente dei parametri di input ben precisi inerenti al periodo della pila, al periodo dell'impalcato isolato sismicamente, al rapporto di massa, al rapporto PGA/PGV e al coefficiente di attrito, provenienti dall'analisi dinamica parametrica riportata integralmente nell'Appendice A, la variazione del numero di neuroni tramite procedimento iterativo ha permesso il corretto raggiungimento della sensibilità della ANN presentata. Se così non fosse infatti, non sarebbe stato possibile definire né graficamente, né tantomeno analiticamente, dei valori ben precisi dell'output di interesse, ovvero $\xi_{ud,max}$, qualunque siano i valori di T_d, T_p, λ_p, PGA/PGV ed f, purché compresi all'interno del loro dominio di definizione. In questo modo è stato possibile non solo esaminare un problema dinamico inizialmente molto complesso, mediante l'automatizzazione di una rete neurale artificiale di architettura semplice e di rapida esecuzione, bensì anche ottenere il valore del parametro di interesse $\xi_{ud,max}$, per una qualunque coppia di valori (f;PGA/PGV) oppure (f;T_d), riuscendo a definirne un dominio di esistenza continuo, come sottolineato dalle figure 9-1 e 9-27.

CAPITOLO 10

Inversione della ANN

10.1 Procedimento analitico

La rappresentazione mediante linee di livello consente di effettuare considerazioni di ordine qualitativo in merito all'effetto dei diversi parametri in gioco sulla variabile di progetto coefficiente di attrito *f* dei DCFPs. Ai fini progettuali lo strumento ideale per conseguire obiettivi prestazionali legati al valore di picco dello spostamento adimensionale del tastapila sarebbe una relazione diretta che consenta assegnato l'obiettivo in parola di verificarne il conseguimento e di individuare i parametri progettuali ottimi. Con tale scopo si è pensato di analizzare la possibilità di inversione della rete neurale artificiale appositamente creata di tipo diretto, in modo tale da ottenere la correlazione ottimale tra f e $\xi_{ud,max}$ in maniera del tutto automatica. Per fare ciò, è bene dapprima introdurre alcune nozioni di tipo analitico-teoriche. Consideriamo lo schema della ANN creata e discussa all'interno del capitolo 9 e riportata in figura 10-1.

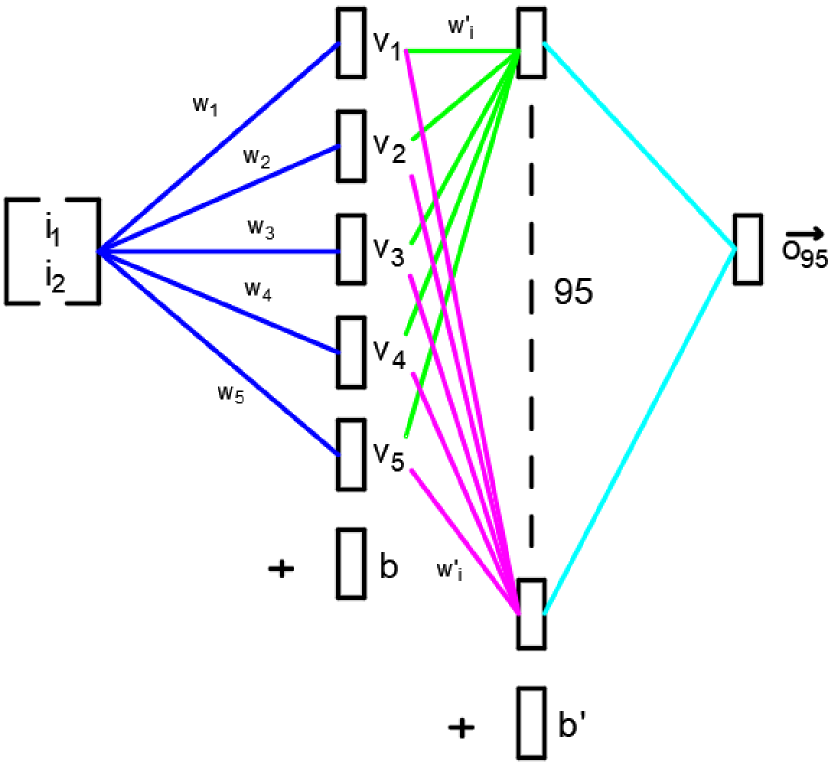

Figura 10-1: schema della ANN creata.

dove:

- i_1 e i_2 rappresentano le due variabili in ingresso, ovvero, nel caso della prima analisi, nonché quella sottoposta ad inversione, f e T_d;
- w_i rappresentano i pesi assegnati alle variabili di input;
- w_i' rappresentano i pesi assegnati agli output dell'hidden layer;
- b e b' rispettivamente il bias dell'input e dell'hidden layer;
- v_i rappresentano i dati elaborati dai singoli neuroni dell'hidden layer;
- $\overrightarrow{o_{95}}$ rappresenta il vettore contenente i 95 output della ANN.

Senza perdere in generalità, per l'analisi in questione ci si è concentrati sul primo dei 95 valori di output, ovvero sul primo valore appartenente al vettore di 95 elementi di uscita, o_1. Quest'ultimo può essere rappresentato in maniera analitica come segue:

$$o_1 = \sum_{i=1}^{5} w'_{1i} v_i + b'_1 \tag{10.1}$$

Inoltre, sapendo che ciascun elemento v_i risulta essere funzione dei dati di input i_1 e i_2, moltiplicati per i rispettivi pesi, nonché del rispettivo bias b_i, per tramite della funzione di attivazione insita dei neuroni artificiali appartenenti all'hidden layer, si ottiene:

$$v_i = \frac{2}{1 + e^{-2\left([i_1 i_2]\begin{bmatrix} w_{i1} \\ w_{i2} \end{bmatrix} + b_i\right)}} - 1 \tag{10.2}$$

con i=1,…,5.

Sostituendo la (10.2) nella (10.1):

$$o_1 = \sum_{i=1}^{5} w'_{1i} \left(\frac{2}{1 + e^{-2([i_1 i_2]\begin{bmatrix} w_{i1} \\ w_{i2} \end{bmatrix} + b_i)}} - 1 \right) + b'_1 \tag{10.3}$$

Successivamente, sviluppando il termine esponenziale della (10.3) ed esplicitandone il termine dipendente solo dalla prima variabile di input, ovvero i_1:

$$e^{-2(i_1 w_{i1}+i_2 w_{i2}+b_i)} = e^{-2i_1 w_{i1}} \cdot e^{-2i_2 w_{i2}-2b_i} = e^{-2i_1 w_{i1}} \cdot z_i \qquad (10.4)$$

Raggruppando poi i termini noti della (10.3) ed effettuando la semplificazione esposta nella (10.4), si ottiene:

$$\frac{o_1 + \sum_{i=1}^{5} w'_{1i} - b'_1}{2} = \sum_{i=1}^{5} \frac{w'_{1i}}{1 + z_i e^{-2w_{1i}i_1 \frac{w_{1i}}{w_{11}}}} \qquad (10.5)$$

Per comodità, si riscrive la quantità $e^{-2w_{1i}i_1}$ con la lettera x, simbolo dell'incognita del problema di inversione in esame. Si ottiene così una funzione $K(o_1)$, definita come di seguito:

$$\frac{\sum_{i=1}^{5} w'_{1i}\left(\prod_{j\neq i}(1 + z_j x^{\alpha_j})\right)}{\prod_{i=1}^{5}(1 + z_i x^{\alpha_i})} = K(o_1) \qquad (10.6)$$

dove con α_i e α_j si sono indicati rispettivamente i rapporti w_{1i}/w_{11} e w_{1j}/w_{11}.

La funzione di interesse, nonché quella soggetta ad inversione risulta essere una funzione del tipo:

$$F(w, z, \alpha) = \frac{w}{1 + zx^{\alpha}} \qquad (10.7)$$

Facendo uno studio della funzione riportata nella 10.7 possiamo definirne i due andamenti limite al variare del parametro α, come riportati in figura 10-2:

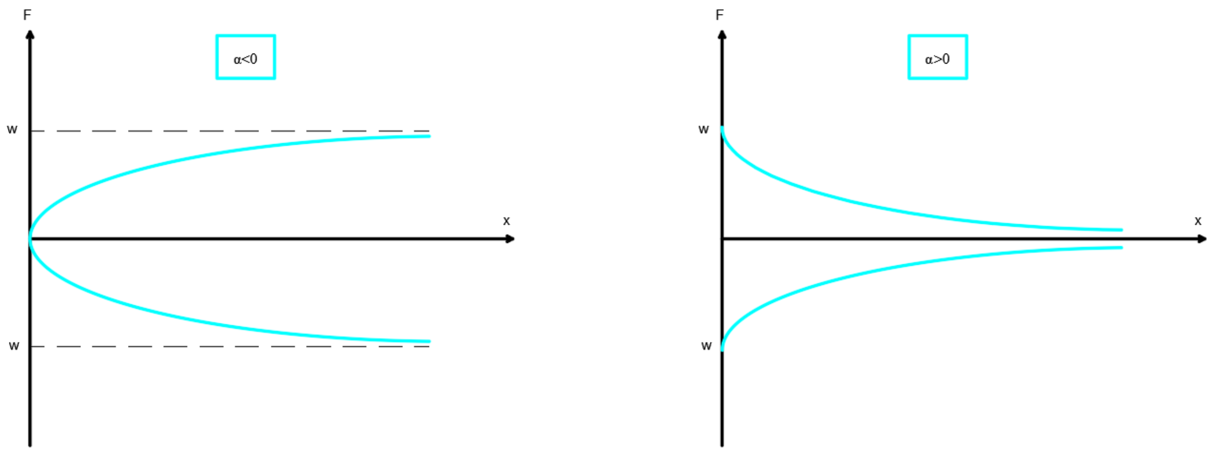

Figura 10-2: andamento qualitativo dei termini della funzione da invertire.

Inoltre, operando in termini di derivata della funzione descritta nella (10.7), è possibile sapere se la funzione tenderà ad un andamento crescente o decrescente (se la derivata è minore di 0 allora la funzione sarà decrescente, al contrario sarà di tipo crescente). Una volta concluse ed effettuate tutte le considerazioni appena descritte, è stato possibile procedere operativamente nello sviluppo dell'inversione diretta, di cui si riportano le considerazioni a seguire.

10.1 Inversione della ANN creata

Per poter procedere con l'inversione della ANN, poiché le variabili in ingresso, come da figura 10-1, risultano essere due, ma il risultato al quale si è voluto tendere è rappresentato unicamente dal valore di ottimo attribuibile al coefficiente di attrito *f*, si è deciso di mantenere invariato, di iterazione in iterazione, la seconda variabile esaminata, ovvero T_d. In particolare, come riportato integralmente all'interno dell'appendice E, è stato creato un apposito script di comando tramite il software Matlab, all'interno del quale sono stati trascritti i valori dei pesi *w* e *w'*[3], nonché i bias, ottenuti automaticamente dalla ANN derivata dalla prima analisi, inerenti al primo dei 95 valori di $\xi_{ud,max}$ ottenuti dall'elaborazione. Una volta noti i parametri di controllo e di correlazione utilizzati dalla rete neurale, è stato possibile, mediante lo studio di funzione esaminato al paragrafo 10.1 e in maniera del tutto automatizzata, visualizzare da un punto di vista grafico l'andamento dello spostamento adimensionalizzato in funzione del coefficiente di attrito dei dispositivi DCFPs.

[3] Denominazione come riportato in figura 10-1.

Tale procedimento è stato svolto per ciascuno dei 45 valori attribuibili al rapporto PGA/PGV entro i limiti del proprio dominio; tuttavia, si è ritenuto consono riportare graficamente i casi di maggiore rilevanza, al fine di poterne trarre conclusioni di tipo generale. In particolare, dunque, si riportano tre casi studio inerenti all'inversione diretta della ANN analizzata:

- caso studio 1: PGA/PGV intermedio[4];
- caso studio 2: PGA/PGV basso[5];
- caso studio 3: PGA/PGV alto[6].

Di seguito si riportano i risultati attesi.

1. È stato preso in considerazione, al fine di determinare pesi e bias utili per l'inversione diretta della ANN, il caso specifico di T_p=0.1s, λ_p=0.15 e PGA/PGV=1.04. Successivamente, l'inversione è stata ottenuta analizzando l'andamento della funzione rappresentante $\xi_{ud,max}$ al variare del periodo imposto T_p. A seguire i risultati grafici.

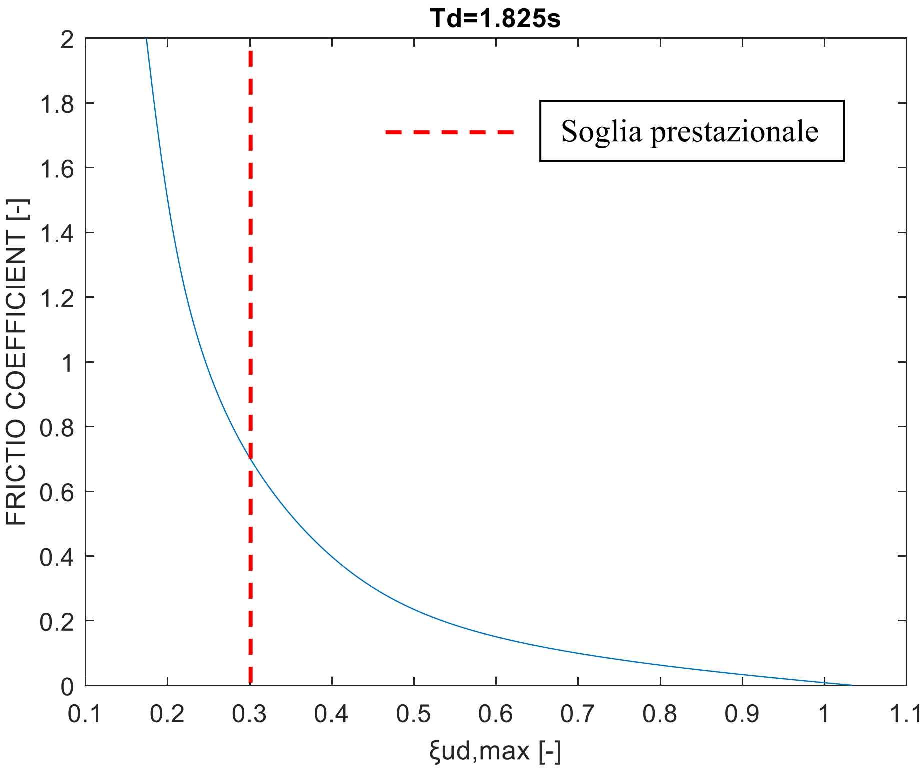

Figura 10-3

[4] Ovvero PGA/PGV≅1.3.
[5] Ovvero 0.36<PGA<1.2.
[6] Ovvero 1.4<PGA/PGV<2.63.

