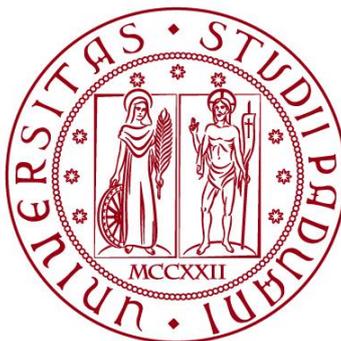


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**EFFICACIA E OTTIMIZZAZIONE DEGLI
SMORZATORI FLUIDO-VISCOSI PER IL
MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO
SISMICO DI EDIFICI CON ISOLAMENTO
D'INTERPIANO**

Relatore:
Chiar.mo PROF. DA PORTO FRANCESCA
Correlatori:
Chiar.mo PROF. DONÁ MARCO

Laureando: ALBERTO ZONTA
1130632

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

Indice

Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	7
Introduzione	9
1. ASPETTI GENERALI.....	11
1.1 Introduzione	11
1.2 Cenni storici	14
1.3 Isolamento d'interpiano	18
1.3.1 <i>Differenze tra i due sistemi di isolamento.....</i>	<i>19</i>
1.4 Near fault ground motions e far fault ground motions	26
1.5 Smorzamento	28
2. ALGORITMI EVOLUTIVI E OTTIMIZZAZIONE MULTIOBIETTIVO	33
2.1 Problema di Ottimizzazione Multiobiettivo	34
2.2 Algoritmi genetici	36
2.3 Nsga II.....	38
3. MATRICE DI SMORZAMENTO C.....	45
3.1 Analisi dinamica	45
4. MODELLAZIONE.....	59
4.1 Impostazione del problema	59
4.2 Funzioni obiettivo	69
4.3 Parametri e performance dello smorzamento	70
4.3.1 <i>Serie di Fourier e Fast Fourier Transform.....</i>	<i>79</i>
5. ANALISI NUMERICA E PARAMETRICA	81
5.1 Analisi Time History	81
5.2 Modello surrogato	102
5.3 Ottimizzazione	110
Conclusioni.....	141
Bibliografia.....	143

Indice delle figure

Figura 1 Differenza dell'azione sismica su edifici smorzati e isolati	11
Figura 2 Primi esempi di isolamento sismico	14
Figura 3 Esempio di Friction Pendulum	15
Figura 4 Isolamento con sfere metalliche	16
Figura 5 Isolamento sismico con sabbia e talco	17
Figura 6 Sistema di prevenzione rotture tubazioni.....	17
Figura 7 Momento e taglio alla base dell'edificio	19
Figura 8 Isolamento alla base.....	21
Figura 9 Isolamento d'interpiano.....	21
Figura 10 Isolamento d'interpiano con TMD	22
Figura 11 Esempio di TMD	24
Figura 12 Esempio di ASI.....	24
Figura 13 Onda di tipo A.....	26
Figura 14 Onda di tipo B.....	27
Figura 15 Smorzatore elettroreologico.....	29
Figura 16 Grafico forza spostamento	29
Figura 17 Diminuzione spostamento per sismi NF	30
Figura 18 Aumento spostamento per sismi FF.....	30
Figura 19 Pareto Front.....	35
Figura 20 Crowding distance	40
Figura 21 Meccanismo di generazione della popolazione successiva	43
Figura 22 Meccanismo di penalty	43
Figura 23 Sistema MDOF e SDOF	45
Figura 24 Modi di vibrare	46
Figura 25 Schematizzazione di un edificio a più piani con matrice di smorzamento	48
Figura 26 Smorzamento alla Rayleigh	50
Figura 27 Rapporto di smorzamento alla Rayleigh uguale per due modi di vibrare	50
Figura 28 Smorzamento alla Rayleigh diverso per due modi di vibrare.....	50
Figura 29 Smorzamento proporzionale alla rigidezza.....	53
Figura 30 Valore e andamento dello smorzamento per i vari modi	54
Figura 31 Smorzamento alla Rayleigh complessivo	55
Figura 32 Modi di vibrare di una struttura a 7 piani	56
Figura 33 Metodo di Runge Kutta del 4° ordine	68
Figura 34 Spostamento sovrastruttura con e senza smorzamento.....	70
Figura 35 Spostamento isolamento con e senza smorzamento	70
Figura 36 FFT.....	71
Figura 37 Smorzamento equivalente.....	72
Figura 38 Rappresentazione schematizzata di una struttura con e senza smorzatore	72
Figura 39 Primo modo di vibrare di una struttura a n piani	75
Figura 40 Passaggio da una struttura a n piani a un sistema SDOF.....	75
Figura 41 Schematizzazione primo modo di vibrare	76

Figura 42 Schematizzazione secondo modo di vibrare	76
Figura 43 Andamento OF1 e OF2	77
Figura 44 Spostamento globale dato dalla somma di OF1 e OF2	77
Figura 45 Accelerogramma Umbria Marche	85
Figura 46 Spettro Umbria Marche	85
Figura 47 Accelerogramma Campano Lucano	85
Figura 48 Spettro Campano Lucano	86
Figura 49 Accelerogramma Chi Chi	86
Figura 50 Spettro Chi Chi	86
Figura 51 Sovrapposizione spettri	87
Figura 52 Accelerogramma Umbria Marche	87
Figura 53 Spettro Umbria Marche	88
Figura 54 Accelerogramma Campano Lucano	88
Figura 55 Spettro Campano Lucano	88
Figura 56 Sovrapposizione spettri	89
Figura 57 Taglio alla base struttura 2 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	94
Figura 58 Taglio alla base struttura 8 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	94
Figura 59 Spostamento sovrastruttura struttura 4 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	95
Figura 60 Accelerazione sovrastruttura struttura 4 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	96
Figura 61 Spostamento isolamento struttura 4 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	97
Figura 62 Accelerazione isolamento struttura 4 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	97
Figura 63 Spostamento sottostruttura struttura 2 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	98
Figura 64 Spostamento sottostruttura struttura 8 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	98
Figura 65 Accelerazione sottostruttura struttura 4 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3	99
Figura 66 Struttura con 4 piani sotto e 2 sopra, per una PGA di 0.25g	100
Figura 67 Struttura con 8 piani sotto e 4 sopra, per una PGA di 0.25g	101
Figura 68 Struttura con $r_{o,L}=3.23$ $r_{o,U}=1.088$ PGA=0.35g	104
Figura 69 Struttura con $r_{o,L}=1.87$ $r_{o,U}=0.98$ PGA=0.35g	105
Figura 70 Struttura con $r_{o,L}=3.23$ $r_{o,U}=1.088$ PGA=0.35g	106
Figura 71 Struttura con $r_{o,L}=1.87$ $r_{o,U}=0.98$ PGA=0.35g	106
Figura 72 Struttura con $r_{o,L}=3.23$ $r_{o,U}=1.088$ PGA=0.35g	107
Figura 73 Struttura con $r_{o,L}=1.87$ $r_{o,U}=0.98$ PGA=0.35g	107
Figura 74 Pareto front di tutte le strutture studiate per una PGA=0.25g e Tis/Tup=3	111
Figura 75 Pareto front di tutte le strutture studiate per una PGA=0.25g e Tis/Tup=4	112
Figura 76 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una PGA=0.25g e Tis/Tup=3	113
Figura 77 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una PGA=0.25g e Tis/Tup=3	113
Figura 78 Valori di c^* e α per i vari punti delle Pareto front	114
Figura 79 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una PGA=0.25g e Tis/Tup=3	115
Figura 80 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una PGA=0.25g e Tis/Tup=4	115
Figura 81 Valori di c^* e α per i vari punti delle Pareto front	116
Figura 82 Strutture in cls PGA 0.25g Tis/Tup=3	119
Figura 83 Andamento di c^* e α	120
Figura 84 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3	121

Figura 85 Strutture in acciaio e cls massa di piano doppia PGA 0.25g Tis/Tup=3	122
Figura 86 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3	123
Figura 87 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3	124
Figura 88 Strutture in acciaio e cls massa di piano doppia PGA 0.25g Tis/Tup=3	124
Figura 89 Strutture in cls PGA 0.25g Tis/Tup=3 vincolate	125
Figura 90 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3 vincolate	126
Figura 91 Strutture in acciaio e cls con massa doppia PGA 0.25g Tis/Tup=3 vincolate..	126
Figura 92 Confronti obiettivi e distribuzione c^* e α	127
Figura 93 Strutture in cls $\rho L=2$, PGA 0.25g	129
Figura 94 Strutture in cls $\rho L=5$, PGA 0.25g	129
Figura 95 Struttura in cls $\rho L=8$, PGA 0.25g	130
Figura 96 Struttura in cls $\rho L=8$, PGA 0.25g	130
Figura 97 Struttura mista in acciaio e cls $\rho L=2$, PGA 0.25g	131
Figura 98 Struttura mista in acciaio e cls massa doppia $\rho L=2$, PGA 0.25g.....	132
Figura 99 Struttura in cls $\rho L=2$ PGA 0.25g	132
Figura 100 Struttura in cls $\rho L=8$ PGA 0.25g	133
Figura 101 Struttura in acciaio e cls $\rho L=2$ PGA 0.25g	133
Figura 102 Struttura mista in acciaio e cls massa doppia $\rho L=2$, PGA 0.25g.....	134
Figura 103 Struttura mista in acciaio e cls massa doppia $\rho L=2$, PGA 0.25g.....	134
Figura 104 Andamento OF1 minimo	136
Figura 105 Andamento OF2 minimo	137
Figura 106 Andamento $\alpha, c^*, \rho L, \rho U$ strutture in cls.....	139
Figura 107 Andamento $\alpha, c^*, \rho L, \rho U$ strutture miste.....	139
Figura 108 Andamento $\alpha, c^*, \rho L, \rho U$ strutture miste massa doppia.....	139

Indice delle tabelle

Tabella 1 Sisimi far fault	83
Tabella 2 Sisimi near fault	84
Tabella 3 Masse e area struttura	91
Tabella 4 Caratteristiche struttura.....	91
Tabella 5 Casi analizzati.....	92
Tabella 6 Valori alfa	93
Tabella 7 Valori del coef. di smorzamento	93
Tabella 8 Grado superfici	107
Tabella 9 Accuratezza superfici	107
Tabella 10 Coefficienti superfici	109
Tabella 11 Frequenze struttura in cls.....	117
Tabella 12 Frequenze struttura mista in acciaio e cls	117
Tabella 13 Frequenze struttura mista in acciaio e cls con massa di piano doppia	118
Tabella 14 Caratteristiche strutture in cls	120
Tabella 15 Caratteristiche strutture in acciaio e cls	121
Tabella 16 Caratteristiche strutture in acciaio e cls con massa dipiano doppia	122
Tabella 17 Valori α e c^* con OF1 minimo	136
Tabella 18 Valori α e c^* con OF2 minimo	137

Introduzione

Questa tesi si pone l'obiettivo di isolare vari edifici tramite l'inserimento di isolatori non alla base ma bensì ad un piano intermedio della struttura.

Lo scopo è valutare l'effetto che ha l'inserimento di uno smorzatore all'interno del piano di isolamento. Si cerca infatti di ottimizzare i parametri α e c dello smorzatore in modo da diminuire lo spostamento del piano di isolamento ma anche della sovrastruttura.

Tale metodologia si sta sviluppando soprattutto in paesi emergenti, quali la Cina, dovuta soprattutto alla mancanza di spazio. Se l'edificio lo permette, si realizzano piani aggiuntivi sopra a quelli esistenti, e l'unico modo per evitare di gravare ancora di più sull'edificio sottostante è proprio l'utilizzo di un isolamento d'interpiano.

Nel primo capitolo si spiega in breve cos'è l'isolamento d'interpiano e le differenze rispetto ad un isolamento alla base classico.

Nel secondo capitolo si descrive l'algoritmo genetico, la sua evoluzione e come interagisce per ricercare i valori ottimali dello smorzatore.

Il terzo capitolo parla invece dello smorzamento della struttura che risulta non classico e quindi non assimilabile alla normale procedura. Per questo motivo si espone la metodologia applicata per arrivare ad un risultato coerente.

Nel quarto è presente la procedura che sta alla base della teoria utilizzata, con le varie equazioni e metodologia iterative e un esempio applicativo su un edificio esistente.

Il quinto e ultimo capitolo sviluppa l'analisi parametrica su varie tipologie di strutture che abbiamo condotto divisa in analisi time history, modello surrogato e ottimizzazione dei risultati.

1. ASPETTI GENERALI

1.1 Introduzione

Il primo obiettivo della ricerca nel campo dell'isolamento è quello di superare le limitazioni delle costruzioni a base fissa, ovvero il fatto che, a fronte del non crollo per effetto di terremoti di forte intensità, si debba comunque accettare un danno anche considerevole e, dunque, l'inutilizzabilità dell'edificio.

Vari paesi, tra i quali l'Italia, hanno sostanzialmente messo in atto due strategie: l'isolamento sismico e la dissipazione d'energia. La progettazione con queste due tecniche mira alla drastica riduzione delle forze sismiche agenti sulla struttura, piuttosto che affidarsi alla sua resistenza come avviene utilizzando l'approccio convenzionale.



Figura 1 Differenza dell'azione sismica su edifici smorzati e isolati

L'obiettivo dell'isolamento sismico è quello di isolare la struttura dai movimenti del terreno indotti dal sisma. Il principio generale è di disconnettere la costruzione dal terreno, visto che l'energia sismica è trasmessa alla struttura attraverso le fondazioni. L'isolamento sismico disaccoppia il movimento della costruzione da quello del terreno filtrando le componenti orizzontali del terremoto che in genere sono quelle più pericolose. Questo è effettuato mediante l'inserimento di dispositivi estremamente flessibili nella direzione orizzontale. La struttura sopra gli isolatori si muove rigidamente nel piano orizzontale con valori molto piccoli sia dell'accelerazione che degli spostamenti d'interpiano e, quindi,

senza danneggiamento non solo delle parti strutturali ma anche di contenuti compresi. Per la cosiddetta sovrastruttura si realizza una drastica riduzione sia dell'accelerazione e delle sue variazioni verticali, che delle deformazioni orizzontali e verticali. Infatti, il periodo proprio della costruzione aumenta considerevolmente e le accelerazioni della struttura decrescono fortemente.

L'isolamento sismico si può ottenere in 2 modi:

- aumentando il periodo di oscillazione della sovrastruttura e portandolo nel cosiddetto campo dei grandi periodi (2-3 sec) dove le accelerazioni spettrali sono estremamente piccole;
- attraverso la dissipazione energetica che consente di ridurre le accelerazioni e gli spostamenti.

Nel secondo caso, l'isolatore ha il compito principale di dissipare l'energia del sisma che altrimenti verrebbe trasferita alla sovrastruttura. La dissipazione di energia viene solitamente ottenuta per isteresi o per mezzo dell'attrito viscoso solitamente ottenuto facendo scorrere fluidi viscosi. La dissipazione energetica consente di abbattere le accelerazioni trasmesse alla sovrastruttura e contestualmente anche gli spostamenti.

Un sistema d'isolamento deve possedere:

- una buona capacità ricentrante (cioè la capacità di riportare la struttura alla posizione iniziale una volta terminato il terremoto);
- una vita utile sufficientemente lunga (almeno pari a quella delle usuali costruzioni, sebbene debba essere anche garantita la sostituibilità degli isolatori);
- rigidità crescente al diminuire del livello dell'eccitazione sismica (elevata per quelle di modesta entità, così da impedire continue vibrazioni, ad esempio sotto l'azione del vento);
- rigidità e smorzamento poco sensibili agli effetti dell'invecchiamento e alle variazioni di temperatura.

L'isolamento è una tecnica di agevole applicazione nel caso di nuove costruzioni, dato che la sovrastruttura resta in campo elastico, ma può essere utilizzato anche per l'adeguamento sismico di strutture esistenti.

Merita particolare attenzione la corretta realizzazione:

- dei “giunti strutturali” (gap) fra la sovrastruttura isolata e la sottostruttura od il terreno circostante (ovvero fra due sovrastrutture adiacenti isolate indipendentemente l’una dall’altra), cioè di quegli spazi che sono necessari a garantire il libero movimento della sovrastruttura almeno fino allo spostamento corrispondente al cosiddetto Stato Limite di Collasso;
- dei cosiddetti elementi di interfaccia, cioè di quei componenti e di quelle strutture che attraversano, orizzontalmente o verticalmente, il gap: passerelle d’accesso, coperture dei gap stessi, scale, ascensori, tubazioni di vario tipo, cavi, ecc.

Un metodo di progettazione dell’isolamento sismico potrebbe essere quello di tarare gli isolatori in modo che il periodo proprio della struttura isolata sia almeno uguale al cosiddetto *corner period*, ovvero il periodo spettrale che nelle norme è solitamente indicato con TD. Al di sopra di TD si ottengono solo benefici in quanto si riducono le accelerazioni ma non si aumentano gli spostamenti. Ovviamente non è opportuno progettare strutture con periodo troppo grande perché:

- si otterrebbero delle accelerazioni e quindi dei tagli sismici talmente modesti che l’azione sismica non sarebbe più dimensionante per le sottostrutture, ma lo sarebbero altre azioni per esempio il vento;
- nella maggior parte dei casi aumentare la flessibilità degli isolatori comporta un costo maggiore che non porterebbe, nei casi limite, alcun vantaggio per le sottostrutture;
- la struttura offrirebbe scarsa rigidità alle altre azioni orizzontali, ad esempio il frenamento e la forza centrifuga nei ponti;
- la struttura potrebbe diventare sensibile ai fenomeni dinamici dovuti al vento.

1.2 Cenni storici

Le prime applicazioni del concetto di isolamento sismico risalgono alle antiche civiltà presenti in Cina, Grecia, Perù ed Italia. Il concetto di far scorrere la struttura rispetto al terreno veniva messo in pratica disponendo in fondazione strati di materiale di vario genere, come carbone, velli di lana, o sabbia.

É del 1870 il primo documento che certifica l'idea di disaccoppiamento del moto della struttura, grazie agli studi del francese Jules Touaillon che prevedeva l'uso di sfere portanti poste tra la base della sovrastruttura e la fondazione.

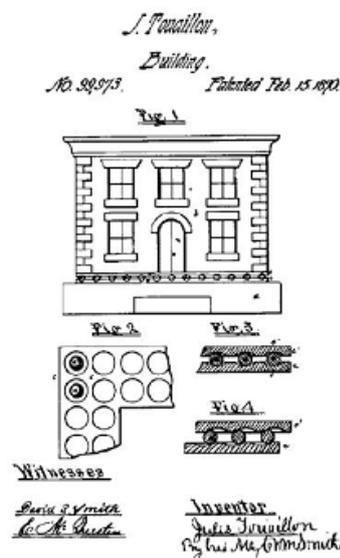


Figura 2 Primi esempi di isolamento sismico

Il documento è datato 15 febbraio 1870, ma in realtà questo sistema non fu mai applicato, se non 130 anni dopo, cioè nel 2001 grazie agli studi di Hyakuda che portarono alla realizzazione del sistema noto come Doppio Pendolo Concavo ad Attrito (Double Concave Friction Pendulum – DCFP).

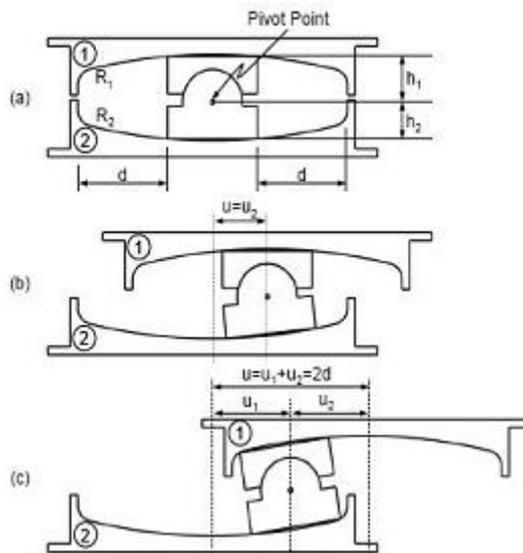
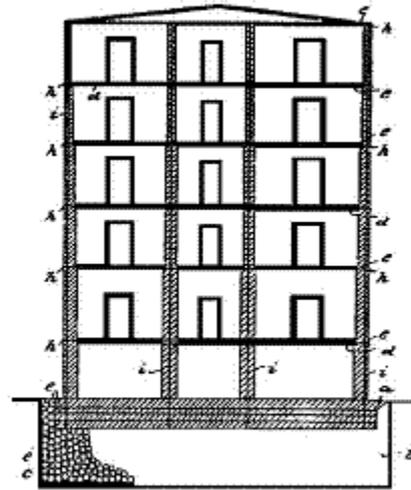


Figura 3 Esempio di Friction Pendulum

Nel 1891 arrivò un'altra proposta da parte di K. Kawai, il quale proponeva l'inserimento di strati alternati di calcestruzzo e tronchi di legno posti sotto la struttura, riprendendo le idee utilizzate dalle civiltà antiche.

Nel 1906, invece, Jakob Bechtold suggeriva di creare un cuscino di sfere metalliche che facesse da strato isolante per la struttura, riprendendo il concetto di Jules Touaillon.

FIG. 1.



Constructors:
E. H. Liebbrand
W. Reynolds

Inventor:
J. Beckett
J. E. G. M. M. M.

Figura 4 Isolamento con sfere metalliche

Un vero progetto dettagliato e con tanto di particolari costruttivi arriva nel 1909 da parte di un medico inglese, tale J. A. Calantarients, che propose la costruzione di un edificio su uno strato di sabbia fine e talco in modo tale che la struttura potesse scorrere in caso di sisma. Il progetto prevedeva anche l'ideazione di ingegnose connessioni per le reti di gas e fognatura, in modo da evitare danneggiamenti dovuti ai grandi spostamenti.

DE CALVIARRENTS METHOD OF BUILDING STRUCTURES AND APPURTENANCES
 — TO RESIST THE ACTION OF EARTHQUAKES AND HIGH WINDS —

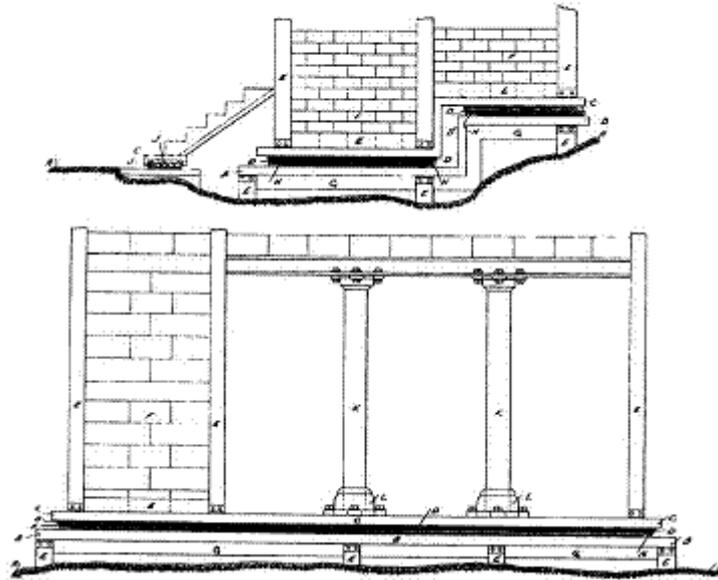


Figura 5 Isolamento sismico con sabbia e talco

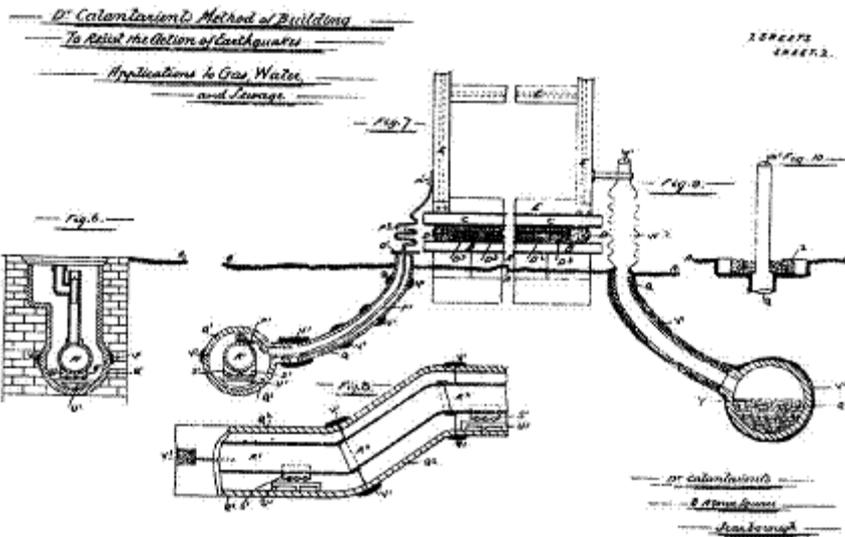


Figura 6 Sistema di prevenzione rotture tubazioni

1.3 Isolamento d'interpiano

L'isolamento alla base però non è l'unico sistema possibile, infatti sta nascendo un nuovo metodo di isolamento, l'isolamento di interpiano. Tale tipologia di isolamento prevede l'inserimento di isolatori posti tra la base e i vari livelli dell'edificio stesso.

Risulta infatti relativamente semplice l'installazione di questo tipo di isolamento, soprattutto negli edifici esistenti, perché evita il taglio delle fondazioni e dunque lavori di messa in sicurezza dell'opera. Si può infatti mantenere in operabilità l'edificio mentre si effettua tale modifica.

Il sistema d'isolamento di interpiano rispetto a quello di base presenta delle sostanziali differenze.

L'isolamento alla base non può essere applicato ad edifici di medie-grandi altezze a causa del cambiamento del primo modo di vibrare e dell'allungamento del periodo proprio di vibrazione, con conseguente aumento della flessibilità. Infatti tale isolamento presenta un buon funzionamento quando è il primo modo di vibrare a essere dominante tralasciando i successivi, cosa che non può essere fatta se l'edificio aumenta di dimensioni.

Si decide quindi di implementare un sistema più sofisticato che si sviluppa verticalmente e che permette di isolare l'edificio. Tale sistema è passivo ma può anche essere collegato ad uno attivo che presenta costi non sostenibili per edifici di media altezza.

Essendo gli edifici in questione medio-alti si ha che la forza di taglio che si sviluppa alla base, e conseguentemente il momento, sono dati principalmente dalla massa posta in sommità della struttura. Anche per questo si sta sviluppando perciò un sistema di isolamento parziale PMI (Partial Mass Isolation).

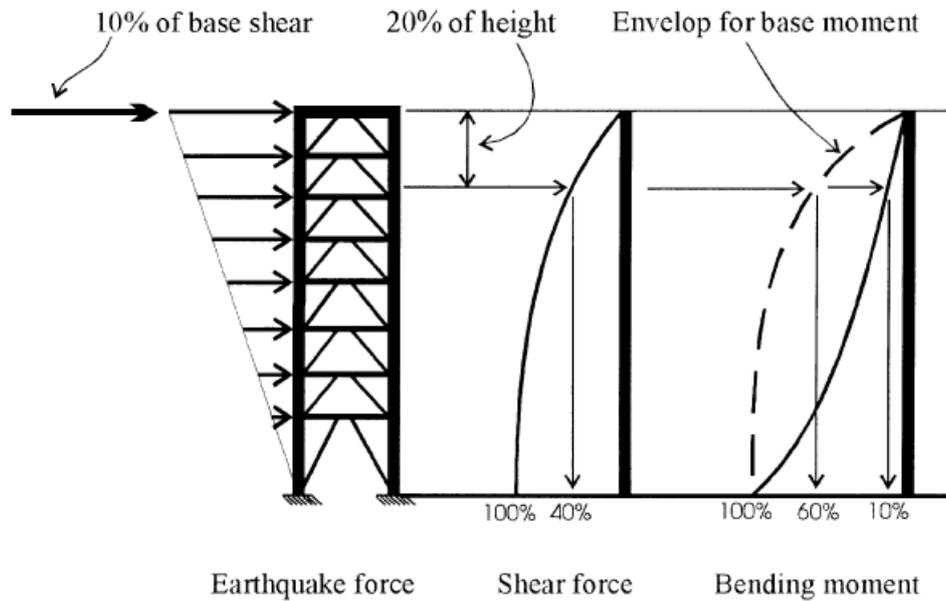


Figura 7 Momento e taglio alla base dell'edificio

1.3.1 Differenze tra i due sistemi di isolamento

- **Sistema ad un grado di libertà contro sistema a molti gradi di libertà**

L'isolamento di base può sfruttare un sistema ad un grado di libertà ma non il PMI dovuto al fatto che la flessibilità, e quindi il predominare del primo modo di vibrare, si ha solo dove è presente l'isolamento. La restante massa non può trascurare i modi di vibrare superiori al primo. Il PMI perciò non fa altro che cambiare il numero di gradi di libertà ma non può essere assimilato ad un unico sistema ad un grado di libertà.

- **Energia sismica**

In un sistema ad un solo grado di libertà l'inserimento dell'isolamento comporta uno spostamento del periodo proprio della struttura verso una zona di minore intensità dello spettro sismico. Tale spostamento conduce ad avere forze minori e minor energia in ingresso. La stessa situazione è applicabile ai sistemi a base isolata perché concentrano la massa quasi tutta nel primo modo di vibrare.

Anche l'isolamento parziale sposta il primo modo di vibrare in una zona dove l'energia sismica è inferiore, ma avendo una serie di modi superiori di vibrare elevata e avendo una quantità di massa partecipante al primo modo di vibrare piccola, non si ha un sostanziale cambiamento nella struttura. Per questo motivo

vengono sempre associati dissipatori viscosi al sistema che prendono la maggior parte dell'energia lasciandone passare solamente una minima parte alla struttura.

- **Requisiti di smorzamento**

Uno strato di isolamento flessibile con un rapporto di smorzamento basso risulta essere il meccanismo più efficiente per un sistema ad un grado di libertà. Stessa considerazione viene fatta per l'isolamento alla base.

Dunque avere un rapporto di smorzamento elevato conduce solamente ad avere un valore di forze maggiore che arriva all'edificio. Lo smorzamento, perciò, in questi sistemi serve solamente per prevenire la possibilità di risonanza data dalle vibrazioni ambientali.

L'isolamento parziale, invece, può ricevere un'energia maggiore persino di una struttura non isolata ed è per questo quindi che deve essere dissipata attraverso un sistema di smorzamento efficace. I vari modi di vibrare presentano grandi spostamenti connessi a grandi velocità che possono essere sfruttate da sistemi di smorzamento viscosi per ridurre l'energia sismica in ingresso.

- **Versatilità di progettazione**

A differenza dell'isolamento alla base, l'isolamento parziale permette al progettista di modificare, aggiustare il suo progetto per ottenere il risultato ottimale. A seconda dell'altezza in cui viene posto si modificano gli aspetti dell'opera, inoltre se il sistema è attivo anziché solamente passivo si ottengono risultati ancora migliori.

Quindi l'isolamento d'interpiano permette schemi strutturali che prima non era fattibili, incrementando la libertà nello schema architettonico. Grazie a questo è possibile adottare colonne snelle che portano a terra solamente il carico verticale. Inoltre la risposta sismica della parte bassa della struttura si riduce a seconda però del rapporto tra le masse della sovrastruttura e della sottostruttura.

Foundation base isolation structure

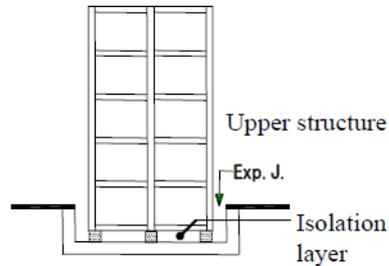


Figura 8 Isolamento alla base

- È possibile ridurre l'energia sismica nella sovrastruttura e quindi si ha una libertà di progettazione diversa;
- Necessita di un gap strutturale attorno all'edificio;
- La sovrastruttura deve avere una forma che rimane circa sempre la stessa.

Generally adopted middle-story isolated structure

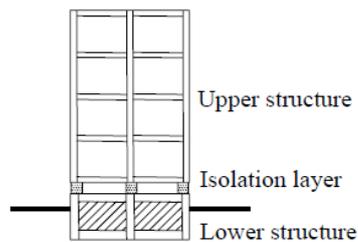


Figura 9 Isolamento d'interpiano

- Lo strato di isolamento intermedio comporta una forza sismica minore e una libertà di schema architettonico maggiore;
- La sottostruttura deve provvedere alle stesse funzioni di una fondazione quindi presenta solitamente pareti a taglio in calcestruzzo.

Middle-story isolated structure with untuned mass damper effect

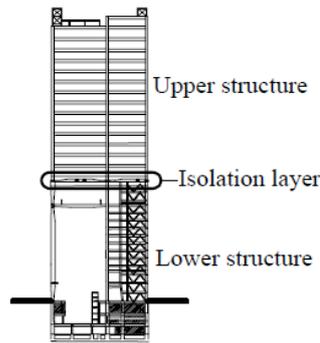


Figura 10 Isolamento d'interpiano con TMD

- Grande resistenza sismica della sovrastruttura e libertà di scelta architettonica;
- Grazie allo smorzamento anche la sottostruttura riceve meno forza sismica e ha una maggiore libertà di progettazione. (Tsuneki, Torii, Murakami, & Sueoka, 2008)

Andare ad isolare un numero di piani superiori a 10 in modo parziale risulta tecnicamente difficile, per questo lo si applica ad edifici medio alti. Una soluzione è associare un sistema che riduca l'ampiezza di vibrazione del primo modo di vibrare.

Utilizzare un sistema di smorzamento viscoso lineare limita il rapporto di smorzamento. Per superare tale limite si utilizza uno smorzamento non lineare che deve dare un rapporto di smorzamento basso nei modi di vibrare superiori e uno smorzamento elevato nel primo modo di vibrare, essendo la velocità bassa, così da ridurre le forze che arrivano alla struttura. (ZIYAEIFAR & NOGUCHI, 1998)

L'isolamento d'interpiano sfrutta anche i TMD (Tuned Mass Damper) e l'ASI (Added Stories Isolation).

I TMD sono costituiti da una massa collegata alla struttura attraverso un sistema di molle ed uno smorzatore viscoso e sono posti preferibilmente in un punto della struttura dove le oscillazioni sono maggiori. Il TMD si basa sul principio che, quando si è in risonanza, le vibrazioni di un sistema meccanico poco smorzato possano essere ridotte mediante l'aggiunta di una piccola massa che è accordata ad una frequenza all'incirca pari a quella del sistema principale. Il sistema agisce in contro fase diminuendo l'ampiezza dell'oscillazione. Tale sistema è utilizzato soprattutto per edifici molto alti, soggetti non solo ad azione sismica ma anche a quella del vento.

Tale sistema trova i primi sviluppi già nel 1970 in edifici alti e torri per mitigare l'azione del vento. Recenti applicazioni si hanno nel Millenium Bridge di Londra o nel Solferino Bridge di Parigi. Dalle prime analisi si individuano tre possibili limitazioni nell'utilizzo di tale sistema:

1. Mancanza di robustezza;
2. Elevata dipendenza dalla frequenza del terremoto;
3. Carattere impulsivo dell'eccitazione sismica.

Per evitare questi problemi si sono sviluppati sistemi di TMD non convenzionali che sfruttano la massa stessa dell'edificio e la convertono in una massa in frequenza. Sistemi di questo tipo possono essere dati da giardini pensili, sistemi di tetti scorrevoli che vengono posizionati in copertura e isolati da questa. Nei sistemi convenzionali la massa che partecipa è solamente una piccola percentuale della struttura, con questo metodo invece la percentuale di massa sale fino anche al 50% della massa complessiva.

La procedura di ottimizzazione del sistema riguarda la massimizzazione del rapporto tra l'energia di ingresso del sisma e l'energia dissipata dal sistema di isolamento.

Avere un rapporto di massa molto elevato permette di avere una robustezza maggiore, una dipendenza minore dalla frequenza sismica e quindi un effettivo miglioramento in termini di dissipazione. (REGGIO & DE ANGELIS, 2015) (DE ANGELIS, PERNO, & REGGIO, 2012)

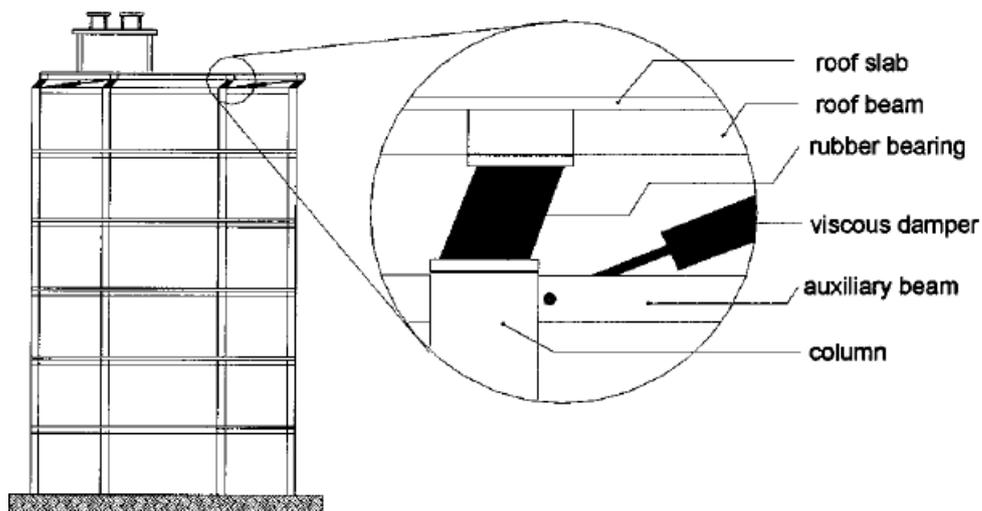


Figura 11 Esempio di TMD

L'ASI sfrutta sempre il concetto del TMD ma va ad inserire questa volta una serie di piani ulteriori rispetto a quelli esistenti. Questo a causa della mancanza di terreni per potersi espandere, e alla necessità di adeguare sismicamente gli edifici esistenti.

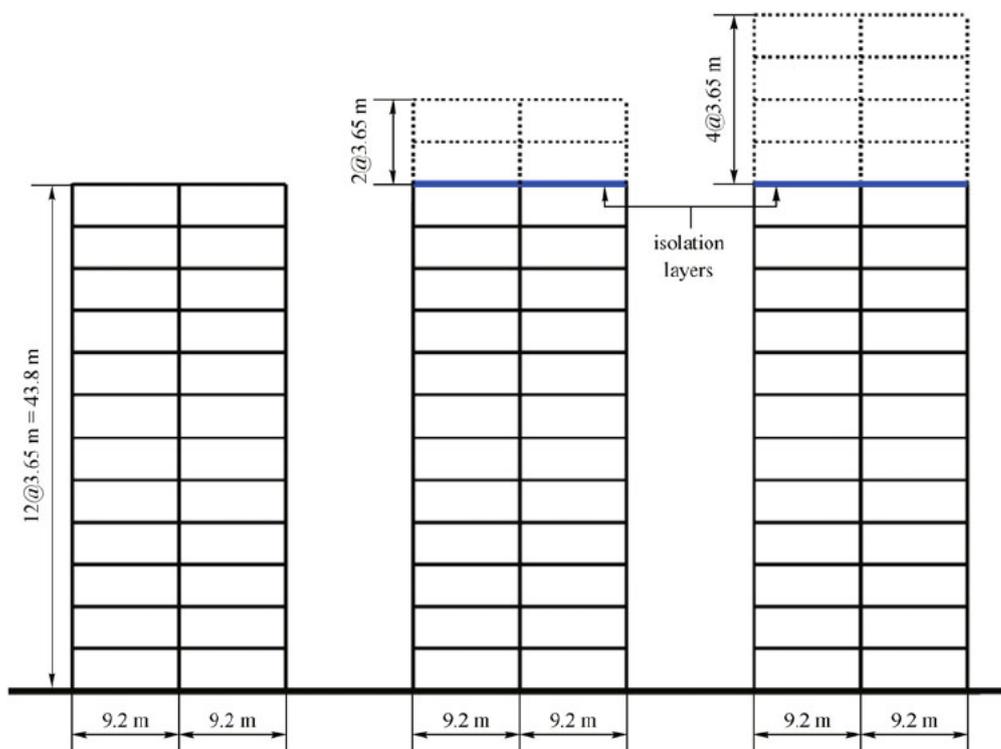


Figura 12 Esempio di ASI

Tali livelli aggiuntivi vengono separati dall'esistente tramite una serie di isolatori. L'unione dei piani con gli isolatori permette di dissipare l'energia del sisma quando questa colpisce la struttura.

L'aumentare del numero di piani permette di controllare meglio il periodo fondamentale di vibrazione della struttura grazie alla dissipazione di questa massa aggiuntiva in sommità dell'edificio. L'ASI può quindi diventare un sistema fattibile e efficace nello sviluppo e sistemazione di edifici. (CHEY, CHASE, MANDER, & CARR, 2013)

Tale tipologia di isolamento è connessa soprattutto alla duttilità che presenta. Alcuni studi hanno dimostrato la correlazione esistente tra duttilità e effetto dell'isolamento. Si ha infatti che la risposta sismica della parte di edificio posta al di sopra dell'isolamento si riduce all'aumentare della duttilità di tale zona. (SHIRAYAMA, et al., 2004)

1.4 Near fault ground motions e far fault ground motions

Gli edifici che subiscono un sisma possono essere divisi in base alla loro posizione rispetto alla faglia. Si ha quindi un'azione sismica divisa in:

- near fault ground motions;
- far fault ground motions.

