



POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione ottimizzata di esoscheletri
dissipativi mediante algoritmo genetico**

Relatore:

Prof. Giuseppe Carlo Marano

Co-relatori:

Prof. Gabriele Bertagnoli

Dott. Ing. Raffaele Cucuzza

Dott.ssa Jana Olivo

Candidato:

Goffredo Orsi

DICEMBRE A.A.2024-2025

Sommario

Già dall'inizio di questo secolo, l'impiego di esoscheletri in acciaio per l'adeguamento sismico delle strutture esistenti ha acquisito crescente rilevanza, grazie alla rapidità di installazione, al carattere non invasivo e alla possibilità di intervenire senza interrompere lo svolgimento di attività logistiche in edifici strategici quali aeroporti, ospedali ed unità strutturali complesse. Questa soluzione risulta particolarmente vantaggiosa anche quando il livello di conoscenza della struttura è limitato o quando si opera in contesti ad elevato rischio sismico.

Tuttavia, nonostante il loro potenziale, la progettazione preliminare degli esoscheletri — soprattutto quando dotati di dispositivi dissipativi non lineari (i.e. smorzatori) — rimane complessa sia nella modellazione che nell'accuratezza della risposta strutturale attesa. Sebbene in letteratura siano presenti diversi contributi volti allo sviluppo di strategie avanzate di modellazione dei processi di dissipazione e raffinati metodi di analisi dall'importante onere computazionale, manca una procedura speditiva automatizzata per il dimensionamento di esoscheletri dissipativi allo scopo di identificare i parametri ottimali di dissipazione dei dispositivi isteretici al variare della disposizione spaziale e della configurazione sezionale dei sistemi esterni di rinforzo.

Per rispondere a questa esigenza, nella presente tesi, il candidato ha sviluppato un processo di ottimizzazione per la progettazione preliminare basato su un algoritmo evolutivo, finalizzato all'individuazione della configurazione più efficiente di esoscheletri dissipativi. Tali configurazioni verranno valutate mediante analisi dinamiche lineari individuando una correlazione tra il coefficiente di abbattimento dell'input sismico, ξ , e il coefficiente di dissipazione, C_{NL} , proprio dei dispositivi isteretici ospitati dall'esoscheletro.

Il lavoro si articola in due parti:

1. un'analisi critica della letteratura e uno studio parametrico, condotto su telai bidimensionali vincolati ad esoscheletri dissipativi, ai fini della stima della perdita

di accuratezza nella valutazione della risposta sismica del sistema strutturale dovuta alla semplificazione intrinseca nel tipo di analisi strutturale adottata;

2. l'implementazione di un algoritmo genetico per la progettazione ottimale di esoscheletri e delle capacità dissipative dei dispositivi isteretici quali dissipatori fluido-viscosi.

I risultati evidenziano la presenza di un valore ottimale di dissipazione capace di minimizzare la seguente funzione obiettivo (OF):

$$\text{OF} = (C_{\text{EX}} + C_{\text{dampers}}) \phi_1 \phi_2 + \phi_3(N_{\text{EX}}) \quad (1)$$

I cui termini si specificheranno successivamente nell'elaborato. definita, migliorando l'efficienza globale dell'intervento sia dal punto di vista tecnico sia economico.

Inoltre, nell'elaborato si è seguita una procedura semplificata che consenta di correlare il fattore di smorzamento da utilizzare in analisi dinamica lineare e il coefficiente non lineari tipico delle leggi costitutive dei dissipatori.

In conclusione, obiettivo ultimo di questa tesi è fornire una procedura speditiva per il predimensionamento di esoscheletri dissipativi che permetta, seppur solo in fase preliminare, di non adoperare analisi dinamiche non-lineari mantenendo un accettabile livello di accuratezza nella stima della risposta strutturale globale.