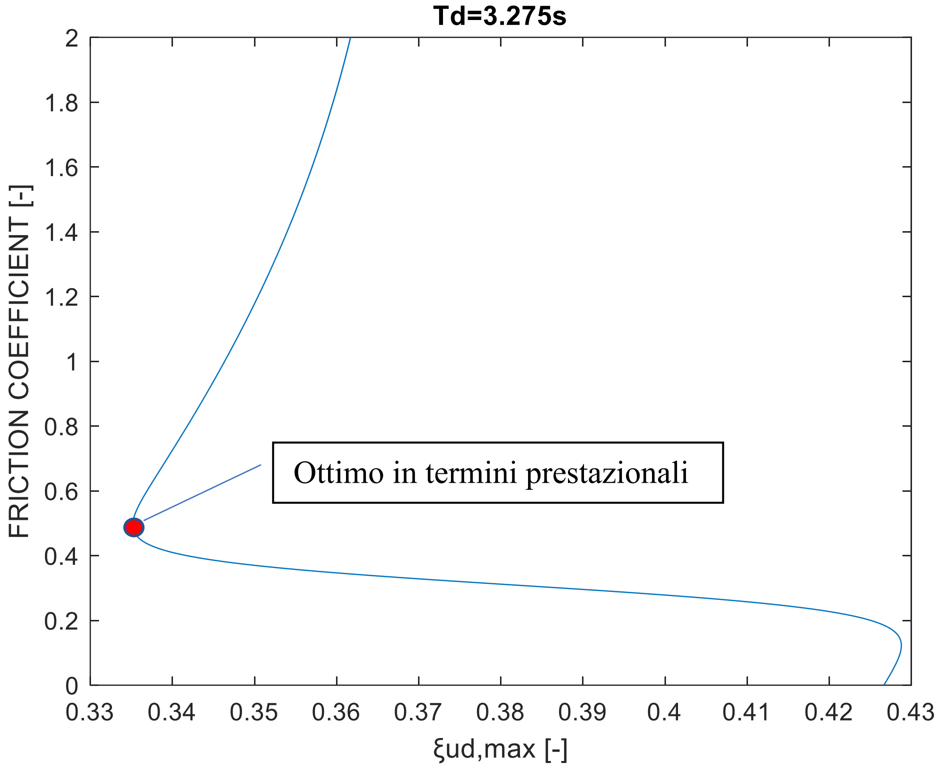

Figura 10-4

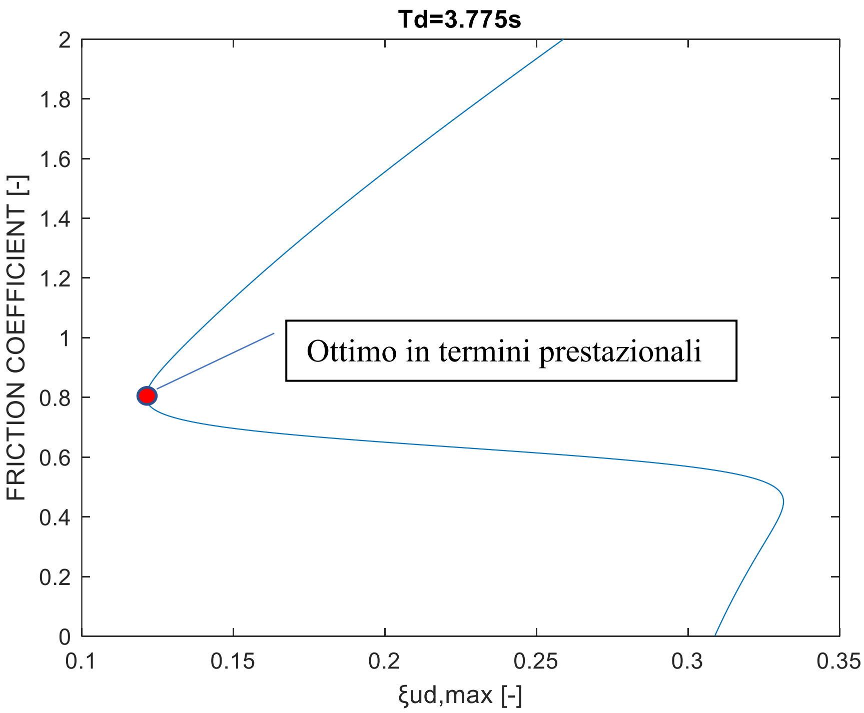

Figura 10-5

Come si può notare, confrontando le figure 10-3, 10-4 e 10-5, per periodi che si aggirano circa al di sotto di 3s la funzione rappresentante ξud,max risulta avere un andamento curvilineo di tipo decrescente; a mano a mano che ci si avvicina al valore massimo del periodo dell'impalcato isolato, ovvero giungendo verso i 4s, la funzione presenta un punto di minimo riguardante il parametro in ordinata, il coefficiente di attrito *f*, che diventa via via sempre più accentuato.

Volendo dunque fissare un limite prestazionale al parametro ξud,max, ad esempio pari a 0.3, nel caso in cui ci trovassimo in figura 10-3, si potrebbe scegliere un qualunque valore di f, purché inferiore al valore della funzione intercettata (nel caso in esame, corrispondente ad $f \cong 0.8$). Lo stesso ragionamento potrebbe essere effettuato anche nei due successivi casi, rappresentati nelle figure 10-4 e 10-5, tuttavia, all'interno del range di variazione trovato, caratterizzante i valori coerenti con il limite prestazionale imposto, ci si potrebbe semplicemente soffermare attorno ai valori di ottimo del parametro ricercato, ovvero *f*, rappresentati rispettivamente dai valori minimi: $f \cong 0.45$ e $f \cong 0.8$. In particolare, tale ottimo ritrovato, nel caso studio esaminato, si è riscontrato, tendere a valori sempre più elevati di *f*, all'aumentare del periodo T_d esaminato.

2. È stato preso in considerazione, ancora una volta il caso specifico di T_p=0.1s, λ_p=0.15 e PGA/PGV=0.68. Successivamente, l'inversione è stata ottenuta in maniera diretta, ritrovando i pesi e i bias utilizzati nella ANN creata, andando ad analizzare l'andamento della funzione rappresentante $\xi_{ud,max}$ al variare del periodo imposto T_p. A seguire i risultati trovati, per i tre casi di maggiore rilevanza.