Il movimento del terreno, che subisce un edificio vicino alla faglia sismica, risulta diverso perché tale onda ha uno o più impulsi di spostamento all'inizio del sismogramma, che hanno una velocità di picco e una durata compatibile con il periodo delle strutture isolate e con la velocità dell'onda di taglio.

Il near fault ground motions presenta due aspetti fondamentali che vanno ad intaccare le strutture isolate. Il primo è la presenza di un periodo spettrale normale più lungo rispetto a quello parallelo. Questi due moti sono inoltre slegati tra loro quindi non possono essere sommati vettorialmente. Il secondo aspetto riguarda la durata delle pulsazioni che, essendo molto lunghe, vanno ad influenzare lo spostamento degli isolatori rendendolo molto grande.

Tale onda può essere di tipo A, ovvero è un'onda che procede solamente in avanti, quindi non reversibile, o di tipo B, ovvero procede sia in avanti che indietro con una velocità che somiglia a un moto armonico di lungo periodo. (MAKRIS, 1997) (FATHI, MAKHDOUMI, & PARVI, 2014)

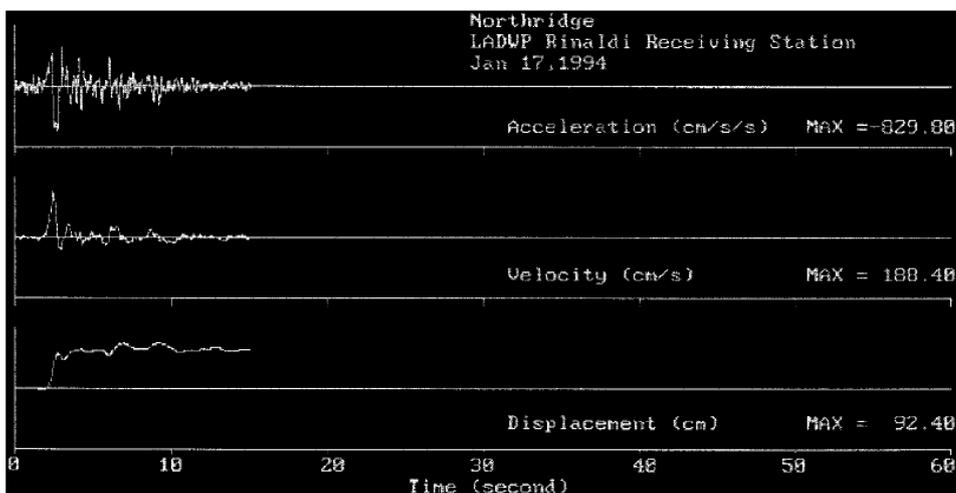


Figura 13 Onda di tipo A

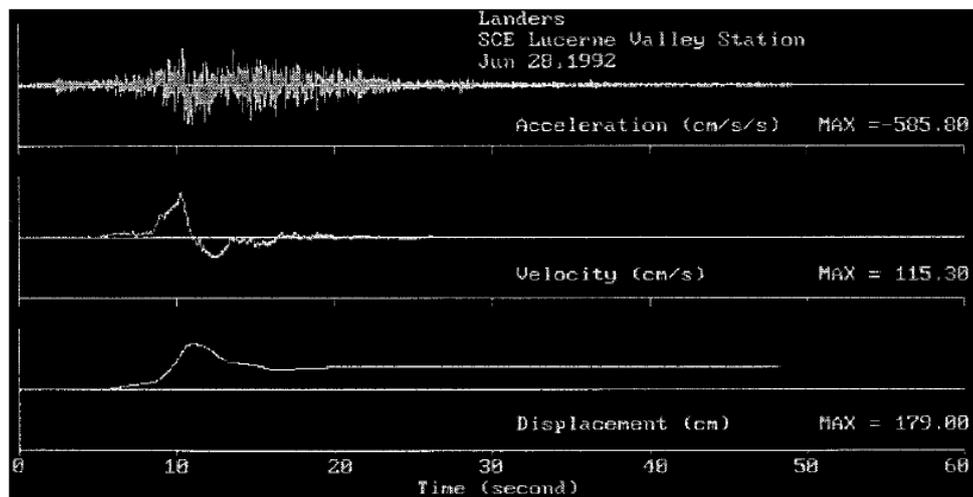


Figura 14 Onda di tipo B

Per ridurre lo spostamento ed evitare la rottura o l'instabilità dello stesso, si può pensare di utilizzare isolatori molto più grandi ma questo diventa antieconomico, quindi si va ad utilizzare un sistema di smorzamento.

1.5 Smorzamento

Per ridurre lo spostamento provocato dal sisma ma soprattutto da quei particolari moti quali sono i near fault ground motions, si decide di utilizzare sistemi di smorzamento. Tali sistemi possono essere attivi, passivi o semiattivi.

L'accoppiamento tra isolatori e smorzatori diventa efficace soprattutto nel caso dell'isolamento d'interpiano perché permette di ridurre l'effetto $P-\Delta$ dovuto allo spostamento tra la sovrastruttura e la sottostruttura.

Alcuni autori hanno trattato il tema dello smorzamento supplementare proponendo tesi contrastanti. Kelly affermava, tramite un'analisi lineare su un sistema a due gradi di libertà isolato alla base, che comportava solamente un aumento di accelerazione e spostamento d'interpiano dovuto all'eccitazione dei modi superiori di vibrare. Viceversa Hall, dopo aver effettuato un'analisi temporale sempre di un sistema a due gradi di libertà, ha dimostrato la riduzione sia della domanda di spostamento degli isolatori che dello spostamento d'interpiano.

La dissipazione di energia di questi meccanismi pertanto può essere generata da sistemi viscosi oppure da cicli isteretici. Lo smorzamento porta però degli effetti non favorevoli:

- uno smorzamento lineare elevato può comportare forze e accelerazioni maggiori rispetto ad uno smorzamento più piccolo;
- lo smorzamento isteretico è meno efficiente rispetto a quello lineare perché porta accelerazioni maggiori dovute alla presenza di modi superiori di vibrare.

L'inserimento dello smorzamento con valori molto elevati per contrastare gli alti spostamenti degli isolatori conduce a spostamenti d'interpiano e accelerazioni della sovrastruttura più grandi di quelle che si avrebbero senza l'isolamento antisismico. Tutto ciò appare quindi un controsenso all'azione che realmente dovrebbe essere svolta dall'isolamento.

Si sono studiate delle possibili alternative in sostituzione allo smorzamento viscoso classico, una di queste è quella proposta da Makris (MAKRIS, 1997) che riguarda lo smorzatore elettroreologico. Tale smorzatore presenta il vantaggio di poter funzionare come sistema passivo nel caso di mancanza di elettricità e genera forze elevate pur essendo compatto.

Quando l'elettricità entra in gioco, trasformando il dissipatore in un sistema attivo e non più passivo, si ha un comportamento viscoplastico che comporta una dissipazione maggiore di forza pur mantenendo lo stesso spostamento.

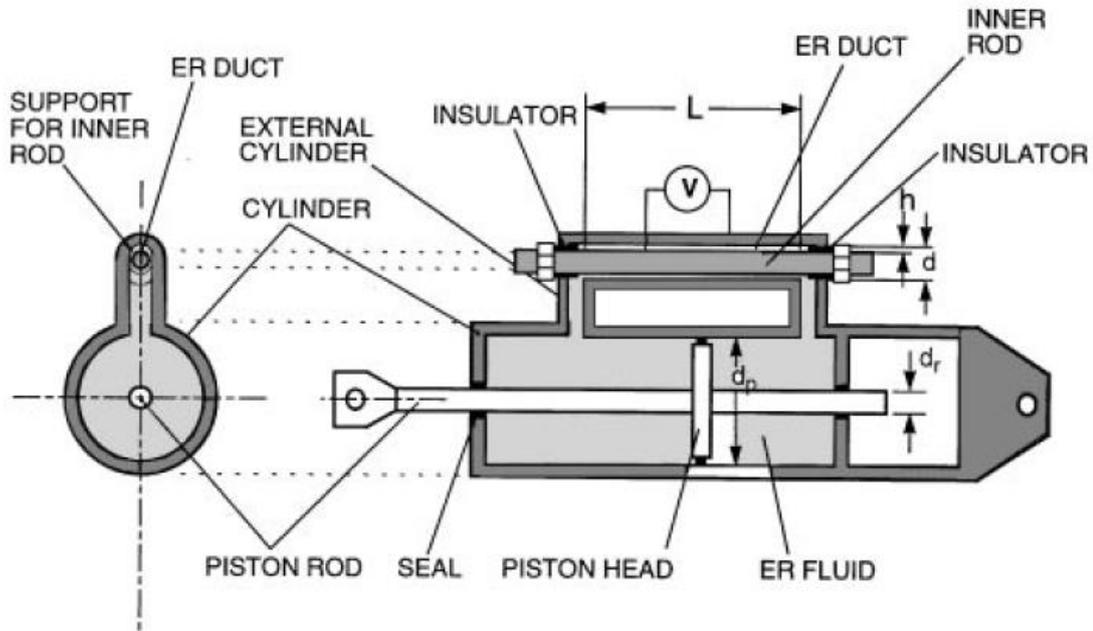


Figura 15 Smorzatore elettroeologico

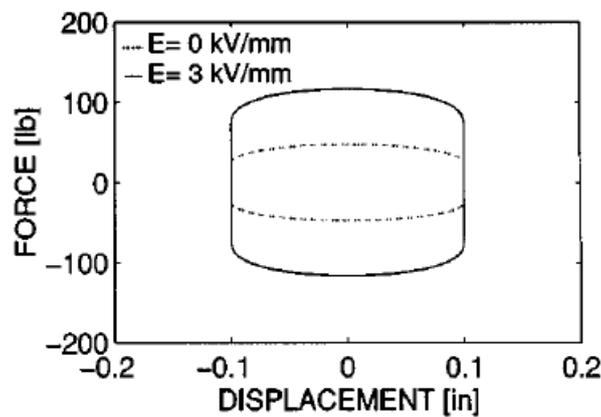


Figura 16 Grafico forza spostamento

Tale dispositivo non è così diffuso però a causa del costo elevato, inoltre la mancanza di conoscenza da parte dei paesi, la continua manutenzione e la richiesta costante di energia non aiutano il suo sviluppo.

Mettendo a confronto l'isolamento applicato ad un caso di near fault ground motions (NF) e ad uno di far fault ground motions (FF) si notano alcune differenze. Si ha infatti un aumento dello spostamento d'interpiano e dell'accelerazione nei siti sottoposti a FF

quando si applica uno smorzamento aggiuntivo. Maggiore è lo smorzamento inserito maggiore risulta l'accelerazione e lo spostamento.

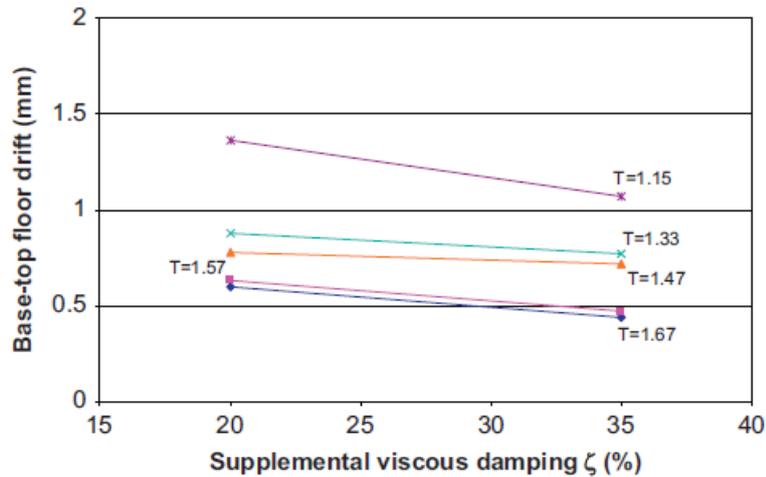


Figura 17 Diminuzione spostamento per sismi NF

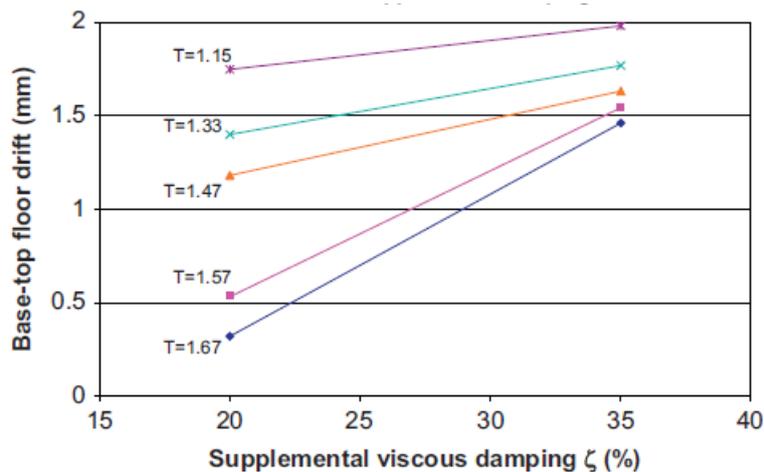


Figura 18 Aumento spostamento per sismi FF

Otteniamo perciò che l'inserimento di uno smorzamento supplementare comporta:

- aumento dello spostamento d'interpiano in zone soggette a FF;
- aumento dell'accelerazione di piano nelle zone soggette a FF e una diminuzione in quelle dove agisce NF;
- per evitare tale problema di spostamento si deve controllare lo smorzamento entro un certo intervallo. (PROVIDAKIS, 2009)

Lo smorzamento quindi può essere sia lineare che non lineare. La decisione di usare l'uno piuttosto che l'altro comporta delle differenze nei risultati.

Il non lineare dissipa un'energia maggiore per ciclo a parità di forza di smorzamento e ampiezza dello spostamento, limitando la trasmissione della forza di smorzamento a velocità elevata al di sopra del limite di progetto. Il lineare, invece, permette di contenere la forza totale al massimo spostamento dove idealmente lo smorzamento è nullo.

Così come per gli isolatori, anche gli smorzatori devono essere posizionati in un punto di ottimo lungo l'altezza dell'edificio se si vuole ridurre in modo efficace l'azione sismica.

2. ALGORITMI EVOLUTIVI E OTTIMIZZAZIONE MULTIOBIETTIVO

Esistono nel mondo vari tipi di problemi, uno di questi riguarda la ricerca di una soluzione che soddisfi contemporaneamente diversi obiettivi. In questo caso si sta parlando di un problema Multiobiettivo, che permette di trovare una soluzione che sia ottimale per tutte le funzioni obiettivo presenti.

La soluzione che si va a trovare non è mai unica, ma bensì si ha un set di possibili valori ottimali per il problema. Si lascia perciò la scelta al Decision Maker di individuare quale sia la più adatta tra le varie trovate all'interno dell'insieme di Pareto ottimale. Per andare a risolvere tale tipo di problema ci si affida a degli strumenti quali sono gli Algoritmi Evolutivi. Tra questi algoritmi possiamo distinguere:

- Algoritmi Genetici;
- Strategie Evolutive;
- Evolutionary Programming.

Gli algoritmi genetici sono ispirati al principio di selezione naturale proposto da Charles Darwin nel 1895. Il loro scopo è quello di trovare una soluzione ottimale di un dato problema, sfruttando le meccaniche che governano l'evoluzione biologica. Si parte da una popolazione iniziale di individui, chiamati cromosomi, che sono una possibile soluzione del problema. Tali individui sono i così detti geni della popolazione. Come nella teoria di Darwin, anche qui la popolazione si adatta migliorandosi al fine di trovare una soluzione al problema dato.

Tale tipo di algoritmo si basa su tre operatori che agiscono sulla popolazione:

- Riproduzione selettiva degli elementi migliori;
- Ricombinazione genetica(Crossover);
- Mutazione casuale dei cromosomi.

Solamente gli individui con un certo valore potranno passare alla generazione successiva trasferendo il loro contributo genetico.

2.1 Problema di Ottimizzazione Multiobiettivo

Un problema di ottimizzazione multiobiettivo, ad differenza di uno singolo, presenta una difficoltà nella scelta della soluzione ottimale che come abbiamo detto viene lasciata al Decision Maker. L'insieme delle soluzioni possibili che si vanno a trovare, non è del tutto ordinato a differenza di quello ad un solo obiettivo.

Dati due vettori obiettivo a e b si può verificare che:

$$a = b \text{ se } \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} : a_i = b_i$$

$$a \geq b \text{ se } \forall i \in \{1, 2, \dots, k\} : a_i \geq b_i$$

$$a > b \text{ se } a \geq b \wedge a \neq b$$

Questi due vettori a e b possono avere tre possibilità all'interno del problema:

$$a > b \text{ (} a \text{ domina } b \text{)} \qquad \text{se } f(a) > f(b)$$

$$a \geq b \text{ (} a \text{ domina debolmente } b \text{)} \qquad \text{se } f(a) \geq f(b)$$

$$a \sim b \text{ (} a \text{ è indifferente a } b \text{)} \qquad \text{se } f(a) \not\geq f(b) \text{ e } f(b) \not\geq f(a)$$

Una volta definito questo concetto si può introdurre la definizione di Pareto Ottimalità ovvero:

un vettore decisione $x \in X_f$ si dice non dominato rispetto all'insieme $A \subseteq X_f$ se:

$$\nexists y \in A : y \text{ domina } x$$

Inoltre, x si dice Pareto Ottimale se x è non dominato rispetto ad X_f . L'insieme di tutte le soluzioni ottimali prende il nome di Insieme di Pareto Ottimale.

La distribuzione di Pareto è una legge di probabilità che viene sfruttata nel caso in esame per determinare i valori ottimali necessari a scegliere i parametri dello smorzatore. Una soluzione è detta Pareto ottimale se non esiste alcun vettore tale per cui l'incremento di un parametro è legato dal decremento di un altro parametro.

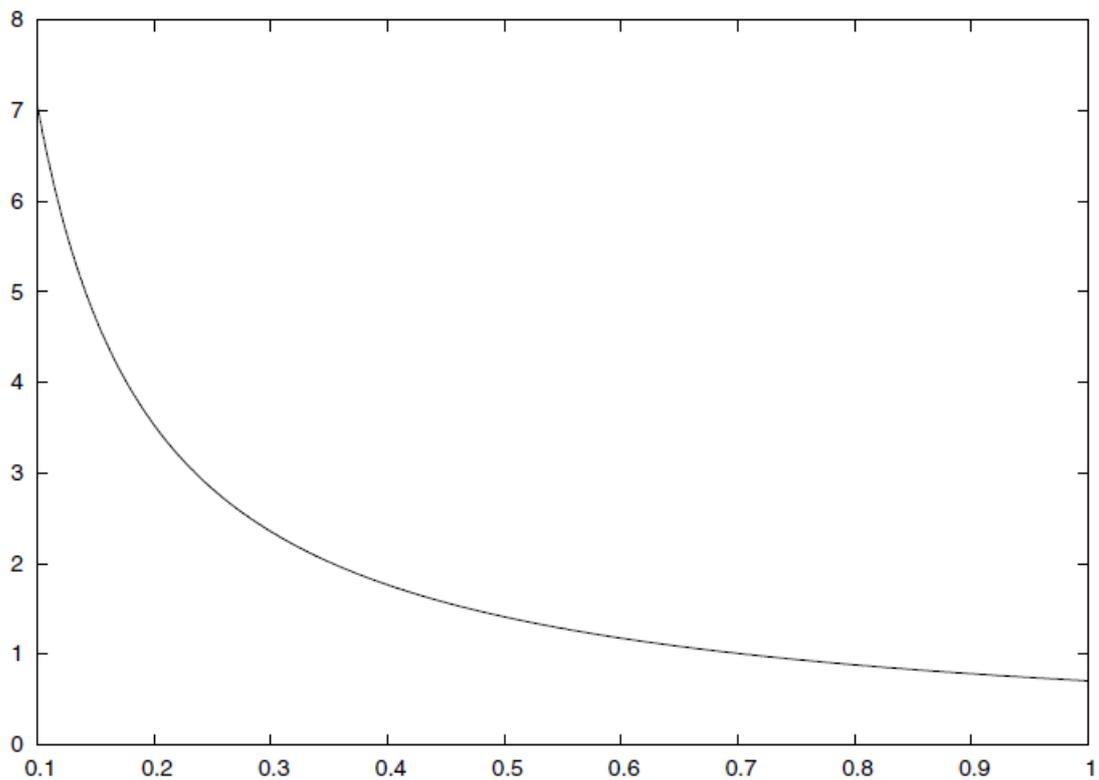


Figura 19 Pareto Front

Ad ogni generazione del MOEAs (multiobjective optimization evolutionary algorithms) un set di soluzioni di Pareto viene generato e prende il nome di Pcorrente. Si continua con le iterazioni fino a che non si raggiunge una stabilità nelle soluzioni. Molti MOEAs utilizzano però anche una seconda popolazione che prende il nome di Pconosciuta. La popolazione che definisce il vero set di Pareto è detta Pvera.

Quindi un problema Multiobiettivo include un insieme di n parametri (variabili decisione), un insieme di k funzioni obiettivo, ed un insieme di vincoli. Le funzioni obiettivo ed i vincoli sono funzioni delle variabili decisione.

Gli obiettivi dell'ottimizzazione sono:

$$\text{massimizzare o minimizzare } y = f(x) = (f_1(x), f_2(x) \dots f_k(x))$$

$$\text{soggetto a} \quad e = (e_1(x), e_2(x) \dots e_m(x))$$

$$\text{dove} \quad x = (x_1, x_2 \dots x_n) \in X \text{ e } y = (y_1, y_2 \dots y_k) \in Y$$

Dove x è il vettore decisione, y è il vettore obiettivo, X è lo spazio decisione, ed Y è chiamato spazio obiettivo. I vincoli $e(x) \leq 0$ determinano l'insieme delle soluzioni ammissibili.

Il problema di ottimizzazione multiobiettivo può essere definito anche come la ricerca di un vettore di variabili decisionali che soddisfano i vincoli e ottimizzano un vettore di funzione i cui elementi rappresentano le funzioni obiettivo.

Le variabili decisionali sono quantità numeriche i cui valori devono essere scelti nella risoluzione del problema di ottimizzazione. Queste quantità vengono rappresentate come x_j con j che varia da 1 a n . Il vettore x di queste variabili è pari a:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{bmatrix}$$

I vincoli imposti nel problema sono dati dalle circostanze esterne e dalla tipologia di problema che deve essere risolta.

Lo scopo perciò di questi problemi è quello di ottimizzare simultaneamente n funzioni obiettivo. Queste funzioni possono essere minimizzate, massimizzate oppure può esserci una combinazione di massimizzazione e minimizzazione.

2.2 Algoritmi genetici

Gli algoritmi genetici sono stati studiati per la prima volta da Holland nel 1975. Come detto è un metodo per la ricerca dell'ottimizzazione del problema, esso interviene modificando la popolazione esistente, scegliendo in modo casuale vari individui che andranno a costituire una popolazione nuova per l'iterazione successiva. Solamente gli individui con le qualità più adatte hanno modo di sopravvivere e riprodursi.

Le fasi dell'algoritmo possono essere così elencate:

- viene generata una popolazione iniziale in modo casuale;

- vengono create in sequenza nuove popolazioni e in ciascuna iterazione gli individui della popolazione corrente sono usati per generare quella successiva compiendo diversi passi quali:
 - ciascun membro è valutato tramite il valore di fitness;
 - si ordinano gli individui secondo tale valore di fitness;
 - gli individui migliori sono scelti come genitori;
 - da questi individui si dà vita alla generazione successiva che ha uno stesso numero di individui. Lo si può fare in due modi o effettuando cambiamenti casuali su un genitore tramite la mutazione, oppure combinando le caratteristiche della coppia di genitori tramite l'incrocio;
 - Questi nuovi individui sostituiscono i precedenti formando la nuova popolazione;
 - L'algoritmo si ferma quando soddisfatto.

Uno schema prolifera più rapidamente se oltre ad avere alti valori di fitness si ha anche una distanza minima tra i vari geni presenti.

Esistono diversi tipi di algoritmi che permettono di risolvere il problema e sono:

- Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) ;
- Nondominated Sorted Genetic Algorithm (NSGA);
- Niche Pareto Genetic Algorithm (NPGA);
- Pareto Archived Evolution Strategy (PAES);
- Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA);
- Multiobjective Messy Genetic Algorithm (MOMGA);
- Pareto Envelope-based Selection Algorithm (PESA);
- Micro Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization (MGAMO);
- Multiobjective Struggle GA (MOSGA);
- Orthogonal Multi-Objective Evolutionary Algorithm (OMOE);
- General Multi-Objective Evolutionary Algorithm (GENMOP).

2.3 Nsga II

Nello studio dell'isolamento d'interpiano si è detto che molto spesso gli isolatori vengono messi in parallelo con dispositivi di smorzamento. Tali dispositivi entrano in gioco per diminuire gli spostamenti del piano isolato.

Il dispositivo di smorzamento prevede alcuni parametri che devono essere scelti per rendere tale accoppiamento ottimale. Si cerca la minimizzazione dello spostamento del piano isolato ma non solo, si vuole anche una minimizzazione dello spostamento totale d'interpiano e dell'accelerazione di piano della sovrastruttura.

Per ottenere questo risultato si ricerca un set di soluzioni ottimali di Pareto attraverso un algoritmo genetico chiamato Non-dominated Sorting Genetic Algorithm NSGA-II. Tale algoritmo permette di trovare un set di soluzioni ottimali anziché un'unica soluzione.

L'NSGA-II è un algoritmo proposto da Kalyanmoy Deb nel 2000. Questo algoritmo è la versione successiva dell'NSGA realizzato da Srinivas e Deb nel 1994. Questa prima versione presentava dei difetti quali:

- la complessità computazionale;
- la necessità di parametri specifici;
- mancanza di approccio elitistico.

Tale algoritmo andava a dividere la popolazione in base al criterio di non dominanza, ovvero tutti gli individui non dominati venivano classificati in gruppi, detti rank. Per mantenere la diversità venivano suddivisi in base al valore di fitness che assumevano. Definito il primo gruppo si passava al secondo e così via fino alla fine degli individui. Presenta perciò dei problemi che sono:

- elevata complessità computazionale $O(MN^3)$;
- mancanza di elitismo;
- uso del parametro σ share per mantenere la diversità nella popolazione, che però deve essere scelto.

All'interno dell'Nsga-II vengono effettuate diverse operazioni per giungere alla soluzione finale. Si riportano di seguito le varie fasi.

Non domination sorting

L'algoritmo opera un'operazione di suddivisione degli elementi in ranks, ponendoli in ordine seguendo il principio di non dominanza. Le migliori soluzioni non dominate sono quelle di rank 1. Una volta trovate le migliori, verranno lasciate da parte per ripetere l'operazione con gli altri elementi e andare a determinare la seconda rank, la terza e così via fino alla fine degli individui.

Per ogni soluzione vengono calcolate due entità:

- domination count: il numero di soluzioni che dominano una generica soluzione p ;
- S_p : un insieme di soluzioni dominate dalla soluzione p .

Le soluzioni del primo fronte non dominato avranno un domination count pari a 0. Poi per ogni soluzione p , verrà esaminata ogni soluzione q del suo insieme S_p , dove il domination count verrà fissato a 1. Se facendo questo il domination count, per ogni soluzione q , diventa 0, allora l'elemento q viene messo in una lista separata Q che determina il secondo fronte. Si ripete la procedura con i membri di Q e si determina il terzo fronte e così via, fino alla determinazione di tutti i ranks.

Crowding-distance

Per preservare la diversità tra le soluzioni dello stesso fronte non dominato, si utilizza la crowding-distance. Per definire tale distanza si devono prima definire un operatore, chiamato crowded-comparison, e una densità delle soluzioni.

Per stimare la densità delle soluzioni che circondano una determinata soluzione, si calcola la distanza media di due punti, giacenti su ciascun lato del punto analizzato, lungo ognuno degli obiettivi. Questa determina il perimetro del cuboide formato usando come vertici i punti più vicini alla nostra soluzione. Questa sarà la crowding-distance.

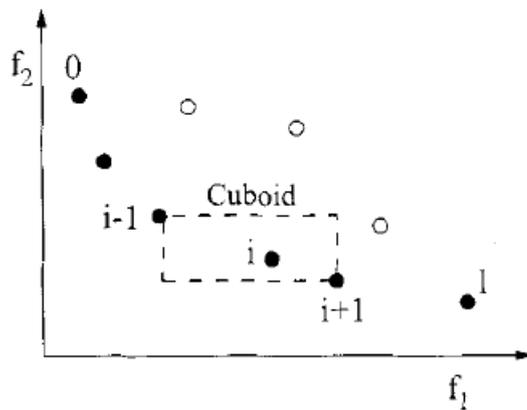


Figura 20 Crowding distance

Per calcolare questa distanza si richiede che le soluzioni vengano ordinate in modo crescente in base al valore che le soluzioni obiettivo assumono. Alle soluzioni di confine, cioè quelle con i valori di funzione più alto e più basso, viene dato un valore infinito, mentre per le altre viene dato un valore pari alla differenza dei valori delle funzioni di due soluzioni adiacenti.

Interviene poi il crowded-comparison che sceglie tra due soluzioni con rank diverso, quella con il valore più basso, mentre tra due soluzioni con lo stesso rank sceglie quella che presenta una crowding-distance maggiore, ovvero meno affollata.

Elitismo

L'elitismo è una strategia che permette di includere i migliori individui di una generazione, nella generazione successiva. L'Nsga-II è un algoritmo elitista perché si è certi che i cromosomi migliori di una generazione saranno presenti anche nella successiva. Per fare ciò si devono ordinare gli individui secondo il principio di non dominanza e si deve usare la crowding-distance.

Tournament selection

Nella tournament selection le soluzioni, scelte in modo casuale, si scontrano tra loro per decidere quale porterà avanti i suoi geni. Le gare avvengono con due o più elementi per volta, nel nostro caso sono due, e la vincente sarà colei che avrà maggior probabilità di riprodursi. La soluzione migliore verrà poi selezionata, ne verrà fatta una copia e sarà gettata nella mating pool dove verrà poi incrociata per dar vita alla generazione dei figli.

Tramite delle funzioni che determinano numeri casuali compresi tra 0 e 1, vengono generati due numeri che corrispondono a due individui della popolazione. Per scegliere il vincitore si mettono a confronto la rank e la distanza. Quello con la rank più bassa e distanza più alta verrà scelto. Si ripete tante volte quanto è la popolazione cosicché almeno una volta tutti possano parteciparvi.

Crossover

La creazione di nuovi individui viene effettuata grazie all'operazione di crossover. Esistono due possibili tipi di codifica, ovvero quella formata da numeri binari e quella formata da numeri reali. Nel caso la codifica sia binaria si hanno due possibili crossover:

- Crossover a punto singolo. Viene generato un numero casuale compreso tra 0 e 1 e viene confrontato con la probabilità pc scelta dall'utente. Se tale numero è minore parte l'operazione di scambio del materiale genetico altrimenti verranno ricopiati esattamente in modo uguale gli individui di partenza.
Dalla coppia di genitori verranno generati i due figli che avranno una parte del cromosoma del primo e una parte del secondo.
- Crossover uniforme. Anche in questo caso si genera un numero random e lo si confronta con la probabilità, solamente che se è minore allora i figli avranno i geni del secondo genitore, se è maggiore si ricopieranno uguali i genitori.

Nel caso si usino numeri reali si sfrutta l'SBX operator (Simulated Binary Crossover), che simula l'effetto del crossover a punto singolo. Anche in questo caso si parte dai genitori e si creano dei figli che abbiano una parte dei geni di un genitore e una parte dell'altro.

Mutazione

La mutazione permette di modificare la stringa binaria che rappresenta la nuova popolazione per dare ancora più variabilità. Nel caso la codifica sia binaria si genera un numero random tra 0 e 1, e se è minore della probabilità della mutazione, va a modificare i valori della stringa cambiando lo 0 in 1 e viceversa.

Se le variabili sono reali si sfrutta la mutazione polinomiale.

La forma dell'algoritmo risulta essere perciò:

1. Inizializzare la popolazione;

2. Generare la popolazione in modalità random - grandezza d ;
3. Valutare le Funzioni Obiettivo;
4. Assegnare la rank in base al concetto di Pareto dominanza;
- 5. for $i=1$ to gen do**
6. Generare una popolazione di figli;
7. Applicare l'operatore di selezione per torneo;
8. Applicare gli operatori di ricombinazione e mutazione;
9. Valutare le Funzioni Obiettivo per la nuova popolazione;
10. Assegnare la rank in base al concetto di Pareto dominanza;
11. Con la popolazione di genitori e figli;
12. Generare gruppi di fronti non dominati;
13. Loop (interno) per aggiungere soluzioni alla nuova generazione cominciando dal primo fronte fino ai d individui trovati;
14. Determinare la crowding-distance fra i punti in ogni fronte;
15. Selezionare i punti del fronte più basso, (ovvero con rank più bassa) e con un'alta crowding-distance (elitismo);
16. Incrementare l'indice relativo alla generazione
- 17. end for**

Inizialmente viene generata una popolazione di grandezza d , scelta dall'utente, in modalità random. Si procede poi alla valutazione delle funzioni obiettivo del problema, e ad ogni individuo viene assegnata una classe in base al principio di Pareto. La prima classe sarà la migliore poi avremo la seconda e così via. Fatto questo si va a ripetere un ciclo tante volte quante sono le generazioni fissate, in questo modo si va a generare la popolazione dei discendenti tramite il tournament selection, il crossover e la mutazione.

Fatto ciò si vanno a valutare le funzioni obiettivo per i nuovi individui che verranno poi ordinati secondo il criterio di Pareto in base al concetto di non dominanza. Si considera poi l'unione della popolazione dei genitori e dei figli che verrà ordinata in base alla classe di ciascun individuo. Perciò una volta uniti le soluzioni appartenenti al primo fronte saranno le migliori.

Si valuta se il numero degli individui appartenente a questo fronte risulti maggiore o minore di d . Se risulta minore intanto si prendono tutti gli individui appartenenti a questo fronte e poi si va a pescare nei fronti successivi. Per completare la popolazione in modo

che abbia la stessa dimensione d scelta si andranno a prendere come ultimi elementi, quelli appartenenti all'ultimo fronte che presentano una crowding distance più elevata.

Viene poi incrementato l'indice delle generazioni e si ripete il processo fino a raggiungere il numero finale di generazioni scelto dall'utente.

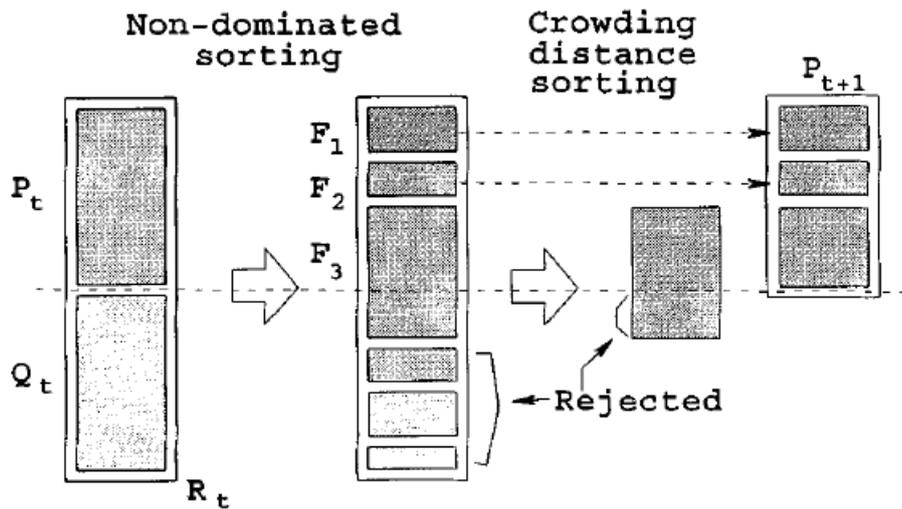


Figura 21 Meccanismo di generazione della popolazione successiva

Esiste un fattore di penalizzazione P , che presenta un valore abbastanza elevato, che permette di eliminare dalla scelta degli individui della successiva generazione quelli che non rispettano il limite imposto.

$$d_{iso}^D = \begin{cases} d_{iso}^D & \text{if } d_{sup}^D \leq d_{sup} \\ d_{iso}^D + P & \text{if } d_{sup}^D > d_{sup} \end{cases}$$

$$d_{sup}^D = \begin{cases} d_{sup}^D & \text{if } d_{sup}^D \leq d_{sup} \\ d_{sup}^D + P & \text{if } d_{sup}^D > d_{sup} \end{cases}$$

Figura 22 Meccanismo di penalty

3. MATRICE DI SMORZAMENTO C

3.1 Analisi dinamica

Fondamentale importanza ricopre il ruolo della matrice C all'interno dello smorzamento d'interpiano. Essendo le strutture in questione complesse, è necessario utilizzare un sistema a molti gradi di libertà per ottenere un modello dinamico adeguato. Le risposte ottenute per un sistema ad 1 GDL possono essere combinate per ottenere la risposta dinamica del sistema MGD. Le masse sono assunte concentrate e il numero di gradi di libertà è considerato finito.

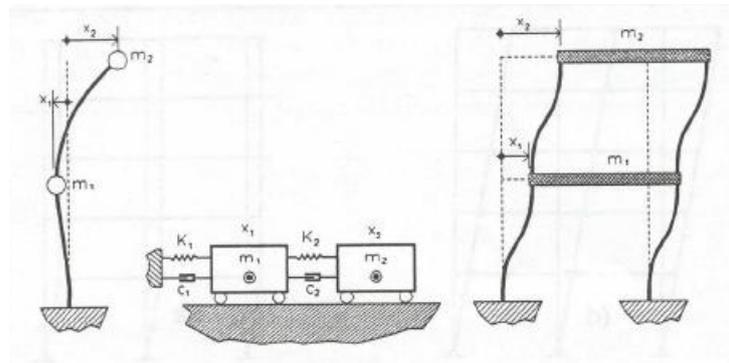


Figura 23 Sistema MDOF e SDOF

Per iniziare si analizza un sistema a MGD senza smorzamento. Tale sistema è governato dalla seguente equazione:

$$m\ddot{u} + ku = 0$$

che in forma matriciale risulta essere pari a:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & m_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & \dots & \vdots \\ 0 & -k_3 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -k_n \\ 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dalla risoluzione della forma matriciale si ottengono n autovalori ($\bar{\omega}_1^2, \bar{\omega}_2^2, \dots$) corrispondenti alle frequenze circolari naturali del sistema. La più piccola di questa è detta frequenza fondamentale. Sostituendo poi le frequenze ricavate all'interno dell'equazione del moto si ottengono un set di autovettori ϕ_r detti modi di vibrare.

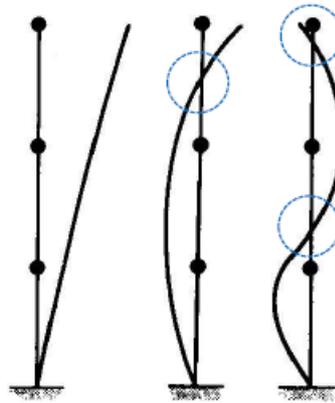


Figura 24 Modi di vibrare

Raccogliendo autovettori e autovalori in forma matriciale si ottiene:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \bar{\omega}_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{\omega}_2^2 & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \bar{\omega}_N^2 \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_1 & \phi_2 & \dots & \phi_r & \phi_N \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

La difficoltà principale sta nel risolvere un problema a molti gradi di libertà. Si cerca di normalizzare i modi di vibrare tale per cui risultino disaccoppiate le equazioni del moto e dunque si possa trasformare il sistema a n-GDL in un sistema a 1GDL.

Si considerano due modi di vibrare generici ϕ_r e ϕ_s tale per cui si ha:

$$(K - \omega^2 M)x = 0$$

$$\begin{array}{l} \swarrow \\ \searrow \end{array} \begin{array}{l} K\phi_r = \omega_r^2 M\phi_r \\ K\phi_s = \omega_s^2 M\phi_s \end{array}$$

Premoltiplicando la prima per ϕ_s^T e trasponendo la seconda e postmoltiplicandola per ϕ_r si ottiene:

$$\phi_s^T K \phi_r = \omega_r^2 \phi_s^T M \phi_r$$

$$\phi_s^T K \phi_r = \omega_s^2 \phi_s^T M \phi_r$$

Sottraendole poi si ha:

$$0 = (\omega_r^2 - \omega_s^2) \phi_s^T M \phi_r$$

che rappresentano le condizioni di ortogonalità dei due modi di vibrare. I modi di vibrare sono normali rispetto alla matrice di massa e di rigidità.

Se le due frequenze sono diverse allora $\phi_s^T M \phi_r = 0$ e $\phi_s^T K \phi_r = 0$, altrimenti si ottengono la matrice di massa modale $\phi_s^T M \phi_s = M_s$ e la matrice di rigidità modale $\phi_s^T K \phi_s = K_s$.

Per normalizzare i modi di vibrare esistono due possibili metodi:

- settare la componente più grande uguale a 1
 $\max|\phi| = 1$;
- settare le componenti modali in modo tale che la matrice di massa modale sia uguale a 1.

Grazie all'ortogonalità si possono scrivere gli spostamenti in termini di modi di vibrare come:

$$u(t) = \phi_1 q_1(t) + \phi_2 q_2(t) + \dots + \phi_N q_N(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t)$$

con ϕ_N pari all'ennesimo modo di vibrare e $q_N(t)$ pari all'ennesima coordinata modale.