Sebbene una stima più accurata della risposta sismica del sistema strutturale richieda analisi dinamiche non lineari nel rispetto delle normative vigenti, l'approccio proposto rappresenta un passo concreto verso una metodologia automatizzata e a vantaggio di sicurezza per la progettazione preliminare di esoscheletri dissipativi. Tale contributo apre la strada a futuri sviluppi e a integrazioni con procedure avanzate di analisi e modellazione del comportamento non lineare dei sistemi dissipativi.

Indice

1	Introduzione	4
2	Stato dell'Arte	6
2.1	Esoscheletri	7
2.1.1	Utilità	7
2.2	Tipi di Esoscheletro	9
2.2.1	Orientamento	10
2.2.2	Esoscheletri elastici versus dissipative: vantaggi e svantaggi . .	12
2.2.3	Tipologie di dissipatori	14
3	Studio Parametrico per l'identificazione di un criterio di correlazione tra indice di abbattimento, ξ, e coefficiente di smorzamento, α.	18
3.1	Caratteristiche esoscheletri analizzati	19
3.2	Modello dei dissipatori Fluido-Viscosi	19
3.3	Analisi comparativa	20
3.3.1	Tipi di analisi	22
3.4	Procedura semplificata per la progettazione sismica di strutture dotate di smorzatori viscosi	33
3.4.1	Ipotesi della procedura	33
3.4.2	Vantaggi della procedura	37
3.4.3	Procedura	38
3.5	Descrizione dei modelli analizzati	40
3.5.1	Modelli 2D	42

3.5.2	Modello 3D	48
3.6	Analisi ed interpretazione dei risultati	50
4	Formulazione del Problema di Ottimizzazione e Criteri di Settaggio dell'Algoritmo	61
4.1	Sviluppo di un approccio Displacement-Based	61
4.2	Ottimizzazione tramite algoritmo evolutivo	63
4.2.1	Formulazione matematica del problema di ottimizzazione	66
4.2.2	Disposizione degli esoscheletri e valutazione dei costi di intervento	71
4.2.3	Integrazione della procedura di predimensionamento nell'algoritmo genetico	77
4.2.4	Caso studio	80
5	Caso studio	81
5.1	Struttura di base considerata	81
5.2	Carichi	83
5.3	Struttura di base considerata	84
5.4	Analisi Time History non lineari	85
5.5	Esoscheletri ortogonali	85
6	Interpretazione dei risultati	92
6.1	Risultati dei processi di ottimizzazione	92
6.2	Discussione dei risultati	95
6.2.1	Analisi su struttura base	95
6.2.2	Difficoltà di convergenza	96
6.2.3	Considerazioni generali	99
6.3	Risultati dell'analisi sull'individuo migliore	100
6.3.1	Individuo migliore	100
6.3.2	Discussione dei risultati dell'ottimizzazione	101
7	Validazione dei risultati ottenuti	104
7.1	Modellazione della struttura per analisi TH_NL	104
7.2	Validazione della modellazione per le analisi time history	106

7.3	Validazione dell'impiego di analisi dinamiche lineari in presenza di dissipatori non lineari	108
7.4	Validazione della procedura di Silvestri	110
7.5	Confronto tra esoscheletri rigidi e esoscheletri dissipativi	111
8	Conclusioni e sviluppi futuri	114
9	Bibliografia	119

Capitolo 1

Introduzione

Nel corso degli anni, a seguito di importanti eventi sismici che si sono verificati in diverse nazioni, ci troviamo oggi a gestire un patrimonio edilizio molto vasto, obsoleto e progettato senza alcun criterio antisismico. Ciò è dovuto al fatto che normative strutturali solide e fondate sono state sviluppate soltanto in seguito a eventi sismici di notevole intensità, che hanno segnato la storia dell'Italia e, più in generale, di molti altri Paesi.

Attualmente, uno dei temi più rilevanti riguarda la gestione e la manutenzione di strutture datate, instabili e, in molti casi, da preservare in quanto beni di valore storico, artistico o culturale, oppure edifici di primaria importanza funzionale, come ospedali, caserme o scuole.