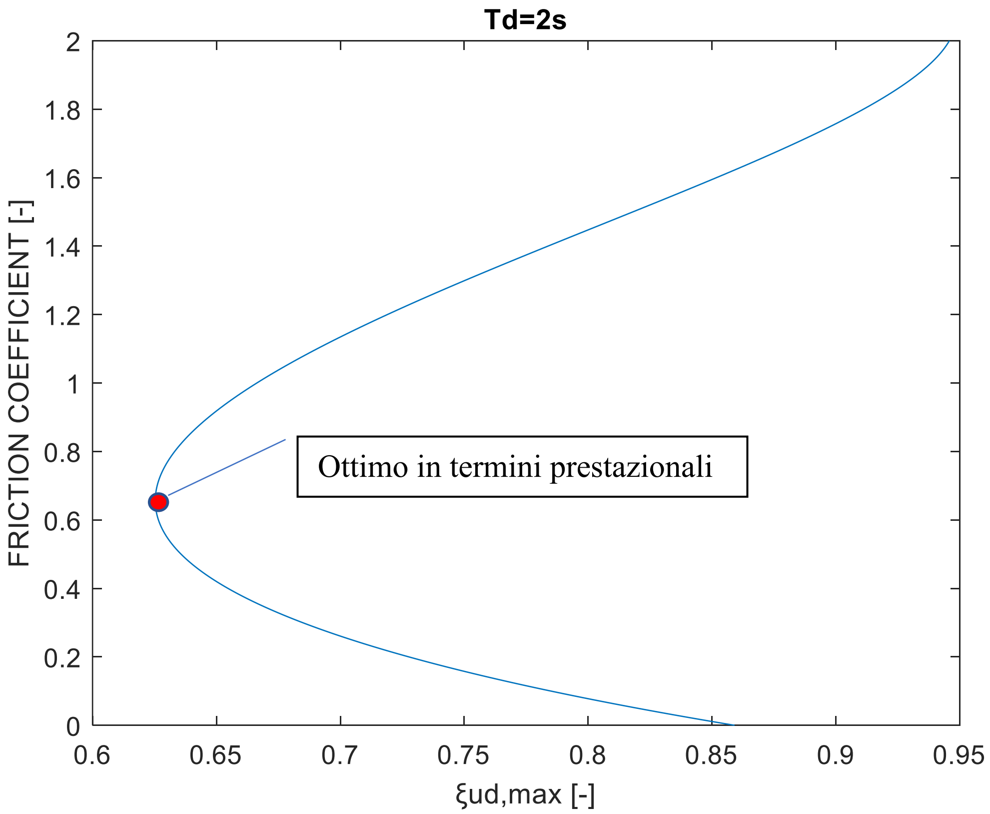

Figura 10-6

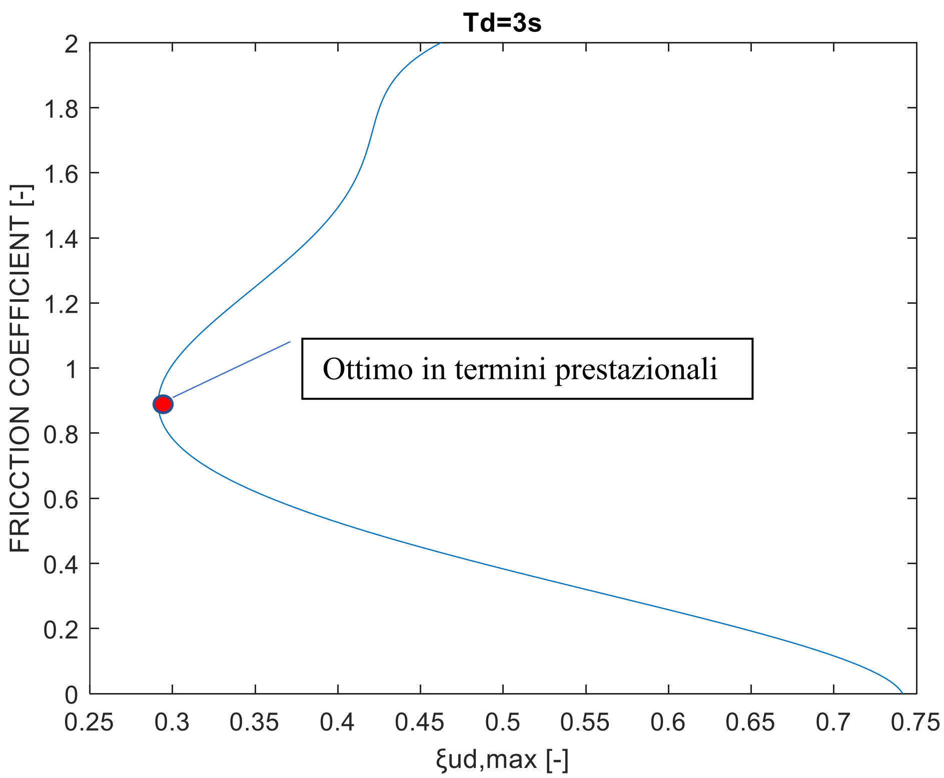

Figura 10-7

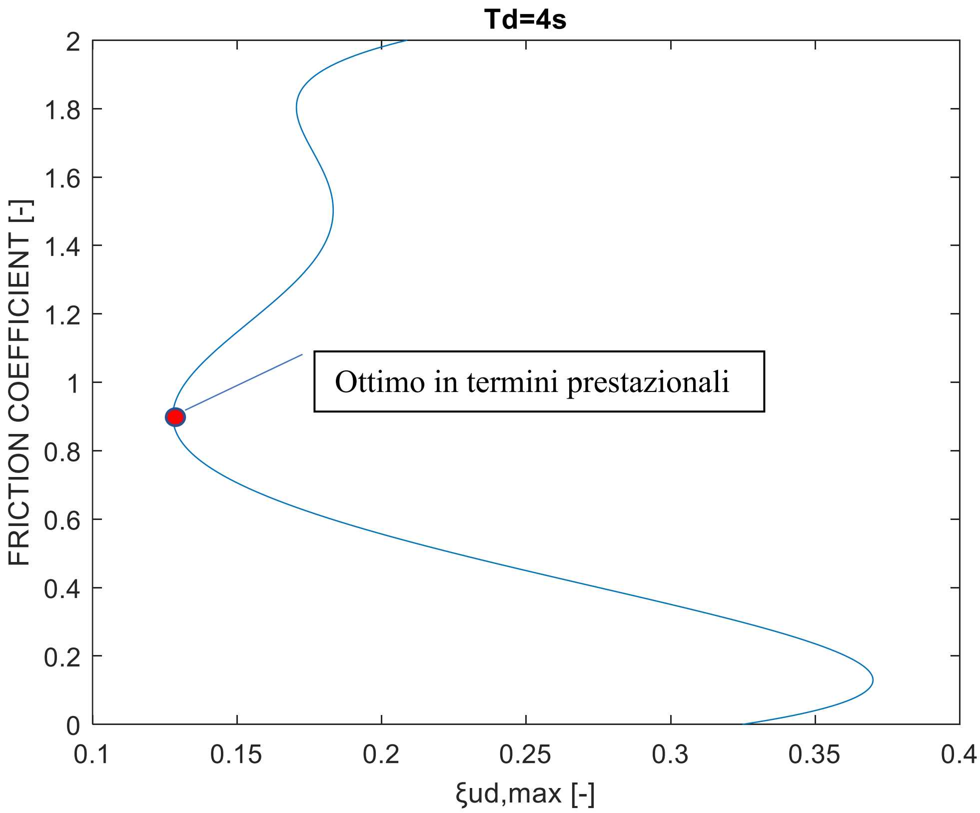

Figura 10-8

Al contrario del caso precedente, confrontando le figure 10-6, 10-7 e 10-8, è possibile notare come già a partire dal primo valore minimo attribuibile al parametro Td, ovvero 2s, la funzione presenti fin da subito una concavità, corrispondente al ritrovamento dell'ottimo attribuibile al coefficiente di attrito *f* (nel caso riportato in figura 10-6, il valore di ottimo si aggira attorno a 0.7). Procedendo poi con l'aumentare del periodo del sistema isolato, si osserva la presenza di ulteriori minimi locali, collocati verso i valori più alti di *f*, assieme alla costante presenza di valori di ottimo assoluti, individuabili per tramite dei minimi globali della funzione esaminata. Anche in questo caso, dunque, fissato un vincolo prestazionale al parametro output di interesse, ξud,max, è possibile individuare per via grafica ed analitica il dominio di esistenza attribuibile al parametro f affinchè il limite imposto venga rispettato, nonché i valori ottimali attribuibili al parametro in ordinata, ovvero *f*.

3. Come ultimo caso esaminato, si riportano a seguire i tre grafici di maggior rilevanza, considerando T_p=0.1s, λ_p=0.15 e PGA/PGV=2.31.

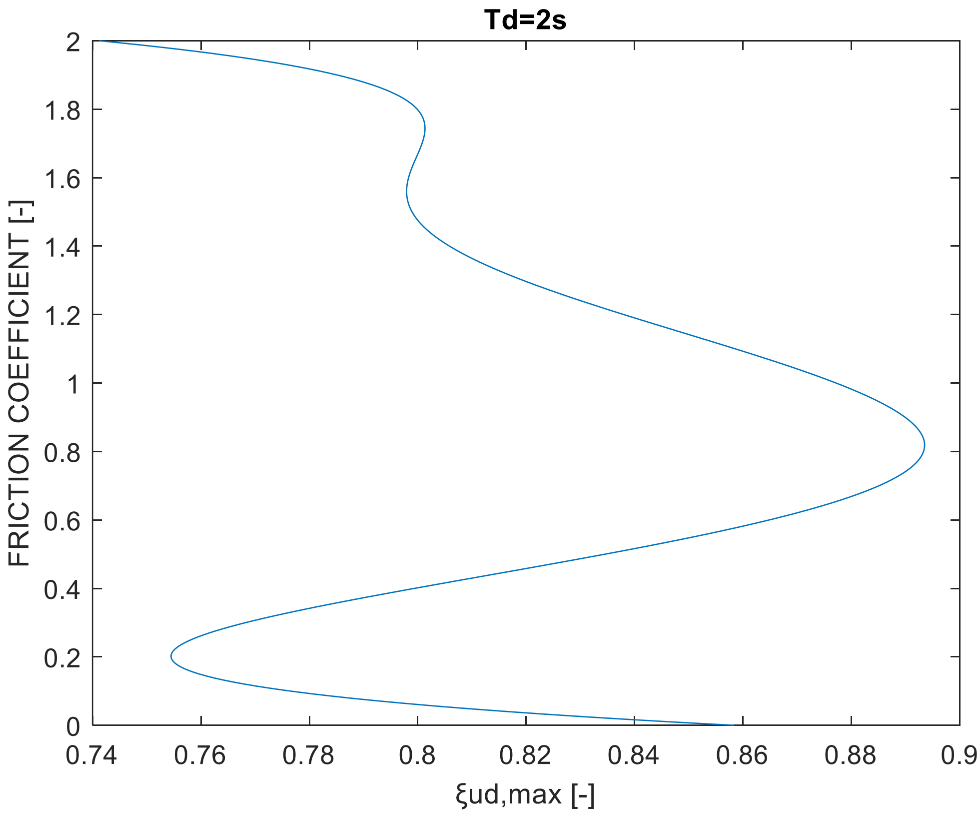

Figura 10-9

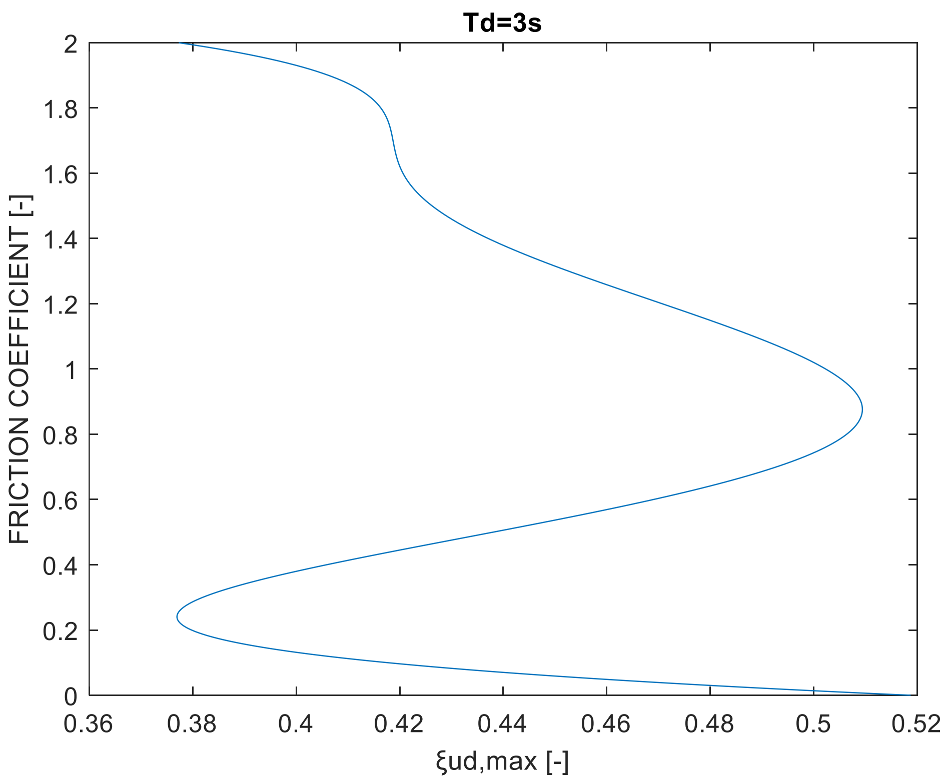

Figura 10-10

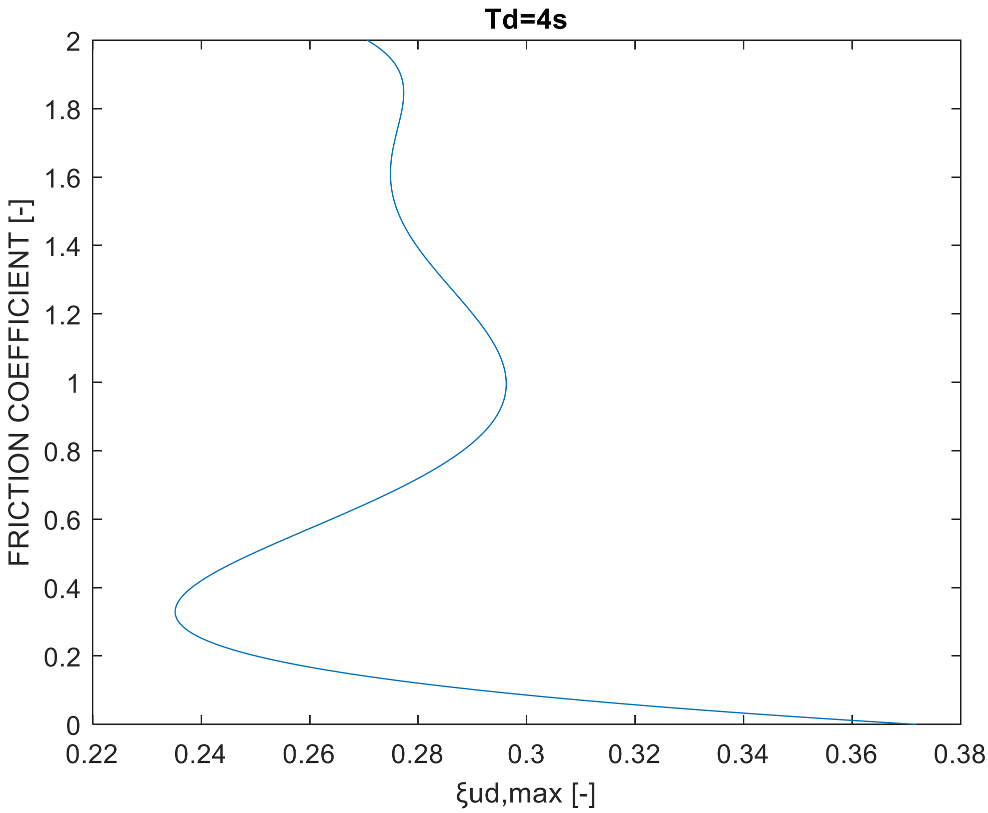

Figura 10-11

La casistica esaminata attraverso le figure 10-9, 10-10 e 10-11 riporta un fenomeno ancor più differente: si individuano infatti non solo dei punti di minimo della funzione esaminata, ma anche dei punti di massimo globali e locali i quali tendono ad essere più evidenti avvicinandosi a periodi Td via via sempre più tendenti al minimo. Questa fenomenologia fa sì che, imposto un massimo prestazionale al parametro ξud,max, intersecando la curva rappresentante la funzione, possano essere individuati differenti campi di validità attribuibili al parametro f, che vanno esaminati di caso in caso.

In conclusione, generalizzando le tre casistiche riportate in precedenza, si può affermare che per rapporti PGA/PGV medio-bassi, al differenziarsi del periodo Td scelto e del limite prestazionale imponibile a ξud,max, è possibile individuare dei punti di ottimo attribuibili a *f* che risultano essere univoci se Td è vicino al limite minimo, oppure molteplici se Td assume valori medio-alti. Se invece PGA/PGV assume valori tendenti al valore massimo scelto, ovvero attorno a 2.5-2.6, allora non solo si possono individuare dei punti di minimo, ovvero di ottimo, attribuibili al parametro f, bensì anche dei punti di massimo, che tendono ad essere sempre più evidenti, a mano a mano che ci si avvicina a Td=4s.

Conclusioni

Con la presente tesi si è voluta esplorare l'efficacia dell'utilizzo delle reti neurali artificiali anche nell'ambito dell'ingegneria civile, soffermandosi in particolar modo nell'elaborazione di una particolare ANN al fine di ritrovare il comportamento dinamico di un viadotto ad impalcato continuo isolato sismicamente. I vantaggi restituiti dall'elaborazione oggetto di studio sono molteplici. In primo luogo, è stato possibile ovviare al problema dell'utilizzo di una complessa analisi di tipo dinamica, mediante l'uso di un metodo completamente automatico e più rapido. In secondo luogo, sebbene il parametro di output ottenuto risulti essere lo steso indagato tramite indagine dinamica parametrica, la rete in esame, grazie al procedimento iterativo di training, ha permesso lo sviluppo di un dominio di esistenza continuo attribuibile al parametro ξud,max, analisi di difficile risoluzione tramite l'utilizzo di analisi puramente sismiche in quanto, come già precedentemente esplicato, tale output risulterebbe imprescindibile dalla combinazione dei parametri dinamici inseriti durante la definizione delle equazioni del moto caratterizzanti il sistema.

Da un punto di vista dei risultati ottenuti invece, lo sviluppo della ANN nei confronti dello schema statico esaminato ha evidenziato sia da un punto di vista analitico che grafico, una forte correlazione tra lo spostamento adimensionalizzato di picco dell'impalcato isolato, il periodo dello stesso, il rapporto PGA/PGV e il coefficiente di attrito dei dispositivi DCFPs. In particolar modo, tramite la semplice sostituzione di uno dei due parametri di input della ANN, il cui meccanismo di funzionamento risulta essere riportato nelle appendici C e D, è possibile graficare e ritrovare i valori di f e T_d o di f e PGA/PGV a cui la struttura dovrebbe sottostare se si volesse imporre un massimo di spostamento all'impalcato isolato.

Da ultimo, tramite inversione diretta della ANN creata, è stato possibile, ancora una volta in maniera del tutto automatizzata, ricondursi ai valori di ottimo attribuibili al coefficiente di attrito f dei DCFPs, una volta imposto un limite massimo prestazionale al parametro ξud,max e fissato un valore specifico al periodo dell'impalcato isolato.