Si è partiti da un'equazione formata da n equazioni differenziali accoppiate e si è giunti ad n equazioni disaccoppiate ad 1 grado di libertà.

$$m\ddot{u} + ku = 0$$

$$\sum_{r=1}^N m \phi_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N k \phi_r q_r(t) = 0$$

$$\sum_{r=1}^N \phi_s^T m \phi_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \phi_s^T k \phi_r q_r(t) = 0$$

Sfruttando l'ortogonalità

$$M_r \ddot{q}_r(t) + K_r q_r(t) = 0$$

La situazione diventa più complessa però quando entra in gioco anche lo smorzamento viscoso del sistema. Si ha infatti oltre alla matrice di massa e a quella di rigidità, l'aggiunta della matrice di smorzamento C.

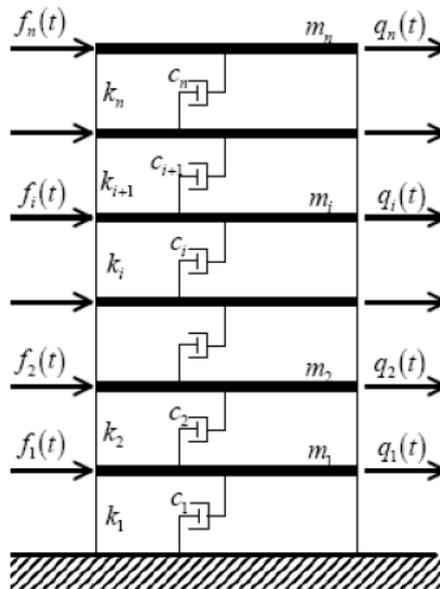


Figura 25 Schematizzazione di un edificio a più piani con matrice di smorzamento

L'equazione fondamentale diventa:

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

L'idea è di procedere con lo stesso metodo appena sviluppato per un sistema a oscillazioni libere. Il problema è la presenza dello smorzamento viscoso, infatti mentre la matrice di massa e di rigidità sono diagonalizzabili contemporaneamente grazie alla matrice modale ϕ , non è detto che questo accada anche per la matrice di smorzamento. In questo caso quindi la matrice cade all'interno del campo dei numeri complessi, ovvero le forme modali hanno forme complesse.

$$(K - \omega^2 M + i\omega C)x = 0$$

Esiste però una possibilità di rendere diagonale anche la matrice di smorzamento ed è il caso dello smorzamento classico, ovvero quando la matrice C risulta essere una combinazione lineare della matrice di massa e di quella di rigidità.

$$\begin{array}{l}
 \boxed{\mathbf{c} = \alpha \mathbf{m} + \beta \mathbf{k}} \\
 (\mathbf{c} \text{ is a diagonal matrix})
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \rightarrow C_n = \alpha M_n \rightarrow \xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n} = \frac{\alpha}{2\omega_n} \\
 \rightarrow C_n = \beta K_n = \beta \omega_n^2 M_n \rightarrow \xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n} = \frac{\beta}{2} \omega_n
 \end{array}$$

dove α e β sono i coefficienti di Rayleigh e ξ è il rapporto di smorzamento. Il rapporto di smorzamento complessivo risulta essere:

$$\xi_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta \omega_n \right)$$

I rapporti di smorzamento sono necessariamente legati ai coefficienti di Rayleigh e α e β vengono determinati per valori specifici di ξ_i e ξ_j con i e j modi naturali di vibrare. I due coefficienti si ottengono dunque come:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix}$$

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j}$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j}$$

Lo smorzamento di Rayleigh presenta un andamento che è combinazione di una parte lineare data dalla matrice di rigidità e una non lineare data dalla matrice di massa.

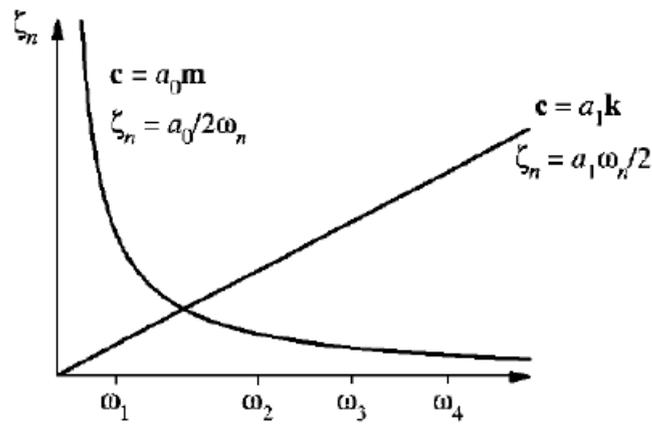


Figura 26 Smorzamento alla Rayleigh

Nel caso in cui il rapporto di smorzamento sia lo stesso in entrambi i modi si ha:

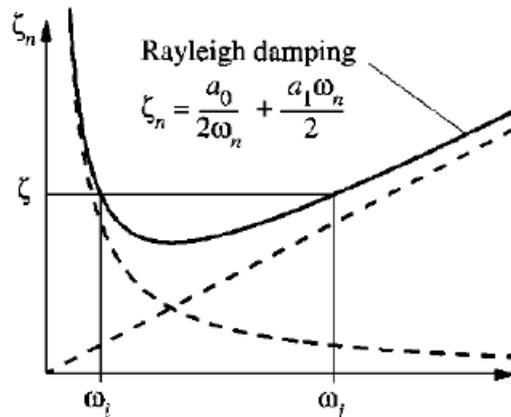


Figura 27 Rapporto di smorzamento alla Rayleigh uguale per due modi di vibrare

Altrimenti otteniamo:

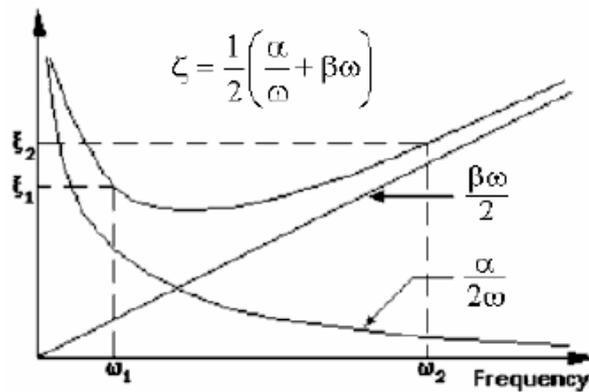


Figura 28 Smorzamento alla Rayleigh diverso per due modi di vibrare

Dopo aver definito lo smorzamento tramite Rayleigh si può sviluppare l'equazione di partenza per arrivare alla forma finale.

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

$$\sum_{r=1}^N m\phi_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N c\phi_r \dot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N k\phi_r q_r(t) = p(t)$$

$$\sum_{r=1}^N \phi_s^T m\phi_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \phi_s^T c\phi_r \dot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \phi_s^T k\phi_r q_r(t) = \phi_s^T p(t)$$

Sfruttando l'ortogonalità

$$M_r \ddot{q}_r(t) + \sum_{r=1}^N \phi_s^T c\phi_r \dot{q}_r(t) + K_r q_r(t) = P_r(t)$$

Assumendo l'ortogonalità anche per la matrice di smorzamento C si ha:

$$\phi_s^T c\phi_r = \begin{cases} C_r = \phi_s^T c\phi_r & \text{se } r = s \\ 0 & \text{se } r \neq s \end{cases}$$

L'equazione finale diventa:

$$M_r \ddot{q}_r(t) + C_r \dot{q}_r(t) + K_r q_r(t) = P_r(t)$$

Questa trattazione vale, come specificato, nel caso di uno smorzamento classico, per esempio quello di una struttura in cemento armato e non vale in problemi di interazione per esempio struttura in cemento armato-suolo.

Questo risulta appunto essere il problema principale che si riscontra nello smorzamento di interpiano, essendo l'edificio diviso in sotto e sovrastruttura. Le due parti interagiscono tra loro e quindi non è più possibile definire uno smorzamento viscoso classico ma bensì si deve trovare un metodo per fare interagire le due parti in modo da ottenere valori ritenuti accettabili.

Per cercare di arrivare a dei risultati plausibili si possono seguire due possibili strade.

Nel primo caso si prende la matrice di smorzamento e la si divide in due sottomatrici più piccole riferite una alla sottostruttura (C_l) e l'altra alla sovrastruttura (C_u). Dopo aver fatto questa divisione, vengono messe insieme andando a cambiare il sistema di riferimento, che viene traslato dalla base dell'edificio al piano di applicazione dell'isolamento. Le due sottomatrici infatti, sono costruite basandosi su una sovrastruttura e una sottostruttura a

base fissa ben sapendo però che non è un'ipotesi vera per quanto riguarda la sovrastruttura. Per evitare tale problema si inserisce un vettore (C^*) all'interno della matrice, con numero di righe pari al numero di piani della sovrastruttura e una colonna, che permette di riportare il problema alla situazione originaria.

$$C = \begin{bmatrix} C_l & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & C^* & C_u \end{bmatrix}$$

Il vettore C^* altro non è che una differenza tra la velocità di un piano e quella del piano dell'isolamento.

$$C^*[n \times m] = \left[-\sum_{j=1}^N C_u[1,j] \quad -\sum_{j=1}^N C_u[2,j] \quad \dots \quad -\sum_{j=1}^N C_u[N,j] \right]^T$$

Le due sottomatrici sono scritte in funzione dei coefficienti α e β di Rayleigh.

$$C_u = \alpha_u M_u + \beta_u K_u$$

$$C_l = \alpha_l M_l + \beta_l K_l$$

Scegliere questo procedimento risulta essere problematico a causa della forma della matrice di smorzamento. Tale matrice presenta infatti una forma non simmetrica dovuta ai termini extra diagonali.

Si hanno problemi anche riguardo al valore di smorzamento che si ottiene, infatti si hanno delle percentuali troppo elevate che riducono la forza agente andando quindi a sfavore di sicurezza.

Nel secondo caso si decide di applicare uno smorzamento diverso tra sovrastruttura e sottostruttura, ovvero proporzionale alla rigidità sopra e proporzionale sia alla rigidità che alla massa sotto. In questo modo si riesce a gestire meglio la percentuale di smorzamento e quindi evitare un decadimento eccessivo della forza agente.

Essere proporzionali alla rigidità significa avere un rapporto di smorzamento caratterizzato da:

$$\xi_n = \frac{\beta \omega_n}{2}$$

dove viene eliminata la proporzionalità con la massa. Tale smorzamento risulta essere lineare e comporta quindi valori molto elevati per i modi di vibrare superiori al primo.

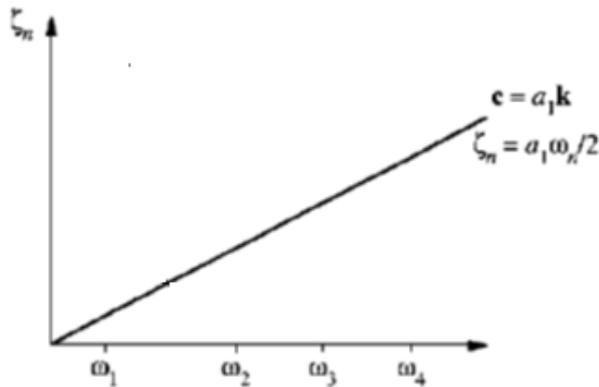


Figura 29 Smorzamento proporzionale alla rigidezza

Il rapporto di smorzamento dell'edificio isolato, ignorando i termini fuori diagonale vale:

$$\xi_{eq} = \frac{\phi^T C \phi}{2\omega(\phi^T M \phi)}$$

Dove ϕ è la forma del modo di vibrare e ω è la sua frequenza. Utilizzare $\phi^T C \phi$ all'interno della formula vuol dire distribuire lo smorzamento su tutta la struttura, quindi quando si vanno a trovare i valori per la sovrastruttura questi possono risultare più piccoli rispetto al valore di smorzamento scelto perché devono essere combinati anche con il valore di smorzamento della sottostruttura.

Provando ad applicare uno smorzamento proporzionale alla rigidezza ad una struttura a 7 piani con l'isolamento posto al terzo, si sono ottenuti, dando come smorzamento il 5% al primo modo, valori pari a:

- 0.0036 per il primo modo
- 0.3087 per il secondo modo
- 0.5991 per il terzo modo
- 0.5886 per il quarto modo
- 0.8042 per il quinto modo
- 0.9287 per il sesto modo
- 1.5148 per il settimo modo

Questi valori portano ad uno smorzamento troppo elevato appena si supera il primo modo di vibrare.

Si decide allora di applicare questo metodo solo alla sovrastruttura. Per fare questo però esistono diversi approcci ovvero si può scegliere uno smorzamento dell'1% per il primo modo, uno smorzamento del 5% per il secondo modo o uno smorzamento del 5% per il terzo modo. Sottraendo i risultati ottenuti con uno smorzamento al 5% per la sovrastruttura con quelli ottenuti con la stessa percentuale per la struttura globale, si dimostra che tale metodo porta a valori troppo elevati per la sottostruttura. Si sono scelti questi modi perché risultano essere quelli più significativi per la struttura.

Unendo in un grafico i vari approcci otteniamo:

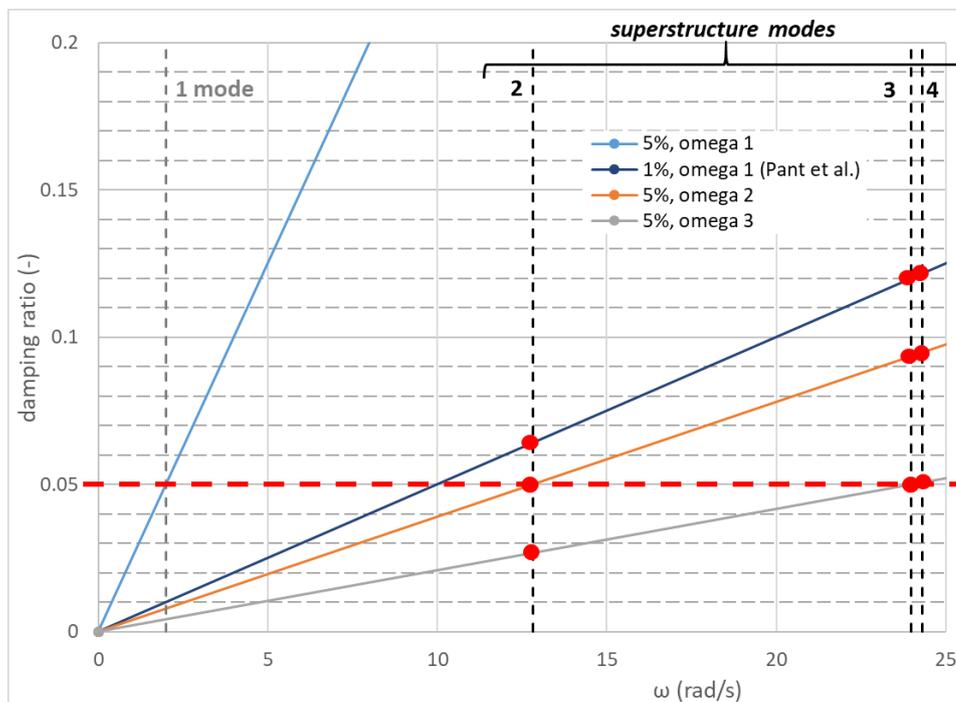


Figura 30 Valore e andamento dello smorzamento per i vari modi

Nel caso di smorzamento al 5% per il secondo modo di vibrare si hanno dei valori pari a:

- 3.6724e-04 per il primo modo
- 0.0481 per il secondo modo
- 0.0648 per il terzo modo
- 0.0286 per il quarto modo
- 0.1254 per il quinto modo
- 0.1449 per il sesto modo

- 2.9427e-07 per il settimo modo

Si può notare come il secondo modo dovrebbe avere un valore pari al 5%, invece, risulta essere più piccolo, dovuto al fatto che deve essere combinato con quello derivante dalla sottostruttura.

Per la sottostruttura invece si va ad utilizzare Rayleigh andando a calibrare i valori di α e β . Per calibrare i coefficienti si devono scegliere i modi a cui attribuire il valore di smorzamento scelto. Anche in questa situazione ci sono tre diverse possibilità ovvero, si può scegliere il 5% per i modi 2 e 7, oppure il 5% per i modi 3 e 7 o il 5% per i modi 3 e 4.

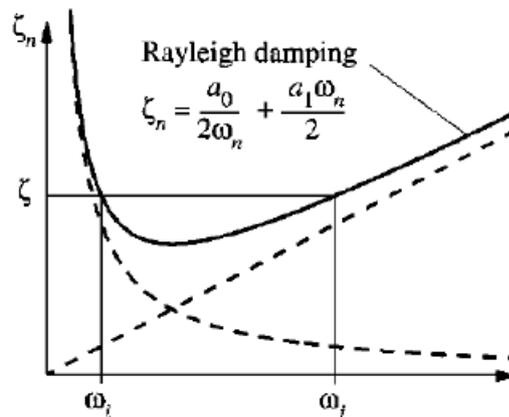


Figura 31 Smorzamento alla Rayleigh complessivo

I modi scelti sono quelli considerati importanti per la struttura in esame. Nel secondo approccio considerato si può osservare come il valore dello smorzamento al modo di vibrare 3 sia di gran lunga inferiore al 5% questo perché, come detto prima, deve essere combinato con il valore ottenuto per la sovrastruttura. Il modo di vibrare 7 presenta invece già direttamente un valore del 5%, questo implica appunto che la sovrastruttura non contribuisce allo smorzamento. Si può osservare tale fatto guardando il grafico che rappresenta i modi di vibrare della struttura. Infatti per il settimo modo di vibrare la sovrastruttura risulta praticamente rigida, ciò comporta dunque un apporto ininfluente allo smorzamento totale.

- 1.0430e-04 per il primo modo
- 5.0337e-05 per il secondo modo
- 0.0154 per il terzo modo
- 0.0340 per il quarto modo
- 6.3810e-06 per il quinto modo

- $9.6239e-07$ per il sesto modo
- 0.0500 per il settimo modo

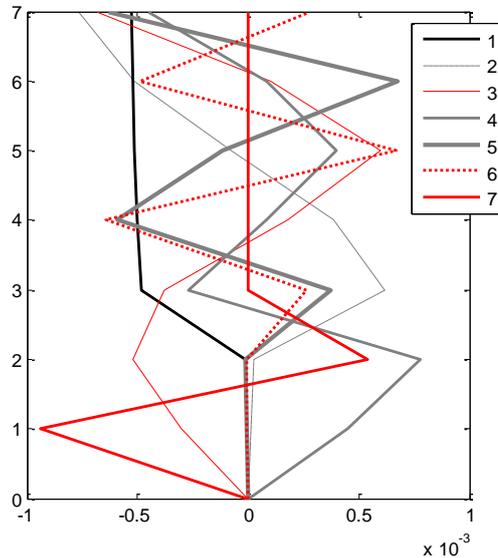


Figura 32 Modi di vibrare di una struttura a 7 piani

Quello che manca ora è l'unione delle due parti. Si può scegliere se unire lo smorzamento al 5% del secondo modo di vibrare della sovrastruttura con lo smorzamento al 5% del terzo e settimo modo della sottostruttura oppure si possono scegliere altre combinazioni. Una mano nella scelta di cosa combinare la dà il fattore di partecipazione infatti, ci permette di capire quali sono i modi più significativi dell'intera struttura e quali no.

Una delle scelte migliori è quella di combinare lo smorzamento al 5% del terzo modo di vibrare della sovrastruttura con lo smorzamento al 5% del terzo e settimo modo della sottostruttura. Si ottiene:

- $3.0204e-04$ per il primo modo
- 0.0259 per il secondo modo
- 0.0503 per il terzo modo
- 0.0494 per il quarto modo
- 0.0675 per il quinto modo
- 0.0780 per il sesto modo
- 0.0500 per il settimo modo

Si osserva come lo smorzamento venga mantenuto vicino al 5% per i modi di vibrare più importanti come il terzo e il quarto, mentre viene sottostimato per il secondo modo anche se è trascurabile avendo questo un fattore di partecipazione molto piccolo.

Utilizzando questa seconda strada si riescono ad avere dei valori di smorzamento minori e quindi una riduzione di forze più piccola.

4. MODELLAZIONE

4.1 Impostazione del problema

Qualsiasi edificio si prenda in considerazione presenta una sovrastruttura e una sottostruttura divise da uno strato di isolamento, al quale viene aggiunto a volte uno smorzamento additivo.

L'equazione principale della dinamica che governa il sistema, alla quale vengono apportate delle modifiche è:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -MI\ddot{x}_g(t)$$

dove M è la matrice di massa, C è la matrice di smorzamento e K la matrice di rigidità. \ddot{x} , \dot{x} , x sono rispettivamente l'accelerazione, la velocità e lo spostamento d'interpiano rispetto alla base dell'edificio, mentre \ddot{x}_g è l'accelerazione del terreno e I il vettore unitario di spostamento della struttura.

Tale equazione è definita anche equazione di eccitazione dei supporti del sistema. A questa equazione vengono aggiunti dei termini per tenere in considerazione sia degli isolatori che dei dispositivi di smorzamento. La nuova equazione diventa:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + K_{st}x(t) + r_{is}F_{is}(t) + r_{vd}F_{vd}(t) = -MI\ddot{x}_g(t)$$

K e C rimangono comunque le matrici di rigidità e smorzamento senza considerare però l'isolamento. Tali matrici, come la matrice di massa M , presentano dimensioni diverse a seconda del numero di piani dell'edificio.

Essendo le due strutture separate si possono creare due sottomatrici K_u e K_l all'interno della matrice K più grande. Con u e l vengono identificate rispettivamente la sovrastruttura e la sottostruttura.

Un esempio di matrice K è:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \dots & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & \vdots \\ 0 & -k_3 & \ddots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -k_n \\ 0 & \dots & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix}$$

Se viene scritta in termini di K_u e K_l otteniamo:

$$K_{st} = \begin{bmatrix} K_l & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \cdots & K_u \end{bmatrix}$$

Le due sottomatrici avranno dimensione diversa e pari al numero di piani corrispondenti alla sotto e sovrastruttura.

Per la matrice di smorzamento vale quanto detto nel capitolo precedente.

I termini $r_{is}F_{is}(t)$ e $r_{vd}F_{vd}(t)$ contenuti nella formula, sono rispettivamente la forza di ripristino dell'isolatore e la forza dello smorzatore aggiuntivo. La forza dell'isolatore è scelta in base al modello di Bouc-Wen, oppure può essere considerata anche lineare.

Il modello di Bouc-Wen consiste in equazioni differenziali del primo ordine non lineari contenenti alcuni parametri che possono essere scelti per approssimare il comportamento di certi sistemi isteretici. Le forze di ripristino sotto elevate eccitazioni del terreno mostrano un comportamento non lineare ed è per questo che non possono essere descritte come funzioni di spostamenti e velocità istantanee, ma si va ad usare tale modello.

Il punto iniziale di tale modello è la funzione che descrive il fenomeno di isteresi. Si prende un grafico forza \mathcal{F} -spostamento x e si considera che x sia una funzione del tempo in modo che il valore della forza al tempo t non dipenda solamente dal valore dello spostamento a quel tempo, ma anche da tutti i passati valori di x .

Si considera poi per la funzione F la seguente forma:

$$\frac{d\mathcal{F}}{dt} = g \left(x, \mathcal{F}, \text{sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) \right) \frac{dx}{dt}$$

A questa si aggiunge l'equazione $\frac{d^2x}{dt^2} + \mathcal{F}(t) = p(t)$ con le sue condizioni iniziali $\frac{dx}{dt}(t_0), x(t_0), \mathcal{F}(t_0)$. Essendo difficile dare una soluzione esplicita della prima equazione a causa della non linearità di g , si sfrutta l'integrale di Stieltjes che porta a scrivere:

$$\mathcal{F}(t) = \mu^2 x(t) + \int_{\beta}^t F(V_s^t) dx(s)$$

La scelta di F deve essere tale da soddisfare alcuni requisiti matematici e viene scelta come:

$$F(u) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-\alpha_i u}$$

Questa equazione e la seconda scritta sopra possono essere riscritte come:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \mu^2 x + \sum_{i=1}^N Z_i = p(t)$$

$$\frac{dZ_i}{dt} + \alpha_i \left| \frac{dx}{dt} \right| Z_i - A_i \frac{dx}{dt} = 0$$

dove $Z_i = \int_{\beta}^t A_i e^{-\alpha_i v_s^t x} dx(s)$

Le equazioni appena scritte sono quello che viene definito il modello di Bouc-Wen. Queste poi vengono estese e si giunge alla prima versione del modello che risulta essere pari a:

$$\dot{z} = -\alpha |\dot{x}| z^n - \beta \dot{x} |z^n| + A \dot{x} \text{ per } n \text{ dispari}$$

$$\dot{z} = -\alpha |\dot{x}| z^{n-1} |z| - \beta \dot{x} z^n + A \dot{x} \text{ per } n \text{ pari}$$

Tale modello viene considerato buono se le soluzioni tra i dati sperimentali e quelli del modello sono abbastanza simili tra loro. Se si concettualizza il ciclo isteretico non lineare come una mappa $x(t) \rightarrow \Phi_s(x)(t)$ otteniamo che il modello di Bouc-Wen che approssima il ciclo isteretico è pari a:

$$\dot{z} = -D^{-1}(Ax - \beta |\dot{x}| z^{n-1} z - \gamma \dot{x} |z|^n)$$

$$\Phi_{BW}(x)(t) = \alpha k x(t) + (1 - \alpha) D k z(t)$$

Da questa assunzione la forza di ripristino che caratterizza l'isolamento risulta essere pari a:

$$F_{is}(t) = r k x(t) + (1 - r) r d_y z(t)$$

dove r è il rapporto di rigidità post snervamento, k è la rigidità elastica e d_y è lo spostamento allo snervamento del sistema di isolamento. $z(t)$ definisce invece il

comportamento isteretico e deve soddisfare l'equazione differenziale di primo ordine. La sua equazione è:

$$\dot{z}(t) = \frac{1}{d_y} (A\dot{x}(t) - \beta|\dot{x}(t)|z(t)|z(t)|^{\eta-1} - \gamma\dot{x}(t)|z(t)|^\eta)$$

con A , β e γ parametri adimensionali. La forza di ripristino è caratterizzata da una parte lineare, dovuta alla rigidità elastica dell'isolatore, e da una non lineare, dovuta al comportamento isteretico dello stesso. La forza totale di ripristino diventa quindi:

$$F_r(t) = K_{st}x(t) + r_{is}F_{is}(t) = Kx(t) + r_{is}(1 - r)kd_yz(t)$$

I vettori di influenza r_{is} e r_{vd} vengono utilizzati per considerare in modo corretto la posizione di isolatori e smorzatori all'interno dell'equazione. I due termini sono uguali e hanno tanti termini quanti sono i piani presentando un valore 1 o -1 nel piano dove è presente lo smorzatore e l'isolatore. I segni sono tra loro opposti dovuti al fatto che il compito dello smorzatore è quello di diminuire lo spostamento dell'isolatore quindi deve agire in direzione opposta allo stesso per riportarlo nella posizione di partenza.

Prendendo la forza di ripristino totale otteniamo che l'equazione generale diventa:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + K_{st}x(t) + r_{is}(1 - r)kd_yz(t) + r_{vd}F_{vd}(t) = -MI\ddot{x}_g(t)$$

da questa isolando l'accelerazione dell'edificio si ha:

$$\ddot{x}(t) = -M^{-1}(C\dot{x}(t) + K_{st}x(t) + r_{is}(1 - r)kd_yz(t) + r_{vd}F_{vd}(t) + I\ddot{x}_g(t))$$

Per risolvere il problema risulta più conveniente abbassare il grado dell'equazione, quindi è più semplice esprimerla come un'equazione differenziale di primo ordine. Per fare ciò si utilizza lo state space vector $q(t) = [x^T(t) \quad \dot{x}^T(t) \quad z(t)]^T$.

Lo state space vector permette di rimpiazzare dunque un'equazione differenziale di ordine n con un'equazione differenziale di primo ordine. Tale rappresentazione è caratterizzata da due equazioni:

$$\dot{q}(t) = Aq(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cq(t) + Du(t)$$

La prima equazione è chiamata equazione di stato, mentre la seconda è chiamata equazione di output. Per un sistema di ordine n con r input e m output si ha una dimensione delle matrici pari a:

- q = vettore di stato $n \times 1$
- A = matrice di stato $n \times n$
- B = matrice di input $n \times r$
- u = input $r \times 1$
- C = matrice di output $m \times n$
- D = matrice di transizione diretta $m \times r$
- y = output $m \times 1$

Si considera per esempio un sistema del quarto ordine rappresentato da equazioni differenziali del quarto ordine.

$$y'''' + a_1 y'''' + a_2 y'' + a_3 y' + a_4 y = b_0 x$$

Si definiscono 4 nuove variabili:

- $q_1 = y$
- $q_2 = q_1 = y'$
- $q_3 = q_2 = y''$
- $q_4 = q_3 = y'''$

così si ha

$$y'''' + a_1 q_4 + a_2 q_3 + a_3 q_2 + a_4 q_1 = b_0 x$$

ma $q_4 = y''''$ così si ha

$$y'''' = q_4 = -a_1 q_4 - a_2 q_3 - a_3 q_2 - a_4 q_1 + b_0 x$$

Si riscrive il sistema con equazione del primo ordine come:

- $q_1 = q_2 = y'$
- $q_2 = q_3 = y''$
- $q_3 = q_4 = y'''$
- $q_4 = -a_1 q_4 - a_2 q_3 - a_3 q_2 - a_4 q_1 + b_0 x$

Scritto come state space si ha:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_4 & -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix}$$

con

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -a_4 & -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_0 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$D = 0$$

La rappresentazione che si ottiene non è unica, ovvero scegliendo altri parametri si possono avere soluzioni diverse.

Dall'equazione base di partenza si va a definire un sistema e poi una forma matriciale che riconducono allo state space vector.

$$\begin{cases} \ddot{x} = -M^{-1}Cx - M^{-1}Kx - I\ddot{u}_g \\ \dot{x} = \dot{x} \end{cases}$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \ddot{u}_g$$

$$\dot{q} = Aq - B\ddot{u}_g$$

Il sistema che si va ad utilizzare per la risoluzione del problema diventa:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -M^{-1}(C\dot{x} + Kx + r_{is}(1-r)kd_y z + r_{vd}F_{vd}) - I\ddot{u}_g \\ \dot{x} = \dot{x} \\ \dot{z} = \frac{1}{d_y}(A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z|z|^{\eta-1} - \gamma\dot{x}|z|^\eta) \end{cases}$$

Si possono adesso seguire due strade. La prima consiste nel passare dal sistema appena scritto ad una forma matriciale, mentre l'altra prevede una risoluzione diretta del sistema stesso.

Nel primo caso si avrebbe:

$$\dot{q} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C & -M^{-1}(r_{is}(1-r)kd_y + \frac{r_{vd}F_{vd}}{z}) \\ 0 & \frac{\left(\frac{1}{d_y}(A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z|z|^{\eta-1} - \gamma\dot{x}|z|^\eta)\right)}{\dot{x}} & \frac{\left(\frac{1}{d_y}(A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z|z|^{\eta-1} - \gamma\dot{x}|z|^\eta)\right)}{\dot{z}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ z \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g$$

Utilizzando però questa forma matriciale la risoluzione diventa complicata, si opta perciò per l'uso del sistema. Tale sistema diventa:

$$\dot{q} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M^{-1}(C\dot{x} + Kx + r_{is}(1-r)kd_yz + r_{vd}F_{vd}) \\ \frac{1}{d_y}(A\dot{x} - \beta|\dot{x}|z|z|^{\eta-1} - \gamma\dot{x}|z|^\eta) \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g$$

Cioè da qui si va a ricavare

$$q = \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \\ z \end{Bmatrix}$$

Risulta quindi essere \dot{q} una funzione di q stesso. Infatti si ha:

$$\dot{q} = f(q) - B\ddot{u}_g$$

Scrivere la soluzione in termini matriciali risulta più difficile a causa della presenza di termini non lineari all'interno. Per questo motivo la si scrive in termini di funzione.

Quindi una volta decise le condizioni iniziali di partenza(IC) $q = \begin{pmatrix} x(0) \\ \dot{x}(0) \\ z(0) \end{pmatrix}$ si va a trovare

$\dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{z} \end{pmatrix}$ e integrando le soluzioni di \dot{q} ricavo le soluzioni x , \dot{x} e z .

Essendo però il modello dinamico non integrabile analiticamente, si è scelto il metodo di Runge Kutta, il quale approssima la soluzione analitica. Tale metodo fa parte di quella classe di metodi numerici, che permettono la risoluzione di un'equazione differenziale (problema di Cauchy) in un insieme discreto di punti. L'idea è partire da una forma differenziale e trasformarla in una integrale per poi trovare la soluzione approssimata.

La formula generale che descrive il metodo risulta essere:

$$u_{n+1} = u_n + hF(t_n, u_n, h; f) \quad n \geq 0$$

dove F è la funzione di incremento che risulta essere definita come:

$$F(t_n, u_n, h; f) = \sum_{i=1}^s b_i K_i$$

$$K_i = f \left(t_n + c_i h, u_n + h \sum_{j=1}^s a_{ij} K_j \right) \quad i = 1, 2, \dots, s$$

con s che indica il numero di stadi del metodo. Il metodo di Runge Kutta può essere esplicito, implicito o semiesplicito. La soluzione implicita richiede la risoluzione di un sistema di equazioni non lineari e dunque una complessità computazionale maggiore.

Un metodo R-K esplicito non può avere ordine maggiore di s , inoltre non esistono metodi in cui l'ordine risulta uguale a s se $s \geq 5$.

Dovendo approssimare un'equazione differenziale si deve trovare una funzione che verifichi il problema di Cauchy ovvero:

$$\begin{cases} y'(t) = f(t, y(t)) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Definito il problema si può riformularlo in modo integrale come:

$$y(t) = y_0 + \int_{t_0}^t y'(s) ds = y_0 + \int_{t_0}^t f(s, y(s)) ds$$

Nello studio del problema si utilizza un metodo esplicito. Definito il problema ai valori iniziali:

$$\begin{cases} \dot{y} = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

e considerato un intervallo piccolo sufficientemente $h > 0$ si definiscono:

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ t_{n+1} = t_n + h \end{cases}$$

dove i valori di k sono:

$$k_1 = f(t_n, y_n)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right)$$

$$k_4 = f\left(t_n + h, y_n + hk_3\right)$$

Si ha che k_1 risulta essere l'incremento basato sulla pendenza all'inizio dell'intervallo, k_2 e k_3 a metà intervallo e k_4 alla fine dell'intervallo.

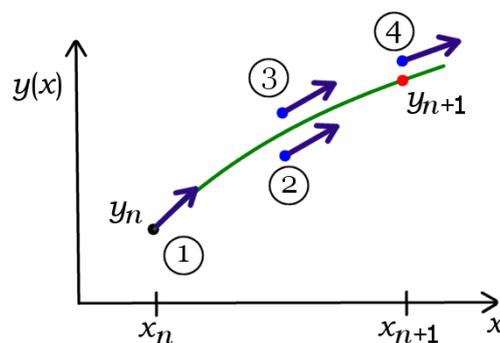


Figura 33 Metodo di Runge Kutta del 4° ordine

Quello utilizzato qui risulta essere un metodo del quarto ordine che sfrutta due pendenze in più nel calcolo della soluzione al passo successivo rispetto al normale metodo del secondo ordine. Tali pendenze hanno un peso che risulta essere maggiore rispetto a quello delle pendenze a inizio e fine intervallo tanto che la soluzione approssimata risulta più vicina a quella reale.

4.2 Funzioni obiettivo

Una volta definiti i passi per andare a caratterizzare il problema si devono cercare le combinazioni ottimali per i parametri del dispositivo di smorzamento. Considerando sempre l'esempio della struttura a 7 piani, la funzione principale del dispositivo risulta quella di diminuire lo spostamento relativo dell'isolatore, ma come già descritto comporta, a causa dell'inserimento di uno smorzamento aggiuntivo, un incremento delle forze interne e dello spostamento d'interpiano.

Per cercare di trovare la soluzione ottimale si scelgono due funzioni obiettivo (OFs):

- minimizzazione dello spostamento relativo del piano di isolamento (OF1);
- minimizzazione dello spostamento totale della sovrastruttura (OF2).

Scritte in forma di equazione risultano essere:

$$OF_1 = \min |d_{iso}^D| = \min |x_n(t) - x_{n-1}(t)|$$

$$OF_2 = \min |d_{sup}^D| = \min |x_i(t) - x_{i-1}(t)| < d_{sup}$$

Nella prima funzione x_n indica il piano dell'isolamento, mentre x_{n-1} indica il piano al di sotto dell'isolamento. Nella seconda funzione $i-1$ sta ad indicare il primo piano della sovrastruttura, mentre i indica l'ultimo piano. d_{iso}^D e d_{sup}^D indicano rispettivamente lo spostamento totale d'interpiano dell'isolatore e della sovrastruttura con lo smorzamento, mentre d_{sup} e d_{iso} rappresentano gli stessi parametri ma senza smorzamento.

Per risolvere queste funzioni obiettivo, come si è già scritto precedentemente, si va ad utilizzare l'algoritmo generico NSGA-II. Infatti la presenza di più obiettivi all'interno dello stesso problema porta ad un set di soluzioni ottimali e non più solo una soluzione.

La volontà di ridurre lo spostamento relativo dell'isolatore si scontra con l'aumento dello spostamento d'interpiano della sovrastruttura. Analizzando una risposta time-history dello spostamento d'interpiano della sovrastruttura e dell'isolamento con e senza smorzamento della struttura, si può notare come dia appunto un beneficio per quanto riguarda l'isolamento, ma comporti un aumento sostanziale, soprattutto nella parte iniziale dell'analisi, dello spostamento della sovrastruttura.

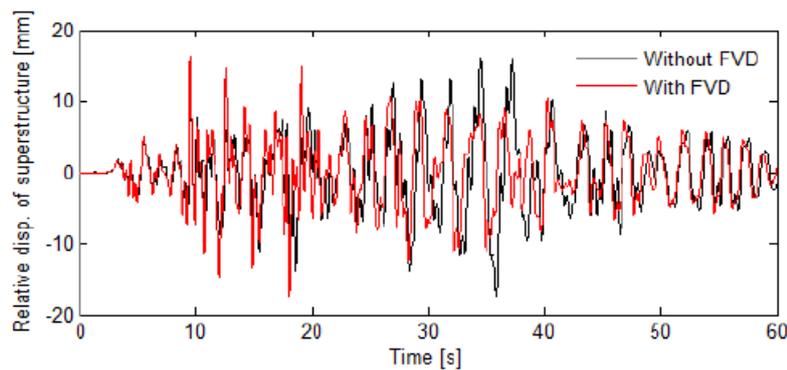


Figura 34 Spostamento sovrastruttura con e senza smorzamento

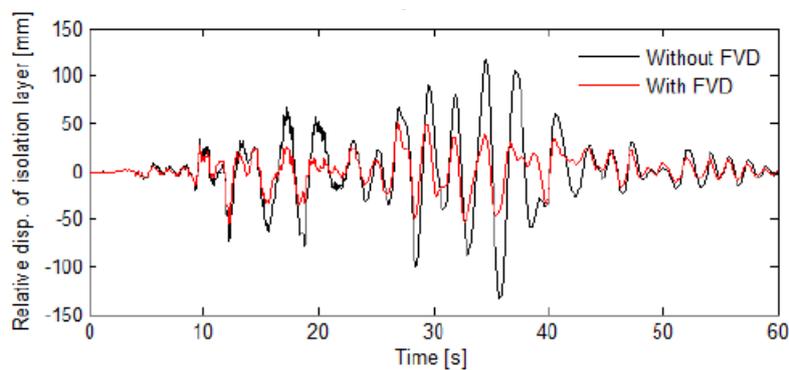


Figura 35 Spostamento isolamento con e senza smorzamento

La forza di taglio alla base però diminuisce più ci si avvicina alla minimizzazione della funzione obiettivo.

4.3 Parametri e performance dello smorzamento

Grazie alla FFT, ovvero la Trasformata di Fourier relativa al segnale della velocità del piano di isolamento, riusciamo a capire quanta importanza abbia lo smorzamento nella mitigazione della risposta sismica. Questa però non risulta l'unica correlazione tra FFT e lo smorzamento, infatti si hanno altre due interessanti caratteristiche:

- se l'involuppo costruito sui picchi di velocità presenta un incremento monotono rapido verso la frequenza di picco massima e poi è seguito da una rapida discesa monotona verso le frequenze più alte, allora lo smorzatore tende a essere lineare. Viceversa se l'involuppo presenta uno o più picchi ugualmente importanti, ovvero uno o più plateau, allora lo smorzatore ottimale è considerato non lineare. Lo smorzatore lineare risulta preferibile quando il moto del piano di isolamento tende

ad essere sinusoidale, inoltre lo smorzatore lineare permette di contenere il valore della forza allo spostamento massimo.

- se le frequenze di eccitazioni all'interno del range di frequenze del primo modo dell'intera struttura crescono, allora le performance dello smorzatore vanno a diminuire. Infatti, per rispettare il vincolo dello spostamento d'interpiano della sovrastruttura, la riduzione massima dello spostamento degli isolatori diminuisce. Tutto questo risulta essere connesso con la quantità di smorzamento supplementare che viene introdotto nel sistema.