Questa ricerca si concentra su quest'ultima categoria, ovvero sulla necessità di preservare la funzionalità di edifici strategici per i quali non è consentita l'interruzione delle attività, o la cui condizione strutturale non è facilmente determinabile a causa dell'elevata incertezza sulle reali caratteristiche dei materiali impiegati.

In quest'ottica, negli ultimi anni si è sviluppato un crescente interesse da parte della comunità scientifica e accademica nei confronti degli esoscheletri in acciaio per l'adeguamento sismico. Si registrano infatti le prime applicazioni di tale tipologia di intervento anche in Italia, su edifici nevralgici come aeroporti, scuole ed edifici pubblici in generale.

La rigorosa applicazione delle normative vigenti in materia di costruzioni fa sì che l'adozione di questa tipologia di intervento non risulti sempre economicamente vantaggiosa. Per questo motivo, la comunità scientifica si sta muovendo per dimostrarne l'efficacia e la praticità, favorendone così una più ampia diffusione.

Sebbene lo studio degli esoscheletri elastici sia stato ampiamente trattato in letteratura e sia tuttora oggetto di continuo aggiornamento, il presente elaborato di ricerca si propone di estendere l'analisi al campo degli esoscheletri dissipativi, non in sostituzione ma in integrazione agli studi esistenti sulle configurazioni non dissipative.

L'introduzione di elementi dissipativi non lineari all'interno della struttura consente di ottenere un risparmio in termini di quantità di acciaio impiegato nell'esoscheletro e, considerato l'attuale costo elevato di tale materiale, di ridurre i costi complessivi dell'intervento.

Definito questo primo obiettivo, l'elaborato intende integrare le analisi sugli esoscheletri dissipativi all'interno di un algoritmo di ottimizzazione, in grado di determinare una distribuzione ottimale del sistema accoppiato. L'uso di elementi dissipativi puntuali permette infatti un notevole risparmio sia in termini di dimensionamento delle sezioni (e quindi di acciaio utilizzato), sia in termini di numero complessivo di esoscheletri necessari per l'intervento.

È doveroso precisare che le procedure e i ragionamenti illustrati nel presente elaborato si collocano all'interno di una fase di predimensionamento degli esoscheletri dissipativi. Come verrà meglio esplicitato nel corso del lavoro, saranno fornite correlazioni e strumenti operativi utili a consentire, a valle di un predimensionamento efficace, l'esecuzione delle verifiche strutturali in conformità alle normative tecniche attualmente vigenti in Italia.

Capitolo 2

Stato dell'Arte

In questo capitolo dell'elaborato si andrà ad eseguire un'approfondita analisi dello stato dell'arte riguardante studi ed applicazioni di esoscheletri in generale, ed esoscheletri dissipativi in quanto oggetto principale dell'elaborato. Il patrimonio edilizio presente in Italia, così come in molte altre nazioni, è stato realizzato in larga parte durante il boom economico degli anni Sessanta, in un periodo antecedente all'introduzione delle normative antisismiche. Di conseguenza, la maggior parte degli edifici sul territorio nazionale è stata progettata per resistere esclusivamente ai carichi verticali, senza tener conto delle sollecitazioni orizzontali generate dalle azioni sismiche. Tale condizione determina una diffusa vulnerabilità strutturale, che rende necessari interventi mirati di adeguamento o miglioramento sismico.

Gran parte degli interventi di adeguamento sismico tradizionali comporta l'interruzione temporanea delle attività svolte all'interno degli edifici, rendendoli inagibili per l'intera durata dei lavori. Inoltre, tali tecniche richiedono una conoscenza approfondita della struttura esistente, con la necessità di piani di indagine spesso onerosi sia in termini di tempo che di costi.

Infine, soluzioni come isolatori o dissipatori sismici rappresentano interventi di natura esclusivamente strutturale, che non consentono di conseguire benefici aggiuntivi in altri ambiti prestazionali dell'edificio.