Sviluppi futuri

Come affermato all'interno del capitolo 8, affinché fosse possibile visualizzare dei risultati di facile lettura e di chiara interpretazione, nonché di rapida esecuzione, si è preferito soffermarsi sull'utilizzo di un solo layer nascosto composto da 5 neuroni artificiali, in virtù anche dello scopo finale di voler invertire la ANN appositamente creata. Tuttavia, nonostante l'utilizzo della rete neurale artificiale creata appositamente per questo caso studio abbia portato al raggiungimento di risultati di notevole interesse, aumentando il numero di neuroni nascosti e/o il numero di hidden layers si potrebbe sicuramente ottenere dei risultati ancor più accurati, come calcolato e rappresentato in figura 8-7. Per quanto riguarda invece il numero di parametri in ingresso, anche in questo caso, avendo verificato che fossero sufficienti due soli parametri di input al fine della determinazione dell'output desiderato, si è preferito soffermarsi sull'utilizzo di f e T_d e di f e PGA/PGV per ciascuna delle due analisi eseguite. Ciò può essere di spunto per eventuali sviluppi futuri, al fine di creare una rete neurale artificiale in grado di elaborare tutti e cinque i parametri studiati per tramite dell'analisi dinamica parametrica ripotata integralmente all'interno dell'appendice A.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il mio relatore, il Professor Paolo Castaldo, per avermi dato la possibilità di svolgere uno studio di tesi così complesso e allo stesso tempo innovativo ed affascinante che mi è servito come dimostrazione del fatto che se si crede in quello che si fa e se si ha un obiettivo, nessuno ostacolo è invalicabile. Grazie anche e soprattutto per avermi dato la possibilità di lavorare fin da subito assieme ad un gruppo di ingegneri esperti che mi hanno trasmesso la loro passione per il mondo dell'Ingegneria, spero un giorno di poter raggiungere gli stessi traguardi per i quali ammiro il lavoro svolto da ciascun dipendente dell'azienda che mi ha accolta amorevolmente, la Sintecna s.r.l.. Un grazie in particolare va al Professor Giuseppe Mancini, per aver creduto in me, dandomi fiducia e inserendomi fin da subito all'interno del sistema aziendale.

Infine, da ultimo ma non per importanza, un ringraziamento caloroso al correlatore di questa tesi, l'Ingegner Massimiliano De Iuliis. Grazie per la disponibilità concessami e la premura dimostrata nei miei confronti; per la bravura e la professionalità con le quali sono stata guidata ed ascoltata durante tutti questi mesi e soprattutto grazie per la pazienza dimostrata nei miei confronti, spero un giorno di poter essere utile anche io e ricambiare tutta la trasmissione di informazioni concessami.

APPENDICE A

Script dei dati di input

```
%clearvars;

clc;close all;tic;warning off;

g = 9.81;n = 5;  % Pier DOF [-]

% SYSTEM PARAMETERS

Td = 2:0.5:4;   % DCFP period [s]
Tp = 0.05:0.05:0.2;   % Pier period [s]
lambdap = 0.1:0.05:0.2; % Mass ratio mp/md [-]
f = [0:0.005:0.3,0.35:0.05:2];  % Normalized friction coefficient [-]

md = 771120;    % Deck mass [kg]
W = md*g;   % Deck weight [N]
lambdas = 0.005;    ms = lambdas*md;    % Slider mass ratio [-]
csip = 0.05;    % Pier damping ratio [-]
csid = 0;   % DCFP damping coefficient [N/m*s]
alpha = 30; r_R = 2;    r_minmax = 3;   r_f = 2;

% SEISMIC INPUT PARAMETERS

load 45SISMIFFcor.mat;   ag=acc_cor;    Sa = zeros(1,size(ag,2));
a0 = 1;

% PRE-ALLOCATION:

wd=zeros(1,length(Td));kd=wd;R2=wd;R1=wd;kd1=wd;kd2=wd;wd1=wd;wd2=wd;
wp = zeros(1,length(Tp));
epsilon = zeros(length(Tp),length(Td));
mp = zeros(1,length(lambdap));
kp = zeros(length(Tp),length(lambdap));
cd = wd;    cp = kp;

for a = 3:3

    for i = 1:size(ag,2)
         Sa(i) = Pspectral(Td(a),csid,ag(1:numstep_(i),i),dt_(i));
         ag(:,i) = ag(:,i)/Sa(i)*a0;
     end

    wd(a) = 2*pi/Td(a);   % DCFP natural frequency [rad/s]
    kd(a) = wd(a)^2*md;   % DCFP restoring stiffness [N/m]
    R2(a) = W/kd(a)/(1+r_R);    R1(a) = r_R*R2(a);
    kd1(a) = md*g/R1(a);    wd1(a) = sqrt(kd1(a)/md);
    kd2(a) = md*g/R2(a);    wd2(a) = sqrt(kd2(a)/md);

    % STIFFNESS MATRIX without pier lateral stiffness:

    K1 = zeros(n+3,n+3);    K1(1,:) = -kd1(a)/2;  K1(:,1) = -kd1(a)/2;
    K1(1,1) = kd1(a)/2 + kd2(a)/2;  K1(2,2) = kd1(a)/2;   K1(3,3) = kd2(a)/2;
    K1 = K1 + [zeros(1,n+3);zeros(n+2,1) kd1(a)/2*ones(n+2,n+2)];

    for b = 2:2
        wp(b) = 2*pi/Tp(b);   % Natural frequency of the pier [rad/s]
        epsilon(a,b) = wd(a)^2/wp(b)^2; % Inverse of square isolation ratio

        for c = 1:1
            mp(c) = lambdap(c)*md;    % Pier mass [kg]
```

```
% MASS MATRIX OF THE PIER

mpi = mp(c)/n;  % Pier mass per node [kg]
Mp = mpi*diag(ones(1,n).*(1:n)); % Diagonal terms of the matrix
Mp1 = triu(ones(n,n),1);
for i = 1:n
    Mp1(i,:) = Mp1(i,:)*Mp(i,i);
end
Mp = Mp + Mp1 + Mp1';

% MASS MATRIX

M = zeros(n+3,n+3); M(1,1) = ms;
M = M + [zeros(1,n+3);zeros(n+2,1) md*ones(n+2,n+2)];
M = M + [zeros(2,n+3);zeros(n+1,2) ms*ones(n+1,n+1)];
M = M + [zeros(3,n+3);zeros(n,3) Mp];
Mg = zeros(n+3,n+3);    Mg(1,1) = ms; Mg(2:n+3,2) = md;
Mg(3:n+3,3) = ms;
Mg = Mg + [zeros(3,n+3);zeros(n,3) tril(mpi*ones(n,n))];

% STIFFNESS MATRIX OF THE PIER

syms k;
Kp = diag(2*k*ones(n,1));     Kp = Kp + diag(-k*ones(n-1,1),1);
Kp = Kp + diag(-k*ones(n-1,1),-1);     Kp(1,1) = Kp(1,1)/2;
d = det(-wp(b)^2*mpi*diag(ones(1,n))+Kp);
E = double(vpasolve(d==0,k));
kp(b,c) = max(E);     Kp = diag(kp(b,c)*ones(n,1));   clear k E;

% STIFFNESS MATRIX

K = K1 + [zeros(3,n+3);zeros(n,3) Kp];

% DAMPING MATRIX

cd(a) = 2*csid*wd(a)*md;
cp(b,c) = 2*csip*wp(b)*mp(c);

C=[cd(a)*diag(ones(1,3))zeros(3,n);zeros(n,3)cp(b,c)*diag(ones(n,1))];

% MODAL ANALYSIS

DE = eig(M\K);  T = 2*pi./sqrt(DE); clear DE;

for d = 1:length(f)
    % DCFP PARAMETERS

    fmax1 = f(d)*a0/g;   fmin1 = fmax1/r_minmax;   %Upper surface
    fmax2 = fmax1/r_f;   fmin2 = fmax2/r_minmax;   %Lower surface

    up = 0*ag;

x1=up;x2=up;x3=up;x4=up;x5=up;x6=up;x7=up;x8=up;x9=up;ud=up;uddot=up;xd=up;xdd
ot=up;

updot=up;x1dot=up;x2dot=up;x3dot=up;x4dot=up;x5dot=up;x6dot=up;x7dot=up;x8dot=
up;x9dot=up;
    Fe_P1=up;Fe_P2=up;Fa_P1=up;Fa_P2=up;F_P1=up;F_P2=up;
    Fe_A1=up;Fe_A2=up;Fa_A1=up;Fa_A2=up;F_A1=up;F_A2=up;
    mi_P1=up;mi_P2=up;mi_A1=up;mi_A2=up;

    for i = 1:size(ag,2)
        signal=ag(1:numstep_(i),i);
        tsignal=(0:dt_(i):(numstep_(i)-1)*dt_(i))';
```

```
                sim model_pier_abutment_DFPS.slx

                x8(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,1),tsignal);
                x7(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,2),tsignal);
                x6(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,3),tsignal);
                x5(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,4),tsignal);
                x4(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,5),tsignal);
                x3(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,6),tsignal);
                x2(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,7),tsignal);
                x1(1:numstep_(i),i)=interp1(time,displ(:,8),tsignal);
up(1:numstep_(i),i)=x1(1:numstep_(i),i)+x2(1:numstep_(i),i)+x3(1:numstep_(i),i
)+x4(1:numstep_(i),i)+x5(1:numstep_(i),i);

x9(1:numstep_(i),i)=up(1:numstep_(i),i)+x6(1:numstep_(i),i)+x7(1:numstep_(i),i
)-x8(1:numstep_(i),i);

ud(1:numstep_(i),i)=up(1:numstep_(i),i)+x6(1:numstep_(i),i)+x7(1:numstep_(i),i
);
                xd(1:numstep_(i),i)=x6(1:numstep_(i),i)+x7(1:numstep_(i),i);

                x8dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,1),tsignal);
                x7dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,2),tsignal);
                x6dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,3),tsignal);
                x5dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,4),tsignal);
                x4dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,5),tsignal);
                x3dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,6),tsignal);
                x2dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,7),tsignal);
                x1dot(1:numstep_(i),i)=interp1(time,vel(:,8),tsignal);

updot(1:numstep_(i),i)=x1dot(1:numstep_(i),i)+x2dot(1:numstep_(i),i)+x3dot(1:n
umstep_(i),i)+x4dot(1:numstep_(i),i)+x5dot(1:numstep_(i),i);

x9dot(1:numstep_(i),i)=updot(1:numstep_(i),i)+x6dot(1:numstep_(i),i)+x7dot(1:n
umstep_(i),i)-x8dot(1:numstep_(i),i);

uddot(1:numstep_(i),i)=updot(1:numstep_(i),i)+x6dot(1:numstep_(i),i)+x7dot(1:n
umstep_(i),i);

xddot(1:numstep_(i),i)=x6dot(1:numstep_(i),i)+x7dot(1:numstep_(i),i);

                % Elastic force on isolators
                Fe_P1(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fe_p1,tsignal);
                Fe_P2(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fe_p2,tsignal);
                Fe_A1(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fe_a1,tsignal);
                Fe_A2(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fe_a2,tsignal);
                % Friction coefficients on isolator surfaces
                mi_P1(1:numstep_(i),i)=interp1(time,mi_p1,tsignal);
                mi_P2(1:numstep_(i),i)=interp1(time,mi_p2,tsignal);
                mi_A1(1:numstep_(i),i)=interp1(time,mi_a1,tsignal);
                mi_A2(1:numstep_(i),i)=interp1(time,mi_a2,tsignal);
                % Friction forces on isolator surfaces
                Fa_P1(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fa_p1,tsignal);
                Fa_P2(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fa_p2,tsignal);
                Fa_A1(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fa_a1,tsignal);
                Fa_A2(1:numstep_(i),i)=interp1(time,Fa_a2,tsignal);
                % Total forces of isolators

F_P1(1:numstep_(i),i)=Fe_P1(1:numstep_(i),i)+Fa_P1(1:numstep_(i),i);

F_P2(1:numstep_(i),i)=Fe_P2(1:numstep_(i),i)+Fa_P2(1:numstep_(i),i);

F_A1(1:numstep_(i),i)=Fe_A1(1:numstep_(i),i)+Fa_A1(1:numstep_(i),i);

F_A2(1:numstep_(i),i)=Fe_A2(1:numstep_(i),i)+Fa_A2(1:numstep_(i),i);
```

```
            end

            up_max(a,b,c,d,:)=max(abs(up));
            ud_max(a,b,c,d,:)=max(abs(ud));
            x6_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x6));
            x7_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x7));
            x8_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x8));
            x9_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x9));
            xd_max(a,b,c,d,:)=max(abs(xd));

            psiup_max(a,b,c,d,:)=up_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a)^2;
            psiud_max(a,b,c,d,:)=ud_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a)^2;
            psix6_max(a,b,c,d,:)=x6_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a)^2;
            psix7_max(a,b,c,d,:)=x7_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a)^2;
            psix8_max(a,b,c,d,:)=x8_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a)^2;
            psix9_max(a,b,c,d,:)=x9_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a)^2;
            psixd_max(a,b,c,d,:)=xd_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a)^2;

            updot_max(a,b,c,d,:)=max(abs(updot));
            uddot_max(a,b,c,d,:)=max(abs(uddot));
            x6dot_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x6dot));
            x7dot_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x7dot));
            x8dot_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x8dot));
            x9dot_max(a,b,c,d,:)=max(abs(x9dot));
            xddot_max(a,b,c,d,:)=max(abs(xddot));

            psiupdot_max(a,b,c,d,:)=updot_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a);
            psiuddot_max(a,b,c,d,:)=updot_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a);
            psix6dot_max(a,b,c,d,:)=x6dot_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a);
            psix7dot_max(a,b,c,d,:)=x7dot_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a);
            psix8dot_max(a,b,c,d,:)=x8dot_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a);
            psix9dot_max(a,b,c,d,:)=x9dot_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a);
            psixddot_max(a,b,c,d,:)=xddot_max(a,b,c,d,:)/a0*wd(a);

            % Forces on deck and pier top obtained by inverting motion
equations
            psi_ad_max(a,b,c,d,:)=max(abs(-g/2*((up+up-
x1+x2)/R1(a)+fmax1+fmax1)-cd(a)*(x6dot+x7dot+updot)/md))/a0;

psi_ap_max(a,b,c,d,:)=max(abs((x3/R2(a)+fmax2)*(0.5+lambdas)*n/lambdap(c)*g-
(cp(b,c)*x5dot+kp(b,c)*x5)*n/mp(c)))/a0;
            psi_asa_max(a,b,c,d,:)=max(abs(((x9/R1(a)+fmax1)/lambdas-
(x8/R2(a)+fmax2)*(1+1/lambdas))*g))/a0;
            psi_asp_max(a,b,c,d,:)=max(abs(((x7/R1(a)+fmax1)/lambdas-
(x6/R2(a)+fmax2)*(1+1/lambdas))*g))/a0;

            F_P1_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_P1));
            F_P2_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_P2));
            F_A1_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_A1));
            F_A2_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_A2));

            psi_F_P1_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_P1))/((mp(c)+md)*a0);
            ppssi_F_P1_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_P1))/(W*fmax1);
            psi_F_P2_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_P2))/((mp(c)+md)*a0);
            ppssi_F_P2_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_P2))/(W*fmax2);
            psi_F_A1_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_A1))/(md*a0);
            ppssi_F_A1_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_A1))/(W*fmax1);
            psi_F_A2_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_A2))/(md*a0);
            ppssi_F_A2_max(a,b,c,d,:)=max(abs(F_A2))/(W*fmax2);

            up_max_(d,:)=up_max(a,b,c,d,:);
            ud_max_(d,:)=ud_max(a,b,c,d,:);
            x6_max_(d,:)=x6_max(a,b,c,d,:);
            x7_max_(d,:)=x7_max(a,b,c,d,:);
```

```
    x8_max_(d,:)=x8_max(a,b,c,d,:);
    x9_max_(d,:)=x9_max(a,b,c,d,:);
    xd_max_(d,:)=xd_max(a,b,c,d,:);
    psiup_max_(d,:)=psiup_max(a,b,c,d,:);
    psiud_max_(d,:)=psiud_max(a,b,c,d,:);
    psix6_max_(d,:)=psix6_max(a,b,c,d,:);
    psix7_max_(d,:)=psix7_max(a,b,c,d,:);
    psix8_max_(d,:)=psix8_max(a,b,c,d,:);
    psix9_max_(d,:)=psix9_max(a,b,c,d,:);
    psixd_max_(d,:)=psixd_max(a,b,c,d,:);

    updot_max_(d,:)=updot_max(a,b,c,d,:);
    uddot_max_(d,:)=uddot_max(a,b,c,d,:);
    x6dot_max_(d,:)=x6dot_max(a,b,c,d,:);
    x7dot_max_(d,:)=x7dot_max(a,b,c,d,:);
    x8dot_max_(d,:)=x8dot_max(a,b,c,d,:);
    x9dot_max_(d,:)=x9dot_max(a,b,c,d,:);
    xddot_max_(d,:)=xddot_max(a,b,c,d,:);
    psiupdot_max_(d,:)=psiupdot_max(a,b,c,d,:);
    psiuddot_max_(d,:)=psiuddot_max(a,b,c,d,:);
    psix6dot_max_(d,:)=psix6dot_max(a,b,c,d,:);
    psix7dot_max_(d,:)=psix7dot_max(a,b,c,d,:);
    psix8dot_max_(d,:)=psix8dot_max(a,b,c,d,:);
    psix9dot_max_(d,:)=psix9dot_max(a,b,c,d,:);
    psixddot_max_(d,:)=psixddot_max(a,b,c,d,:);

    % max values of forces on isolator
    psi_F_P1_max_(d,:)=psi_F_P1_max(a,b,c,d,:);
    ppssi_F_P1_max_(d,:)=ppssi_F_P1_max(a,b,c,d,:);
    psi_F_P2_max_(d,:)=psi_F_P2_max(a,b,c,d,:);
    ppssi_F_P2_max_(d,:)=ppssi_F_P2_max(a,b,c,d,:);
    psi_F_A1_max_(d,:)=psi_F_A1_max(a,b,c,d,:);
    ppssi_F_A1_max_(d,:)=ppssi_F_A1_max(a,b,c,d,:);
    psi_F_A2_max_(d,:)=psi_F_A2_max(a,b,c,d,:);
    ppssi_F_A2_max_(d,:)=ppssi_F_A2_max(a,b,c,d,:);

    clc;[Td(a),Tp(b),lambdap(c),d]
    toc
    save risultatia1b4c3.mat
end

median_psiup_max(a,b,c,:)=geomean(psiup_max_');
beta_psiup_max(a,b,c,:)=std(log(psiup_max_'));
median_psiud_max(a,b,c,:)=geomean(psiud_max_');
beta_psiud_max(a,b,c,:)=std(log(psiud_max_'));
median_psix6_max(a,b,c,:)=geomean(psix6_max_');
beta_psix6_max(a,b,c,:)=std(log(psix6_max_'));
median_psix7_max(a,b,c,:)=geomean(psix7_max_');
beta_psix7_max(a,b,c,:)=std(log(psix7_max_'));
median_psix8_max(a,b,c,:)=geomean(psix8_max_');
beta_psix8_max(a,b,c,:)=std(log(psix8_max_'));
median_psix9_max(a,b,c,:)=geomean(psix9_max_');
beta_psix9_max(a,b,c,:)=std(log(psix9_max_'));
median_psixd_max(a,b,c,:)=geomean(psixd_max_');
beta_psixd_max(a,b,c,:)=std(log(psixd_max_'));

median_psiupdot_max(a,b,c,:)=geomean(psiupdot_max_');
beta_psiupdot_max(a,b,c,:)=std(log(psiupdot_max_'));
median_psiuddot_max(a,b,c,:)=geomean(psiuddot_max_');
beta_psiuddot_max(a,b,c,:)=std(log(psiuddot_max_'));
median_psix6dot_max(a,b,c,:)=geomean(psix6dot_max_');
beta_psix6dot_max(a,b,c,:)=std(log(psix6dot_max_'));
median_psix7dot_max(a,b,c,:)=geomean(psix7dot_max_');
beta_psix7dot_max(a,b,c,:)=std(log(psix7dot_max_'));
median_psix8dot_max(a,b,c,:)=geomean(psix8dot_max_');
```

```
            beta_psix8dot_max(a,b,c,:)=std(log(psix8dot_max_'));
            median_psix9dot_max(a,b,c,:)=geomean(psix9dot_max_');
            beta_psix9dot_max(a,b,c,:)=std(log(psix9dot_max_'));
            median_psixddot_max(a,b,c,:)=geomean(psixddot_max_');
            beta_psixddot_max(a,b,c,:)=std(log(psixddot_max_'));

            median_psi_F_P1_max(a,b,c,:)=geomean(psi_F_P1_max_');
            beta_psi_F_P1_max(a,b,c,:)=std(log(psi_F_P1_max_'));
            median_ppssi_F_P1_max(a,b,c,:)=geomean(ppssi_F_P1_max_');
            beta_ppssi_F_P1_max(a,b,c,:)=std(log(ppssi_F_P1_max_'));
            median_psi_F_P2_max(a,b,c,:)=geomean(psi_F_P2_max_');
            beta_psi_F_P2_max(a,b,c,:)=std(log(psi_F_P2_max_'));
            median_ppssi_F_P2_max(a,b,c,:)=geomean(ppssi_F_P2_max_');
            beta_ppssi_F_P2_max(a,b,c,:)=std(log(ppssi_F_P2_max_'));
            median_psi_F_A1_max(a,b,c,:)=geomean(psi_F_A1_max_');
            beta_psi_F_A1_max(a,b,c,:)=std(log(psi_F_A1_max_'));
            median_ppssi_F_A1_max(a,b,c,:)=geomean(ppssi_F_A1_max_');
            beta_ppssi_F_A1_max(a,b,c,:)=std(log(ppssi_F_A1_max_'));
            median_psi_F_A2_max(a,b,c,:)=geomean(psi_F_A2_max_');
            beta_psi_F_A2_max(a,b,c,:)=std(log(psi_F_A2_max_'));
            median_ppssi_F_A2_max(a,b,c,:)=geomean(ppssi_F_A2_max_');
            beta_ppssi_F_A2_max(a,b,c,:)=std(log(ppssi_F_A2_max_'));

            clear acc displ time tout vel tsignal signal ans
            clear Fe_a1 Fe_a2 Fe_p1 Fe_p2 Fa_a1 Fa_a2 Fa_p1 Fa_p2 mi_a1 mi_a2
mi_p1 mi_p2
            clear Fe_A1 Fe_A2 Fe_P1 Fe_P2 Fa_A1 Fa_A2 Fa_P1 Fa_P2 mi_A1 mi_A2
mi_P1 mi_P2
            clear F_A1 F_A2 F_P1 F_P2
            clear x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 up ud xd
            clear x1dot x2dot x3dot x4dot x5dot x6dot x7dot x8dot x9dot updot
uddot xddot
            save risultatia1b4c3.mat
        end
    end
end
toc
```