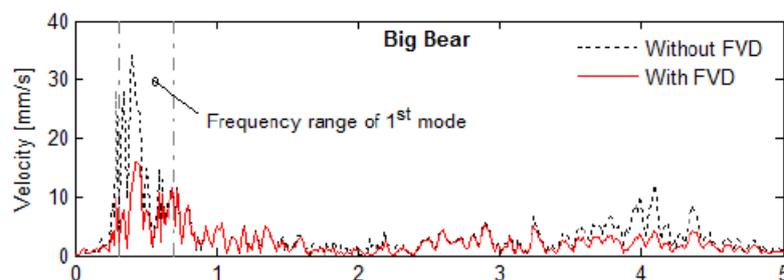


Figura 36 FFT

Per provare l'efficienza dello smorzatore in caso di frequenze del primo modo basse e quantificare lo smorzamento supplementare si usa il concetto del rapporto di smorzamento equivalente. Si considerano diversi terremoti e si analizza:

- un sistema senza dispositivo di smorzamento con un valore di ξ del 5% più una certa quantità di ξ aggiuntiva;
- un sistema con uno ξ del 5% e un dispositivo di smorzamento.

In quest'esempio si può vedere come per raggiungere la funzione obiettivo di minimizzazione dello spostamento dell'isolatore si debba dare uno smorzamento aggiuntivo del 40% al sistema.

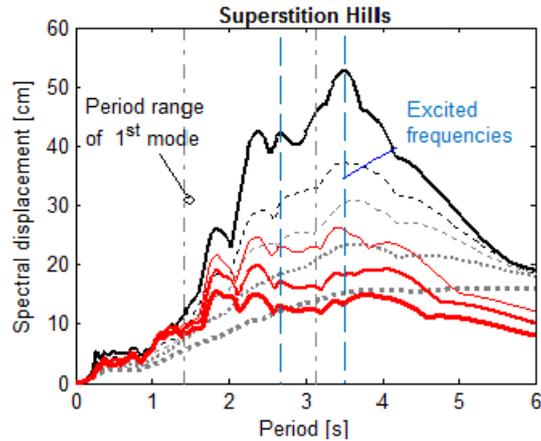


Figura 37 Smorzamento equivalente

Without FVD ($\zeta=5\%$) : — $\Delta\zeta=0\%$ - - - $\Delta\zeta=5\%$ ····· $\Delta\zeta=10\%$ ······ $\Delta\zeta=20\%$ ······ $\Delta\zeta=40\%$
 With FVD ($\zeta=5\%$) : — OF1_{max} — OF1_{mean} — OF1_{min}

Quindi si può dire che dare troppo smorzamento alla struttura comporta problemi sia per quanto riguarda gli spostamenti sia per le accelerazioni della sovrastruttura.

Tale confronto però viene sviluppato sulla base di una differenza tra l'accelerazione del piano d'isolamento e quella del piano sottostante ($\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i-1}(t)$). Questo implica che gli spettri di spostamento trovati sono degli spettri relativi e non assoluti.



Figura 38 Rappresentazione schematizzata di una struttura con e senza smorzatore

Le due strutture, con e senza smorzamento, hanno un input di partenza che arriva dal suolo che risulta lo stesso. Questo primo input viene filtrato in due modi diversi a causa della differenza dovuta allo smorzatore e di questo ne risente la sovrastruttura.

È per questo motivo che si considera allora uno smorzamento equivalente, dove si recupera la dissipazione data dallo smorzatore tramite l'aggiunta di un $\Delta\xi$ dato dalla sovrastruttura che viene considerata come un SDOF. Lo ξ di partenza, come scritto sopra, è del 5% e

questo comporta un $\Delta\xi$ relativo e non assoluto. Se si vuole ottenere una differenza assoluta tra le due strutture per cercare di capire effettivamente quanto questa vada a smorzare si deve partire da un valore dello 0%.

Si cerca di utilizzare allora un procedimento diverso. Il metodo che si è trovato prevede il cambiamento della matrice C, usandone una equivalente. Si variano i valori della matrice lungo il piano di isolamento, ovvero si andranno a inserire i nuovi dati all'interno delle righe e colonne corrispondenti all'isolamento.

Tali valori sono approssimati perché, per poterli inserire all'interno di C, devono essere convertiti in numeri lineari.

Per effettuare questo cambiamento si sfrutta un'analisi modale complessa la cui equazione è:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx$$

Tramite l'analisi modale si possono trovare i valori di frequenza della struttura dai quali poi recuperare i valori di smorzamento. I valori di ω che si trovano sono:

- la frequenza della struttura semplice ω_{st} ;
- La frequenza della struttura isolata ω_{st+LRB} ;
- La frequenza della struttura isolata e smorzata $\omega_{st+LRB+FVD}$;
- La frequenza della struttura non smorzata ω_{un} .

A questi valori si giunge con l'equazione fondamentale alla quale è stata variata la matrice C. Considerando il caso smorzato e non smorzato, inizialmente si aveva:

1. $M K C_{st} BW$
2. $M K C_{st} BW FVD$

ovvero si utilizzava il modello di Bouc Wen per andare a determinare il valore della forza dell'isolatore, mantenendo la matrice invariata. Ora si va ad agire direttamente sulla matrice C. Si ha per il caso non smorzato:

$$M K [C_{st} + C_{LRB}] \cancel{BW}$$

Si elimina l'utilizzo del modello di Bouc Wen perché si inserisce il valore dell'isolamento all'interno della matrice.

Mentre se la struttura è anche smorzata si ha:

$$M K [C_{st} + C_{FVD}] BW$$

Essendo questa un'analisi modale complessa, le frequenze che andiamo a trovare sono anch'esse complesse e quindi composte da una parte reale e una immaginaria. Si considera però solamente la parte reale trascurando quella immaginaria che risulta essere di poco conto.

Nel caso della struttura smorzata il valore della matrice C_{FVD} assume due valori a seconda se stiamo analizzando la funzione obiettivo che massimizza o minimizza.

Giunti quindi alle frequenze si determina il valore dello smorzamento come:

$$\xi = \sqrt{1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_{un}^2}} \quad \text{con } \omega_d^2 = \omega_{st}, \omega_{st+LRB}, \omega_{st+LRB+FVD}$$

ovvero si vanno a trovare valori di ξ diversi a seconda della frequenza che andiamo a inserire all'interno. Una volta determinato il valore dello smorzamento si va a fare una differenza tra i vari casi e si determina il $\Delta\xi$ cercato.

Nel caso si voglia semplificare il procedimento in modo da non dover utilizzare un'analisi modale complessa, si può considerare che la sovrastruttura risulti connessa al suolo direttamente, ricevendo un'accelerazione $\ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_g(t)$, con i valore del piano di riferimento sottostante a quello di attacco al suolo della struttura semplificata, e non più una differenza tra il piano di isolamento e quello sottostante ($\ddot{x}_i(t) - \ddot{x}_{i-1}(t)$).

Così facendo si ha un edificio che presenta un modo 1 di vibrare dominante con una percentuale di circa il 100% rispetto agli altri, ovvero lo spostamento della sovrastruttura risulta praticamente nullo.

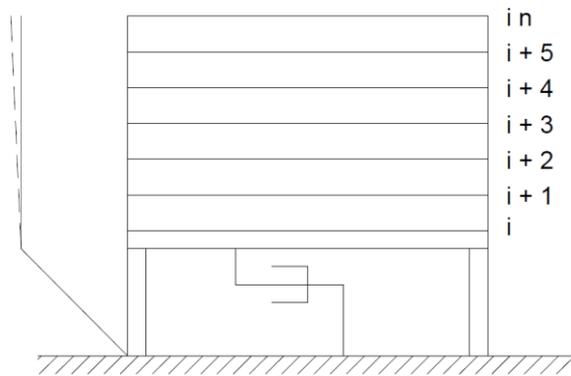


Figura 39 Primo modo di vibrare di una struttura a n piani

Essendo il primo modo quello dominante, possiamo ricavare dalla frequenza ω_1 il periodo T_1 in caso smorzato e non. Una volta trovato il periodo si entra in un grafico S-T con il quale si sceglie il valore dello smorzamento. L'unico problema è scegliere con quale valore entrare lungo l'asse delle y. Il valore che si sceglie è quello della funzione obiettivo OF1, ovvero la minimizzazione dello spostamento dell'isolatore, perché essendo lo spostamento della sovrastruttura praticamente nullo, non va ad intervenire in alcun modo il limite sullo spostamento d'interpiano totale.

Visto che si tratta di una struttura connessa al suolo, si può passare da una struttura a molti gradi di libertà ad una equivalente ad un grado di libertà. Questa contiene tutte le caratteristiche di quella di partenza ma riscritte in modo equivalente.

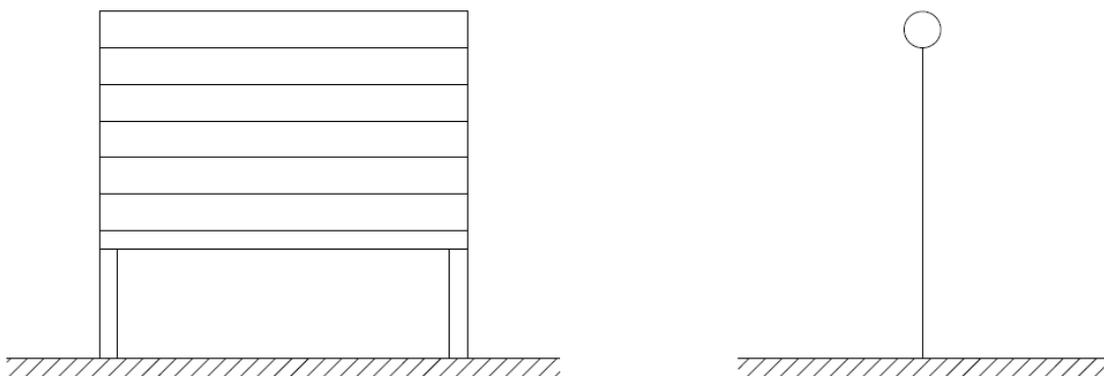


Figura 40 Passaggio da una struttura a n piani a un sistema SDOF

Considerare l'edificio connesso al suolo è un'assunzione che si scontra con quella che è la realtà dei fatti. Gli ω da considerare sono globali e quindi non si ha più solo una predominanza del primo modo di vibrare ma bensì un'unione di $\omega_1, \omega_2, \dots$. Trascurando i

modi superiori al secondo, perché si sta conducendo un'analisi semplificata, si ha che ω_1 e ω_2 agiscono insieme. Il primo modo è dominante ma risente della presenza del secondo. Si ha:

- ω_1 . La sovrastruttura sarebbe inclinata, ma tale inclinazione è talmente minima che si può trascurare.

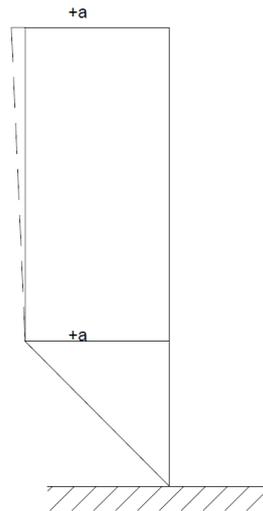


Figura 41 Schematizzazione primo modo di vibrare

- ω_2 . Si può considerare tale modo di vibrare circa simmetrico.

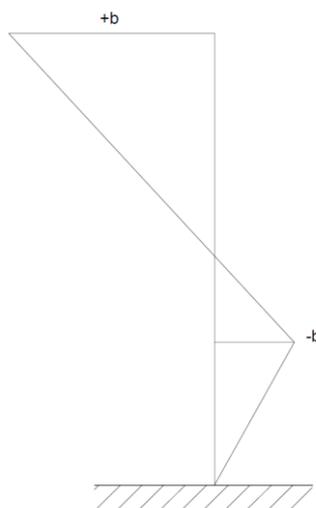


Figura 42 Schematizzazione secondo modo di vibrare

Quando agisce ω_1 l'obiettivo è minimizzare OF1 perché la sovrastruttura è praticamente verticale. Entrando però in gioco anche ω_2 , si ha uno spostamento della sovrastruttura e conseguentemente si deve andare a rispettare anche OF2 ovvero lo spostamento totale

d'interpiano. Le due funzioni obiettivo risultano collegate tra loro, ovvero al diminuire dello spostamento dell'isolatore si ha un aumento dello spostamento totale d'interpiano e viceversa.

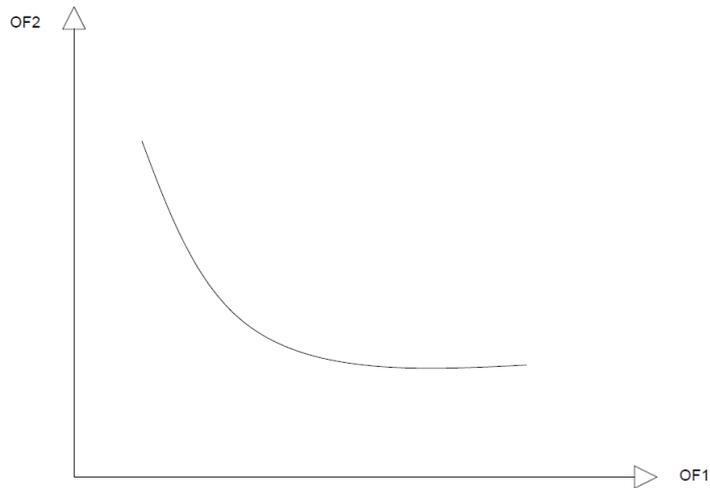


Figura 43 Andamento OF1 e OF2

Globalmente si ottiene:

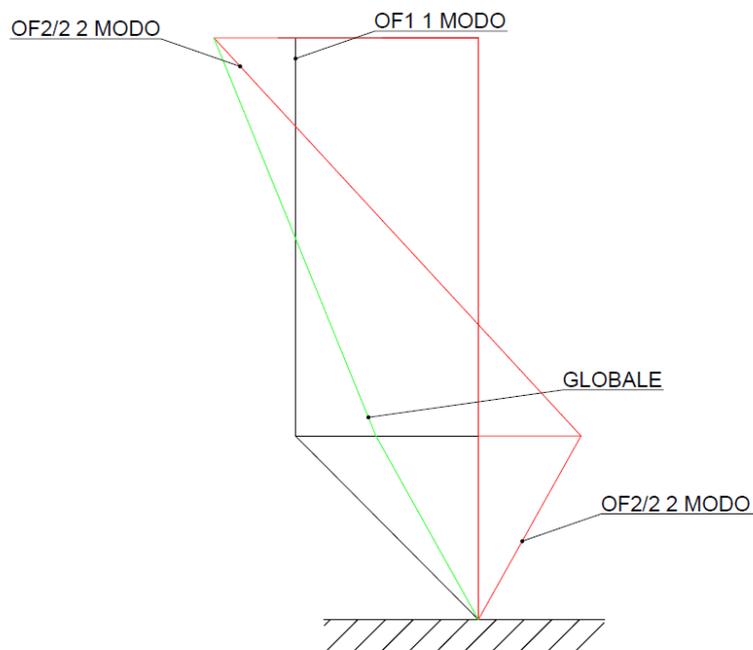


Figura 44 Spostamento globale dato dalla somma di OF1 e OF2

Quindi il valore con cui si deve entrare nel grafico S-T non è più solamente OF1, ma bensì è un'unione degli spostamenti dati dal primo e secondo modo di vibrare. Si ha infatti:

$$OF1 = a - b$$

$$OF1 + OF2 = a + b$$

Combinandole tra loro si ha:

$$OF1 = a - b$$

$$a - b + OF2 = a + b$$

E quindi:

$$OF1 = a - b$$

$$OF2 = 2b$$

$$\text{Spostamento del 1° modo} = a = OF1 + \frac{OF2}{2}$$

Il procedimento per trovare il valore dello smorzamento può essere considerato iterativo, infatti si può:

- entrare nel grafico con il valore del periodo non smorzato e ottenere un primo ξ_0 ;
- ottenuto poi il valore del periodo smorzato, si utilizza la formula

$$\xi = \sqrt{1 - \frac{T_d^2}{T_{un}^2}}$$

e si ottiene un nuovo valore di smorzamento ξ_1 . Si continua in questo modo fino a che i valori di ξ non diventano praticamente identici tra loro.

4.3.1 Serie di Fourier e Fast Fourier Transform

L'analisi di Fourier riesce a decomporre un segnale periodico come somma di segnali sinusoidali, ognuno con la propria frequenza e una propria ampiezza. Passare da descrivere il segnale dal punto di vista temporale a quello armonico, altro non è che un passaggio dal dominio dei tempi a quello delle frequenze. La funzione sviluppata in serie è:

$$f(x) \sim \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos(k\omega x) + b_k \sin(k\omega x))$$

Oltre alla serie, quello che più importa è la sua trasformata. La trasformata è un operatore di uno spazio di funzioni su un altro spazio di funzioni, ovvero trasforma una funzione in un'altra funzione. Solitamente la si usa per semplificare alcune operazioni. La trasformata permette l'analisi di un segnale che non risulta essere necessariamente periodico come nel caso della serie ed è quello che accade nel caso di eventi sismici. La trasformata della funzione $x(t)$ è pari a:

$$F[x(t)](\omega) = X(\omega) := \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt$$

Dovendo però utilizzare un computer per analizzare i vari fenomeni, è necessario passare da una funzione continua ad una funzione discreta. Si passa da $f(t)$ a $f(t_k)$ dove t_k è $k\Delta$. Questa è la DFT cioè la Discrete Fourier Transform. Tale tecnica prevede però dei tempi di calcolo abbastanza lunghi e con una complessità del tipo $O(n^2)$.

Allora per diminuire il tempo di calcolo si usa il procedimento FFT ovvero, la Fast Fourier Transform. Questo metodo si basa su un determinato algoritmo, sia per la forma diretta che inversa, che permette un'accurata e efficiente valutazione delle forme discrete dell'analisi di Fourier (DFT). Si parte dell'equazione della forma diretta:

$$A_n \equiv P_n N = \sum_{m=0}^{N-1} p_m \exp(-i \frac{2\pi n m}{N})$$

da questa poi, tramite una serie di trasformazioni e sostituzioni si giunge a:

$$\begin{aligned}
& A(n_{\gamma-1}, n_{\gamma-2}, \dots, n_0) \\
&= \sum_{m_0=0}^1 \sum_{m_1=0}^1 \dots \sum_{m_{\gamma-1}=0}^1 \left[p_0(m_{\gamma-1}, m_{\gamma-2}, \dots, m_0) x W_N^{2^{\gamma-1}(n_0 m_{\gamma-1})} x \dots x W_N^{(2^{\gamma-1} n_{\gamma-1} + 2^{\gamma-2} n_{\gamma-2} + \dots + n_0) m_0} \right]
\end{aligned}$$

Tale tecnica riduce la complessità del calcolo della forma discreta passando da $O(n^2)$ a $O(n \log n)$. Esistono diversi tipi di algoritmi che possono essere usati, ma il più usato è quello di Cooley-Tukey. È estremamente efficiente come metodo perché riduce di molto il tempo di calcolo e soprattutto è molto accurato e fa sì perciò che l'approccio tramite il dominio delle frequenze alla risposta dinamica della struttura sia migliore.

5. ANALISI NUMERICA E PARAMETRICA

Si è deciso di condurre un'analisi numerica sull'effetto dello smorzamento andando a studiare diverse tipologie di strutture, così facendo si sono trovati dei risultati utili ad un progettista che vuole applicare tale metodologia alla sua struttura.

Infatti si sono analizzate 28 diverse combinazioni di edifici con differenti valori di alfa e del coefficiente di smorzamento per capire quali potessero essere gli effetti.

Lo studio può essere diviso in tre gruppi:

- analisi time history
- modello surrogato
- NSGA

5.1 Analisi Time History

La prima parte prevede un'analisi nel tempo delle diverse strutture che permette di ricavare spostamenti, velocità, accelerazioni e forza alla base mediati su 10 accelerogrammi diversi. Questi risultati sono dipendenti non solo dai sismi ma anche dai valori del coefficiente di smorzamento, α e dalla PGA.

Gli accelerogrammi utilizzati sono naturali spettro compatibili, infatti la normativa italiana permette di usarli a patto che rispettino certi limiti. Di seguito si riporta quanto cita la normativa italiana al § 3.2.3.6 delle NTC 2008.

“Gli stati limite, ultimi e di esercizio, possono essere verificati mediante l’uso di accelerogrammi, o artificiali o simulati o naturali. Ciascun accelerogramma descrive una componente, orizzontale o verticale, dell’azione sismica; l’insieme delle tre componenti (due orizzontali, tra loro ortogonali ed una verticale) costituisce un gruppo di accelerogrammi. La durata degli accelerogrammi artificiali deve essere stabilita sulla base della magnitudo e degli altri parametri fisici che determinano la scelta del valore di a_g e di SS . In assenza di studi specifici la durata della parte pseudo-stazionaria degli accelerogrammi deve essere almeno pari a 10 s; la parte pseudo-stazionaria deve essere preceduta e seguita da tratti di ampiezza crescente da zero e decrescente a zero, di modo che la durata complessiva dell’accelerogramma sia non inferiore a 25 s. Gli accelerogrammi artificiali devono avere uno spettro di risposta elastico coerente con lo

spettro di risposta adottato nella progettazione. La coerenza con lo spettro elastico è da verificare in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi, per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente α del 5%. L'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico, in alcun punto del maggiore tra gli intervalli $0,15s \div 2,0s$ e $0,15s \div 2T$, in cui T è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura in campo elastico, per le verifiche agli stati limite ultimi, e $0,15s \div 1,5 T$, per le verifiche agli stati limite di esercizio. [...] L'uso di accelerogrammi registrati è ammesso, a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito. Gli accelerogrammi registrati devono essere selezionati e scalati in modo da approssimare gli spettri di risposta nel campo di periodi di interesse per il problema in esame.”

Avendo scelto dieci accelerogrammi, la spettro compatibilità viene garantita se la media di questi si trova al di sopra del 90% dello spettro di riferimento. Tale spettro è il Tipo 1 dell'Eurocodice 8 su suolo B.

I dati sono stati ricavati dal database PEER e da quello Europeo. Sono stati decisi in modo che avessero una velocità di propagazione V_{s30} delle onde abbastanza elevata in modo da rientrare nei sottosuoli di categoria B.

Le strutture vengono analizzate per una PGA di riferimento pari a $0.35g_S$ e tutti gli accelerogrammi sono scalati in modo da ottenere questa stessa accelerazione al suolo. A questa PGA se ne aggiungono poi altre due ovvero $0.15g$ e $0.25g$.

In base alla vicinanza o meno dalla faglia si hanno due diverse categorie di sismi. A seconda di questa distanza si hanno delle sollecitazioni diverse dovute alle caratteristiche proprie del sisma.

Di seguito si riportano le tipologie di accelerogrammi, la loro distanza dalla faglia, la magnitudo e il fattore di scala.

Tabella 1 Sismi far fault

Tipo di terremoto	Evento sismico	Data	Mw	Distanza Epicentro [km]	Fattore di scala (PGA 0.15gS)	Fattore di scala (PGA 0.25gS)	Fattore di scala (PGA 0.35gS)
Far fault	Umbria Marche	26/09/1997	6.0	38	1.96	3.27	4.59
	Landers	28/06/1992	7.3	27	1.46	2.43	3.41
	Campano Lucano	23/11/1980	6.9	33	1.94	3.24	4.55
	Kobe	17/01/1995	6.9	22	0.55	0.92	1.29
	Northridge	17/01/1994	6.7	30	0.75	1.25	1.75
	Chi Chi	21/09/1999	7.6	29	0.87	1.45	2.04
	Loma Prieta	17/10/1989	6.9	34	2.45	4.09	5.73
	Spitak	07/12/1988	6.7	20	0.98	1.63	2.29
	Irpinia	23/11/1980	6.9	30	1.27	2.12	2.98
Kyllini	16/10/1988	5.9	36	1.15	1.92	2.69	

Tabella 2 Sismi near fault

Tipo di terremoto	Evento sismico	Data	Mw	Distanza Epicentro [km]	Fattore di scala (PGA 0.15gS)	Fattore di scala (PGA 0.25gS)	Fattore di scala (PGA 0.35gS)
Near fault	Umbria Marche	26/09/1997	6.0	9	1.04	1.73	2.43
	Landers	28/06/1992	7.3	11	0.65	1.09	1.53
	Campano Lucano	23/11/1980	6.9	15	1.35	2.25	3.16
	Kobe	17/01/1995	6.9	1	0.30	0.50	0.71
	Northridge	17/01/1994	6.7	5	0.18	0.30	0.42
	Chi Chi	21/09/1999	7.6	3	0.20	0.34	0.48
	Loma Prieta	17/10/1989	6.9	4	0.28	0.46	0.65
	Spitak	07/12/1988	5.8	10	1.46	2.44	3.42
	Irpinia	23/11/1980	6.9	13	1.38	2.31	3.24
	Kyllini	16/10/1988	5.9	8	1.40	2.32	3.25

Di seguito si riportano alcuni degli accelerogrammi e spettri dei sismi far e near fault utilizzati.

SISMI FAR FAULT

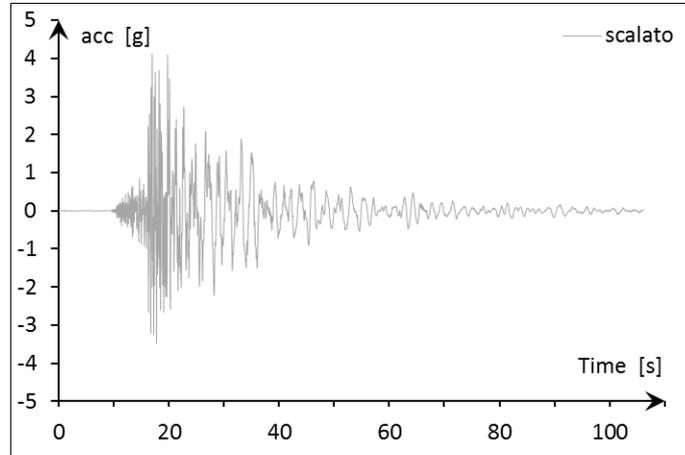


Figura 45 Accelerogramma Umbria Marche

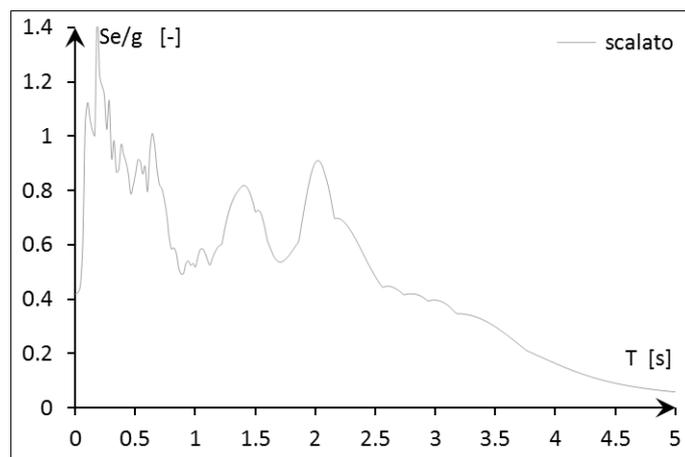


Figura 46 Spettro Umbria Marche

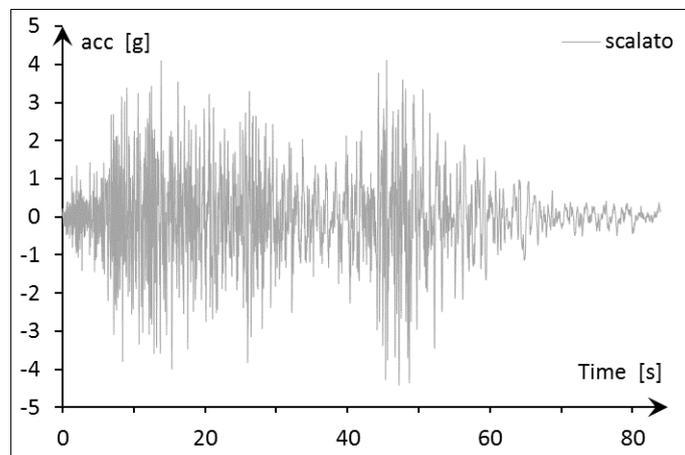


Figura 47 Accelerogramma Campano Lucano

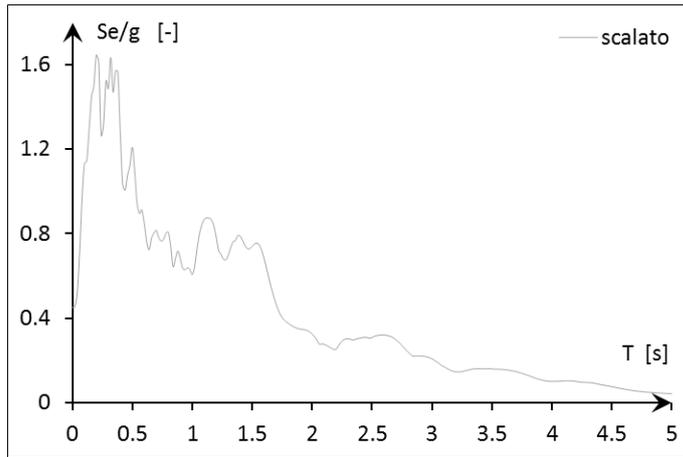


Figura 48 Spettro Campano Lucano

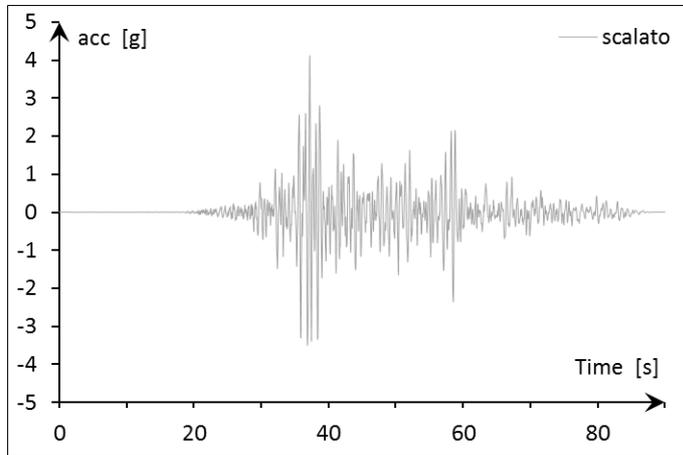


Figura 49 Accelerogramma Chi Chi

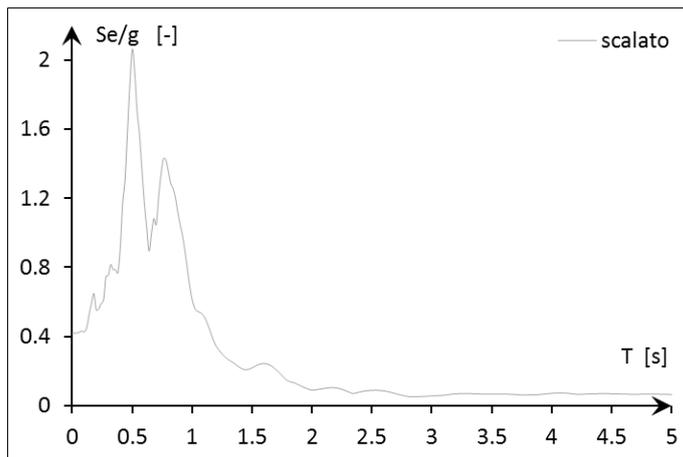


Figura 50 Spettro Chi Chi

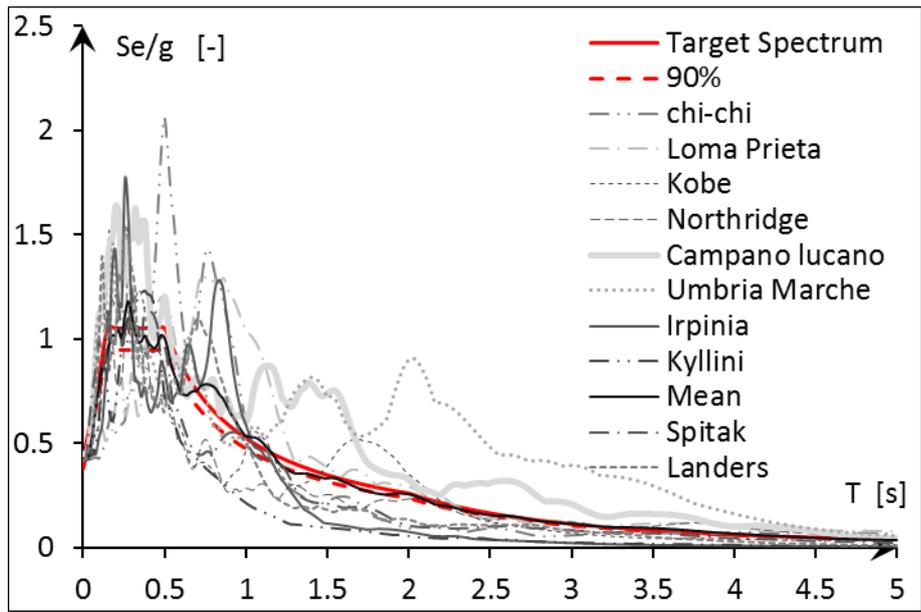


Figura 51 Sovrapposizione spettri

SISMI NEAR FAULT

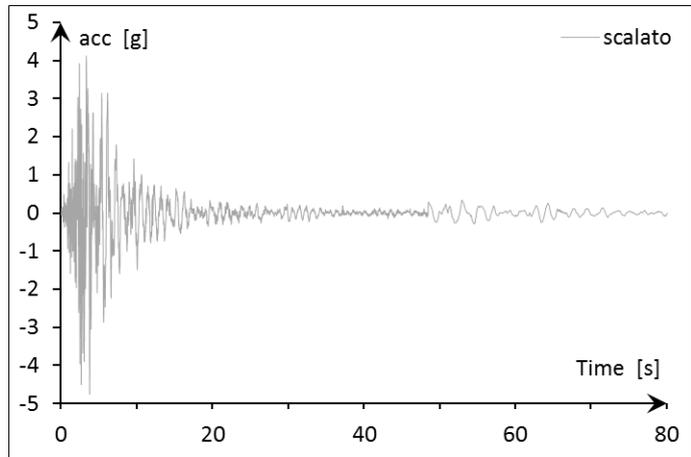


Figura 52 Accelerogramma Umbria Marche

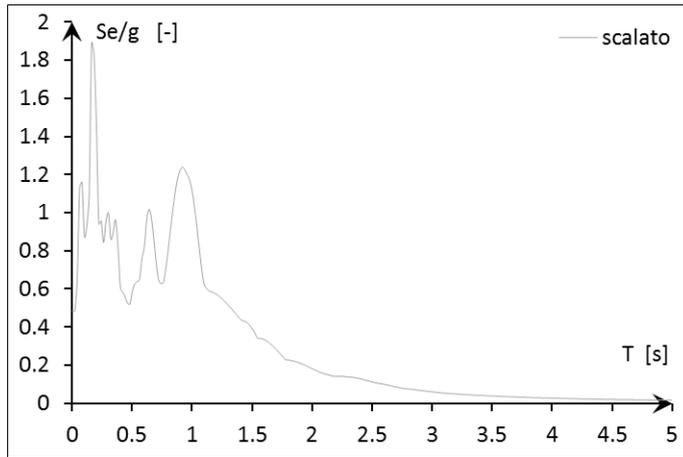


Figura 53 Spettro Umbria Marche

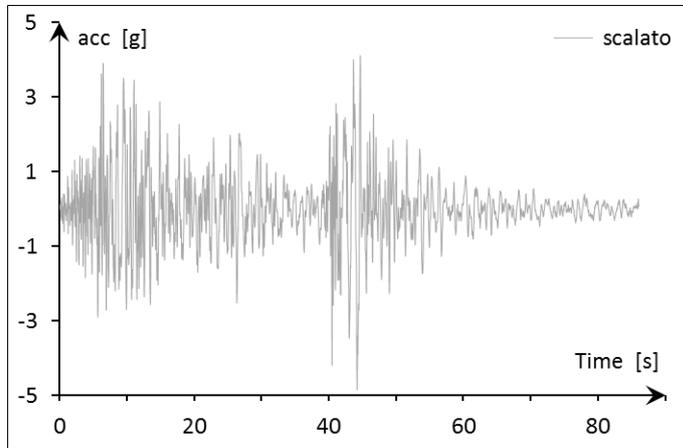


Figura 54 Accelerogramma Campano Lucano

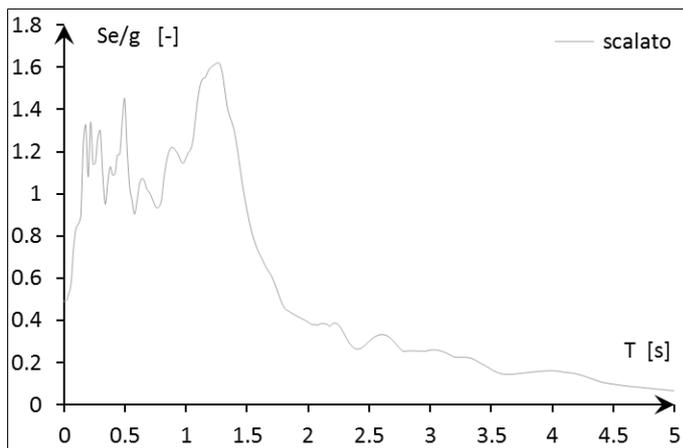


Figura 55 Spettro Campano Lucano

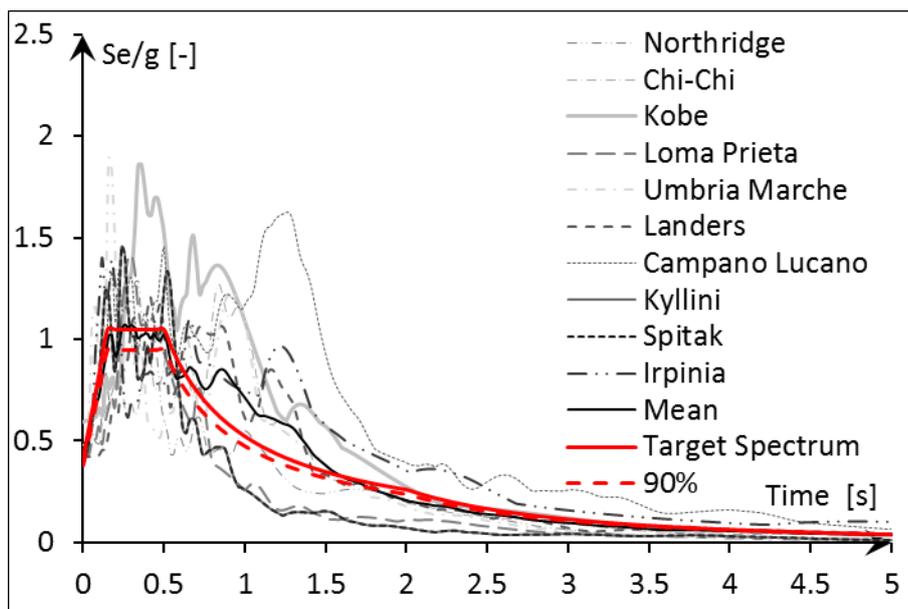


Figura 56 Sovrapposizione spettri

Essendo le strutture a più gradi di libertà e dovendo dare un'informazione generale del comportamento senza dover realizzare l'edificio così come si presenta nella realtà, si decide di passare ad un sistema più semplice a tre gradi di libertà. Si suddivide la struttura in tre masse ovvero quella della sovrastruttura, della sottostruttura e dell'isolamento. Per effettuare tale passaggio si devono assumere determinate ipotesi quali:

- Massa di piano costante per tutti i piani al di fuori del piano di isolamento
- La geometria di pianta è costante per tutta l'altezza

Nel sistema reale quindi sia la sovrastruttura che la sottostruttura saranno composte da piani aventi la medesima massa. Per il calcolo delle caratteristiche del sistema equivalente però è stato necessario fare delle ulteriori ipotesi e, per assicurare una equivalenza dinamica tra i due sistemi posti a confronto, si è deciso di determinare la rigidità in maniera indiretta, partendo dal calcolo del periodo. Il calcolo delle caratteristiche della struttura semplificata viene fatto nel seguente modo:

1. La massa della sovrastruttura è la somma delle masse di piano che costituiscono la sovrastruttura, e lo stesso vale per la sottostruttura:

$$M_{\text{sottostruttura}} = n_{\text{piani}_{\text{sottostruttura}}} \times \text{massa di piani}$$

$$M_{\text{sovrastruttura}} = n_{\text{piani}_{\text{sovrastruttura}}} \times \text{massa di piano}$$

2. Per introdurre un metodo generalizzato per la determinazione delle rigidezze si è deciso di partire dalla determinazione dei periodi delle singole parti di struttura. Il calcolo del periodo è stato eseguito attraverso la formula semplificata proposta dalle NTC08 fondata sull'ipotesi che il primo modo di vibrare sia il principale. In questo studio l'ipotesi non è sempre soddisfatta, però risulta comunque accettabile poiché il periodo è calcolato al solo fine della determinazione di una rigidezza, che non sia legata alle caratteristiche strutturali, ma sia calcolabile in maniera generalizzata. Si determinano i periodi della struttura generale e della sovrastruttura, entrambe ipotizzate fisse alla base.

$$T_{\text{sovrastruttura}} = C H_{\text{sovrastruttura}}^{\frac{3}{4}}$$

$$T_{\text{globale}} = C H_{\text{globale}}^{\frac{3}{4}}$$

Dai periodi si determinano le frequenze angolari con la seguente relazione:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Infine si determinano le rigidezze delle singole parti di struttura:

$$K = \omega^2 M$$

La K trovata è riferita al sistema equivalente, ed è ipotizzata pari alla somma in serie delle rigidezze di piano del sistema reale:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} = n \frac{1}{k}$$

$$k = nk_{eq}$$

Si è fatta dipendere la rigidezza della sottostruttura da quella della sovrastruttura perché aggiungendo un certo numero di piani all'edificio esistente si deve

considerare il rinforzo della parte sotto che non è detto sia in grado di sopportare un aumento di peso.