2.1 Esoscheletri

Gli esoscheletri sono strutture esterne all'edificio, generalmente realizzate in acciaio, e collegate al suo sistema strutturale. Essi possono avere una configurazione bi o tri-dimensionale.

Il nome esoscheletri deriva dalla biomimesi, infatti gli esoscheletri vanno ad emulare strutture presenti in diverse specie animali, andandone a comprendere e sfruttare la biomeccanica ed i benefici che ne derivano [1].

L'obiettivo principale è quello di assorbire il carico sismico dalla struttura di base e trasferirlo, tramite opportuni collegamenti, agli esoscheletri posti all'esterno della struttura di partenza [2].

2.1.1 Utilità

Gli interventi tradizionali di adeguamento sismico presentano una serie di lacune che gli esoscheletri si propongono di colmare.

La conoscenza e modellazione delle strutture esistenti risulta spesso complessa e approssimata, a causa dell'incertezza legata alle reali proprietà meccaniche dei materiali e alla disposizione degli elementi strutturali. Per sopperire a tale mancanza di informazioni, è possibile introdurre strutture esterne rigide che, grazie alla loro elevata rigidità, consentono di ridurre significativamente le azioni sismiche anche senza una conoscenza approfondita della struttura originaria.

In un'ottica di costruzione modulare, e quindi di rapidità di esecuzione dell'intervento, l'esoscheletro può essere assemblato con facilità e progettato in modo da richiedere interventi di manutenzione regolari e a basso costo, assicurandone così la piena e continuativa funzionalità. Inoltre, la semplicità delle operazioni di manutenzione e di sostituzione degli elementi eventualmente danneggiati consente di ripristinare in tempi brevi la piena efficienza della struttura anche dopo un evento sismico di elevata intensità. Dal punto di vista del Life Cycle Thinking, un interven-

to a secco e, possibilmente, prefabbricato consente di ridurre l'impatto ambientale del processo costruttivo. Inoltre, l'impiego di strutture modulari in acciaio permetterebbe di utilizzare elementi riciclati e riadattabili al caso specifico, favorendo così un approccio più sostenibile e circolare. [3, 4].

Oltre all'aspetto strettamente strutturale, gli esoscheletri possono rappresentare anche una soluzione di efficientamento energetico, poiché possono essere integrati con sistemi di facciata ventilata o rivestimenti architettonici, migliorando al contempo l'aspetto estetico dell'edificio[5, 6]

.

In ambito residenziale risulta complessa la temporanea mobilitazione di intere famiglia ed arredamenti, causando disagi ai proprietari degli immobili e dei residenti [7]. Oltre all'ambito residenziale, ci sono molte strutture la cui funzionalità non può essere interrotta, come ospedali, caserme, aeroporti.

L'impiego di esoscheletri tridimensionali, qualora lo spazio esterno lo consenta, può inoltre permettere di incrementare la superficie calpestabile dell'immobile o di creare nuovi ambienti esterni funzionalmente collegati all'edificio principale.

Considerato l'attuale elevato costo e peso dell'acciaio, ridurre al minimo le dimensioni delle sezioni resistenti dell'esoscheletro e il numero complessivo di moduli impiegati, consentirebbe di diminuire in modo significativo i costi complessivi dell'intervento. Una massa maggiore dell'esoscheletro, infatti, si traduce in un incremento della massa sismica e, conseguentemente, delle forze inerziali agenti sulla struttura; allo stesso modo, un numero maggiore di esoscheletri implica la necessità di realizzare più fondazioni, con costi aggiuntivi. Pertanto, l'obiettivo della ricerca è quello di integrare dispositivi dissipativi all'interno di questa tipologia di intervento di adeguamento, al fine di ottimizzarne l'efficacia strutturale e migliorarne la sostenibilità economica.