APPENDICE B

Analisi di sensibilità della rete

```
clear all
close all

load risultatitotali.mat

for k=1:1; % periodo pila 0.05, 0.1, 0.15, 0.2
for t=2:2; % rapporto massa 0.1, 0.15, 0.2 : ho fissato prop. sistema
for s=14:14 % rapporto PGA su PGV

for j=1:5
    for y=1:95
        grandezza(j,y)=Tpsiud_max_(j,k,t,y,s)
    end
end

for y=1:95
for sr=1:28
    grandez(sr,y)=grandezza(1,y)+((grandezza(2,y)-grandezza(1,y))/0.5)*(-
0.175+0.025*(sr-1));
end
for sr=29:48
    grandez(sr,y)=grandezza(2,y)+((grandezza(3,y)-
grandezza(2,y))/0.5)*(0.025*(sr-28));
end
for sr=49:68
    grandez(sr,y)=grandezza(3,y)+((grandezza(4,y)-
grandezza(3,y))/0.5)*(0.025*(sr-48));
end
for sr=69:95
    grandez(sr,y)=grandezza(4,y)+((grandezza(5,y)-
grandezza(3,y))/0.5)*(0.025*(sr-68));
end
end

Tdnew=1.825:0.025:4.175;

figure(1)
mesh(Tdnew,f,grandez)

P=[Tdnew;f];
T=grandez;

%ora ho 30 neuroni nascosti
net=newff([1.825 4.175; 0 2], [50,95], {'tansig','purelin'},'trainlm');

%Define parameters
net.trainParam.show = 50;
net.trainParam.lr = 0.005;
net.trainParam.epochs = 1000;
net.trainParam.goal = 1e-20

net1 = train(net, P, T)


a1= sim(net1,P);

%figure(2)
%mesh(Tdnew,f,a1)
```

```
%figure(3)
%mesh(Tdnew,f,grandez-a1)

%pause

risultati(k,t,s,:,:)=a1;

end
end
end



for k=1:95
    for j=1:95
        qw(k,j)=T(k,j)-a1(k,j);
    end
end


devstandart=sum(std(qw))

save sensibilita_50neuroni_k1t2s14.mat
```

APPENDICE C

Rete Neurale Artificiale con f e T_d variabili

```
clear all
close all

load risultatitotali.mat

for k=1:1; % periodo pila 0.05, 0.1, 0.15, 0.2
for t=3:3; % rapporto massa 0.1, 0.15, 0.2 : ho fissato prop. sistema
for s=33:33
   % rapporto PGA su PGV

for j=1:5
    for y=1:95
        grandezza(j,y)=Tpsiud_max_(j,k,t,y,s)
    end
end

for y=1:95
for sr=1:28
    grandez(sr,y)=grandezza(1,y)+((grandezza(2,y)-grandezza(1,y))/0.5)*(-
0.175+0.025*(sr-1));
end
for sr=29:48
    grandez(sr,y)=grandezza(2,y)+((grandezza(3,y)-
grandezza(2,y))/0.5)*(0.025*(sr-28));
end
for sr=49:68
    grandez(sr,y)=grandezza(3,y)+((grandezza(4,y)-
grandezza(3,y))/0.5)*(0.025*(sr-48));
end
for sr=69:95
    grandez(sr,y)=grandezza(4,y)+((grandezza(5,y)-
grandezza(3,y))/0.5)*(0.025*(sr-68));
end
end

Tdnew=1.825:0.025:4.175;

figure(1)
mesh(Tdnew,f,grandez)

P=[Tdnew;f];
T=grandez;

%ora ho 30 neuroni nascosti
net=newff([1.825 4.175; 0 2], [5,95], {'tansig','purelin'},'trainlm');

%Define parameters
net.trainParam.show = 50;
net.trainParam.lr = 0.005;
net.trainParam.epochs = 1000;
net.trainParam.goal = 1e-20

net1 = train(net, P, T)


a1= sim(net1,P);
```

```
% Infittimento risultati

for ti=1:1000
    xx(ti)=1.825+(4.175-1.825)*(ti/1000);
    if xx(ti)>3.325,
        yy(ti)=2*xx(ti)-6.35;
    else
        yy(ti)=0.2*xx(ti)-0.365
    end

    risulto(ti,:)=sim(net1,[xx(ti);yy(ti)]);
end

% Grafico a linee di livello

figure(3)
[aa,ww]=contour(xx,f,risulto',[1 0.8 0.6 0.4 0.2 0.1]);
clabel(aa,ww);


% Richiesta singolo valore Tdcall tra 2 e 4, fcall tra 0 e 2

Tdcall=2.312;
fcall=0.564;

if Tdcall>3.325,
    chiamata=2*Tdcall-6.35;
else
    chiamata=0.2*Tdcall-0.365;
end

rigavalori=sim(net1,[Tdcall;chiamata]);

if fcall>0.3,
    num=19.41*fcall+55.1765;
else
    num=203.33*fcall;
end

dif=fix(num);
ecc=ceil(num);
valdif=rigavalori(dif);
valecc=rigavalori(ecc);

valoreuscita=valdif+(valecc-valdif)*(num-dif);

figure(2)
mesh(risulto)

end
end
end
```