3. A questo punto si conoscono masse e rigidzze della sovrastruttura e della sottostruttura di entrambi i sistemi, manca però la determinazione della rigidzza del sistema di isolamento. Data la necessità di creare un sistema generalizzato che sia congruo all'utilizzo per ogni struttura da analizzare, si fissa un periodo di isolamento pari ad una amplificazione del periodo calcolato per la sovrastruttura fissa alla base.

La massa del sistema di isolamento è invece la stessa tra i due sistemi.

Per uniformare ulteriormente il tutto si sono prese delle dimensioni e delle masse standard per tutte le strutture. Si è scelta un'area di 900mq pari ad una maglia 30 x 30m.

Tabella 3 Masse e area struttura

MASSE	
Acciaio	900 kg/mq
Cls	1000 kg/mq
Isolamento	1200 kg/mq

Tabella 4 Caratteristiche struttura

	Acciaio	Cls
C_NTC	0.085	0.075
H piano [m]	3	3
H isolamento[m]	1	1

Le strutture scelte per il calcolo sono le seguenti:

Tabella 5 Casi analizzati

CASO	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°	16°
n° masse upper	2	2	2	2	4	4	4	4	6	6	6	6	8	8	8	8
n° masse is	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n° masse lower	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
rapporto di massa	1	2	3	4	0.5	1	1.5	2	0.3	0.6	1	1.3	0.25	0.5	0.75	1

CASO	17°	18°	19°	20°	21°	22°	23°	24°	25°	26°	27°	28°
n° masse upper	10	10	10	10	15	15	15	15	20	20	20	20
n° masse is	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n° masse lower	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
rapporto di massa	0.2	0.4	0.6	0.8	0.13	0.26	0.4	0.53	0.1	0.2	0.3	0.4

Nell'analisi time history realizzata si sono considerati diversi valori del coefficiente di smorzamento e di α . Tale valori sono stati scelti in base alle caratteristiche dei dissipatori che è possibile trovare in commercio o che comunque risultano realizzabili. I valori scelti sono:

Tabella 6 Valori alfa

alfa	0.1	0.25	0.50	0.60	0.75	0.90	1
------	-----	------	------	------	------	------	---

Tabella 7 Valori del coef. di smorzamento

C				passo
1° intervallo	0	a	1000	200
2° intervallo	2000	a	10000	2000
3° intervallo	11000	a	101000	10000
4° intervallo	15000	a	105000	10000
5° intervallo	16000	a	106000	10000

Dai risultati ottenuti si sono estrapolati poi i rapporti degli spostamenti, della velocità e dell'accelerazione rispetto a quelli senza smorzamento. Questo ci sarà utile poi nella seconda parte dello studio.

A questi valori se ne aggiunge un altro che riguarda lo smorzamento c . Per poter ottenere un valore sensato, si considera di rapportarlo rispetto al valore $2 m \omega$ dove ω è la frequenza angolare del primo modo di vibrare mentre m è la massa modale sempre del primo modo. Così facendo si vanno ad escludere tutte le strutture che presentano un valore maggiore di 1, ovvero che presentano un sovrasmorzamento.

Questa esclusione permette di limitare i valori di spostamento, forza alla base che riceve la struttura.

La divisione delle strutture secondo il numero di piani è servita per definire una struttura equivalente senza la quale non si sarebbe potuto definire delle situazioni generali. Si andranno poi a dare dei valori di frequenze nei quali possono ricadere strutture diverse da quelle scelte per lo studio.

I numerosi risultati ottenuti dalle analisi svolte, consentono di prendere visione di un comportamento strutturale delle strutture con isolamento di interpiano al variare di alcuni parametri strutturali.

Taglio alla base

Per sottostrutture con pochi piani (2,4), un elevato numero di piani della sovrastruttura riduce la forza tagliante alla base, al contrario per sottostrutture con maggiore numero di piani (6,8), il più basso taglio si ha per sovrastrutture con pochi piani.

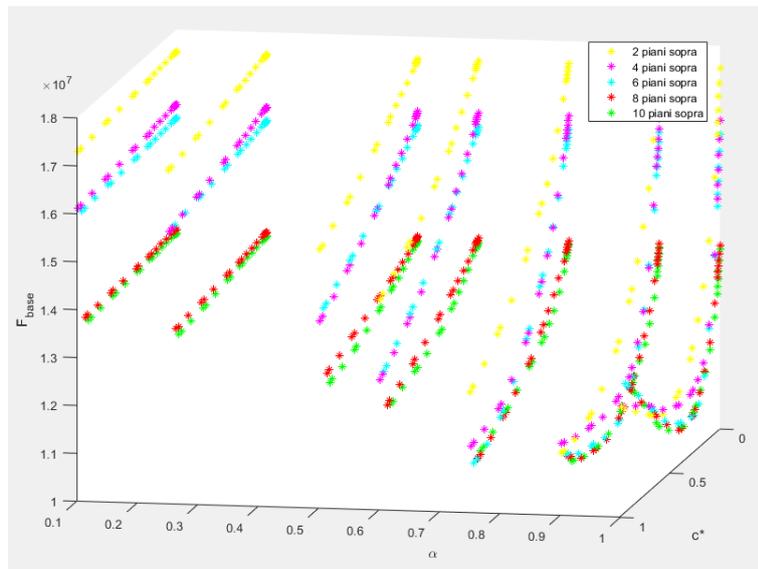


Figura 57 Taglio alla base struttura 2 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3

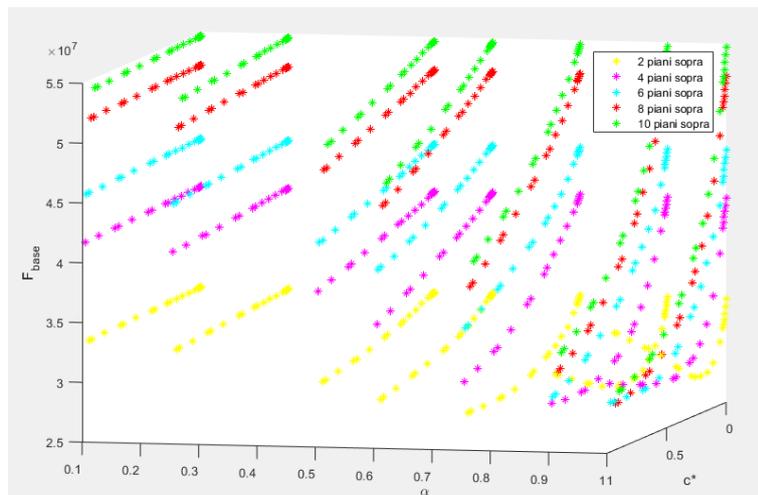


Figura 58 Taglio alla base struttura 8 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3

I grafici riportano i dati ottenuti dalle analisi per una struttura con 2 piani sotto e con 8. Si nota come queste presentino un comportamento diverso al variare dei piani sopra. Ad esempio, se la sottostruttura ha 2 piani, un elevato numero di piani sopra riducono il taglio perché il loro peso tende a ridurre lo spostamento della sottostruttura. Un ragionamento diverso va invece fatto quando la sottostruttura presenta più piani. Per quest'ultima il taglio minimo si presenta quando la sovrastruttura ha 2 piani. Essendo il periodo dell'isolamento legato a quello della sovrastruttura, ad un numero elevato di piani sopra corrisponde un periodo di isolamento alto e viceversa. Uno smorzatore lineare tende a diminuire il taglio alla base, poiché minimizza gli spostamenti dell'isolamento e tende ad irrigidire il sistema, riducendo anche lo spostamento della sottostruttura.

Spostamento sovrastruttura

Per qualsiasi numero di piani della sottostruttura, aumenta all'aumentare del numero dei piani della sovrastruttura, cambia però il comportamento al variare dei parametri dello smorzatore. Si riporta il grafico della struttura con 4 piani sotto.

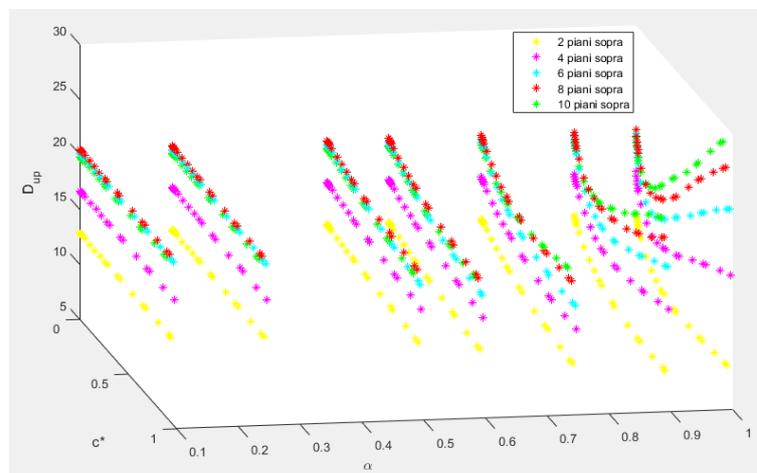


Figura 59 Spostamento sovrastruttura struttura 4 piani sotto $PGA=0.25g$ e $Tis/Tup=3$

Il grafico riporta come, per tutte le strutture, il valore minimo di spostamento relativo della sovrastruttura si ha per uno smorzatore lineare, tuttavia, quando il numero di piani della sovrastruttura è ridotto (pari a 2 in questo caso, ma il ragionamento si può estendere anche a 1 piano o a 3), un elevato smorzamento porta a ridurre lo spostamento, perché la struttura è rigida; aumentando invece il numero dei piani sopra, un elevato smorzamento porta ad un aumento dello spostamento della sovrastruttura, perché è meno rigida rispetto a prima.

Accelerazione sovrastruttura

Al contrario dello spostamento, presenta valori maggiori quando la sovrastruttura è rigida, ovvero ha un numero di piani basso. Come per il caso precedente si riporta il grafico riferito alla struttura con 4 piani sotto.

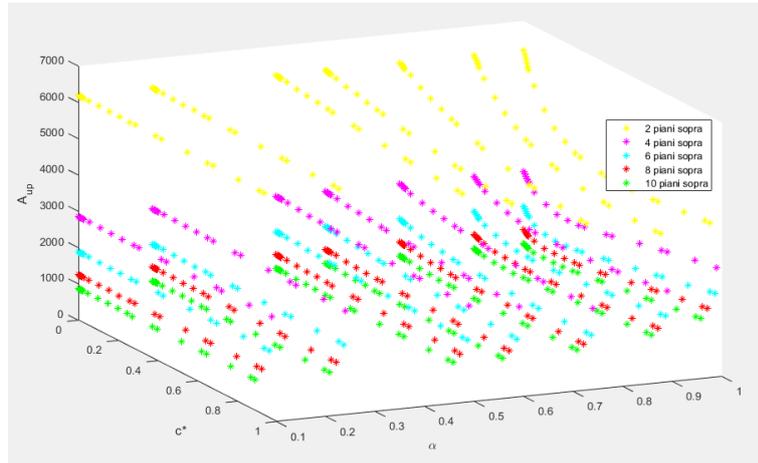


Figura 60 Accelerazione sovrastruttura struttura 4 piani sotto $PGA=0.25g$ e $Tis/Tup=3$

Per i casi con sovrastruttura pari a 2,4 e 6 piani, un aumento del valore di α porta ad una riduzione dell'accelerazione, mentre per le strutture con 8 e 10 piani sopra la soluzione migliore si ha con un damper non lineare ($\alpha < 0.5$). Per tutti i casi il valore ottimale di smorzamento non corrisponde al massimo, ma ad un rapporto c^* inferiore a 0.5.

Spostamento del piano dell'isolamento

Aumenta all'aumentare dei piani sopra, mentre diminuisce all'aumentare di c^* e α , poiché lo smorzatore lineare con una costante c elevata genera una forza di reazione opposta al moto elevata, che tende a bloccare lo spostamento.

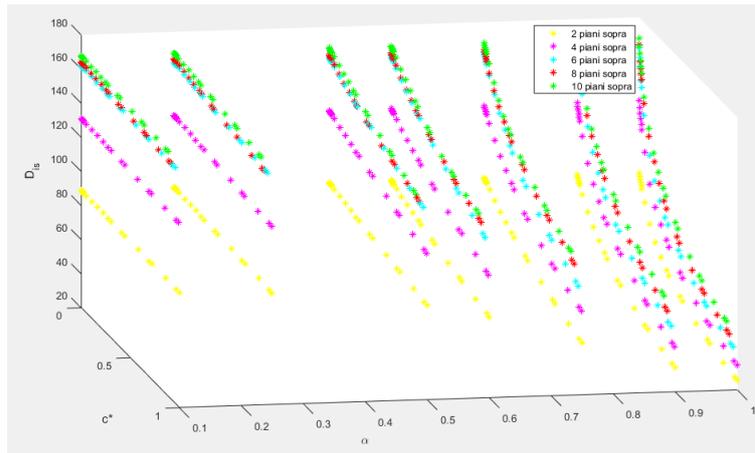


Figura 61 Spostamento isolamento struttura 4 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3

Accelerazione isolamento

Per quanto riguarda l'accelerazione a livello dell'isolamento invece, sono presenti diverse risposte strutturali al variare di c^* e α , per diverse strutture.

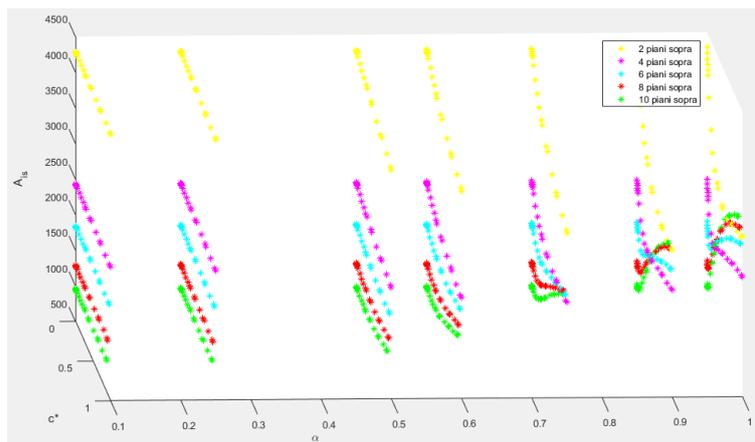


Figura 62 Accelerazione isolamento struttura 4 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3

Per strutture con 6,8 e 10 piani sopra, un aumento dei parametri c^* e α comporta un aumento di accelerazione a livello dell'isolamento, mentre accade l'opposto per strutture con 4 piani sotto e 2 sopra.

Spostamento della sottostruttura

Per strutture con 2,4 e 6 piani sotto il minimo valore si ha con una sovrastruttura di 8 e 10 piani, mentre quando il numero di piani sotto l'isolamento è elevato (8), la migliore soluzione diventa dipendente dai valori di c^* e alfa.

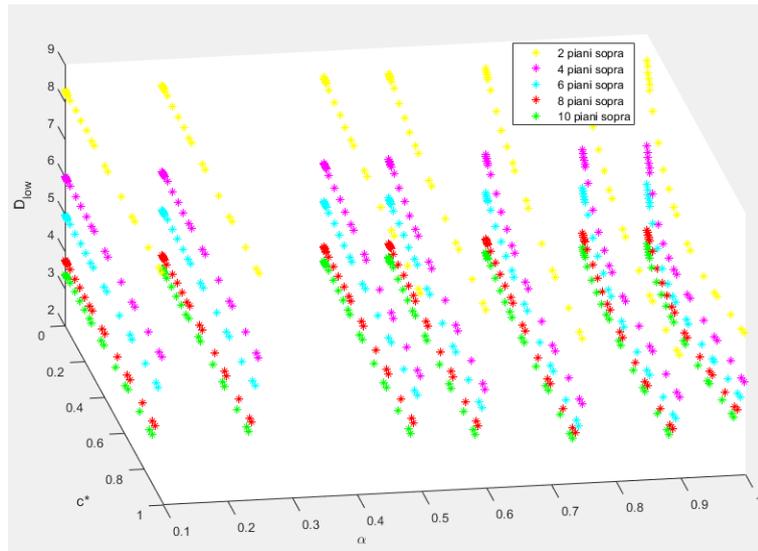


Figura 63 Spostamento sottostruttura struttura 2 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3

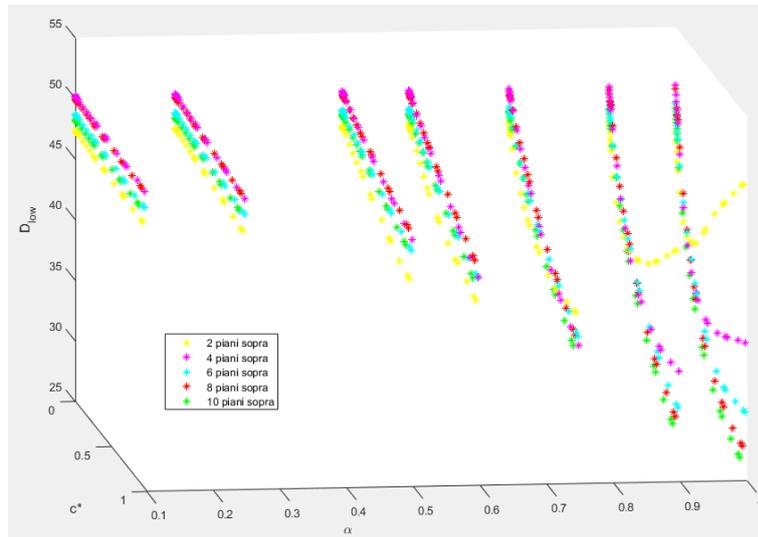


Figura 64 Spostamento sottostruttura struttura 8 piani sotto PGA=0.25g e Tis/Tup=3

Per una struttura con 8 piani sotto, per uno smorzatore non lineare la soluzione migliore si ha con 2 piani sopra all'isolamento, mentre per uno smorzatore lineare la soluzione migliore si ha costruendo 8 piani sopra all'isolamento.

Per quanto riguarda l'accelerazione della sottostruttura, questa presenta un valore minimo per $c^*=1$ e $\alpha=1$.

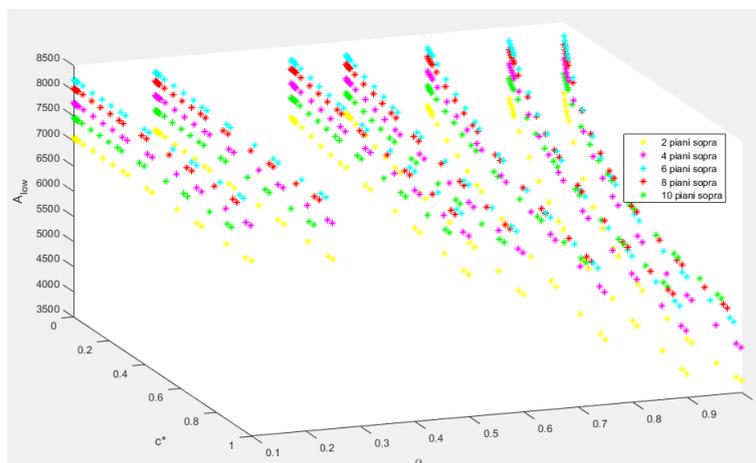
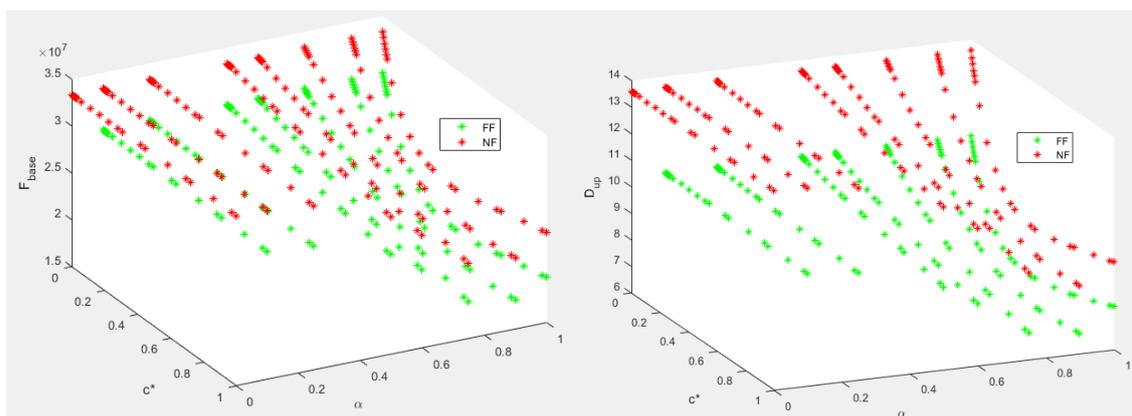


Figura 65 Accelerazione sottostruttura struttura 4 piani sotto $PGA=0.25g$ e $Tis/Tip=3$

Le analisi sono state svolte per diversi periodi di isolamento, tuttavia, pur presentando valori diversi, presentano comportamenti pressoché uguali al variare di c^* , α e del numero di piani della sovrastruttura.

Le analisi appena riportate sono riferite a sismi di tipo far fault. Sono state svolte anche analisi per i medesimi eventi sismici ma di tipo near fault. Le due tipologie di accelerogrammi, comportano risposte strutturali di intensità diversa ma il comportamento in funzione di c^* e α rimane pressoché invariato.



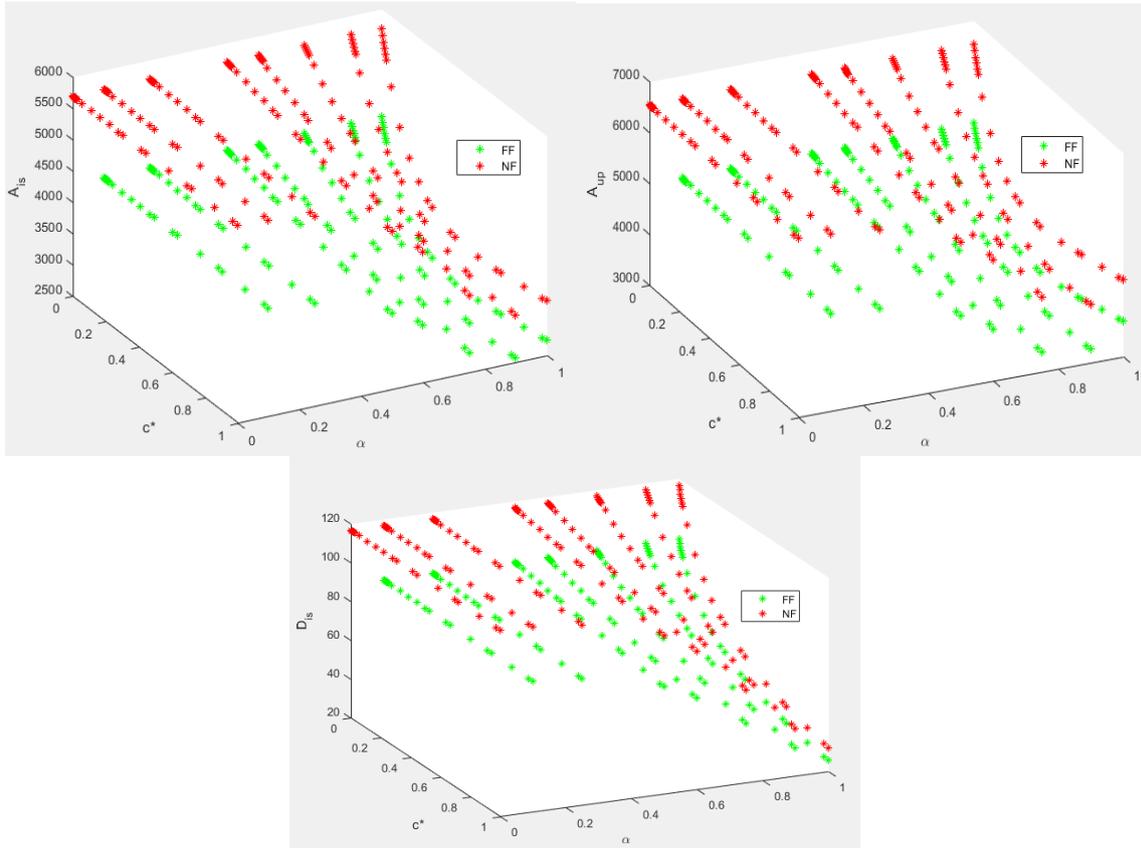
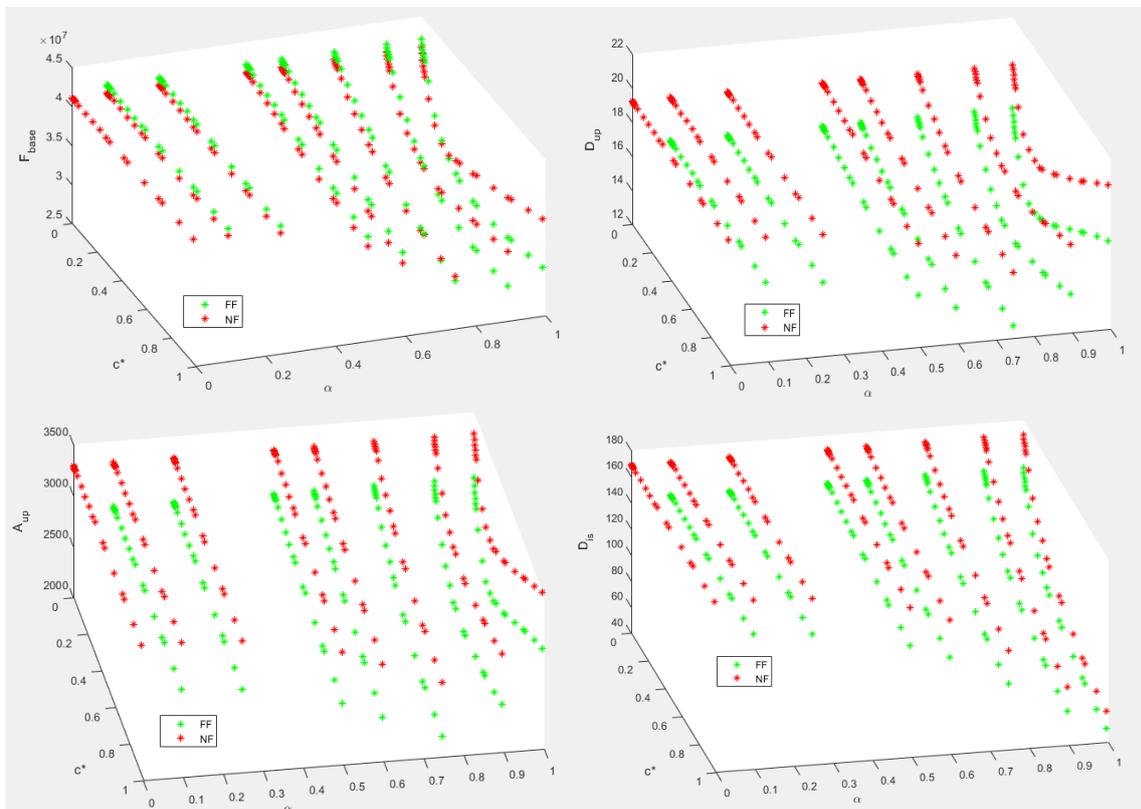


Figura 66 Struttura con 4 piani sotto e 2 sopra, per una PGA di 0.25g



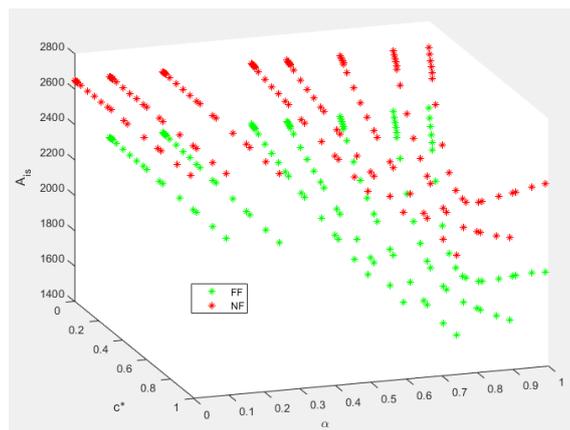


Figura 67 Struttura con 8 piani sotto e 4 sopra, per una PGA di 0.25g

Dai grafici si nota come un sisma di tipo near fault gravi maggiormente sulla struttura rispetto a quello far fault.

Lo studio presenta poi, oltre alle strutture elencate in precedenza, anche altre due tipologie di edifici:

- Edificio misto in acciaio e calcestruzzo;
- Edificio misto in acciaio e calcestruzzo con una massa di piano della sottostruttura pari a due volte quella della struttura normale.

L'analisi per trovare la rigidezza di piano è analoga a quella eseguita in precedenza, solamente che in questo caso si utilizza il calcolo del periodo con la formula da normativa sia per la sovra che sottostruttura. Da qui poi:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Prima di calcolare la rigidezza della sottostruttura si deve attribuire alla massa di piano anche la massa della parte sopra per poter calcolare la rigidezza corretta. Quindi:

$$m_{eq} = (m_{piano} + m_u)$$

$$K = \omega^2 m_{eq}$$

Nell'analisi di queste strutture si è scelto un numero di piani pari a 2 e 4 per la sottostruttura.

5.2 Modello surrogato

La seconda parte dello studio prevede di realizzare una superficie che permetta di descrivere il comportamento delle strutture. Tale superficie deve essere in grado di approssimare l'andamento dei parametri studiati in modo che, scelta una qualsiasi struttura presente o meno all'interno dei casi, si possa arrivare ad un risultato che possa dare un'idea di quello che può accadere all'edificio.

Per fare questo ci si basa su un'analisi di regressione non lineare. Tramite il programma Minitab si va a creare una superficie che permetta di rispettare i vari dati delle time history. Si sono fatte varie prove per poter scegliere le giuste variabili da utilizzare e i vari output da plottare.

Gli output scelti sono i seguenti:

- $r_{D,U}$: rapporto spostamento sovrastruttura smorzato rispetto a quello non smorzato
- $r_{D,IS}$: rapporto spostamento isolamento smorzato rispetto a quello non smorzato
- $r_{A,U}$: rapporto accelerazione sovrastruttura smorzata rispetto a quella non smorzata
- $r_{A,IS}$: rapporto accelerazione isolamento smorzata rispetto a quella non smorzata
- $r_{F,B}$: rapporto forza alle base smorzata rispetto a quella non smorzata
- F_{FVD} : forza del dissipatore

Questi output non sono valori assoluti ma bensì dei rapporti, questo permette di dare dei risultati in termini generali.

Le variabili scelte invece sono:

- PGA : accelerazione massima al suolo
- α : costante del damper
- c^* : rapporto tra il coefficiente di smorzamento del damper e $2m_1\omega_1$
- $r_{\omega,L}$: rapporto frequenza della sottostruttura rispetto a quella dell'isolamento
- $r_{\omega,U}$: rapporto frequenza della sovrastruttura rispetto a quella dell'isolamento

Così facendo riusciamo ad ottenere una differenziazione delle varie strutture che risultano perciò univocamente determinate una volta scelti i vari rapporti. Inoltre vengono inserite le caratteristiche dinamiche che ci permettono di tenere conto dei modi di vibrare della struttura e quindi di andare ad ottenere delle superfici più attinenti ai casi studiati.

Si sono eliminati gli output corrispondenti al rapporto $\frac{c_{dampner}}{2 m_1 \omega_1} > 1$. Per determinare il grado da attribuire all'equazione che descriverà il sistema, si sono posti a confronto i grafici di dispersione dei punti generati dalla THA e quelli ottenuti dal modello di previsione.

Dal totale dei dati analizzati si vanno ad eliminare anche le strutture con 15 e 20 piani sopra, infatti da precedenti analisi si è visto come questi valori vadano a creare dei problemi nell'adattamento della funzione.

Per poter trovare una superficie buona si deve procedere prima ad un'analisi statistica dei dati, ovvero si osservano alcuni parametri fondamentali quali il p-value, S e l'R-sq(adj).

Il p-value è la probabilità che per un dato modello, quando l'ipotesi nulla è vera, la somma statistica sia uguale o maggiore rispetto ai dati osservati.

S è la deviazione standard e indica di quanto i dati si discostano dal modello

$$s^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

n = numero della popolazione

x_i = i-esimo valore di x

\bar{x} = media campionaria

L'R-sq(adj) si differenzia dal normale R-sq perché presenta un valore più accurato quando le variabili in gioco sono molte. Il normale R-sq infatti, pur essendo un parametro indicatore della bontà del modello, cresce anche all'aumentare del modello e non è ben chiaro se il suo valore elevato sia dovuto al fatto che il modello approssima bene i dati oppure al numero di variabili in gioco. In questo caso è quindi utile usare R-sq(adj), più adatto a problemi a molte variabili.

Nelle analisi condotte perciò si sono escluse le variabili con un p-value troppo elevato e con un R-sq(adj) troppo basso.

Il primo passo è stato generare un modello surrogato di grado 2. È stato messo a confronto il risultato ottenuto dal modello e i risultati ottenuti dalle THA, sui quali il modello si basa,

riferiti al rapporto tra lo spostamento della sovrastruttura per vari tipi di smorzamento su quello della stessa quando lo smorzamento del damper è 0.

Si riportano di seguito alcuni casi delle soluzioni trovate.

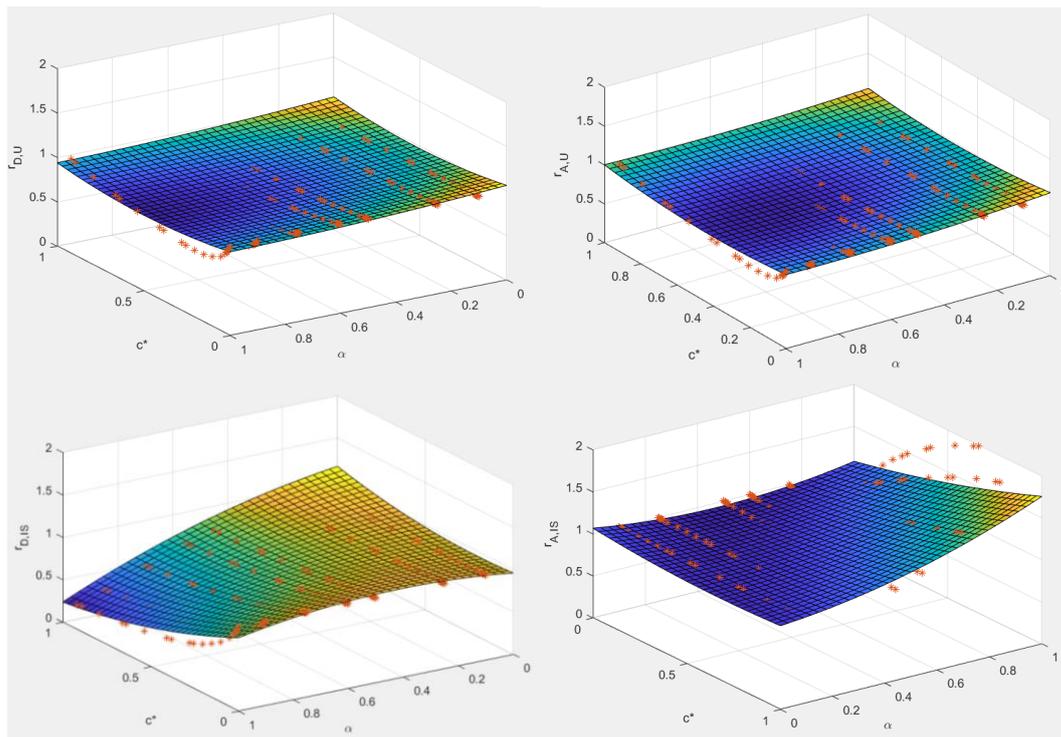


Figura 68 Struttura con $r_{\omega,L}=3.23$ $r_{\omega,U}=1.088$ $PGA=0.35g$

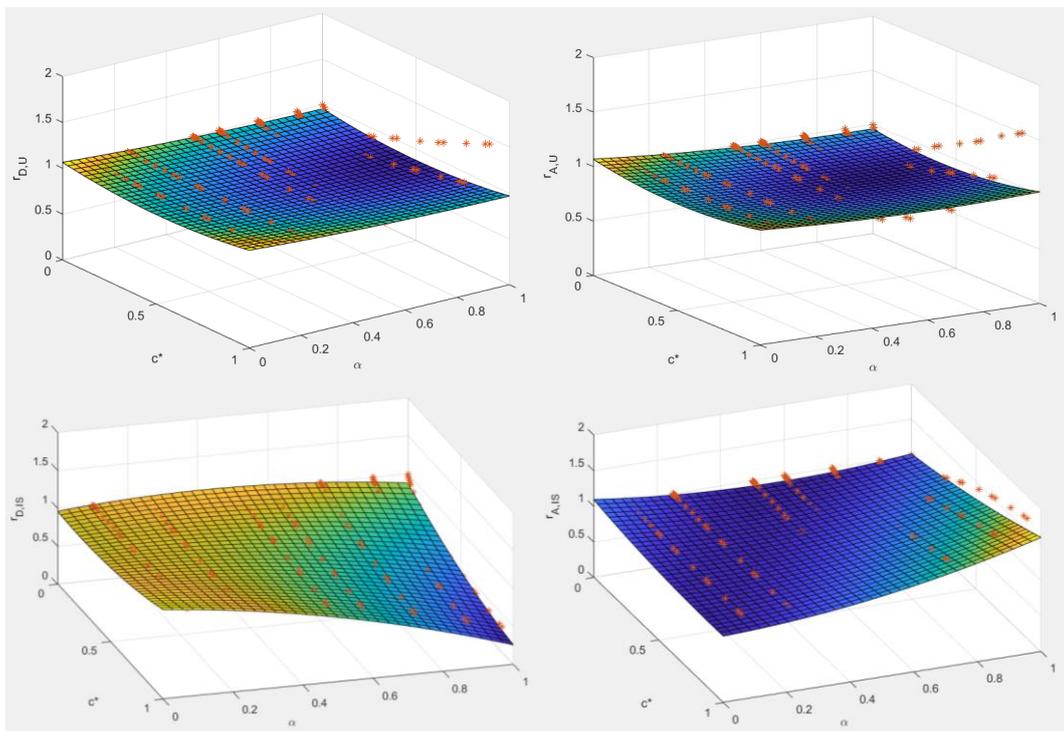
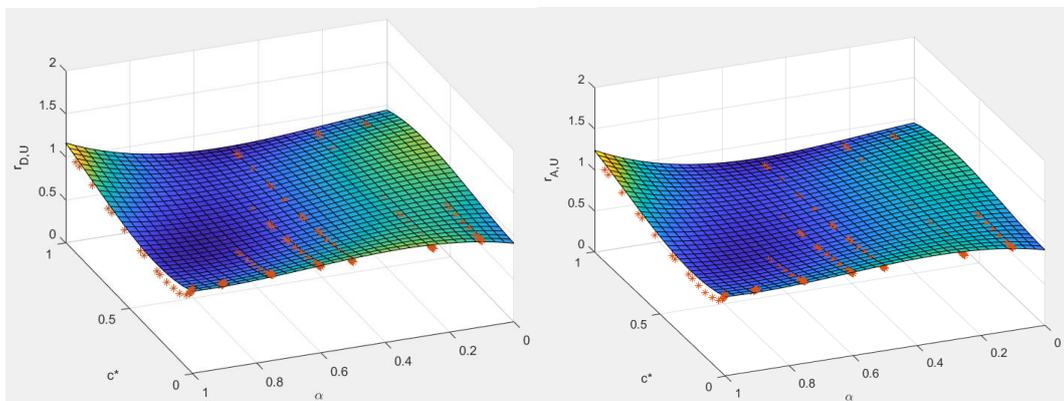


Figura 69 Struttura con $r_{\omega,L}=1.87$ $r_{\omega,U}=0.98$ $PGA=0.35g$

Tra le varie superfici plottate quella che potrebbe rispecchiare meglio di tutti l'andamento dei dati della THA è lo spostamento del piano di isolamento. Tale superficie però si discosta ancora dal vero andamento dei dati perciò si decide di passare ad un grado superiore.



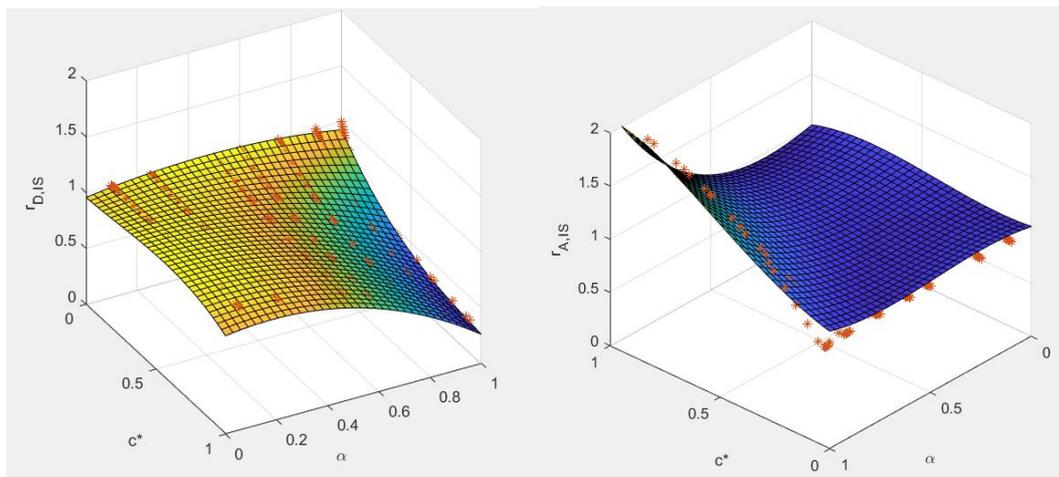


Figura 70 Struttura con $r_{\omega,L}=3.23$ $r_{\omega,U}=1.088$ $PGA=0.35g$

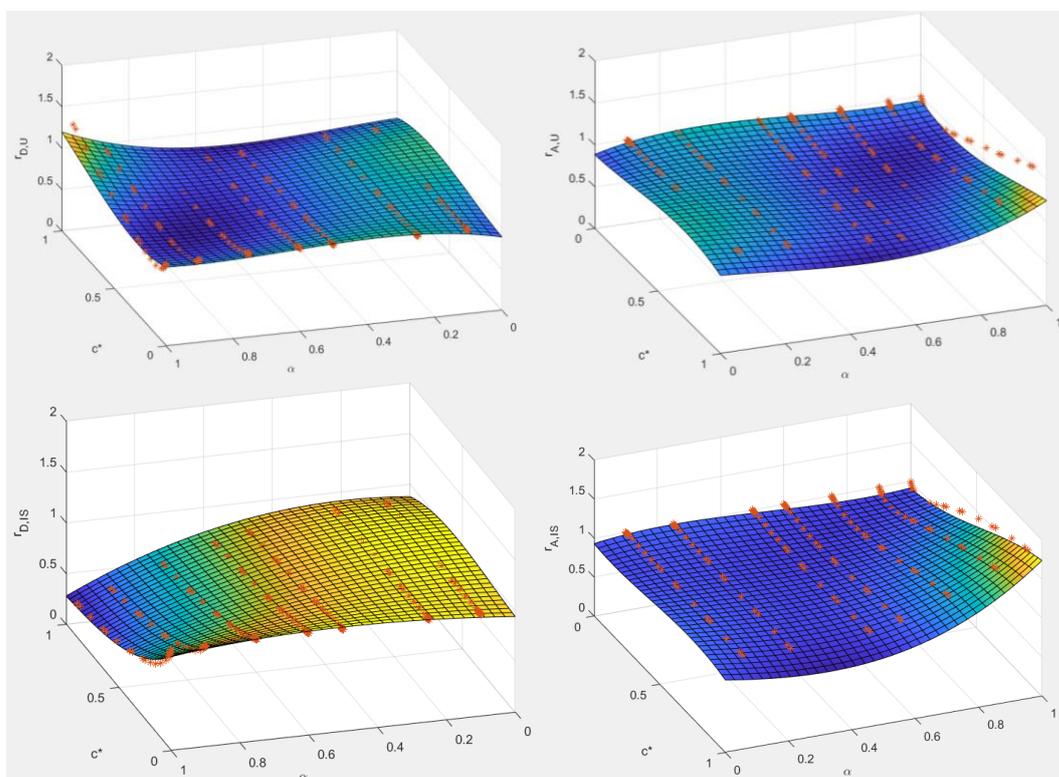


Figura 71 Struttura con $r_{\omega,L}=1.87$ $r_{\omega,U}=0.98$ $PGA=0.35g$

Come si può notare l'andamento dello spostamento dell'isolamento e dell'accelerazione, a differenza degli altri, viene ben descritto dalla superficie di terzo grado. Si accetta perciò di mantenere questo grado e si prova ad utilizzare un grado maggiore per l'accelerazione e lo spostamento della sovrastruttura.

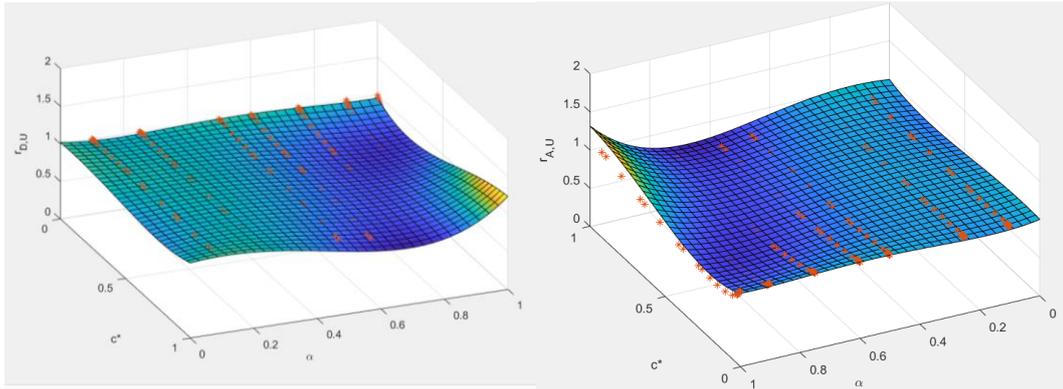


Figura 72 Struttura con $r_{\omega,L}=3.23$ $r_{\omega,U}=1.088$ $PGA=0.35g$

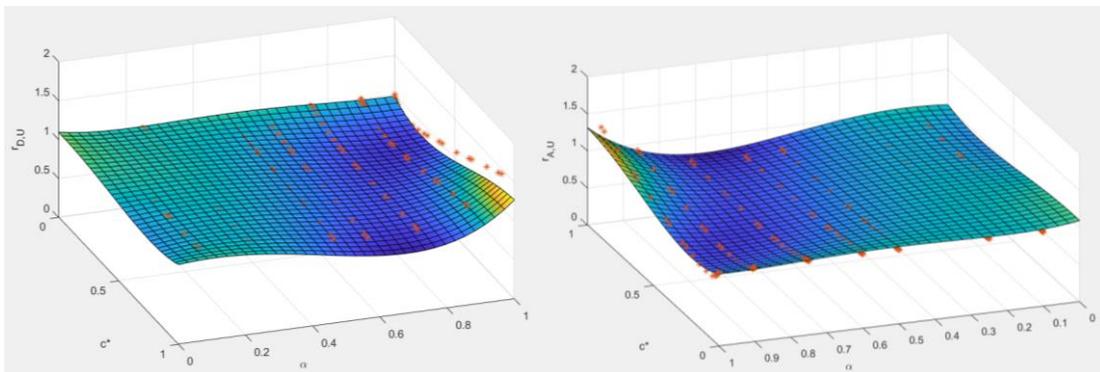


Figura 73 Struttura con $r_{\omega,L}=1.87$ $r_{\omega,U}=0.98$ $PGA=0.35g$

I gradi dei polinomi ottenuti dalla regressione sono quindi:

Tabella 8 Grado superfici

Spostamento sovrastruttura	4° grado
Spostamento isolamento	3° grado
Accelerazione sovrastruttura	4° grado
Accelerazione isolamento	3° grado
Forza alla base	3° grado
Forza dello smorzatore	3° grado

Tabella 9 Accuratezza superfici

	S	R-sq(adj)
$r_{D,U}$	0.0598527	70,79%
$r_{D,IS}$	0.027670	98,02%
$r_{A,U}$	0.0691066	63,77%
$r_{A,IS}$	0.183661	61,4%
$r_{F,B}$	0.0319085	90,45%
F_{FVD}	313702	97.81%

Si riportano di seguito i coefficienti delle equazioni di 3° e 4° grado scelte per lo studio.

Le variabili vengono così definite:

- $A = PGA$
- $B = \alpha$
- $C = c *$
- $D = r_{\omega,L}$
- $E = r_{\omega,U}$

Si riportano solamente i coefficienti per le strutture in calcestruzzo analizzate per i sismi far fault. Il procedimento risulta essere analogo per i sismi near fault e per le altre tipologie di strutture.

Tabella 10 Coefficienti superficiali

	Constant	A	B	C	D	E	AA	BB	CC	DD	EE	AB	AC	AD	AE
$r_{D,IS}$	0.6829	-0.1	0.1679	0.0001	0.05995	0.4684	-0.096	-0.0737	0.4058	-0.005885	-0.242	0.6068	0.6031	0.0104	0.0058
$r_{A,IS}$	-0.932	0.057	0.233	-0.253	0.7432	2.254	0.03	-1.198	1.1	-0.10741	-1.002	-0.437	-0.37	-0.047	0.186
$r_{F,B}$	0.6841	-0.059	0.4772	0.1562	0.13204	0.2615	-0.064	-0.6202	0.1163	-0.014422	-0.0727	0.382	0.368	-0.0005	0.0029
F_{FVD}	-86247	3277527	8363824	541517	-570883	-809230	135787	-15780455	817476	70405	65307	-25372782	1798813	-10008	111306
$r_{D,U}$	8.179	0.03	-2.297	-1.11	-1.909	-15.073	0.21	3.115	-0.313	0.3086	12.085	0.62	0.54	-0.019	-0.25
$r_{A,U}$	8.869	0.09	-2.523	-1.453	-2.107	-16.432	0.19	2.974	-0.317	0.3334	13.099	0.65	0.5	-0.035	-0.32
	BC	BD	BE	CD	CE	DE	BBB	CCC	DDD	EEE	AAB	AAC	AAD	AAE	ABB
$r_{D,IS}$	-1.1047	-0.01628	-0.0464	-0.02421	-0.0069	-0.04785	-0.0457	-0.5237	0.000054	0.04005	0.098	-0.462	-0.0072	0.008	-0.5781
$r_{A,IS}$	-0.811	0.0425	0.412	0.1555	-0.289	-0.4643	0.8963	-0.914	0.004009	0.1443	0.24	0.49	0.046	-0.254	0.219
$r_{F,B}$	-1.2504	-0.02134	-0.0749	-0.00086	-0.0192	-0.10087	0.1528	-0.3094	0.000228	0.0049	0.058	-0.246	0.0018	-0.002	-0.3287
F_{FVD}	-8282982	297169	1164252	-172932	-147419	399877	8220377	1591927	-5139	-39551	-964740	-1951233	43622	144036	32987096
$r_{D,U}$	1.093	0.2822	2.031	0.1772	1.528	2.514	-4.029	0.044	-0.01778	-4.294	-0.83	-0.77	-0.026	-0.03	-0.894
$r_{A,U}$	0.941	0.3666	2.386	0.2799	2	2.765	-4.047	0.172	-0.01879	-4.624	-0.79	-0.69	-0.022	-0.02	-0.98
	ABC	ABD	ABE	ACC	ACD	ACE	ADD	ADE	AEE	BBC	BBD	BBE	BCC	BCD	BCE
$r_{D,IS}$	-0.1017	-0.00466	0.0131	-0.172	0.00523	-0.002	-0.00069	0.0024	-0.0073	-0.61077	0.00781	-0.04188	1.19313	0.00031	-0.03211
$r_{A,IS}$	-0.314	-0.0156	0.087	-0.162	-0.057	0.313	0.00124	0.0162	-0.0488	2.07	0.21141	-0.7634	0.3121	0.31233	-1.2514
$r_{F,B}$	-0.0713	-0.00384	-0.0134	-0.1013	-0.004	-0.0062	-0.000076	0.00223	0.001	-0.0721	0.02957	0.0946	0.7775	0.03915	0.11558
F_{FVD}	38595244	-1059941	-3040975	-6381526	-799006	-2638725	56050	21010	414663	18019729	-562740	-1689500	-6558051	-689003	-2376496
$r_{D,U}$	0.229	0.007	0.168	-0.781	0.037	0.123	0.0047	0.009	0.121	-5.898	-0.1066	0.271	2.659	-0.1984	0.166
$r_{A,U}$	0.173	0	0.176	-0.76	0.031	0.138	0.0074	0.016	0.155	-5.781	-0.1009	0.436	2.718	-0.1889	0.264
	BDD	BDE	BEE	CCD	CCE	CDD	CDE	CEE	DDE	DEE	BBBB	CCCC	DDDD	EEEE	AABB
$r_{D,IS}$	0.002424	-0.01295	0.03685	0.01071	-0.01782	0.002219	-0.01003	0.0199	0.0032	0.00917					
$r_{A,IS}$	-0.01322	-0.10245	0.1938	-0.01399	0.1633	-0.00909	-0.0934	0.1926	0.03941	0.06621					
$r_{F,B}$	0.001878	-0.02075	0.00054	0.003	0.0521	0.001726	-0.02179	-0.00577	0.007159	0.01968					
F_{FVD}	52518	26209	369613	182542	123312	41414	19916	368321	-26648	-65219					
$r_{D,U}$	-0.04542	-0.0339	-1.254	-0.0097	-0.157	-0.03745	0.0183	-0.898	-0.2851	-1.0783	1.858	0.406	0.000274	0.5697	0.79
$r_{A,U}$	-0.0602	-0.0682	-1.484	-0.0238	-0.219	-0.05375	-0.0205	-1.142	-0.306	-1.1912	1.886	0.35	0.000288	0.6091	0.74
	AABC	AABD	AABE	AACC	AACD	AACE	AADD	AADE	AAEE	ABBB	ABBC	ABBD	ABBE	ABCC	ABCD
$r_{D,U}$	0.71	0.013	-0.085	0.48	-0.001	-0.125	0.0014	0.001	0.026	0.317	-0.728	-0.0113	-0.094	-0.135	-0.0162
$r_{A,U}$	0.7	0.016	-0.081	0.45	0.002	-0.148	0.0009	0.001	0.022	0.391	-0.672	-0.0079	-0.111	-0.126	-0.019
	ABCE	ABDD	ABDE	ABEE	ACCC	ACCD	ACCE	ACDD	ACDE	ACEE	ADDD	ADDE	ADEE	AEEE	BBBC
$r_{D,U}$	0.101	0.00078	-0.0055	-0.002	0.324	-0.0111	0.029	-0.00116	-0.0039	-0.026	-0.000307	-0.00096	0.0013	-0.0263	4.2279
$r_{A,U}$	0.099	0.00094	-0.0048	0	0.324	-0.0109	0.025	-0.00071	-0.0036	-0.024	-0.000413	-0.0017	0.0007	-0.033	4.339
	BBBD	BBBE	BBCD	BBCE	BBDD	BBDE	BSEE	BCCC	BCCD	BCEE	BCDD	BCDE	BCEE	BDDD	
$r_{D,U}$	0.0207	-0.3598	1.7757	0.06349	-0.8736	-0.00084	0.052	0.0587	-2.7124	0.0424	0.0209	0.00241	0.05735	0.0694	0.002801
$r_{A,U}$	0.0277	-0.3944	1.591	0.0854	-0.9446	-0.0027	0.052	0.0255	-2.718	0.0393	0.0802	0.00025	0.0577	0.0366	0.003547
	BDDE	BDEE	BEEE	CCCD	CCCE	CCDD	CCDE	CCEE	CDDD	CDDE	CDEE	CEEE	DDDE	DDEE	DEEE
$r_{D,U}$	0.00341	-0.02362	0.2443	-0.0188	0.0049	-0.00013	0.0189	0.0215	0.002364	0.00182	-0.02732	0.1833	0.0089	0.06433	0.1471
$r_{A,U}$	0.00714	-0.0229	0.2951	-0.0206	-0.0095	0.00151	0.0201	0.0385	0.003041	0.00552	-0.0251	0.2284	0.0092	0.06971	0.1632

5.3 Ottimizzazione

Il processo di ottimizzazione è stato sviluppato mediante l'algoritmo genetico NSGAI. Lo scopo del processo è quello di ottimizzare dei parametri di risposta strutturale, utilizzando come variabili i parametri c^* e α . Il risultato sarà quindi un fronte di Pareto, dove sono riportati tutte le possibili combinazioni di variabili che ottimizzano gli obiettivi (OF).

Si pongano, ad esempio, gli spostamenti di interpiano dell'isolamento e della sovrastruttura come obiettivi, si intuisce che all'aumentare della forza di reazione del damper, lo spostamento dell'isolamento diminuisce, mentre aumenta quello della sovrastruttura, perché ad essa è trasmessa più accelerazione. Al contrario, per una costante c dello smorzatore bassa, lo spostamento del piano di isolamento sarà maggiore, mentre sarà minore quello della sovrastruttura.

Per i diversi valori di PGA, il comportamento è pressochè uguale, varia invece in base al periodo del sistema di isolamento (e quindi dalle caratteristiche degli isolatori).

Sono di seguito riportati i grafici dei fronti di Pareto per la struttura in calcestruzzo, per una $PGA=0.25g$, come esempio. OF1 indica il rapporto tra gli spostamenti del piano di isolamento quando c'è o meno lo smorzatore, mentre OF2 indica il rapporto tra gli spostamenti della sovrastruttura.

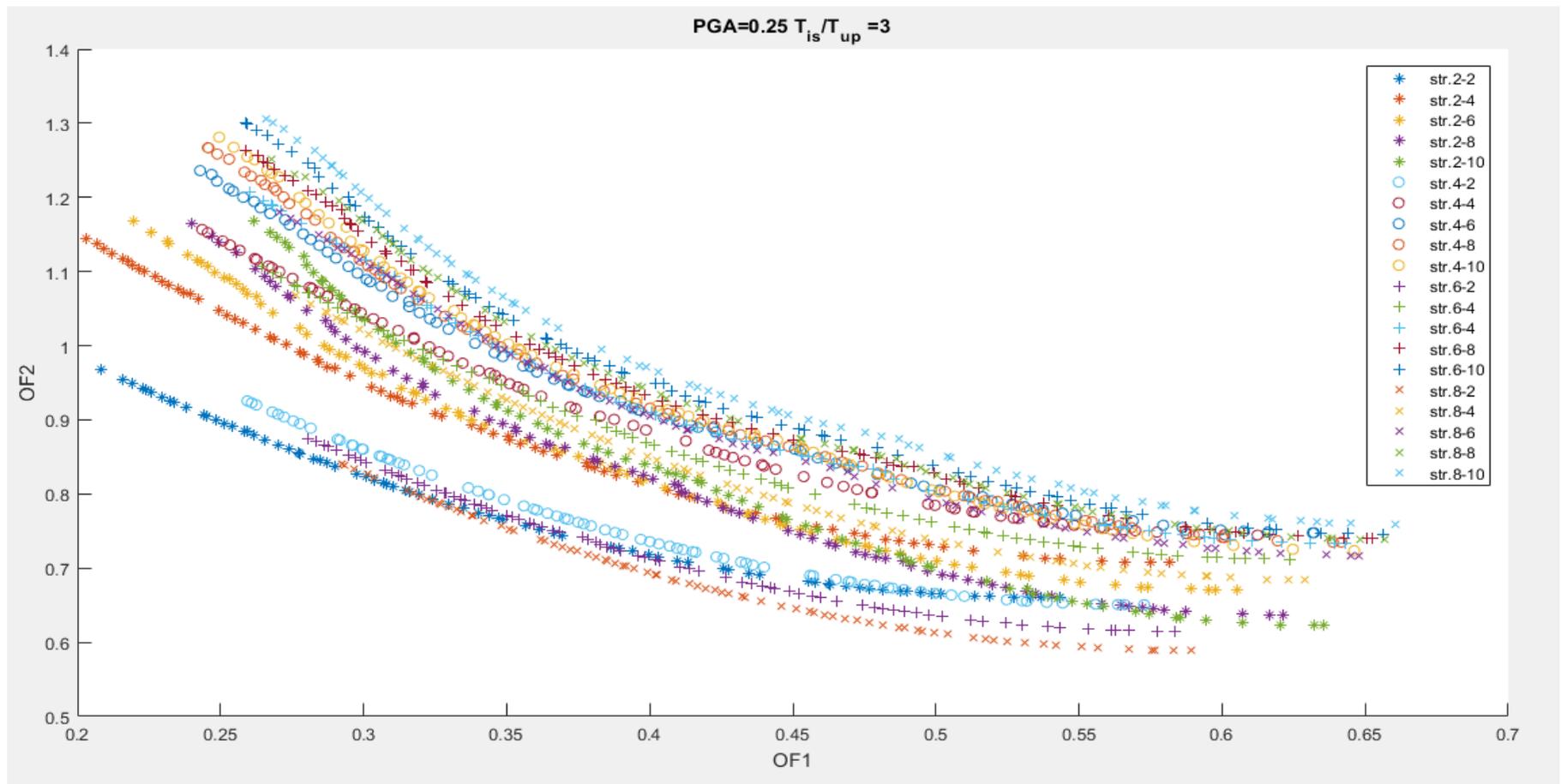


Figura 74 Pareto front di tutte le strutture studiate per una PGA=0.25g e $T_{is}/T_{up}=3$

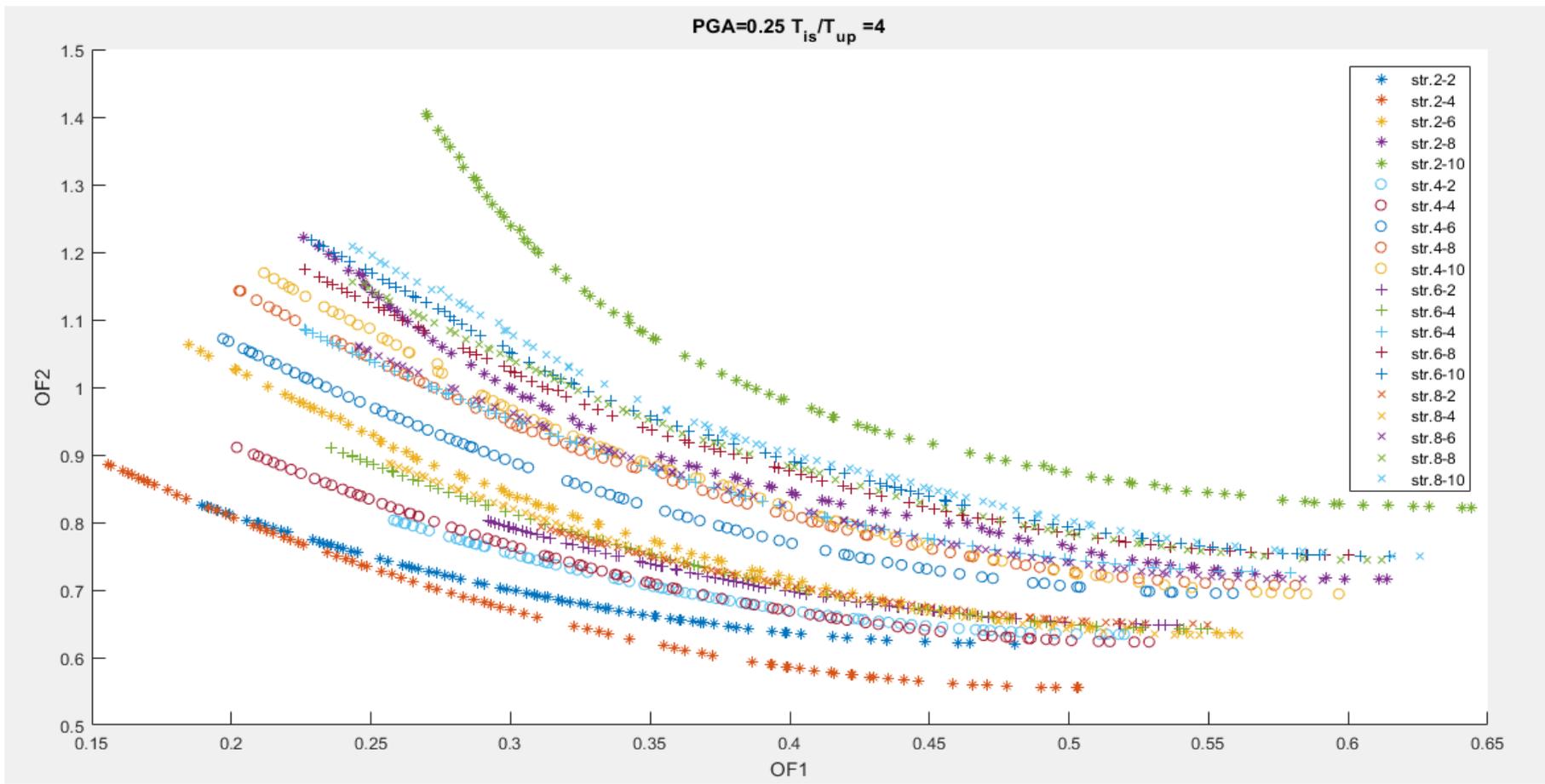


Figura 75 Pareto front di tutte le strutture studiate per una PGA=0.25g e $T_{is}/T_{up}=4$

Dai grafici si nota che per la maggior parte delle strutture, una riduzione di spostamento del piano di isolamento porta ad un aumento dello spostamento della sovrastruttura, anche del 30%. L'utilizzo del damper riduce comunque lo spostamento dell'isolamento. Per rendere più chiara la rappresentazione, si prenda il solo caso di struttura con 4 piani sotto.

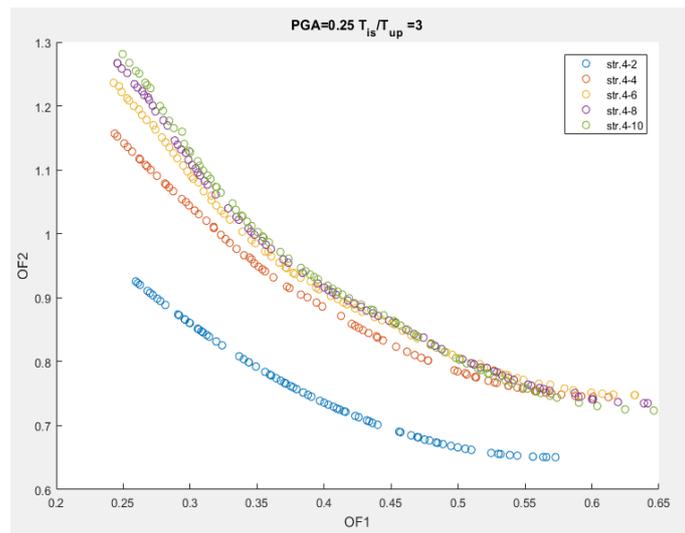


Figura 76 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una $PGA=0.25g$ e $T_{is}/T_{up}=3$

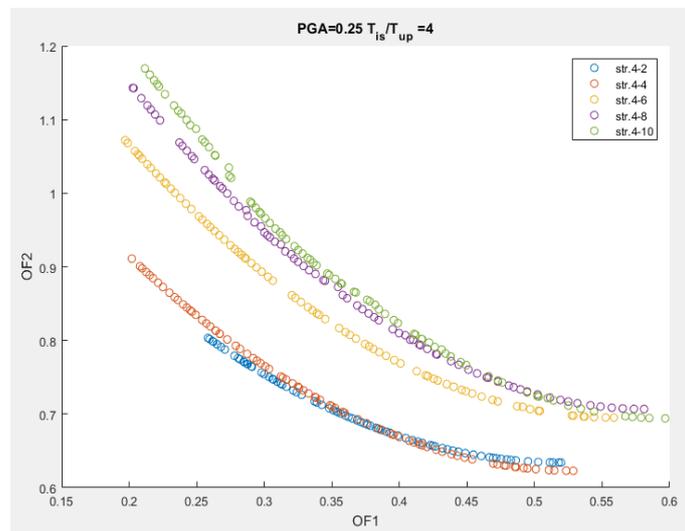


Figura 77 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una $PGA=0.25g$ e $T_{is}/T_{up}=3$

Dai grafici si nota come un aumento del periodo di isolamento, con l'utilizzo di uno smorzatore, porti un beneficio alla sovrastruttura. Si nota come per il secondo grafico i valori di OF2 siano minori rispetto al primo. Per quando riguarda i valori di c^* e α , questi sono riportati nei seguenti grafici.

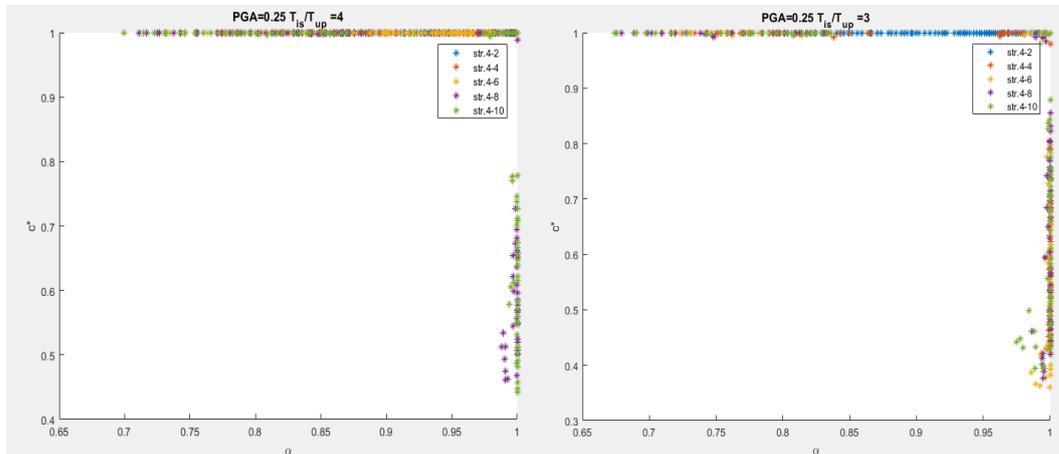


Figura 78 Valori di c^* e α per i vari punti delle Pareto front

I valori di c^* e α sono situati lungo il bordo del grafico, dove $c^*=1$ oppure $\alpha=1$. Si ricorda che il rapporto $c^*=1$ non indica uno smorzamento del 100%, poiché dipende dalla massa partecipante del primo modo di vibrare. Dai risultati ottenuti si può quindi dedurre che uno smorzamento elevato porta sempre ad una riduzione dello spostamento a livello dell'isolamento, mentre può aumentare lo spostamento della sovrastruttura.

Si ripete ora l'analisi per altri 2 obiettivi: riduzione del taglio alla base (OF1) e dell'accelerazione della sovrastruttura (OF2).

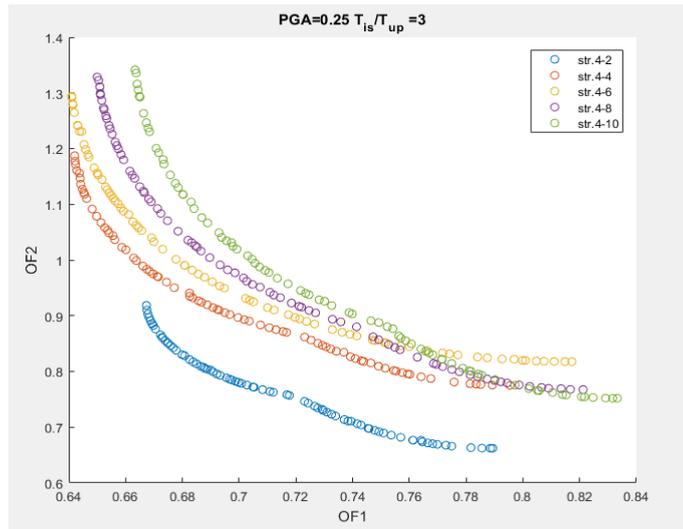


Figura 79 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una PGA=0.25g e $T_{is}/T_{up}=3$

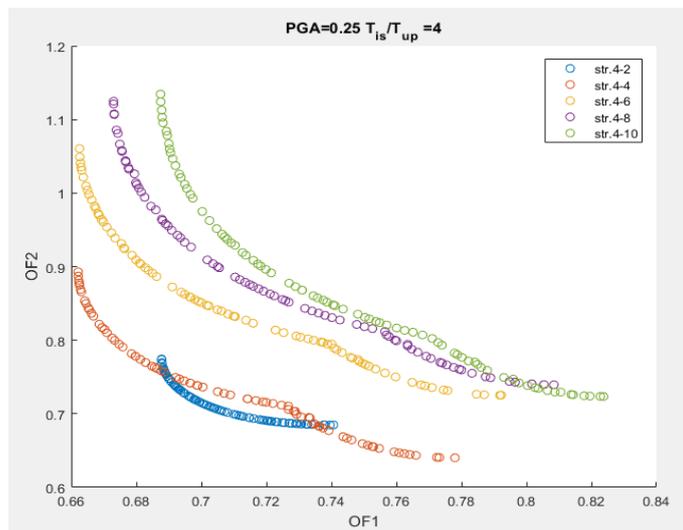


Figura 80 Pareto front della struttura con 4 piani sotto per una PGA=0.25g e $T_{is}/T_{up}=4$

Dai grafici si legge che l'applicazione del damper può portare ad una riduzione del taglio alla base, risulta quindi un beneficio in termini di sollecitazioni. Si nota inoltre che l'accelerazione in sommità aumenta all'aumentare dei piani della sovrastruttura. I valori di c^* e α ottimizzati assumono i valori rappresentati di seguito:

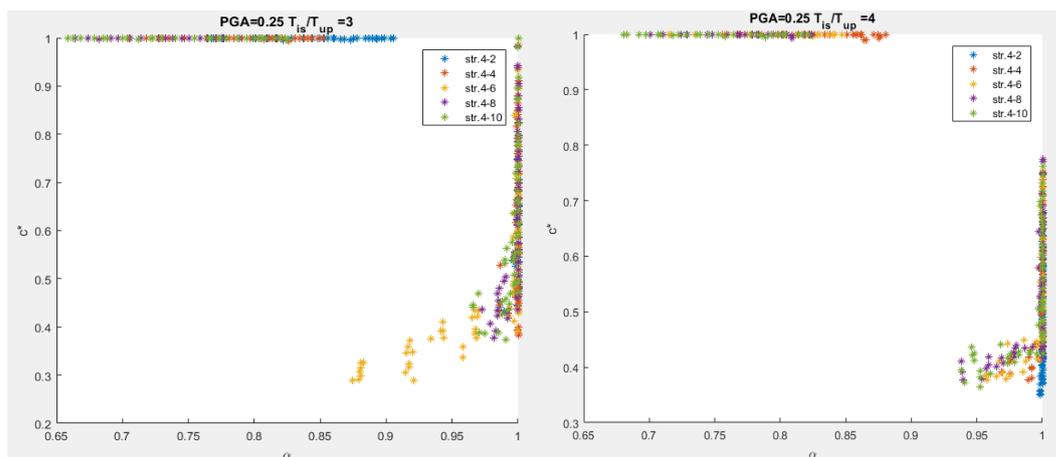


Figura 81 Valori di c^* e α per i vari punti delle Pareto front

I grafici appena riportati danno un'idea dell'andamento nel caso della struttura in calcestruzzo.

Quelli riportati sono esempi di come possono combinarsi i vari obiettivi tra loro e di cosa si possa ottenere. Ora però si vanno a valutare gli andamenti delle tre tipologie di strutture combinando tra loro tre obiettivi ovvero:

- OF1: Rapporto dello spostamento dell'isolamento;
- OF2: Rapporto dello spostamento della sovrastruttura;
- OF3: Rapporto dell'accelerazione della sovrastruttura.

Tramite la combinazione di questi tre obiettivi si cerca di capire come possono influenzarsi tra loro e quali possono essere i risultati ottimali per le tre tipologie di edifici in esame.

Si riportano perciò i grafici degli andamenti dei vari obiettivi plottati a due a due, sia nel caso in cui ci sia una limitazione imposta, sia che non ci sia. Si riporta inoltre la distribuzione dei parametri c^* e α a seconda della PGA analizzata. Si analizza anche un caso singolo per valutare quale sia la differenza tra vincolare e non.

Le strutture essendo state divise per numero di piani non permettono una generalizzazione, quindi si sono riportate le frequenze in modo da slegarsi da questa assunzione.

Tabella 11 Frequenze struttura in cls

Tis/Tup	nup	nlow	r ω L	r ω U	r ω U/r ω L	mu/ml
3	10	2	7.107404	0.981981	0.138163	5
3	8	2	6.307314	1.083473	0.17178	4
3	6	2	5.393372	1.224745	0.227083	3
3	10	4	3.627365	0.981981	0.270715	2.5
3	4	2	4.299127	1.441153	0.33522	2
3	8	4	3.232124	1.083473	0.33522	2
3	6	4	2.780667	1.224745	0.44045	1.5
3	4	4	2.239227	1.441153	0.643594	1
3	2	2	2.854465	1.837117	0.643594	1
3	2	4	1.518278	1.837117	1.21	0.5
4	10	2	9.476539	1.309307	0.138163	5
4	8	2	8.409751	1.44463	0.17178	4
4	6	2	7.191162	1.632993	0.227083	3
4	10	4	4.836486	1.309307	0.270715	2.5
4	8	4	4.309499	1.44463	0.33522	2
4	4	2	5.73217	1.921538	0.33522	2
4	6	4	3.707555	1.632993	0.44045	1.5
4	2	2	3.805953	2.44949	0.643594	1
4	4	4	2.985635	1.921538	0.643594	1
4	2	4	2.024371	2.44949	1.210001	0.5

Tabella 12 Frequenze struttura mista in acciaio e cls

Tis/Tup	nup	nlow	r ω L	r ω U	r ω U/r ω L	mu/ml
3	10	2	2.897162	0.981981	0.338946	5
3	8	2	2.703991	1.083473	0.400694	4
3	6	2	2.463366	1.224745	0.497184	3
3	10	4	1.722663	0.981981	0.570037	2.5
3	4	2	2.138578	1.441153	0.673884	2
3	8	4	1.607803	1.083473	0.673884	2
3	6	4	1.464726	1.224745	0.83616	1.5
3	4	4	1.271606	1.441153	1.133333	1
3	2	2	1.620986	1.837117	1.133333	1
3	2	4	0.963844	1.837117	1.906031	0.5
4	10	2	3.862882	1.309307	0.338946	5
4	8	2	3.605322	1.44463	0.400694	4
4	6	2	3.284488	1.632993	0.497183	3
4	10	4	2.296883	1.309307	0.570036	2.5
4	8	4	2.143737	1.44463	0.673884	2
4	4	2	2.851437	1.921538	0.673884	2

4	6	4	1.952968	1.632993	0.83616	1.5
4	4	4	1.695475	1.921538	1.133333	1
4	2	2	2.161314	2.44949	1.133334	1
4	2	4	1.285125	2.44949	1.906032	0.5

Tabella 13 Frequenze struttura mista in acciaio e cls con massa di piano doppia

Tis/Tup	nup	nlow	$r\omega L$	$r\omega U$	$r\omega U/r\omega L$	mu/ml
3	10	2	2.897162	0.981981	0.338946	5
3	8	2	2.703991	1.083473	0.400694	4
3	6	2	2.463366	1.224745	0.497184	3
3	10	4	1.722663	0.981981	0.570037	2.5
3	4	2	2.138578	1.441153	0.673884	2
3	8	4	1.607803	1.083473	0.673884	2
3	6	4	1.464726	1.224745	0.83616	1.5
3	4	4	1.271606	1.441153	1.133333	1
3	2	2	1.620986	1.837117	1.133333	1
3	2	4	0.963844	1.837117	1.906031	0.5
4	10	2	3.862882	1.309307	0.338946	5
4	8	2	3.605322	1.44463	0.400694	4
4	6	2	3.284488	1.632993	0.497183	3
4	10	4	2.296883	1.309307	0.570036	2.5
4	8	4	2.143737	1.44463	0.673884	2
4	4	2	2.851437	1.921538	0.673884	2
4	6	4	1.952968	1.632993	0.83616	1.5
4	4	4	1.695475	1.921538	1.133333	1
4	2	2	2.161314	2.44949	1.133334	1
4	2	4	1.285125	2.44949	1.906032	0.5

L'analisi è stata svolta separatamente per le tre diverse PGA, per le due amplificazioni del periodo della sovrastruttura, per i sismi Far Fault e Near Fault e per le tre tipologie di struttura.

Sismi Far Fault

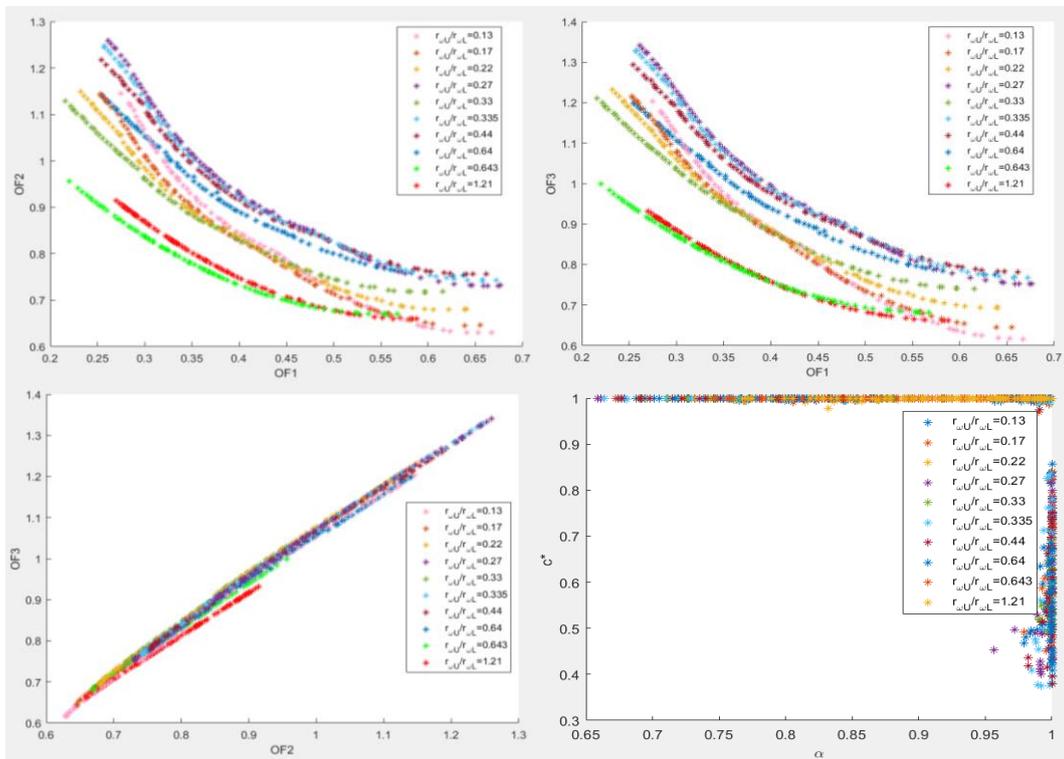


Figura 82 Struttura in cls PGA 0.25g Tis/Tup=3

Mettendo a confronto i due obiettivi OF1 e OF2 si nota come si abbia un aumento dello spostamento della sovrastruttura al diminuire dello spostamento dell'isolamento. L'incremento di OF2 si accentua al crescere del numero di piani sopra e sotto.