APPENDICE D

Rete Neurale Artificiale con f e j variabili

```
clear all
close all

load risultatitotali.mat

for k=2:2; % periodo pila 0.05, 0.1, 0.15, 0.2
for t=2:2; % rapporto massa 0.1, 0.15, 0.2 : ho fissato prop. sistema
for j=1:1 % periodo dispositivo

for s=1:45 %calcolo lo spostamento di picco al vaiare del pga/pgv
    for y=1:95
        grandezza(s,y)=Tpsiud_max_(j,k,t,y,s);
    end
end

figure(10)
mesh(vetPGAsuPGV,f,grandezza')

for y=1:95
    for ns=1:89
            if ceil(ns/2)>fix(ns/2),
                grandez(ns,y)=grandezza(ceil(ns/2),y);
                vetPGAsuPGVnuovo(ns)=vetPGAsuPGV(ceil(ns/2));
            else

grandez(ns,y)=(grandezza(fix(ns/2),y)+grandezza(fix(ns/2)+1,y))/2;

vetPGAsuPGVnuovo(ns)=(vetPGAsuPGV(fix(ns/2))+vetPGAsuPGV(fix(ns/2)+1))/2;
            end
    end
end

for y=1:95

        for ns=1:59
            grandfinale(ns,y)=grandez(ns,y);
            vetPGAsuPGVfinale(ns)=vetPGAsuPGVnuovo(ns);
        end
        grandfinale(60,y)=grandez(59,y)+0.25*(grandez(60,y)-grandez(59,y));
        grandfinale(61,y)=grandez(59,y)+0.5*(grandez(60,y)-grandez(59,y));
        grandfinale(62,y)=grandez(59,y)+0.75*(grandez(60,y)-grandez(59,y));
        grandfinale(63,y)=grandez(60,y);
        grandfinale(64,y)=grandez(60,y)+0.25*(grandez(61,y)-grandez(60,y));
        grandfinale(65,y)=grandez(60,y)+0.5*(grandez(61,y)-grandez(60,y));
        grandfinale(66,y)=grandez(60,y)+0.75*(grandez(61,y)-grandez(60,y));

        vetPGAsuPGVfinale(60)=vetPGAsuPGVnuovo(59)+0.25*(vetPGAsuPGVnuovo(60)-
vetPGAsuPGVnuovo(59));
        vetPGAsuPGVfinale(61)=vetPGAsuPGVnuovo(59)+0.5*(vetPGAsuPGVnuovo(60)-
vetPGAsuPGVnuovo(59));
        vetPGAsuPGVfinale(62)=vetPGAsuPGVnuovo(59)+0.75*(vetPGAsuPGVnuovo(60)-
vetPGAsuPGVnuovo(59));
        vetPGAsuPGVfinale(63)=vetPGAsuPGVnuovo(60);
        vetPGAsuPGVfinale(64)=vetPGAsuPGVnuovo(60)+0.25*(vetPGAsuPGVnuovo(61)-
vetPGAsuPGVnuovo(60));
        vetPGAsuPGVfinale(65)=vetPGAsuPGVnuovo(60)+0.5*(vetPGAsuPGVnuovo(61)-
vetPGAsuPGVnuovo(60));
        vetPGAsuPGVfinale(66)=vetPGAsuPGVnuovo(60)+0.75*(vetPGAsuPGVnuovo(61)-
vetPGAsuPGVnuovo(60));
```

```
        for ns=61:89
            grandfinale(ns+6,y)=grandez(ns,y);
            vetPGAsuPGVfinale(ns+6)=vetPGAsuPGVnuovo(ns);
        end
end


figure(1)
mesh(vetPGAsuPGVfinale,f,grandfinale')

P=[vetPGAsuPGVfinale;f];
T=grandfinale';

%ora ho 30 neuroni nascosti
net=newff([0.36 2.63; 0 2], [5,95], {'tansig','purelin'},'trainlm');

%Define parameters
net.trainParam.show = 50;
net.trainParam.lr = 0.005;
net.trainParam.epochs = 1000;
net.trainParam.goal = 1e-20

net1 = train(net, P, T)

a1= sim(net1,P);

% Grafico a linee di livello

figure(2)
[aa,ww]=contour(vetPGAsuPGVfinale,f,a1,[1 0.8 0.6 0.4 0.2 0.1]);
clabel(aa,ww);


end
end
end
```

APPENDICE E

Inversione della ANN

```
clear all
close all

% Grafici inversione rete per un singolo caso

w1=[1.62807996024580514671242781332693994045257568359375;
    -0.467400183159727089510226960555883124470710754394453125];

w2=[1.0086189239016294383333161022164858877658843994140625;
    0.534299605596258997408654067839961498975753784179687 5];

w3=[5.10614326285416453288235061336308717727661132812 5;
    -12.25162603861774535118911444442346692085266113281 25];

w4=[0.82832601119080062623822868772549554705619812011718 75;
    0.45606879671399963571687408148136455565690994262695312 5];

w5=[-10.50807995461363475442340131849050521850585937 5;
    -6.7799760408285507651271473150700330734252929687 5];

b=[-5.612810568962633084311164566315710544586181640625;
    -1.7294897818260026589598510327050462365150451660156 25;
    -12.94051451759326454293841379694640636444091796875;
    -0.8527560676966364772155770879180636256933212280273437 5;
    18.87099141907042465504673600662499666213989257812 5];

wp(1:5,1)=[-0.0283989105912281769583671575674088671803474426269531 25;
    3.25318701816216515609880843840073794126510620117187 5;
    0.0066230964020335229835989565572162973694503307342529296875;
    -8.2047909802295730941068541142158210277557373046875;
    0.580685372790667342357551206077914685010910034179687 5];


wp(1:5,2)=[-
0.0309351394236825130712453812975581968203186988830566406 25;3.1402274553440041
593432852096157148480415344238281 25;0.00810267890785524962093955281261514755 89
722394943237304687 5;-
7.991693383959130869698128663003444671630859375;0.5585898924532742837456567031
040322035551071166992187 5];

wp(1:5,3)=[-
0.0334713682561232489520719468600873369723558425903320312 5;3.0272678925266727 2
12317618977976962924003601074218 75;0.009582261413670587271718126487485278630 62
918186187744140625;-
7.7785957876905547081491931749042123556137084960937 5;0.5364944121158297107854 1
9592866674065589904785156 25];

wp(1:5,4)=[-
0.036007597088518604466766959149026661179959774017333984375;2.9143083297120235
819477329641813412308692932128906 25;0.011061843919466183769340084097621002001 6
878843307495117187 5;-
7.565498191428018159854218538384884595870971679687 5;0.5143989317782109438326 18
795568123459815979003906 25];

wp(1:5,5)=[-
0.0385438259209300235208495166716602398082613945007324218 75;2.8013487668963947
818667747924337163567543029785156 25;0.012541426425268764263676324333118827780 7
086706161499023437 5;-
```

```
7.35240059516327537636470879078842699527740478515625;0.492303451440656014703733944770647212862968444824218 75];
```

```
wp(1:5,15)=[-
0.06390611424510590776737473106550169177353382110595703125;1.67175313873677122
700200925464741885662078857421875;0.027337251483321219763800158375488535966724
1573333740234375;-
5.22142463250833888110946645610965788364410400390625;0.27134864806531927561294
99230155488476157188415527343 75];
```

```
wp(1:5,16)=[-
0.066442343077499715908729172042512800544500350952148437 5;1.558793575922248209
0535777388140559196472167968 75;0.028816833989116042574751830329660151619464159
0118408203125;-
5.008327036246084773551956459414213895797729492187 5;0.24925316772769354201066 9
602859707083553075790405273437 5];
```

```
wp(1:5,17)=[-
0.068978571909918365290259600897115888074040412902832031 25;1.44583401310619907
853549648280022665858268737792968 75;0.030296416494921818429730819843825884163 3
79669189453125;-
4.79522943998039608004546607844531536102294921875;0.227157687390165591301283 14
33661631308495998382568359375];
```

```
wp(1:5,18)=[-
0.071514800742342940487183966524753486737608909606933593 75;1.33287445028981399
45301636544172652065753936767578125;0.031775999000730373311718324202956864610 3
1436920166015625;-
4.582131843713951546703810890903696417808532714843 75;0.20506220705265831849573
0327413184568285942077636718 75];
```

```
wp(1:5,19)=[-
0.074051029574750709683073068845260422676801681518554687 5;1.219914887474460529
7593125214916653931140899658203125;0.033255581506530962343504143063910305500 03
0517578125;-
4.369034247449826935394412430468946695327758789062 5;0.18296672671508656948802 2
405494120903313159942626953125];
```

```
wp(1:5,20)=[-
0.076587258407172939533857913829706376418471336364746093 75;1.10695532465819246
3260775184608064591884613037109375;0.034735164012338372307997502730358974076 80
7498931884765625;-
4.155936651183646191043408180121332406997680664062 5;0.16087124637757183043262 8
985363407991826534271240234375];
```

```
wp(1:5,21)=[-
0.079123487239579459728844312849105335772037506103515625;0.9939957618429028363
13839998183539137244222545483398437 5;0.036214746518138829500799147353973239660 26
30615234375;-
3.942839054919666796905630690162070095539093017578125;0.13877576603999580706 62
76256591663695871829986572265625];
```

```
wp(1:5,22)=[-
0.081659716072015886556556552022811956703662872314453125;0.8810361990257927766
7342694257968105375766754150390625;0.037694329023952422019760888360906392335 89
17236328125;-
3.729741458651590235717776522506028413772583007812 5;0.11668028570253537179457 4
8144302342552691698074340820312 5];
```

```
wp(1:5,23)=[-
0.084195944904413316800528832573036197572946548461914062 5;0.768076636211034835
5329847436223644763231277465820312 5;0.039173911529748681181750669111352181062 1
0231781005859375;-
3.516643862388806773822125251172110438346862792968 75;0.09458480536492486212551
96667334530502557754516601562 5];
```

```
wp(1:5,24)=[-
0.08673217373683934916517301871863310225307941436767578125;0.65511707339456071
164107697768486104905605316162109375;0.040653494035557784236356582141524995677
173137664794921875;-
3.30354626612216151215761783532798290252685546875;0.07248932502742359840208763
444024953059852123260498046875];

wp(1:5,25)=[-
0.08926840256925984429248188689598464407026767730712890625;0.54215751057842442
861556264688260853290557861328125;0.042133076541364361533581472940568346530199
0509033203125;-
3.09044866985627653122037372668273746967315673828125;0.05039384468990130983012
676324506173841655254364013671875];

wp(1:5,26)=[-
0.09180463140167705038408030304708518087863922119140625;0.42919794776249753365
249262060387991368770599365234375;0.043612659047169349824102368984313216060400
0091552734375;-
2.877351073590862728934780534473247826099395751953125;0.0282983643523652961260
239635521429590880870819091796875];

wp(1:5,27)=[-
0.09434086023407713128552387615854968316853046417236328125;0.31623838494755363
0155425707926042377948760986328125;0.04509224155296715635943272104668722022324
8004913330078125;-
2.66425347732766137909266035421751439571380615234375;0.00620288401476660686273
41218189030769281089305877685546875];

wp(1:5,28)=[-
0.09687708906650939477689377099522971548140048980712890625;0.20327882213073644
7348908768617548048496246337890625;0.04657182405877859782128425081282330211251
9741058349609375;-2.451155881060242958113803979358635842800140380859375;-
0.0158925963227119215748217584405210800468921661376953125];

wp(1:5,29)=[-
0.084609905519968553466725325051811523735523223876953125;0.6413743608538976515
0210905630956403911113739013671875;0.04487234221959360280784778751694830134510
99395751953125;-3.419767810302164701141691693919710814952850341796875;-
0.0205283597469350341524485514810294262133538722991943359375];

wp(1:5,30)=[-
0.072342721973429002790823005852871574461460113525390625;1.0794698995769982374
7816481045447289943695068359375;0.04317286038040892004463700004635029472410678
863525390625;-4.38837973954395010878215543925762176513671875;-
0.025164123171155239333529607392847537994384765625];

wp(1:5,31)=[-
0.060075538426896314680991650902797118760645389556884765625;1.5175654382997083
58016459897044114768505096435546875;0.0414733785412272695780622200345533201470
97110748291015625;-5.3569916687848557756979062105529010295867919921875;-
0.02979988659534915651505571076995693147182464599609375];

wp(1:5,32)=[-
0.0478083548803610869359914659071364440023899078369140625;1.955660977022533719
7047110748826526105403900146484375;0.03977389670204484195537020241317804902791
9769287109375;-6.32560359802602167889062911854125559329986572265625;-
0.03443565001955029014624187766457907855510711669921875];

wp(1:5,33)=[-
0.035541171333823784461714012650190852582454681396484375;2.3937565157455069630
99842323572374880313873291015625;0.0380744148628609918594278838099853601306676
8646240234375;-7.2942155272675197608123198733665049076080322265625;-
0.039071413443761811301602193680082564242184162139892578125];
```

```
wp(1:5,34)=[-
0.0232739877873134951014044702333194436505436897277832031 25;2.8318520544668484
00693379517178982496261596679687 5;0.036374933023689319522286922392595442943274
974822998046875;-8.262827456505343448611711210105568170547485351 5625;-
0.043707176867867542080503540091740433126688003540039062 5];

wp(1:5,35)=[-
0.011006804240745895681619082040469947969540953636169433593 75;3.26994759319161
598654090994386933743953704833984375;0.034675451184492528389213816808478441089
3917083740234375;-9.231439385750881854164617834612727165222167968 75;-
0.048342940292193443962975862859821063466370105743408203125];

wp(1:5,36)=[0.001260379305811566014172697691719804424792528152465820312 5;3.708
0431319158195790919307910371571779251098632812 5;0.032975969345299858959119632 1
180177619680762290954589843 75;-
10.200051314995150164577353280037641525268554687 5;-
0.052978703716484609742565226042643189430236816406 25];

wp(1:5,37)=[0.013527562852334480691940399310624343343079090118408203125;4.1461
3867063789953704144863877445459365844726562 5;0.031276487506122579995704313660 0
98705440759658813476562 5;-11.168663244234636522378423251211643218994140625;-
0.057614467140637587450058276772324461489915847778320312 5];

wp(1:5,38)=[0.025794746398875540577266818331736430991441011428833007812 5;4.584
2342093610781716961355414241552352905273437 5;0.029577005666937185995868375698 5
919899307191371917724609375;-
12.137275173476597345256777771282941102981567382812 5;-
0.062250230564862306381623824336202233098447322845458984375];

wp(1:5,39)=[0.038061929945405789665890949891036143526434898376464843 75;5.02232
974808361909424547775415703654289245605468 75;0.027877523827757055147058551369 8
097201995551586151123046875;-
13.105887102717122871808896888978779315948486328125;-
0.066885993989044503771346228404581779614090919494628906 25];

wp(1:5,40)=[0.050329113491958350767863095143184182234108448028564453125;5.4604
25286807554456913749163504689931869506835937 5;0.026178041988566415343431259543
6495030298829078674316406 25;-
14.074499031960785444539396848995238542556762695312 5;-
0.071521757413318065577101378949009813368320465087890625];

wp(1:5,41)=[0.062596297038565187897951602735702181234955787658691406 25;5.89852
082553464640568563481792807579040527343 75;0.024478560149351642066806178377191 8
2716682553291320800781 25;-
15.043110961211555220984337211120873689651489257812 5;-
0.076157520837793202250765034477808512747287750244140625];

wp(1:5,42)=[0.074863480584989414157170983799005625769495964050292968 75;6.33661
6364250820865322566532995551824569702148437 5;0.022779078310218570796452652871 2
6676412299275398254394531 25;-
16.011722890437752653269853908568620681762695312 5;-
0.080793284261567968607131717817537719383835792541503906 25];

wp(1:5,43)=[0.087130664131550766837719379509508144110441207885742187 5;6.774711
9029753344321420627238694578409194946289062 5;0.021079596471023597653582370980 9
847059659659862518310546875;-
16.980334819682713742849955451674759387969970703125;-
0.085429047685875669770894091925583779811859130859375];

wp(1:5,44)=[0.099397847678153794515054642033646814525127410888671875;7.2128074
41702199895416924846358597278594970703125;0.019380114631811627690094468334791 5
99772870540618896484375;-17.948946748932975481238827342167496681213378906 25;-
0.090064811110339287880677261455275584012269973754882812 5];
```

```
wp(1:5,45)=[0.11166503122466278630220415379881160333752632141113281 25;7.650902
98042345118290086247725412249565124511718 75;0.017680632792639601469364407648 75
44225528836250305175781 25;-
18.917558678170596664358527050353586673736572265625;-
0.09470057453443965489459088757939753122627735137939453125];

wp(1:5,46)=[0.1239322147711688359983384088914426952600479125976 5625;8.0889985
19144572796335523889865726232528686523437 5;0.015981150953470728975913672798014
8862116038799285888671875;-
19.886170607407930077670243917964398860931396484375;-
0.0993363379585316674802442094005527906119823455810546875];

wp(1:5,47)=[0.13619939831768312910043050578678958117961883544921875;8.52709405
786605501020858355332165956497192382812 5;0.014281669114297788555911772334638 95
3907415270805358886718 75;-
20.85478253664607350970072729978710412979125976 5625;-
0.1039721013826486323283759816149540711194276809692382812 5];

wp(1:5,48)=[0.148466581864242164190414996483013965189456939697265625;8.9651895
96590439791157223226036876440048217773437 5;0.012582187275103601242776107937970
6643521785736083984375;-21.823394465890739724045488401316106319427490234375;-
0.10860786480694793743051462797666317783296108245849609375];

wp(1:5,49)=[0.113355550203051241853202668607991654425859451293945312 5;8.423232
893964060608027466514613479375839233398437 5;0.016246416745141246951167346423 97
2048796713352203369140625;-20.553804171327698213644907809793949127197265625;-
0.10037020580731539909358218665147433057427406311035156 25];

wp(1:5,50)=[0.0782445185418640110075472193784662522375583648681640625;7.881276
19133803847262242925353348255157470703125;0.019910646215176831808069124463145 2
7187496423721313476562 5;-19.28421387676545961653573613148182630538940429687 5;-
0.09213254680771000570960183040369884110987186431884765625];

wp(1:5,51)=[0.043133486880650308281648364072680124081671237945556640625;7.3393
19488710355443572552758269011974334716796875;0.023574875685224361970826478795 9
7061546519398689270019531 25;-
18.014623582199480011922787525691092014312744140625;-
0.08389488780799354838979553505851072259247303009033203125];

wp(1:5,52)=[0.00802245521938950434392978650066652335226535797119140625;6.79736
27860799110678158285736571997404098510742187 5;0.027239105155292417381751590710
33704094588756561279296875;-
16.7450332876272867110856168437749147415161132812 5;-
0.07565722880810339667778663397257332690060138702392578125];

wp(1:5,53)=[-
0.027088576441742666378598158871682244352996349334716796875;6.2554060834570828
22008032962912693619728088378906 25;0.030903334625304344079887997054356674198 06
12277984619140625;-15.47544299307223347739181917859241366386413574218 75;-
0.06741956980869702464875814484912552870810031890869140625];

wp(1:5,54)=[-
0.0621996081030486563934189803148910868912935256958007812 5;5.7134493808239694 7
01001099019777029752731323242187 5;0.034567564095392570855391767281616921536624
4316101074218 75;-14.20585269849403253772379684960469603538513183593 75;-
0.059181910808635128373733635953612974844872951507568359375];

wp(1:5,55)=[-
0.097310639764211101510049672924651531502604484558105468 75;5.1714926781993373 3
39219033368863165378570556640625;0.038231793565417546143514471168600721284747 1
2371826171875;-12.93626240393492210500880901236087083816528320312 5;-
0.050944251809116616880324102112354012206196784973144531 25];

wp(1:5,56)=[-
0.13242167142550997915861898945877328515052795410156 25;4.629535975566613004161
```

```
808930803090333938598632812 5;0.041896023035502362452664470993113354779779911 04
1259765625;-11.66667210935759335654893220635131001472473144531 25;-
0.042706592809077792427530084751197136938571929931640625];

wp(1:5,57)=[-
0.16753270308669943045032368900137953460216522216796875;4.087579272940328856 12
29601327795535326004028320312 5;0.045560252505539855505389823520090430974960327
1484375;-10.397081814794766785325919045135378837585449218 75;-
0.034468933809454219141521491565072210505604743957519531 25];

wp(1:5,58)=[-
0.20264373474791350093759945139026967808604240417480468 75;3.5456225703127084 43
651672496343962848186492919921875;0.049224481975587076887368453981252969242632
389068603515625;-9.12749152022892573654644365888088941574096679687 5;-
0.026231274809743208853429763394160545431077480316162109375];

wp(1:5,59)=[-
0.23775476640911311076997947111522080376744270324707031 25;3.003665867685882950
866016471991315484046936035156 25;0.052888711445628421026210475019979639910161 4
95208740234375;-7.857901225664878808174762525595724582672119140625;-
0.017993615810083039840971963485571905039250850677490234375];

wp(1:5,60)=[-
0.27286579807032768085761631482455413788557052612304687 5;2.4617091650581621742
333027214044705033302307128906 25;0.056552940915676676303380787658170447684824 4
66705322265625;-6.588310931098815714790362108033150434494018554687 5;-
0.0097559568103662338417469968021578097250312566757202148437 5];

wp(1:5,61)=[-
0.30797682973151691010471608933585230261087417602539062 5;1.919752462431988826 4
523115140036679804325103759765625;0.060217170385713190972065689265946275554597
377777099609375;-5.318720636536233392632766481256112456321716308593 75;-
0.0015182978107478922649015151691287428548093885183334350585937 5];

wp(1:5,62)=[-
0.34308786139272473558747833521920256316661834716796875;1.377795759804684161 40
922727208817377686500549316406 25;0.063881399855758067007904799083917168900370 5
9783935546875;-
4.049130341971106439302729995688423514366149902343 75;0.006719361188942630722 09
849241289703059010207653045654296875];

wp(1:5,63)=[-
0.378198893053965368160618254478322342038154602050781 25;0.835839057175385646 83
621871154173277318477630615234375;0.067545629325817868604531213350128382444381
7138671875;-
2.779540047401491520417948777321726083755493164062 5;0.014957020188760824369600
39956375112524256110191345214843 75];

wp(1:5,64)=[-
0.413309924715136778328172795227146707475185394287109375;0.293882354550259405 9
0090272053203079849481582641601562 5;0.071209858795846583956468123233207734301 6
862869262695312 5;-
1.509949752841267534009261908067855983972549438476562 5;0.023194679188311542739
0649188055249396711587905883789062 5];

wp(1:5,65)=[-0.44842095637640227989706431799277197569608688354492187 5;-
0.248074348080486700718338965998555067926645278930664062 5;0.0748740882659170 15
938555323373293504118919372558593 75;-
0.240359458268393638702420389563485514372587203979492187 5;0.031432338188223128
6943429893199208891019225120544433593 75];

wp(1:5,66)=[-0.48353198803761410218271521443966776132583618164062 5;-
0.790031050708034365825938039051834493875503540039062 5;0.0785383177359637307 81
2789686067844741046428680419921875;1.029230836297280404778575757518410682678 22
265625;0.03966999718792902501762753786351822782307863235473632812 5];
```

wp(1:5,67)=[-0.518643019698808771522635652218014001846313476562 5;-
1.3319877533345572118150812457315623760223388671875;0.0822025472060028405962839315179735422134399414062 5;2.2988211308606478766591862950008362531661987304687
5;0.047907656187569654104851935016995412297546863555908203125];

wp(1:5,68)=[-0.55375405136003530426336283198907040059566497802734375;-
1.8739444559629789832655433201580308377742767333984375;0.0858667766760560779992772495461395010352134704589843 75;3.5684114254282897071846036851638928055763244628906 25;0.056145315187331394646275128934576059691607952117919921875];

wp(1:5,69)=[-0.54229999797889039125919907746720127761363983154296875;-
1.7095225390679613663991176508716307580471038818359375;0.0875300894102691157128148802257783245295286178588867187 5;3.2197516196942865818186874093953520059585 5712890625;0.071232106018442264971923805205733515322208404541015625];

wp(1:5,70)=[-0.53084594459780298780771090605412609875202178955078125;-
1.5451006221763698977866852146689780056476593017578125;0.0891934021445074387557383488456252962350845336914062 5;2.8710918139679972860278667212696745991706848 14453125;0.086318896849773174562159283595974557101726531982421875];

wp(1:5,71)=[-0.51939189121659368186811889245291240513324737548828125;-
1.3806787052774993629356004021246917545795440673828125;0.0908567148786920547598455755178292747586965560913085937 5;2.5224320082253210983935787226073443889617 919921875;0.1014056876806359447362737569164892192929983139038085 9375];

wp(1:5,72)=[-0.50793783783548829280363179350388236343860626220703125;-
1.2162567883848265370971830634516663849353790283203125;0.0925200276129223286858405117527581751346588134765625;2.1737722024965968614651501411572098731994628 90625;0.116492478511897437631894547394040273502469062805175 78125];