Questo si ha perché i due obiettivi sono contrastanti tra loro. Stessa cosa avviene per i due obiettivi OF1 e OF3. L'accelerazione e lo spostamento della sovrastruttura invece sono concordi tra loro quindi hanno un andamento lineare lungo la bisettrice.

L'aumento dello spostamento della sovrastruttura risulta crescente al decrescere del rapporto delle frequenze.

Per quanto riguarda c^* e α , il valore minimo di OF1 si ottiene con il valore massimo di c^* e α , mentre per il resto della Pareto Front abbiamo:

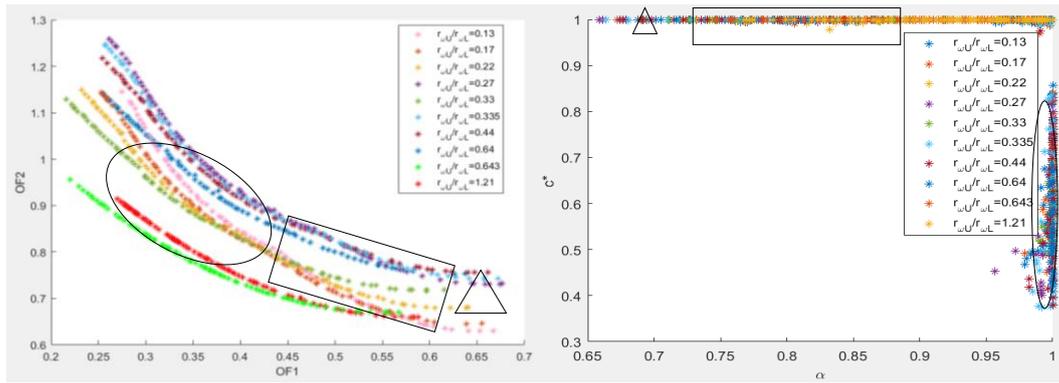
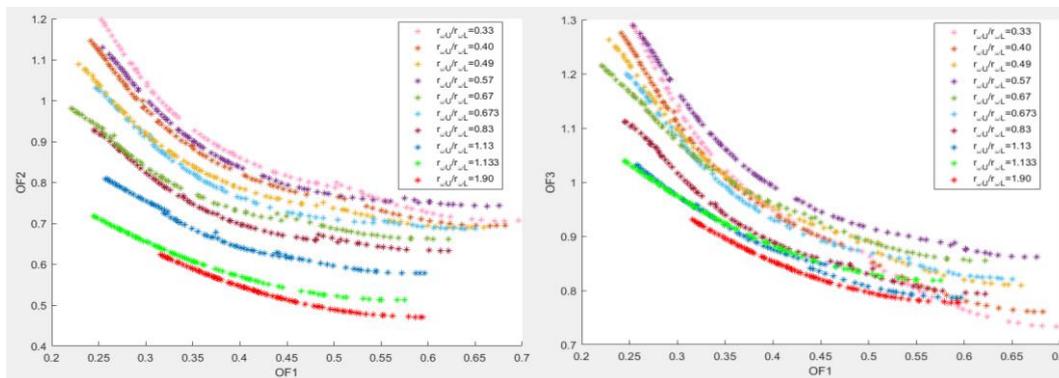


Figura 83 Andamento di c^* e α

Ovvero con valori lineari di α , più sale c^* più scende OF1, viceversa con valori di c^* pari a 1, si devono avere α che tendono a 1 se si vuole ottenere il minimo di OF1.

Tabella 14 Caratteristiche strutture in cls

Tis/Tup	nup	nlow	$r\omega L$	$r\omega U$	$r\omega U/r\omega L$
3	10	2	7.107404	0.981981	0.138163
3	8	2	6.307314	1.083473	0.17178
3	6	2	5.393372	1.224745	0.227083
3	10	4	3.627365	0.981981	0.270715
3	4	2	4.299127	1.441153	0.33522
3	8	4	3.232124	1.083473	0.33522
3	6	4	2.780667	1.224745	0.44045
3	4	4	2.239227	1.441153	0.643594
3	2	2	2.854465	1.837117	0.643594
3	2	4	1.518278	1.837117	1.21



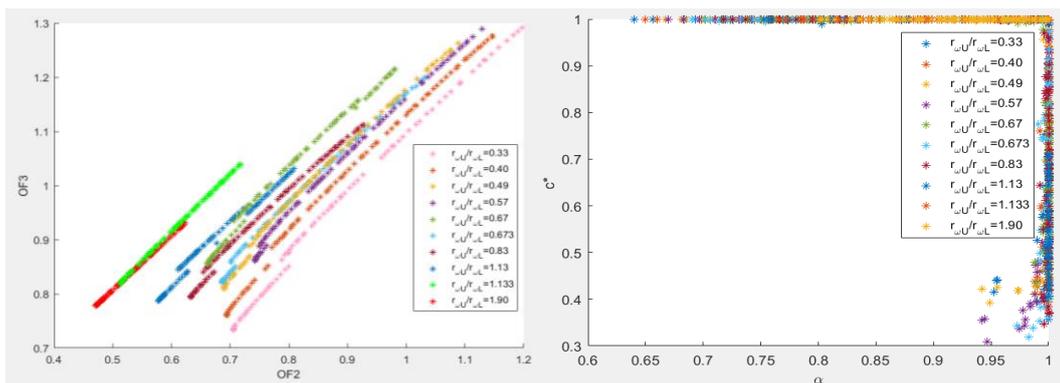


Figura 84 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3

Anche in questo caso si presenta lo stesso andamento descritto in precedenza per la struttura in calcestruzzo. L'unica differenza sta nella disposizione dei risultati di OF2 e OF3, infatti sono più distanziati rispetto al caso precedente anche se sempre concordi. Si ha infatti che a parità di OF3 aumenta OF2, ovvero avendo tanti piani sopra si muove di più la struttura.

Tabella 15 Caratteristiche strutture in acciaio e cls

Tis/Tup	nup	nlow	r _w L	r _w U	r _w U/r _w L
3	10	2	2.897162	0.981981	0.338946
3	8	2	2.703991	1.083473	0.400694
3	6	2	2.463366	1.224745	0.497184
3	10	4	1.722663	0.981981	0.570037
3	4	2	2.138578	1.441153	0.673884
3	8	4	1.607803	1.083473	0.673884
3	6	4	1.464726	1.224745	0.83616
3	4	4	1.271606	1.441153	1.133333
3	2	2	1.620986	1.837117	1.133333
3	2	4	0.963844	1.837117	1.906031

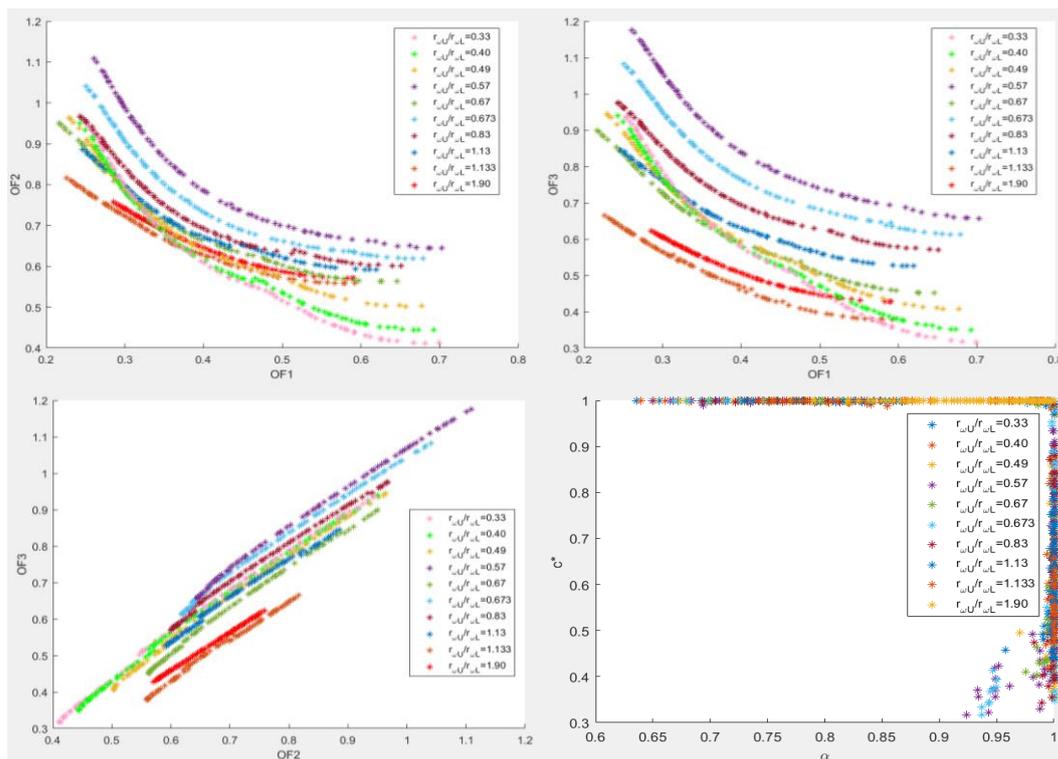


Figura 85 Strutture in acciaio e cls massa di piano doppia PGA 0.25g Tis/Tup=3

In questa struttura possiamo dire che l'andamento viene rispettato nel caso di struttura equivalente ad un numero di piani sotto pari a 4, mentre varia per le altre strutture. Si ha infatti un valore di OF2 più basso a parità di OF1 per le strutture che presentano 2 piani sotto ed un numero di piani sopra maggiore. Questa situazione potrebbe essere collegata con la rigidezza della sottostruttura e con il fatto che la massa di piano è il doppio rispetto a prima.

Tabella 16 Caratteristiche strutture in acciaio e cls con massa dipiano doppia

Tis/Tup	nup	nlow	$r\omega L$	$r\omega U$	$r\omega U/r\omega L$
3	10	2	2.897162	0.981981	0.338946
3	8	2	2.703991	1.083473	0.400694
3	6	2	2.463366	1.224745	0.497184
3	10	4	1.722663	0.981981	0.570037
3	4	2	2.138578	1.441153	0.673884
3	8	4	1.607803	1.083473	0.673884
3	6	4	1.464726	1.224745	0.83616
3	4	4	1.271606	1.441153	1.133333
3	2	2	1.620986	1.837117	1.133333
3	2	4	0.963844	1.837117	1.906031

Sismi Near Fault

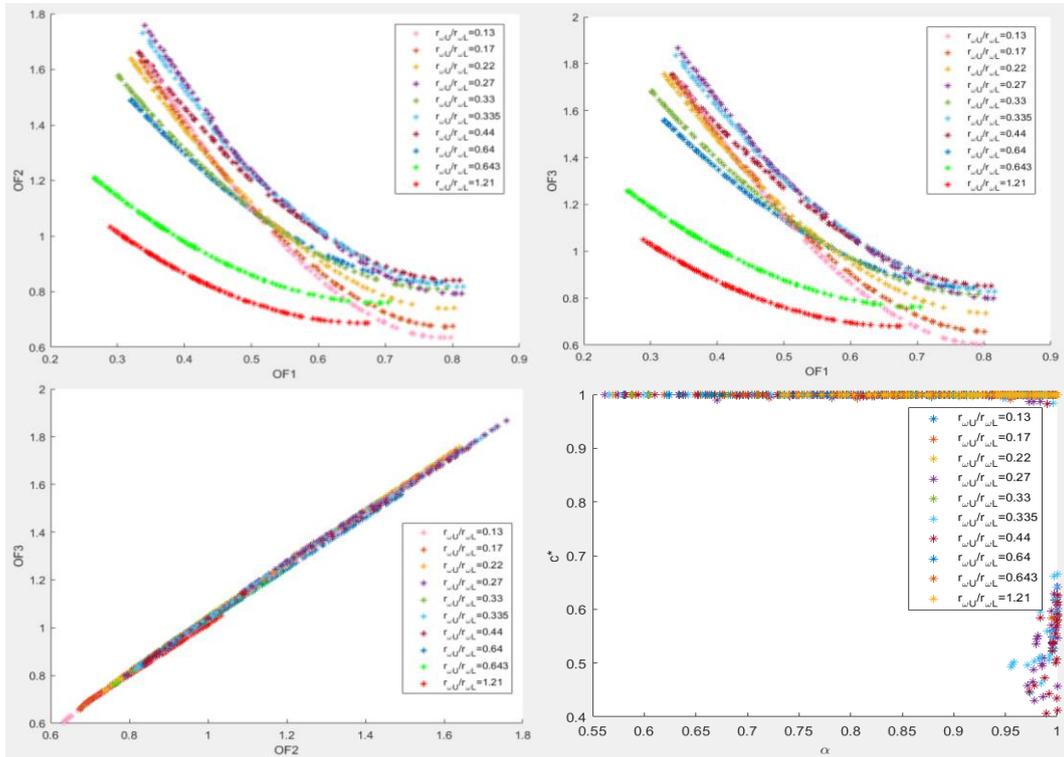
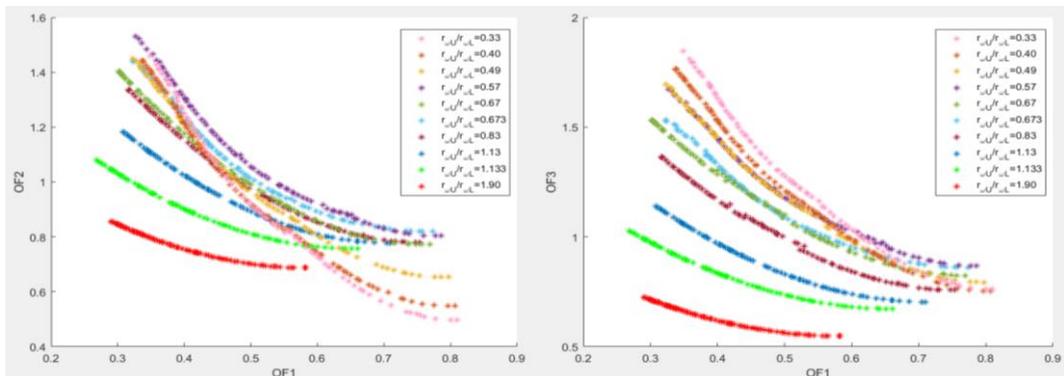


Figura 86 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3

Si può dire che le due strutture in calcestruzzo coincidono abbastanza per quanto riguarda gli andamenti, ma differiscono per i valori massimi raggiunti dallo spostamento della sovrastruttura. Inoltre si presentano maggiori intersezioni tra le varie strutture, dovute ai sismi che possiedono una frequenza diversa.



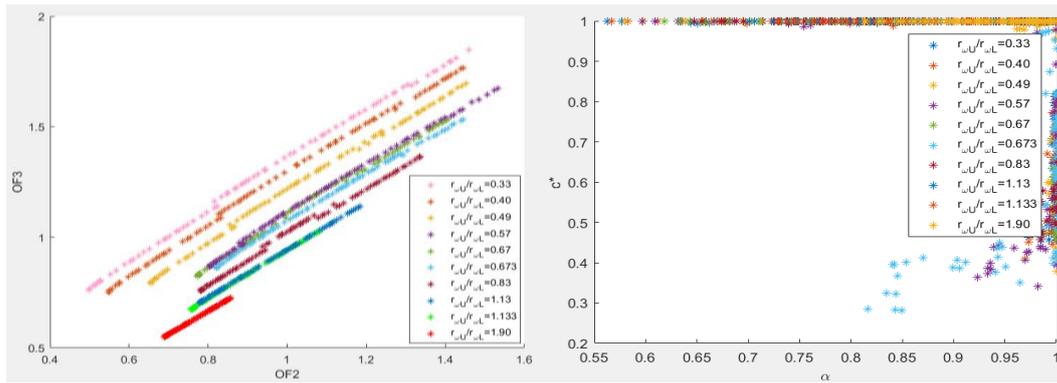


Figura 87 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3

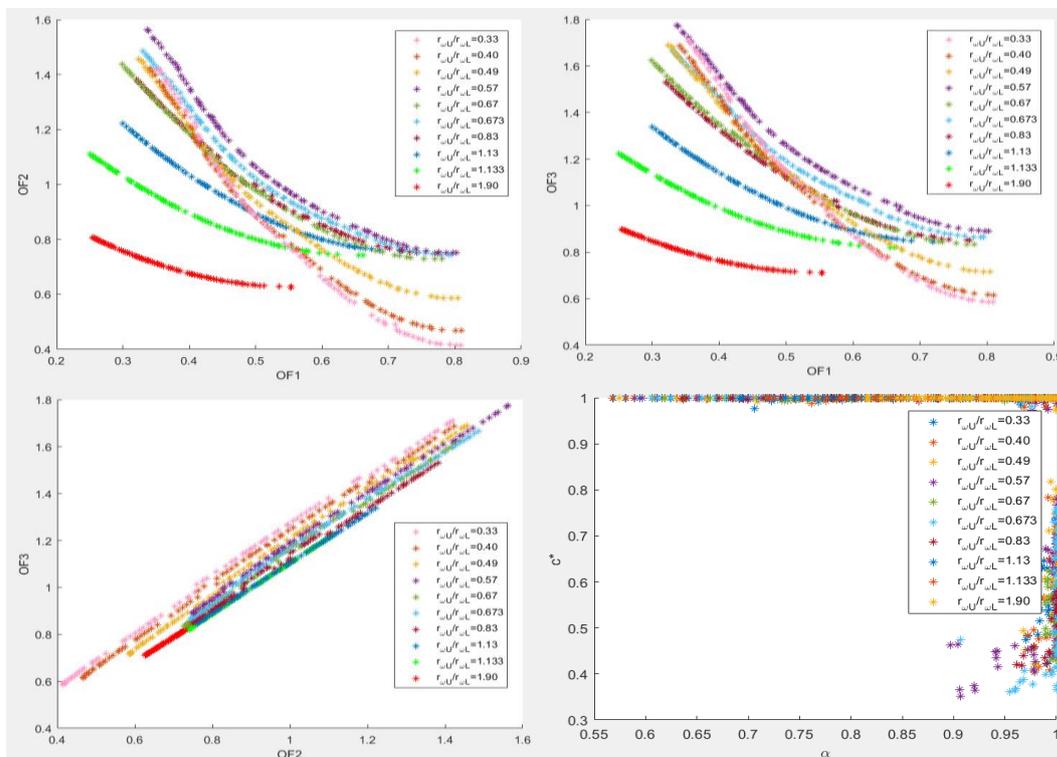


Figura 88 Strutture in acciaio e cls massa di piano doppia PGA 0.25g Tis/Tup=3

Si ripresenta la stessa situazione del caso con il sisma Far Fault solamente che abbiamo dei valori di OF2 più elevati dovuti ai valori dei sismi Near Fault.

Globalmente possiamo affermare che tra i sismi Near Fault e Far Fault ci sia una riduzione di OF1 minore nei casi NF con una amplificazione maggiore di OF2 e OF3. La sovrastruttura ne risente maggiormente rispetto a prima e si ottiene un'ottimizzazione minore. Quindi avendo lo stesso c^* e α di prima si ha una riduzione di OF1 più piccola.

Si vanno a limitare i grafici inserendo dei vincoli sullo spostamento e sull' accelerazione della sovrastruttura. Si decide infatti di evitare che tali obiettivi superino il valore che si aveva prima dell'inserimento del damper.

VINCOLO A	VINCOLO B
$r_{D,U} = \frac{D_{U,damped}}{D_{U,undamped}} < 1$	$r_{A,U} = \frac{A_{U,damped}}{A_{U,undamped}} < 1$

Si ripete l'analisi solamente nel caso di sismi Far Fault.

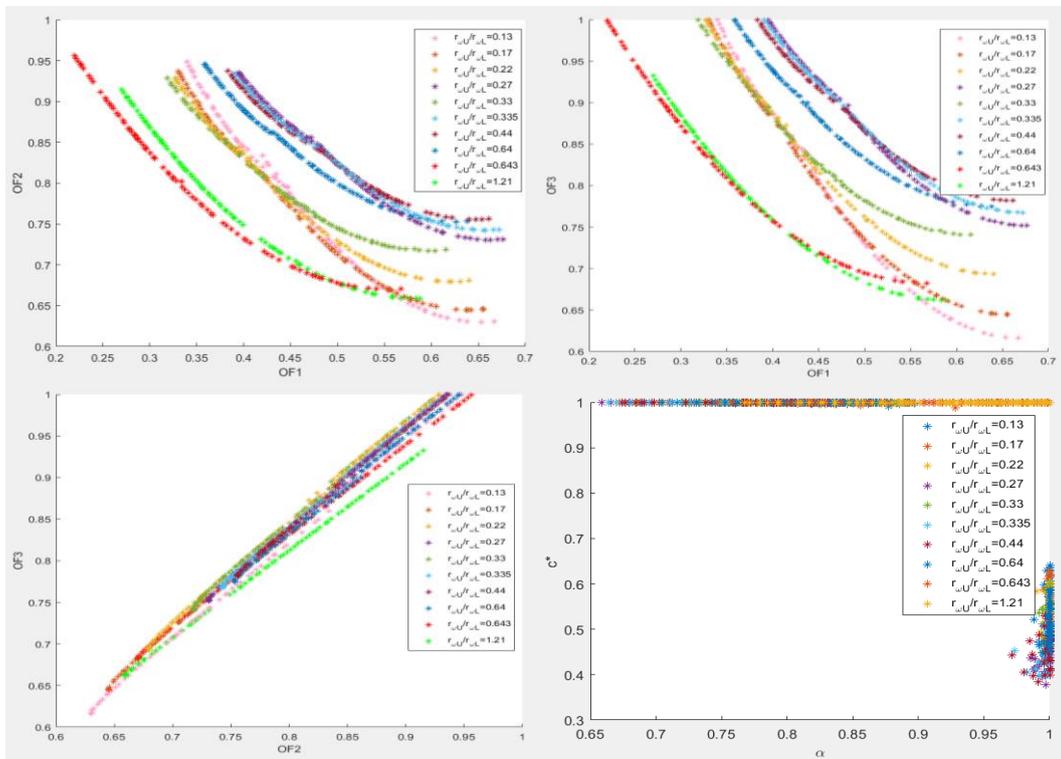


Figura 89 Strutture in cls PGA 0.25g Tis/Tup=3 vincolate

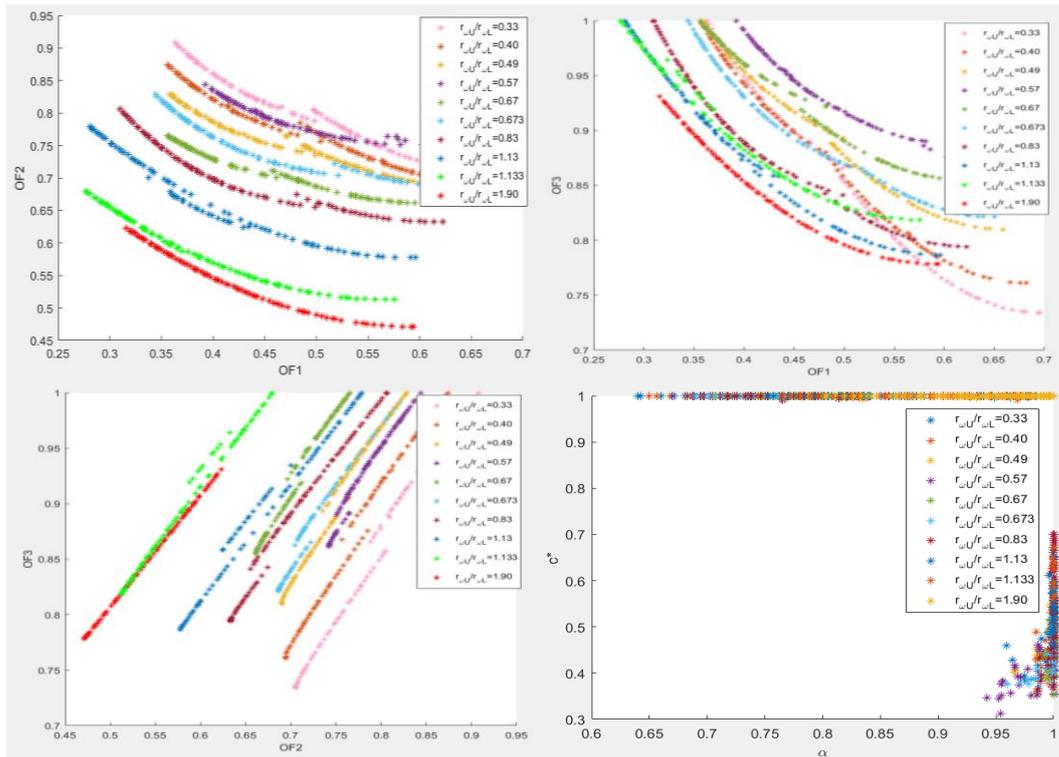


Figura 90 Strutture in acciaio e cls PGA 0.25g Tis/Tup=3 vincolate

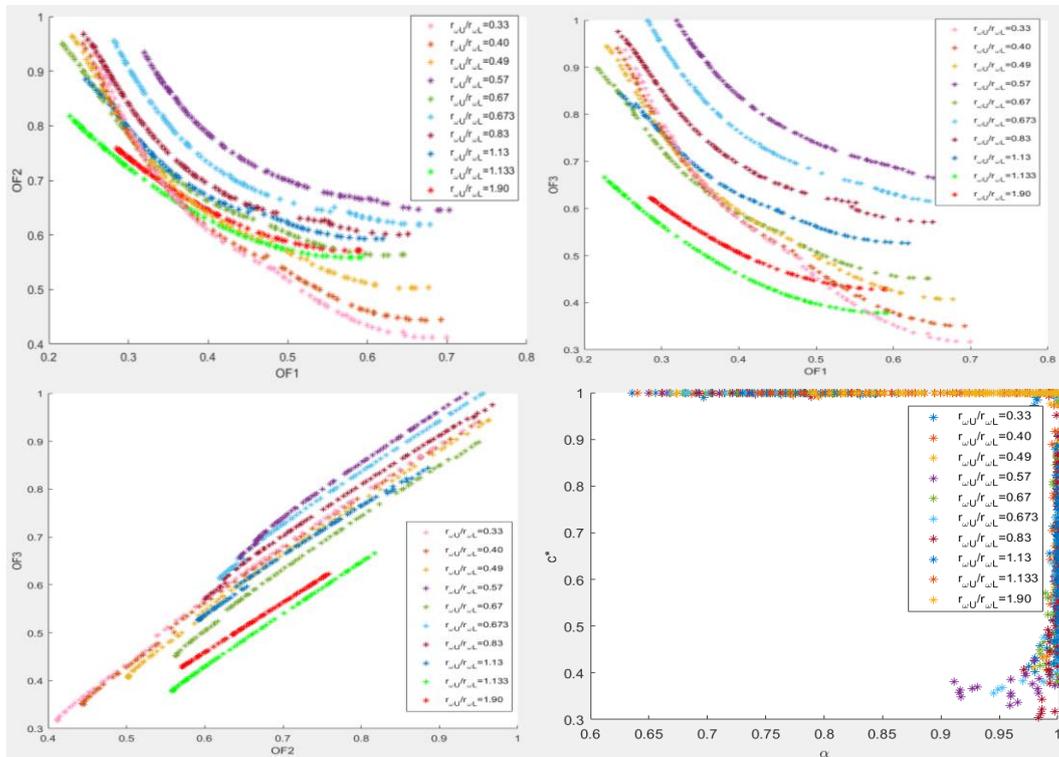


Figura 91 Strutture in acciaio e cls con massa doppia PGA 0.25g Tis/Tup=3 vincolate

Notiamo come per alcuni edifici nulla cambia in quanto avevano valori di amplificazione più piccoli di 1 anche prima dell'inserimento dei vincoli. Per gli altri casi si ha una riduzione della Pareto Front che ora diventa più piccola e resta sotto al valore imposto.

Gli andamenti sono pressoché identici, quello che varia è solamente il valore di OF1 minimo. La limitazione imposta sugli altri due obiettivi comporta una riduzione minore del valore di OF1 appunto perché si deve restare al massimo sotto il valore di 1, ovvero gli altri due obiettivi non si devono amplificare. Si può vedere però come OF2 non arrivi nemmeno mai al valore di 1, questo perché si ha una limitazione più forte data dall'accelerazione. Si ha infatti, che per un valore di OF3 che arriva a 1, se ne ha uno di OF2 più basso.

Si analizzano tre strutture con e senza vincoli in modo da capire se e come varia l'andamento di c^* e α . Si prendono in analisi strutture appartenenti al gruppo dei soli edifici in calcestruzzo, con una PGA di 0.25g e un rapporto $T_{is}/T_{up}=3$.

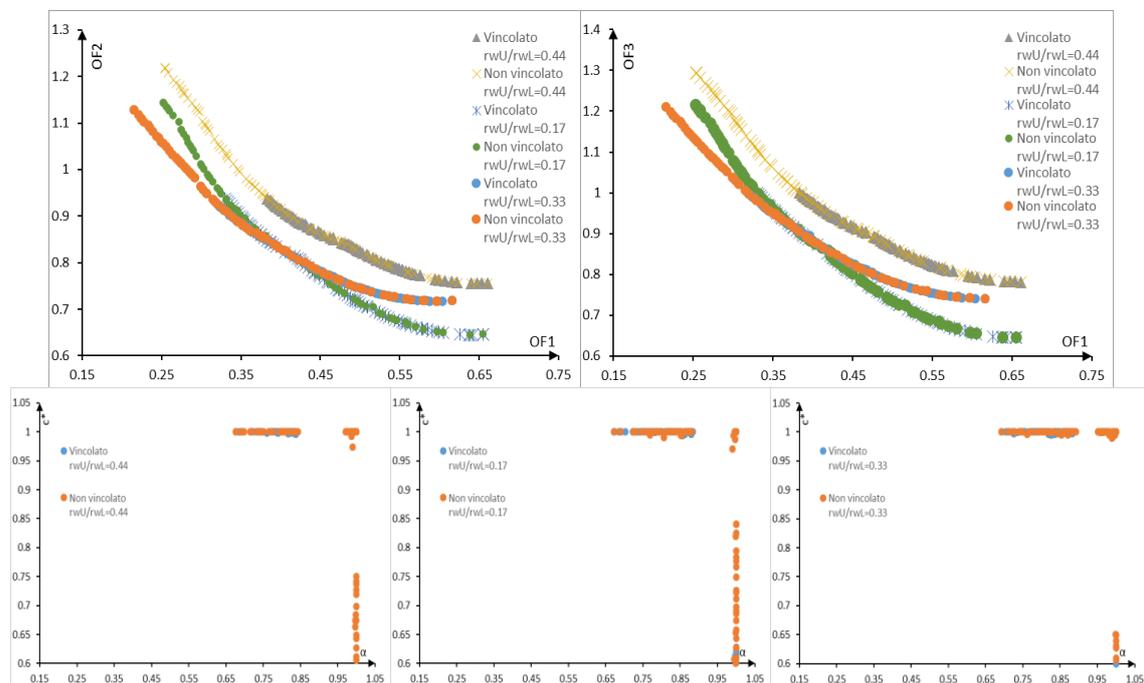


Figura 92 Confronti obiettivi e distribuzione c^* e α

Per le tre strutture analizzate si vede come c^* e α vengano limitati a valori minori di 1 nel caso vincolato. Questo succede perché alle strutture vengono imposti dei vincoli sullo

spostamento della sovrastruttura e sull'accelerazione sempre della sovrastruttura. Inoltre vincolando le strutture si ha che i dati degli obiettivi si concentrano tutti al di sotto del valore imposto. Più si scende con c^* , mantenendo α lineare, più si sale con il valore di OF1. La situazione poi si inverte, ovvero α diventa non lineare e c^* si porta ad un valore unitario, in questo modo si arriva al valore finale massimo per l'obiettivo.

L'andamento di c^* e α risulta lo stesso per il caso vincolato ma, non vincolando la struttura si ha un superamento di circa il 30% per quanto riguarda lo spostamento della sovrastruttura. Così facendo si permette una riduzione maggiore dello spostamento dell'isolamento e conseguentemente i parametri di smorzamento devono necessariamente avvicinarsi a 1 per ottenere tale risultato.

Dopo aver analizzato le strutture per una singola PGA e un'amplificazione, si decide di scegliere una determinata $r\omega L$ facendo variare $r\omega U$ in modo da valutare quale sia la distribuzione di c^* e α in base al variare delle frequenze della sovrastruttura. Si svolge questa analisi per capire quale sia l'influenza sulle strutture di sismi diversi ma anche di strutture con caratteristiche diverse.

Si parte analizzando la struttura in calcestruzzo. Si scelgono:

- $r\omega U = 1, 1.4, 1.8, 2.2$
- $r\omega L = 2, 5, 8$

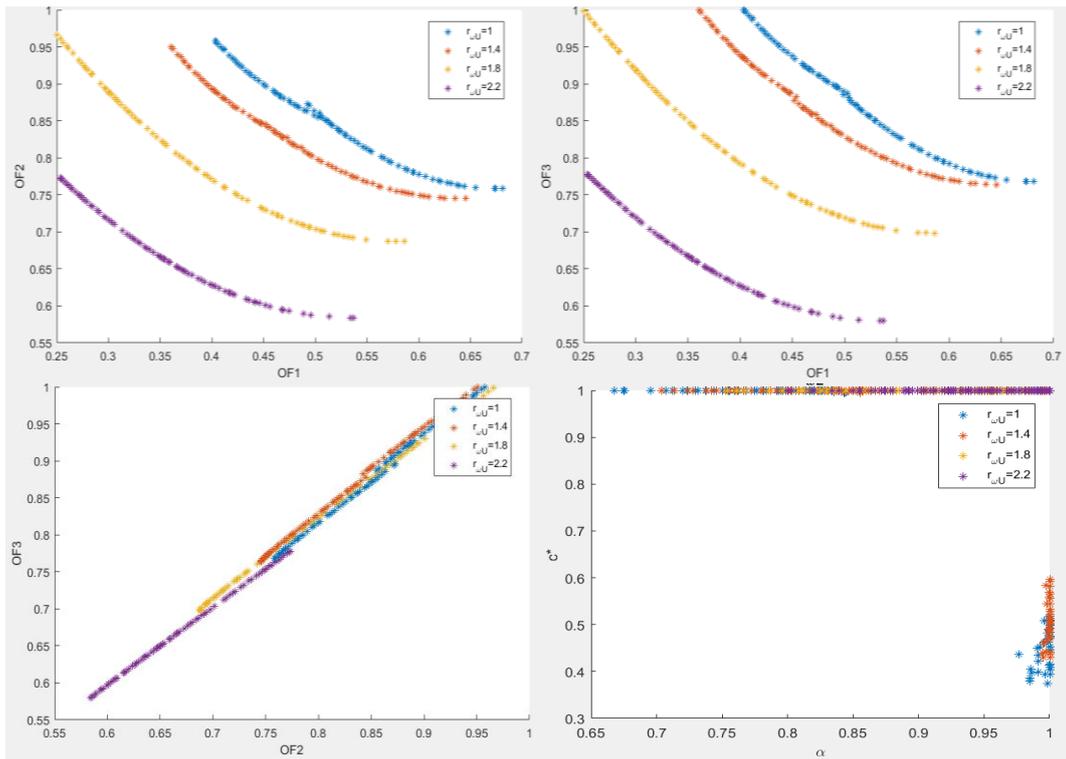


Figura 93 Struttura in cls $\rho\omega L=2$, PGA 0.25g

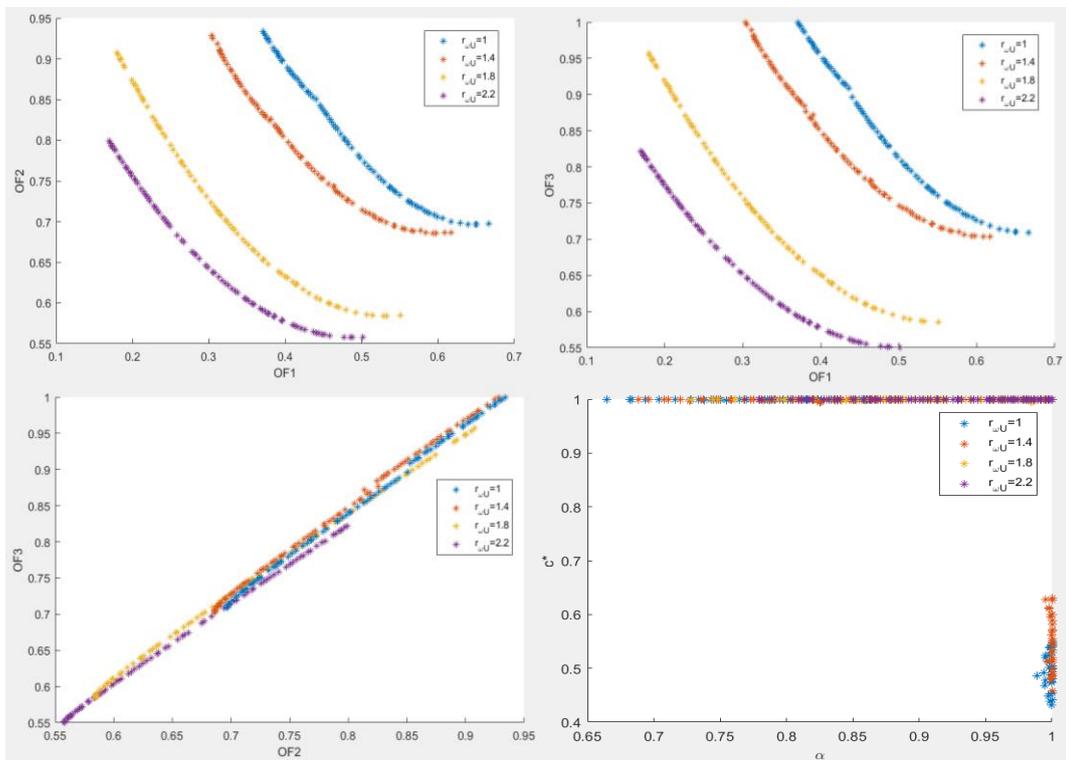


Figura 94 Struttura in cls $\rho\omega L=5$, PGA 0.25g

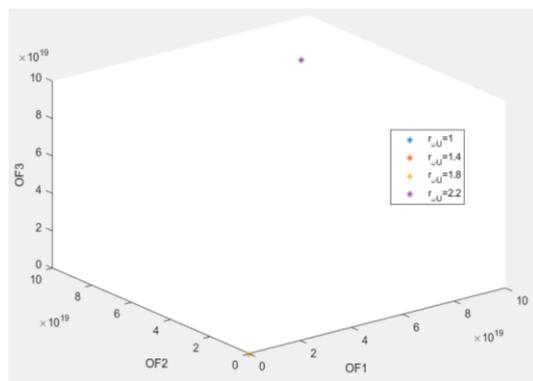


Figura 95 Struttura in cls $r_wL=8$, PGA 0.25g

Si nota che la struttura con un valore di r_wU alto, che equivale ad una struttura rigida, non ammette mai valori al di sotto del vincolo. Si decide allora di far vedere il caso non vincolato in modo da poter analizzare cosa accade. Si ha:

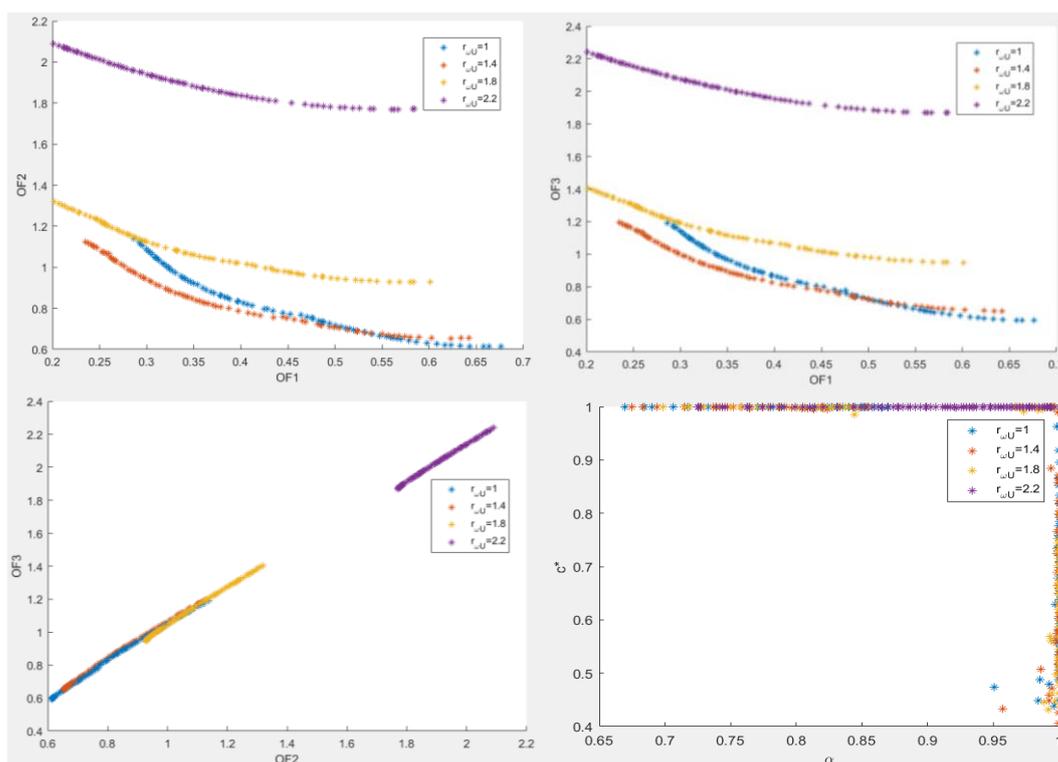


Figura 96 Struttura in cls $r_wL=8$, PGA 0.25g

Come detto, solamente alcune strutture riescono a porsi sotto al valore del vincolo ed è per questo che se si limitano gli obiettivi non si trova alcun risultato.