wp(1:5,73)=[-0.49648378445432400640768833000038284808397293090820312 5;-
1.0518348714886489592146290306118316948413848876953125;0.0941833403471268454376641443559492472559213638305664062 5;1.8251123967599833797237351973308250308036 80419921875;0.13157926934293351362015300765051506459712982177734375];

```
0.26684643763721893616747138366918079555034637451171875;0.22210001432979162294
67858784119016490876674652099609375];

wp(1:5,80)=[-
0.41630541078637250951288706346531398594379425048828125;0.09911854677277835701
243446919761481694877147674560546875;0.105826529486645379285469914520945167168
97487640380859375;-
0.6155062433697142676436442343401722609996795654296875;0.237186805160945424209
018028705031611025333404541015625];

wp(1:5,81)=[-
0.40485135740521915881373615775373764336109161376953125;0.26354046366831207492
9644950316287577152252197265625;0.10748984222085460060736039622497628442943096
160888671875;-
0.964166049104878464248713498818688094615936279296875;0.2522735959920227033492
7789008361287415027618408203125];

wp(1:5,82)=[-
0.393397304024103278141666351075400598347187042236328125;0.4279623805616002418
79460782001842744648456573486328125;0.1091531549550803781301056005759164690971
37451171875;-
1.3128258548349880374672693505999632179737091064453125;0.267360386823244755571
948871875065378844738006591796875];

wp(1:5,83)=[-
0.3819432506429289997385012611630372703075408935546875;0.592384297458394160074
1354704950936138629913330078125;0.11081646768928030133416484659392153844237327
57568359375;-
1.6614856605729888539002558900392614305019378662109375;0.282447177654241099453
71355934184975922107696533203125];

wp(1:5,84)=[-
0.37048919726179996292358964637969620525836944580078125;0.75680621435246164807
6086930814199149608612060546875;0.11247978042350034733054542357422178611159324
64599609375;-
2.010145466304852579497719489154405891895294189453125;0.2975339684854127475510
66559026367031037807464599609375];

wp(1:5,85)=[-
0.359035143880659879389583011288777925074100494384765625;0.9212281312472042626
9931294882553629577159881591796875;0.11414309315771541120110299516454688273370
265960693359375;-
2.358805272038236200415894927573390305042266845703125;0.3126207593165413745062
15333894942887127399444580078125];

wp(1:5,86)=[-
0.34758109049953678226785314109292812645435333251953125;1.08565004814092258556
001979741267859935760498046875;0.115806405891938080099379249077173881232738494
873046875;-
2.707465077769314110156528840889222919940948486328125;0.3277075501477351715529
09605452441610395908355712890625];

wp(1:5,87)=[-
0.336127037118414684346845433537964709103107452392578125;1.2500719650345815114
889092001249082386493682861328125;0.117469718626161206964653160866873804479837
4176025390625;-
3.056124883500258793134207735420204699039459228515625;0.3427943409789330209136
4375883131287992000579833984375];

wp(1:5,88)=[-
0.324672983737256559688688639653264544904232025146484375;1.4144938819304035959
5897825784049928188323974609375;0.11913303136036818008491877662891056388616561
8896484375;-
3.404784689236070693851843316224403679370880126953125;0.3578811318099923144409
04692673939280211925506591796875];
```

```
wp(1:5,89)=[-
0.31321893035611175770682734764704946428537368774414062 5;1.5789157988254216569
14613777189515531063079833984375;0.1207963440945811900428807916796358767896890
6402587890625;-
3.7534444949700751514853891421807929873466491699218 75;0.3729679226411026782272
983837174251675605773925781 25];

wp(1:5,90)=[-
0.30176487697501325202509292466857004910707473754882812 5;1.7433377157176717098
2525385625194758176803588867187 5;0.1224596568288148640268886424564698245376348
4954833984375;-
4.10210430069784770523710903944447636604309082031 25;0.3880547134723911217868 41
949869995005428791046142578125];

wp(1:5,91)=[-
0.290310823593852906920886880470789037644863128662109375;1.9077596326136141424
711922809365205466747283935546875;0.1241229695630211016244004440522985532879 82
940673828125;-
4.450764106433932276729592558695003390312194824218 75;0.4031415043034420331302 6
696378074120730161666870117187 5];

wp(1:5,92)=[-
0.278856770212682070209098128543701022863388061523437 5;2.0721815495101871817 95
1177945360541343688964843 75;0.1257862822972223015849380090003251098096370697 02
1484375;-
4.7994239121714352691583371779415756464004516601562 5;0.4182282951344529764448 0
5472056032158434391021728515625];

wp(1:5,93)=[-
0.26740271683158561843995926210482139140367507934570312 5;2.2366034664023355382
76702209259383380413055419921875;0.1274495950314568082362143286445643752813339
2333984375;-
5.148083717898980005145403993083164095878601074218 75;0.4333150859657484144094 0
417669480666518211364746093 75];

wp(1:5,94)=[-
0.2559486634503640445359451405238360166549682617187 5;2.4010253833019308267182 6
2323993258178234100341796875;0.1291129077656358314918350060906959697604179382 3
2421875;-
5.496743523643286444269051571609452366828918457031 25;0.4484018767965641805162 1
35824502911418676376342773437 5];

wp(1:5,95)=[-
0.2444946100693051183050386043760227039456367492675781 25;2.5654473001918338681
5484482212923467159271240234375;0.1307762204998864641325440061336848884820938 1
103515625;-
5.8454033293657747805127655738033354282379150390625;0.4634886676280044470743 74
638759763911366462707519531 25];



bp=[5.5667431220950209791453744401223957538604736328125;
5.4472222418033453550378908403217792510986328125;
5.3277013615126405099431394774001091718673706054687 5;
5.2081804812250807046325462579261511564254760742187 5;
5.0886596009363715964468610764015465974807739257812 5;
4.9691387206487185324021993437781929969787597656 25;
4.8496178403577534510304758441634476184844970703125;
4.7300969600696110006765593425370752811431884765625;
4.6105760797796468963838378884059175848960876464843 75;
4.4910551994914582607520969759207218885421752929687 5;
4.3715343192017881435162962588947266340255737304687 5;
4.2520134389121739815209366497583687305450439453125;
```

4.1324925586252225784278380160685628652572631835937 5;
4.012971678335350844690765370614826679229736328125;
3.893450798045372085454118860070593655109405517578125;
3.773929917757958829582776161259971559047698974609375;
3.654409037468757670552577110356651246547698974609375;
3.534888157179162160304031203850172460079193115234375;
3.415367276890775460884697167784906923770904541015625;
3.29584639660131717420199493062682449817657470703125;
3.176325516313006414037545255268923938274383544921875;
3.056804636022561805219766029040329158306121826171875;
2.93728375573487276994910644134506583213806152343 75;
2.81776287544517334282545562018640339374542236328125;
2.698241995155869599187781204818747937679290771484375;
2.57872111486681099279394402401521801948547363 28125;
2.45920023457890568607808745582588016986846923828125;
2.33967935428880302595189277781173586845397949218 75;
2.859778842336824222769564585178159177303314208984375;
3.379878330384773033046030832338146865367889404296875;
3.899977818432265319614771215128712356090545654296875;
4.42007730647989305339251586701720952987670898437 5;
4.94017679452769264969447249313816428184509277343 75;
5.460276282573580886037234449759125709533691406 25;
5.98037577062348546519388037268072366714477539062 5;
6.50047525867272657507101030205376446247100830078125;
7.02057474671948078537297988077625632286071777343 75;
7.54067423476752107802667524083517491817474365234375;
8.06077372281481707716466189594939351081848144531 25;
8.58087321086374288370279828086495399475097656 25;
9.10097269891637061789424478774890303611755371093 75;
9.6210721869562050301283306907862424850463867187 5;
10.14117167500580762862227857112884521484375;
10.66127116305816890928781504044309258460998535156 25;
11.18137065110395056422021298203617334365844726562 5;
11.70147013914958300517810130259022116661071777343 75;
12.2215696271956382190637668827548623085021972656 25;
12.74166911524508805086952634155750274658203125;
12.0397530146272657702866126783192157745361328125;
11.3378369140098556044904398731887340545654296875;
10.635920813390503880668802594300359487533569335937 5;
9.93400471276791385832893865881487727165222167968 75;
9.23208861215425180546390038216486573219299316406 25;
8.530172511528533618729852605611085891723632812 5;
7.82825641091275592486908863065764307975769042968 75;
7.12634031028749337366434701834805309772491455078125;
6.42442420966978122720547617063857614994049072265625;
5.72250810905049878130057550151832401752471923828125;
5.02059200843215158727161906426772475242614746093 75;
4.31867590781275456635057707899250090122222900390625;
3.6167598071951694294057233491912484169006347656 25;
2.914843706576259574347886882605962455272674560546875;
2.2129276059550138100462390866596251726150512695312 5;
1.5110115053386563577220158549607731401920318603515625;
0.80909540471571339548262358221109025180339813232421875;
0.107179304096518449029851183240680256858468055725097656 25;
-0.59473679652147504182124748695059679448604583740234375;
-1.2966528971416946269812342507066205143928527832031 25;
-1.09512555349276552441040166741004213690757751464843 75;
-0.89359820984785265363115058789844624698162078857421875;
-0.69207086619440871810837734301458112895488739013671875;
-0.49054352254822852774651664731209166347980499267578125;
-0.289016178897940678726996566183515824377536773681640625;
-0.0874888352499133964412791897302668076008558273315429687 5;
0.1140385083985787778582121632098278496414422988891601562 5;
0.31556585204786519183173254532448481768369674682617187 5;
0.5170931956951685393164552806410938501358032226562 5;

```
0.71862053934406222577280232144403271377086639404296875;
0.92014788299208272182028167662792839109897613525390625;
1.1216752266402265636457968867034651339054107666015625;
1.3232025702897594054974206301267258822917938232421875;
1.5247299139366614628698926026117987930774688720703125;
1.726257257587671123388872729265131056308746337890625;
1.9277846012354860061321915054577402770519256591796875;
2.12931194488409225584746309323236346244812011171875;
2.33083928853149835447311488678678870201110839843750;
2.5323666321788347310928202205104753375053405761 71875;
2.733893975828705080743930011522024869918823242 1875;
2.9354213194776344053593675198499113321304321289 0625;
3.1369486631233196582968503207666799426078796386 71875;
3.338476006773332116495112131815403699874877929 6875;
3.5400033504240822068709348968695849180221557617 1875;
3.7415306940696493320785975811304524540901184082 03125;
3.9430580377239414779921844456112012267112731933 59375;
4.1445853813668751541854362585581839084625244140625];

Tdnew=1.825:0.025:4.175;
f=[0
    0.0050
    0.0100
    0.0150
    0.0200
    0.0250
    0.0300
    0.0350
    0.0400
    0.0450
    0.0500
    0.0550
    0.0600
    0.0650
    0.0700
    0.0750
    0.0800
    0.0850
    0.0900
    0.0950
    0.1000
    0.1050
    0.1100
    0.1150
    0.1200
    0.1250
    0.1300
    0.1350
    0.1400
    0.1450
    0.1500
    0.1550
    0.1600
    0.1650
    0.1700
    0.1750
    0.1800
    0.1850
    0.1900
    0.1950
    0.2000
    0.2050
    0.2100
    0.2150
    0.2200
```

```
    0.2250
    0.2300
    0.2350
    0.2400
    0.2450
    0.2500
    0.2550
    0.2600
    0.2650
    0.2700
    0.2750
    0.2800
    0.2850
    0.2900
    0.2950
    0.3000
    0.3500
    0.4000
    0.4500
    0.5000
    0.5500
    0.6000
    0.6500
    0.7000
    0.7500
    0.8000
    0.8500
    0.9000
    0.9500
    1.0000
    1.0500
    1.1000
    1.1500
    1.2000
    1.2500
    1.3000
    1.3500
    1.4000
    1.4500
    1.5000
    1.5500
    1.6000
    1.6500
    1.7000
    1.7500
    1.8000
    1.8500
    1.9000
    1.9500
    2.0000];

f=f';

% Valore del secondo ingresso

for t=1:95

    i1=Tdnew(t);

    wp1=wp(:,t);
    bp1=bp(t);

% Valore minimo e massimo della variabile da ottimizzare

i2min=0;
```

```
i2max=2;

z1=exp(-2*(i1*w1(1)+b(1)));
z2=exp(-2*(i1*w2(1)+b(2)));
z3=exp(-2*(i1*w3(1)+b(3)));
z4=exp(-2*(i1*w4(1)+b(4)));
z5=exp(-2*(i1*w5(1)+b(5)));

alfa1=1;
alfa2=w2(2)/w1(2);
alfa3=w3(2)/w1(2);
alfa4=w4(2)/w1(2);
alfa5=w5(2)/w1(2);

minx=exp(-2*w1(2)*i2min);
maxx=exp(-2*w1(2)*i2max);

for v=1:10000
    x(v)=minx+v*(maxx-minx)/10000;
    xi(v)=(-1/(2*w1(2)))*log(x(v));
    F1(v)=(wp1(1)/(1+(x(v)^alfa1)*z1));
    F2(v)=(wp1(2)/(1+(x(v)^alfa2)*z2));
    F3(v)=(wp1(3)/(1+(x(v)^alfa3)*z3));
    F4(v)=(wp1(4)/(1+(x(v)^alfa4)*z4));
    F5(v)=(wp1(5)/(1+(x(v)^alfa5)*z5));
    F(v)=F1(v)+F2(v)+F3(v)+F4(v)+F5(v);
end

figure(1)
plot(xi,2*(F1+F2+F3+F4+F5)-(-bp1+wp1(1)+wp1(2)+wp1(3)+wp1(4)+wp1(5)))

figure(2)
plot(2*(F1+F2+F3+F4+F5)-(-bp1+wp1(1)+wp1(2)+wp1(3)+wp1(4)+wp1(5)),xi)

end
```

Bibliografia

[1] G. Amendola e P. Castaldo, «Optimal DCFP bearing properties and seismic performance assessment in nondimensional form for isolated bridges,» *WILEY,* 2021.

[2] E. Tubaldi e P. Castaldo, «Influence of ground motion characteristics on the optimal single concave sliding bearing properties for base-isolated structures.,» *ELSEVIER,* 2017.

[3] M. Bozza, *Base-isolation e isolatori elastomerici,* adepron.it.

[4] I. Flood, «Towards the next generation of artificial neural networks for civil engineering.,» *ELSEVIER,* 2008.

[5] C. Calledda, A. Montisci e M. C. Porcu, «Optimal Design of Earthquake-Resistant Buildings Based on Neural Network Inversion,» *MDPI,* p. 14, 2021.

[6] D. C. M. Fenz, «Behaviour of the double concave friction pendulum bearing,» 2006.

[7] Y. Y. C. Kim, «Seismic response characteristics of bridges using double concave friction pendulum bearings with tri-linear behavior,» 2007.

[8] C. L.-L. L. W.-H. Wang Yen-Po, «Seismic response analysis of bridges isolated with friction pendulum bearings,» 1998.

[9] J. R. Kunde M.C., «Seismic behavior of isolated bridges: a-state-of-the-art review,» 2003.

[10] Lapointe Evan M., «An investigation of the principles and practices of seismic isolation in bridge structures,» 2004.

[11] K. S. W. Symans Michael D., «Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation systems,» 1999.

[12] A. Thomas, An introduction to neural networks for beginners.

[13] S. Longo, Analisi Dimensionale e Modellistica Fisica - Principi e applicazioni alle scienze ingegneristiche., Springer.

[14] H. Jacobsson, Inversion of an Artificial Neural Network Mapping by Evolutionary Algorithms with Sharing.

[15] G. Amendola e P. Castaldo, «Optimal sliding friction coefficient for isolated viaducts and bridges: Acomparison study,» *Wiley,* p. 27, 2021.

Indice delle figure