Si passa ora ad analizzare la struttura mista. Questa presenta:

- $r_wU= 1,1.4,1.8,2.2$

- $r_{\omega L} = 2$

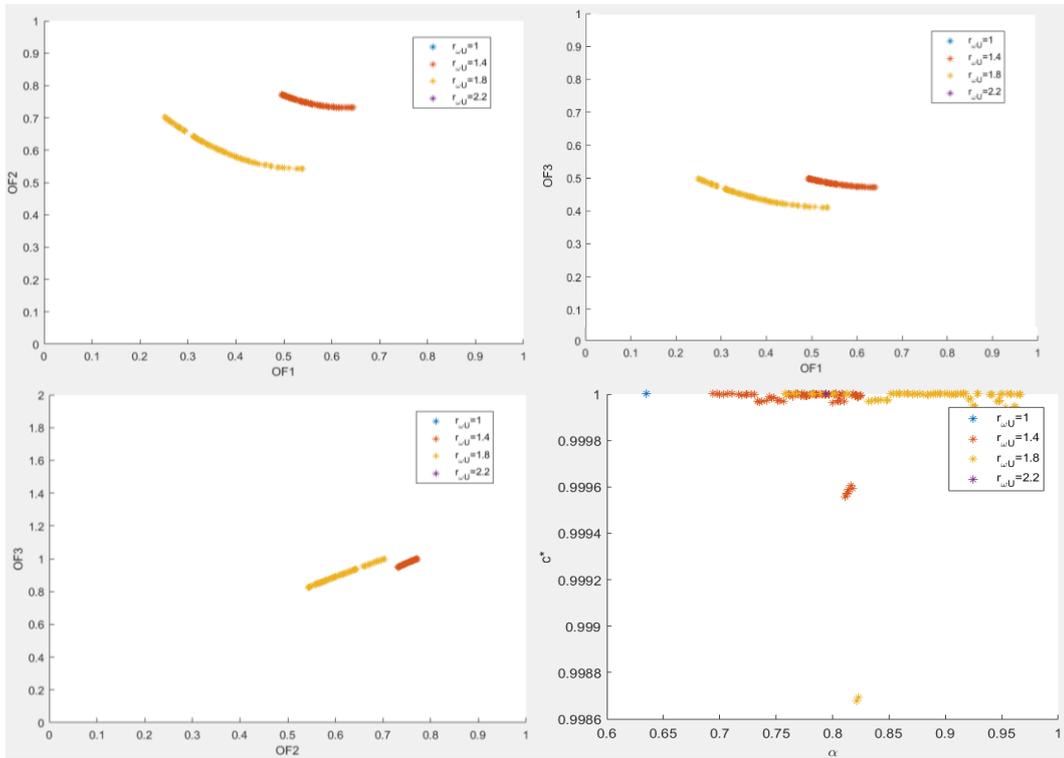
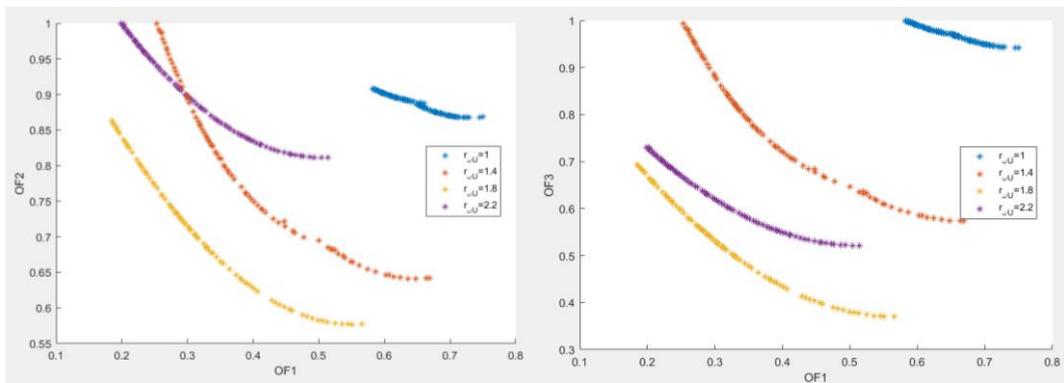


Figura 97 Struttura mista in acciaio e cls $r_{\omega L}=2$, PGA 0.25g

Si analizza lo stesso intervallo anche per la struttura mista con massa di piano doppia.



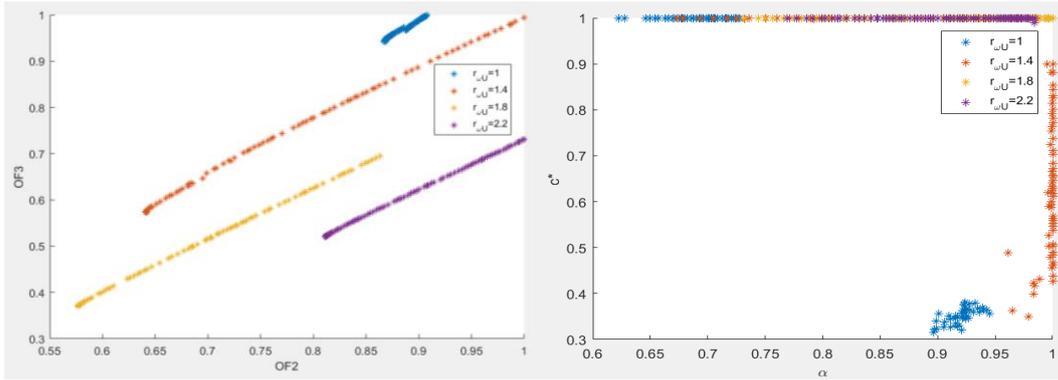


Figura 98 Struttura mista in acciaio e cls massa doppia $r_{wL}=2$, PGA 0.25g

Si procede ad analizzare gli stessi casi anche per i sismi Near Fault

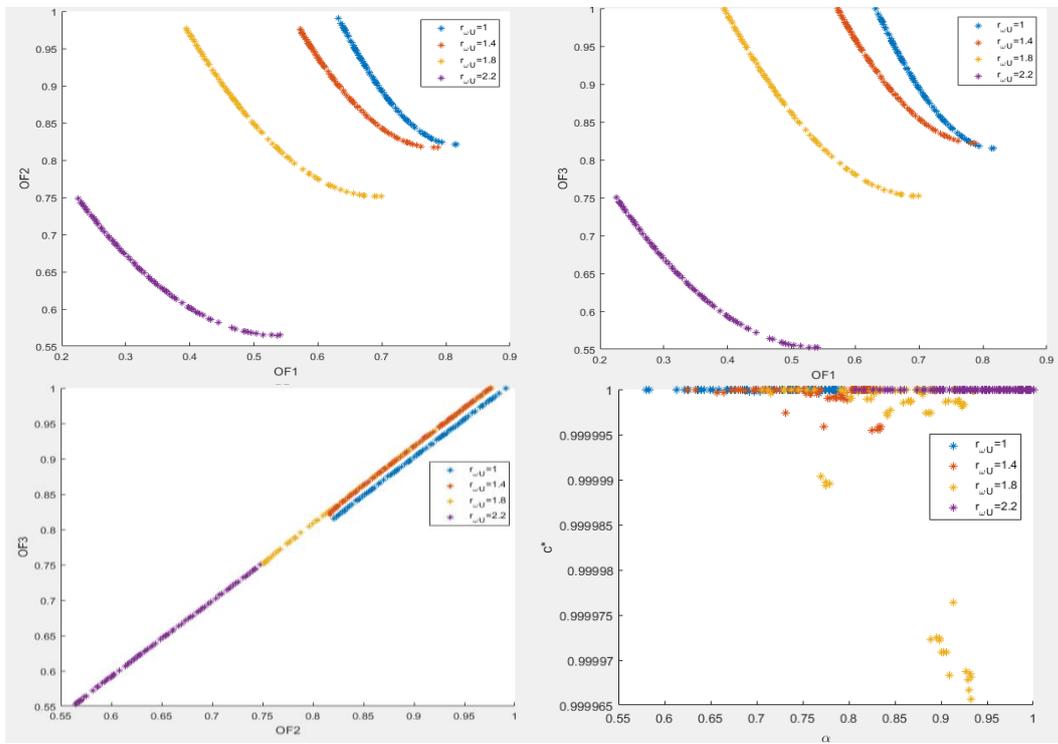


Figura 99 Struttura in cls $r_{wL}=2$ PGA 0.25g

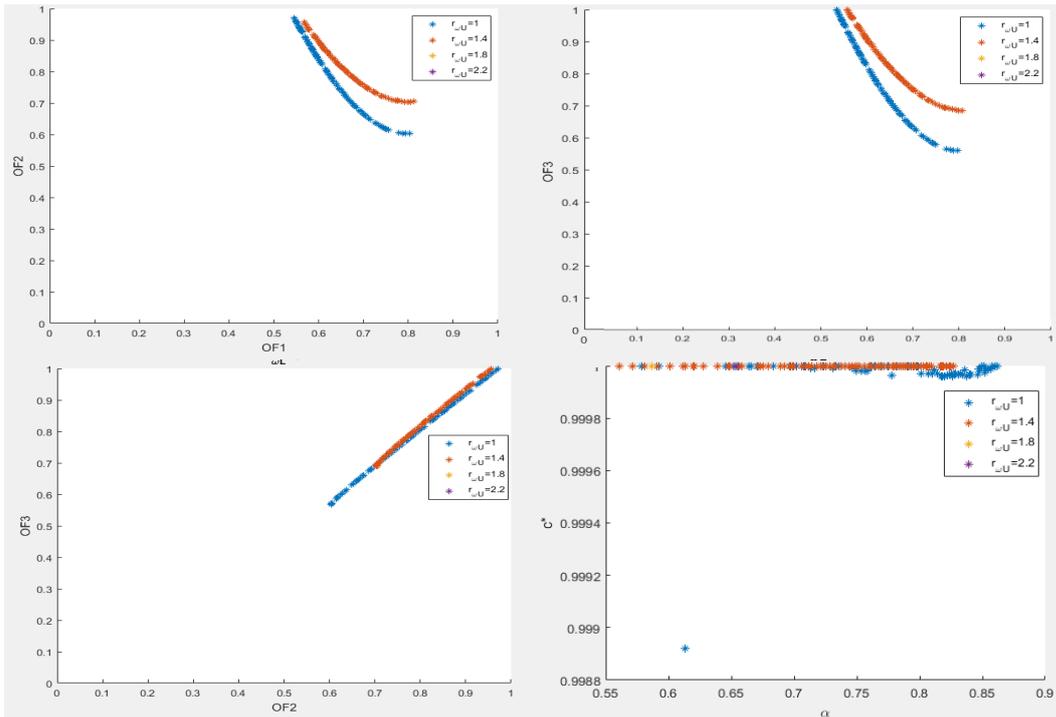


Figura 100 Struttura in cls $\rho_L=8$ PGA 0.25g

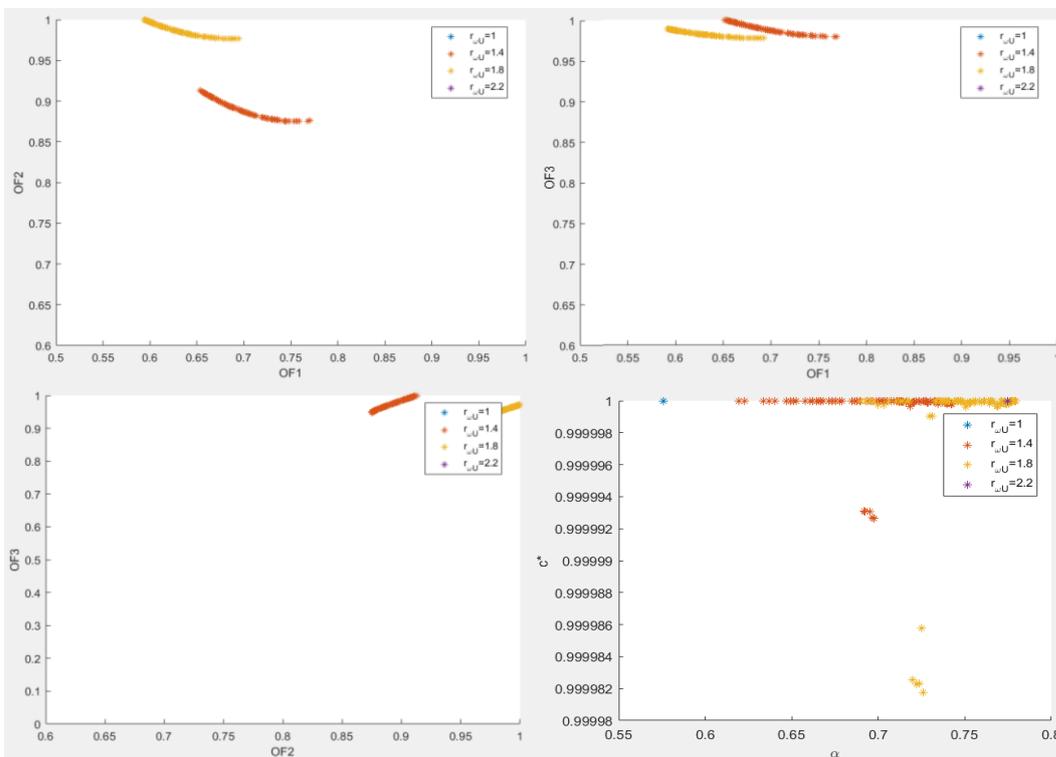


Figura 101 Struttura in acciaio e cls $\rho_L=2$ PGA 0.25g

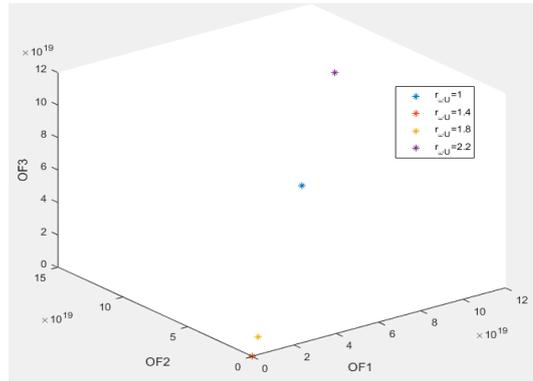


Figura 102 Struttura mista in acciaio e cls massa doppia $r_{uL}=2$, PGA 0.25g

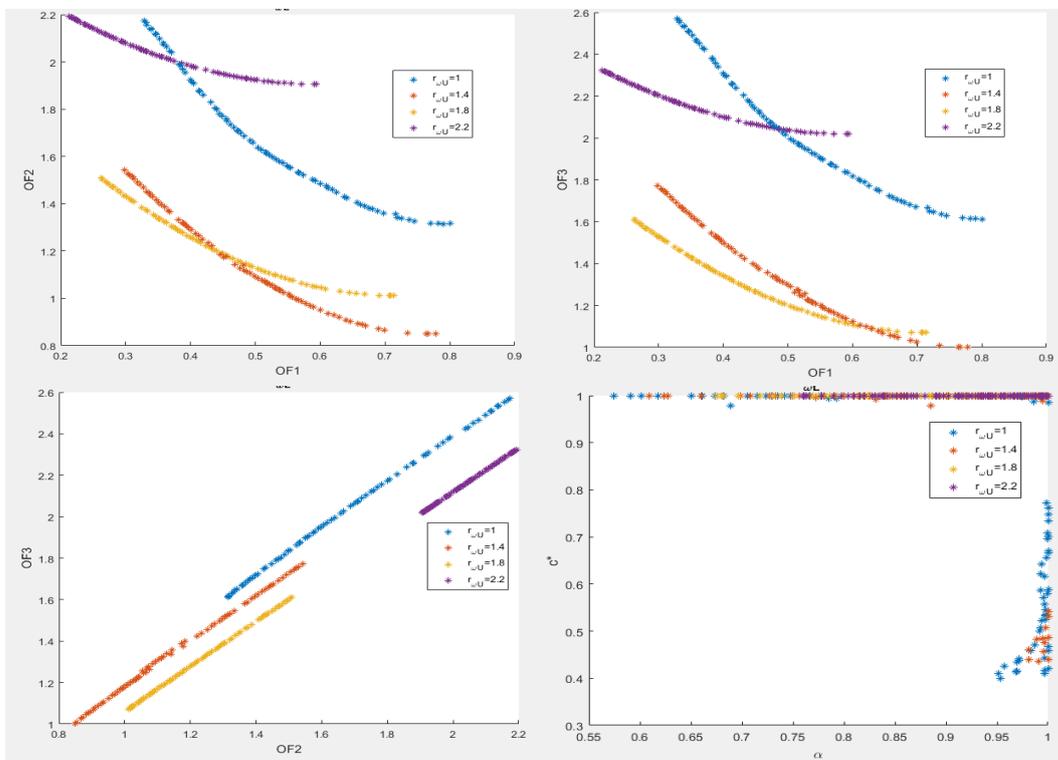


Figura 103 Struttura mista in acciaio e cls massa doppia $r_{uL}=2$, PGA 0.25g

Si analizzano ora gli andamenti delle varie strutture confrontando i casi Near Fault e Far Fault per varie r_{uL} e confrontando poi i vari blocchi di strutture all'interno della stessa tipologia di sismi per una r_{uL} pari a 2.

Per le strutture in calcestruzzo si ha che per un r_{uL} pari a 5, a differenza di $r_{uL}=2$, il grafico trasla, ovvero OF1 subisce una riduzione minore. Si ha un aumento della frequenza della sottostruttura a parità di frequenza dell'isolamento e quindi si ha un aumento della

rigidezza o una diminuzione della massa. Il valore di OF2 si riduce e questo si lega sempre all'aumento di frequenza della sottostruttura.

Quando si passa ad un valore di $r\omega L$ pari a 8, quindi molto rigido, si ottiene una discontinuità e non trovo nulla al di sotto dei vincoli per $r\omega U$ elevati. OF1 può essere ridotto ma OF2 e OF3 superano i valori dei limiti imposti a causa di c^* e α che amplificano i valori della sovrastruttura.

Per questa tipologia di struttura si ha che all'aumentare di $r\omega U$, a parità di $r\omega L$, si può ottenere una diminuzione maggiore di OF1, OF2 e OF3 perché una struttura rigida con poca massa può ricevere uno smorzamento maggiore.

Nella struttura mista solamente due tipologie di $r\omega U$ rientrano nei vincoli. Per il valore di $r\omega U=2.2$, l'obiettivo OF3 supera il limite imposto di 1 anche se il corrispettivo OF2 risulta essere minore. Mentre per $r\omega U=1$, cioè meno rigida, si ha un superamento per entrambi gli obiettivi OF2 e OF3. A differenza di quelle in calcestruzzo che rientrano tutte nei limiti qui si ha una divisione.

Nel caso di struttura mista ma con massa di piano doppia, si ha una rigidezza maggiore e quindi degli spostamenti della sottostruttura minori. Per questo motivo infatti le varie strutture presenti rientrano nei limiti. Inoltre si ha un salto per valori di $r\omega U$ superiori a 1.8, questo è dovuto al fatto che quei valori di frequenza si hanno con un'amplificazione di periodo dell'isolamento diverso.

Si sono valutati poi i risultati per i sismi diversi. Si può osservare che nelle strutture in cls si riduce la possibilità di ridurre OF1 e viene mantenuto l'andamento di riduzione di OF1 all'aumentare di $r\omega U$. Con un $r\omega L=8$ si presenta la stessa situazione di prima sempre con una riduzione minore di OF1.

Per le strutture miste con massa di piano doppia, si hanno solamente alcuni punti al di sotto dei vincoli dovuti a valori di accelerazioni diverse a causa di sismi con caratteristiche diverse.

Si vuole ora vedere come varino gli andamenti degli obiettivi OF1 e OF2 minimi all'interno delle varie tipologie di strutture vincolate al variare del rapporto tra le frequenze.

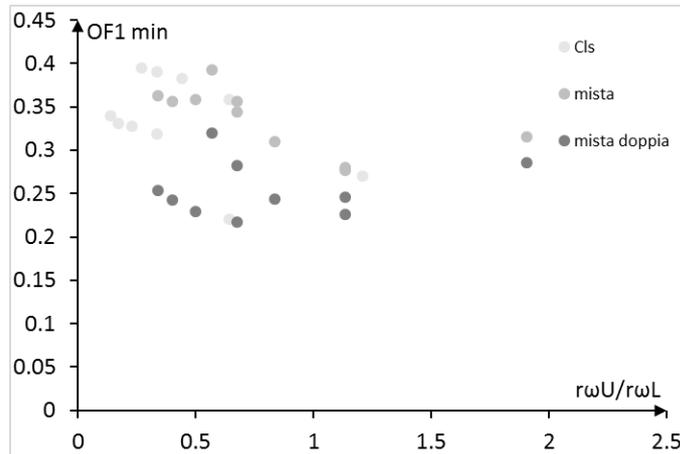


Figura 104 Andamento OF1 minimo

Tabella 17 Valori α e c^* con OF1 minimo

Struttura in cls			
α	c^*	OF1	$r\omega U/r\omega L$
1	0.641408	0.339695	0.138163
0.999998	0.628224	0.330426	0.17178
0.999967	0.60315	0.327143	0.227083
1	0.509669	0.394702	0.270715
1	0.600058	0.318531	0.33522
1	0.514777	0.390628	0.33522
1	0.528681	0.383095	0.44045
1	0.586964	0.358428	0.643594
1	1	0.220109	0.643594
1	1	0.269775	1.21
Struttura in acciaio e cls			
0.99996	0.561628	0.363136	0.338946
1	0.563745	0.355778	0.400694
1	0.544517	0.358324	0.497184
1	0.516816	0.39242	0.570037
1	0.541913	0.355924	0.673884
1	0.607721	0.34387	0.673884
1	0.700613	0.309614	0.83616
0.9856	1	0.280632	1.133333
0.980398	1	0.277015	1.133333
1	1	0.315902	1.906031

Struttura in acciaio e cls massa doppia			
1	1	0.253421	0.338946
1	1	0.242526	0.400694
1	1	0.229383	0.497184
1	0.711439	0.319442	0.570037
1	1	0.216668	0.673884
1	0.82415	0.281914	0.673884
1	1	0.243241	0.83616
1	1	0.245975	1.133333
1	1	0.226312	1.133333
1	1	0.285274	1.906031

Si nota come all'aumentare del valore del rapporto di frequenza si abbia una riduzione maggiore, inoltre a parità di struttura mista, quella con massa di piano doppia ha una riduzione circa costante pari a 0.25 a differenza dell'altra che si riduce al variare della frequenza.

Se si vuole ridurre maggiormente il valore di OF1 allora si deve realizzare una struttura con pianta della sottostruttura maggiore rispetto a quella della sovrastruttura.

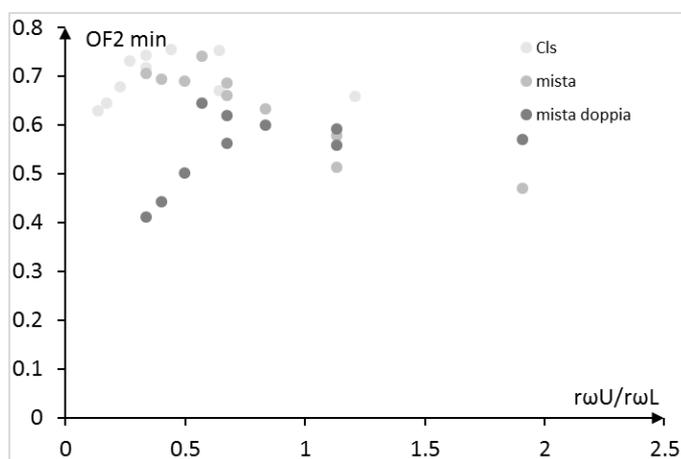


Figura 105 Andamento OF2 minimo

Tabella 18 Valori α e c^* con OF2 minimo

Struttura in cls			
α	c^*	OF2	$r\omega U / r\omega L$
0.687779	1	0.629693	0.138163
0.689615	1	0.644824	0.17178
0.694768	1	0.679421	0.227083

0.674163	1	0.730721	0.270715
0.710768	1	0.717363	0.33522
0.679198	1	0.742455	0.33522
0.690901	1	0.755574	0.44045
0.71635	1	0.752871	0.643594
0.757864	1	0.669856	0.643594
0.771775	1	0.659051	1.21
Struttura in acciaio e cls			
0.656267	1	0.705383	0.338946
0.667092	1	0.693897	0.400694
0.685372	1	0.689472	0.497184
0.682693	1	0.74205	0.570037
0.716776	1	0.661306	0.673884
0.701535	1	0.686264	0.673884
0.725277	1	0.632881	0.83616
0.757028	1	0.577505	1.133333
0.772184	1	0.512866	1.133333
0.801857	1	0.470935	1.906031
Struttura in acciaio e cls massa doppia			
0.65572	1	0.411359	0.338946
0.660963	1	0.443858	0.400694
0.672974	1	0.50199	0.497184
0.665243	1	0.644946	0.570037
0.698682	1	0.563085	0.673884
0.68168	1	0.619032	0.673884
0.704144	1	0.600722	0.83616
0.7372	1	0.592368	1.133333
0.753998	1	0.558686	1.133333
0.79124	1	0.570775	1.906031

Essendo OF2 legato in modo opposto all'andamento di OF1, si ha che per la struttura mista con massa di piano doppia, si tende ad avere un'amplificazione minore dello spostamento della sovrastruttura rispetto alle altre tipologie di strutture. Infatti una struttura con un rapporto di frequenza basso, e quindi un numero di piani alto, subisce una riduzione di OF1 minore e di conseguenza uno spostamento della sovrastruttura più piccolo.

Una volta osservati tali andamenti si vuole valutare, con una PGA di 0.25g, quale sia la struttura ottima, α ottimo e c^* ottimo per minimizzare OF1. Si osservano i range dei rapporti di frequenza ωL e ωU in modo da inserirli all'interno dell'algoritmo genetico così da ottenere la soluzione finale.

Le soluzioni che si riportano riguardano solamente le strutture vincolate. Per le strutture in calcestruzzo si ha:

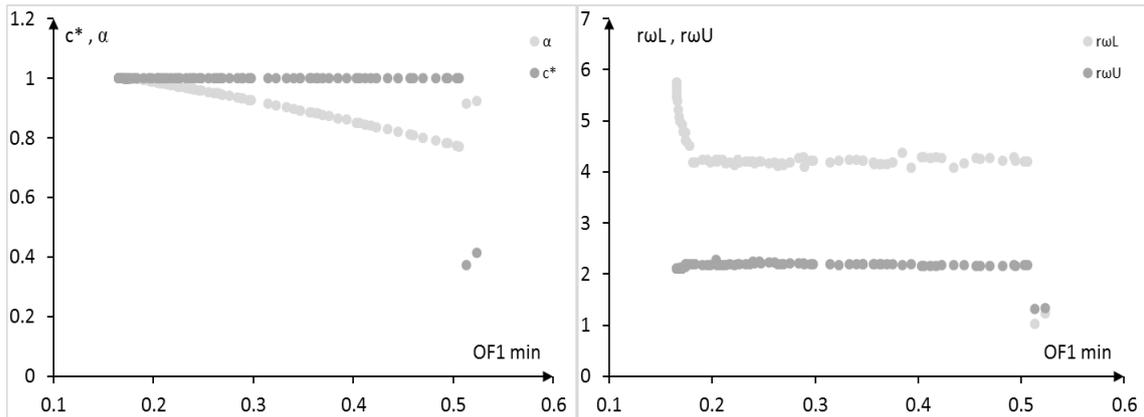


Figura 106 Andamento $\alpha, c^*, r_{wL}, r_{wU}$ strutture in cls

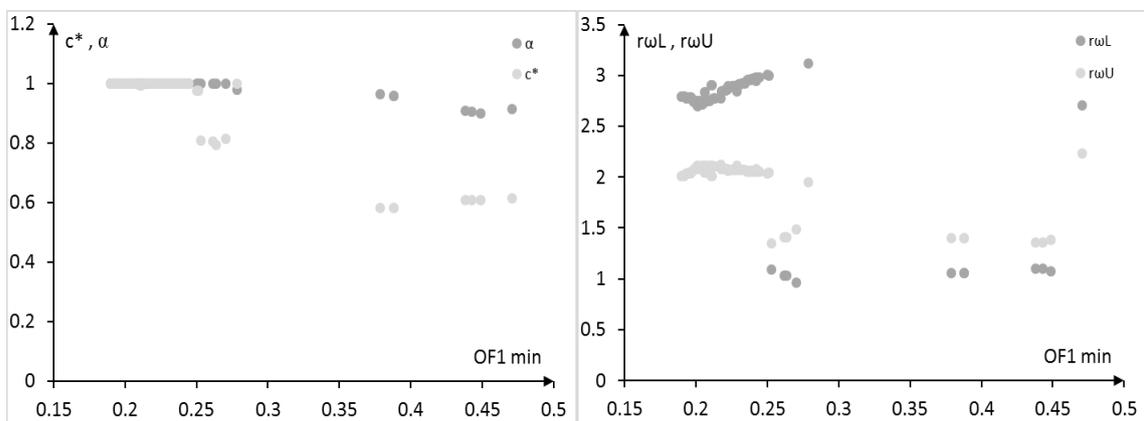


Figura 107 Andamento $\alpha, c^*, r_{wL}, r_{wU}$ strutture miste

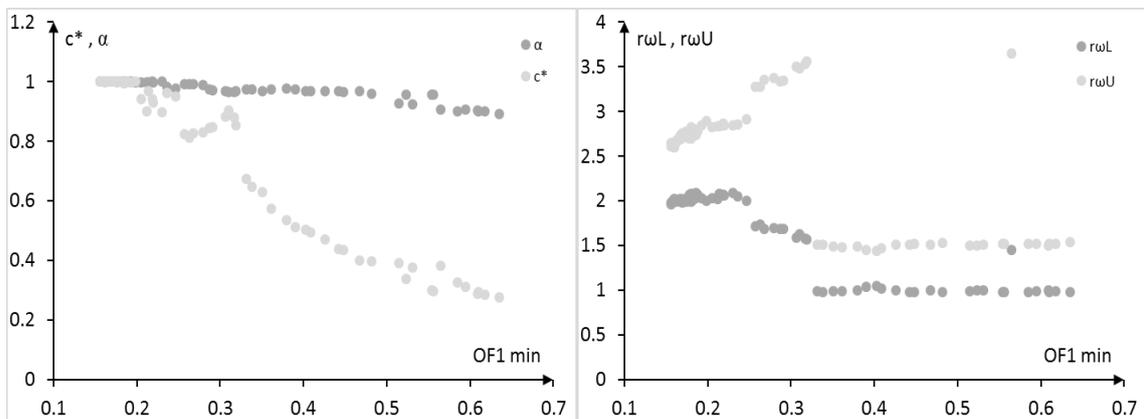


Figura 108 Andamento $\alpha, c^*, r_{wL}, r_{wU}$ strutture miste massa doppia

In tutte e tre le situazioni si vede come il valore di OF1 minimo si ottenga avendo il massimo valore di c^* e α . Al diminuire di α si ottengono risultati più elevati per l'obiettivo.

Per quanto riguarda i rapporti delle frequenze si hanno alcune differenze per le tre tipologie, ovvero nei casi misti le frequenze partono da valori abbastanza vicini per poi allontanarsi, invece nel caso delle strutture in calcestruzzo si hanno valori più distanti che poi tendono ad avvicinarsi.

Le frequenze risultano diverse ma per come noi abbiamo realizzato le strutture si presentano circa gli stessi numeri di piani sopra e sotto.

I salti che si presentano nei grafici sono legati alla presenza di due amplificazioni del periodo diverse. Infatti la presenza dell'amplificazione 3 e 4 comporta range diversi per i rapporti di frequenze che si tramutano pertanto in strutture diverse. Se studiamo separatamente le due amplificazioni non si presentano tali difformità all'interno del grafico.

Nelle strutture in calcestruzzo i valori di $\rho\omega L$ e $\rho\omega U$ che si ottengono sono legati a strutture con rigidzze elevate sia sopra che sotto e questo permette appunto valori di smorzamento lineari e pari al massimo. Ciò che si ottiene è riscontrabile anche nei risultati riportati precedentemente.

Stessa situazione si presente per le strutture miste, ovvero strutture con rigidzze elevate sia sopra che sotto permettono smorzamenti maggiori.

Conclusioni

Dopo aver analizzato varie strutture per diverse PGA e amplificazioni, siamo riusciti ad ottenere degli andamenti riguardo i valori di incremento degli obiettivi imposti e di distribuzione dei parametri dello smorzatore.

Il procedimento svolto però si basa su una semplificazione di base ovvero quella di trattare strutture a MGDL come sistemi 3DOF. Questo passaggio comporta dei problemi dal punto di vista dello studio, infatti si vanno a trascurare tutti i modi superiori degli edifici che possono comportare cambiamenti nella risposta strutturale e che quindi andrebbero analizzati per meglio comprendere i risultati.

A questo si lega anche il problema della scelta delle frequenze da attribuire all'intera struttura per trovare uno smorzamento adeguato, infatti avendo solamente tre valori la scelta ricade per forza di cose su due di questi, comportando valori di smorzamento non sempre veritieri.

Per meglio valutare quello che si è ottenuto si dovrebbe perciò prendere la struttura nella sua interezza e valutarne il vero comportamento in modo da verificare la differenza tra la realtà e il metodo applicato.

Inoltre le superfici utilizzate per descrivere il comportamento dei dati ricavati dalle analisi Time History presentano delle differenze di circa il 15/20% che incrementano ancora di più quella che è l'approssimazione finale.

Tutto ciò porta a dire che le strutture analizzate per i diversi valori di PGA hanno degli andamenti che risultano circa simili, fatto salvo per i valori di amplificazione dei vari obiettivi che tendono a variare. Stessa situazione si ha per le due tipologie di sismi analizzati, infatti i risultati ottenuti per i sismi Near Fault sono di gran lunga superiori a quelli dei sismi Far Fault dovuto proprio alle caratteristiche di frequenza dei sismi stessi.

I Near Fault presentano dei valori di accelerazione iniziale più alta rispetto ai Far Fault, e questo si ripercuote in amplificazioni maggiori dei risultati.

Per quanto riguarda invece i parametri degli smorzatori, si ha che la riduzione massima dell'isolatore si ottiene con un α lineare e un c^* pari a 1, a patto di subire un incremento di

OF2. Tuttavia se si vuole evitare tale situazione, si devono limitare spostamento e accelerazione della sovrastruttura, diminuendo così il valore massimo di riduzione di OF1 e di conseguenza anche i valori dei parametri del damper.

Complessivamente possiamo dire che a seconda dello scopo che si vuole ottenere dal proprio edificio, per esempio se si deve evitare un'accelerazione troppo alta perché si hanno delle attrezzature sensibili, si possono applicare parametri di α non lineari e di conseguenza valori di c^* uguali a 1.

Avendo trovato il range dei valori di frequenza per le varie strutture si è provato a ricavare quale sia la migliore tra tutte quante, ovvero quella che riesce a raggiungere OF1 minimo ottimizzando α , ω , $r\omega_L$ e $r\omega_U$. Abbiamo visto che le frequenze possono variare tra le diverse tipologie di edifici, ma si hanno sempre dei valori che si rifanno a strutture rigide sia sopra che sotto. In questo modo si possono sfruttare al massimo i parametri dello smorzatore in modo da minimizzare OF1.

Grazie alla generalizzazione delle strutture tramite range di frequenza, si ha la possibilità di studiare strutture che hanno massa, rigidità e dimensione diversa, ma che riescono ad entrare in tali valori.

La scelta finale spetta comunque al progettista che con questo studio prende visione di quelli che possono essere gli effetti per la struttura che sta analizzando anche se con qualche semplificazione. La soluzione migliore risulta quella di, una volta capiti gli effetti e le possibili criticità, realizzare la struttura in toto in modo da trovare le frequenze esatte così da applicare il giusto smorzamento e confrontare i risultati ottenuti vedendo la percentuale di differenza tra la semplificazione e la realtà.

Bibliografia

- MAKRIS, N. (1997). RIGIDITYϷPLASTICITYϷVISCOSITY: CAN ELECTORRHEOLOGICAL DAMPERS PROTECT BASE-ISOLATED STRUCTURES FROM NEAR-SOURCE GROUND MOTIONS? In *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS* (pp. 571-591). John Wiley & Sons, Ltd.
- CHEY, M.-H., CHASE, J., MANDER, J., & CARR, A. (2013). Innovative seismic retrofitting strategy of added stories isolation system. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13-23.
- Coello, L. V. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Springer.
- DE ANGELIS, M., PERNO, S., & REGGIO, A. (2012). Dynamic response and optimal design of structures with large mass ratio TMD. In M. DE ANGELIS, S. PERNO, & A. REGGIO, *EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS* (pp. 41-60). John Wiley & Sons, Ltd.
- Deepak R. Pant, A. C. (2013). Appropriate viscous damping for nonlinear time-history analysis of base-isolated reinforced concrete buildings. *EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS*, 2321-2339.
- Diana Faiella, F. V. (2017). Sopraelevare per adeguare: l'isolamento sismico intermedio per strutture murarie esistenti. *XXVII CONVEGNO ANIDIS*, (pp. SS10-3 SS10-12). Pistoia.
- Dora Foti, M. M. (2011). *Isolatori sismici per edifici esistenti e di nuova costruzione*. Palermo: Dario Flaccovio.
- FATHI, M., MAKHDOUNI, A., & PARVI, M. (2014). Effect of Supplemental Damping on Seismic Response of Base Isolated Frames under Near & Far Field Accelerations. *Journal of Civil Engineering*, 1359-1365.
- Kalyanmoy Deb, A. P. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. In *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION* (pp. 182-197).
- KERI L. RYAN, C. L. (2010). Analysis and Design of Inter - Story Isolation Systems with Nonlinear Devices. *Journal of Earthquake Engineering*, 1044-1062.
- Koh, M. K. (October 12-17,2008). MODAL COUPLING EFFECTS OF MID-STORY ISOLATED BUILDINGS. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing.
- PROVIDAKIS, C. (2009). Effect of supplemental damping on LRB and FPS seismic isolators under near-fault ground motions. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (pp. 80-90). ElsevierLtd.
- REGGIO, A., & DE ANGELIS, M. (2015). Optimal energy-based seismic design of non-conventional Tuned. In A. REGGIO, & M. DE ANGELIS, *EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS* (pp. 1623-1642). John Wiley & Sons, Ltd.
- SCIACCA, E. (2005). ALGORITMI EVOLUTIVI MULTIOBIETTIVO E POSSIBILISTIC WORST-CASE DISTANCE PER L'OTTIMIZZAZIONE DI CIRCUITI ELETTRONICI.
- Shiang-Jung Wang, J.-S. H.-C.-H.-H. (2013). Analytical and experimental studies on midstory isolated buildings with modal coupling effect. *EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS*, 201-2019.
- Shiang-Jung Wang, K.-C. C.-S.-H. (2011). Simplified analysis of mid-story seismically isolated buildings. *EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS*, 119-133.
- SHIRAYAMA, A., YAMASHITA, T., ITO, S., MUKAI, Y., BABA, K., & INOUE, Y. (2004). DESIGN PROPOSAL FOR CONTROLLING SEISMIC BEHAVIORS OF INTER-STORY ISOLATION BUILDING STRUCTURES. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver.

TSUNEKI, Y., TORII, S., MURAKAMI, K., & SUEOKA, T. (2008). MIDDLE-STORY ISOLATED STRUCTURAL SYSTEM OF HIGH-RISE BUILDING. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing.

ZIYAEIFAR, M., & NOGUCHI, H. (1998). Partial mass isolation in tall buildings. In Z. M., & N. H., *EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS* (pp. 49-65). 1998 John Wiley & Sons, Ltd.