In conclusione, gli interventi di adeguamento sismico tramite esoscheletri offrono numerosi vantaggi, ma presentano anche alcune limitazioni. In primo luogo, la necessità di spazi liberi esterni all'edificio rappresenta un vincolo non sempre compatibile con il contesto urbano. Inoltre, la realizzazione di nuove fondazioni comporta costi

aggiuntivi non trascurabili, mentre l'aspetto esterno dell'edificio risulta significativamente alterato, rendendo tale soluzione poco idonea per edifici di valore storico o architettonico. In alcuni casi possono inoltre rendersi necessari interventi localizzati di rinforzo o irrigidimento su solai, travi o pilastri esistenti. Infine, considerando il costo elevato di questi sistemi, essi rappresentano una soluzione realmente vantaggiosa solo quando l'obiettivo è il completo adeguamento sismico della struttura; di conseguenza, il loro impiego risulta difficilmente giustificabile per interventi di minore entità. [8].

2.2 Tipi di Esoscheletro

Il materiale che generalmente è utilizzato per gli esoscheletri è l'acciaio, dal momento in cui si possono ottenere elevate caratteristiche strutturali anche con sezioni leggere, facili da trasportare, semplici da installare [5]. Gli esoscheletri sono una soluzione molto versatile, dunque ne esistono molte configurazioni differenti a seconda della forma, connessione o capacità dissipativa. Ciascuna soluzione progettuale comporta vantaggi e svantaggi, ed ha un comportamento differente, dunque non è possibile utilizzare un unico approccio progettuale per ognuna di queste tipologie.

La connessione tra esoscheletro ed edificio può essere di tipo rigido o dissipativo. Gli esoscheletri dissipativi possono presentare connessioni rigide e dissipatori all'interno dell'esoscheletro, o essere di tipo rigido ed avere connessioni dissipative [5].

In funzione della disposizione dei controventi dell'esoscheletro è possibile distinguere Concentric Bracing Frame (CBF), Eccentric Bracing Frame (EBF), Buckling-Restrained Bracing frame (BRB) and Moment Resisting Frame (MRF). Tra queste, la configurazione CBF è preferibile perchè garantisce un design più efficiente. La configurazione CBF può essere ottenuta disponendo i diagonali a croce di San Andrea, portale e a "K". La soluzione migliore dipende dalle necessità strutturali e architettoniche. [5]

Per quanto riguarda le proprietà sezionali dell'esoscheletro, se il regime predominante è quello assiale, allora la soluzione migliore è quella di profili laminati a caldo (Hot rolled) o formati a freddo (Cold-formed). In particolare, la soluzione cava circolare

(Circular Hollow Section), grazie alla forma arrotondata, combina alta efficienza con l'estetica [5].

2.2.1 Orientamento

Dal punto di vista strutturale, gli esoscheletri possono essere bi o tri-dimensionali, e ciò altera il percorso degli sforzi al suo interno. Gli esoscheletri tri-dimensionali hanno un comportamento di tipo a guscio, e questo porta ad un'ottimale distribuzione degli sforzi. Dall'altra parte, gli esoscheletri bi-dimensionali hanno un comportamento planare di diverso tipo a seconda della disposizione delle aste e della tipologia di connessione tra esse. Gli esoscheletri bi-dimensionali possono essere disposti parallelamente o ortogonalmente alla facciata. Infine, particolare interesse stanno sviluppando anche le soluzioni di tipo diagrid [9]. **Orientamento perpendicolare**

In questo caso gli esoscheletri sono posizionati perpendicolarmente alla facciata dell'edificio. Il principale vantaggio di questa soluzione è quello di aggiungere spazio utilizzabile all'edificio.

Da un punto di vista strutturale, questa disposizione induce un incremento della massa sismica, e quindi delle azioni sismiche agenti sul sistema accoppiato. La connessione assiale tra struttura di base ed esoscheletro porta ad un comportamento in piano che richiede l'impiego di fondazioni profonde che siano in grado di resistere al momento ribaltante e taglio. Quindi, questa configurazione risulta applicabile nel caso di strutture ad un piano, o edifici multipiano di altezza ridotta [4].

Questa sarà la configurazione considerata all'interno delle analisi parametriche e del caso studio in questo elaborato.

Orientamento parallelo

Questa disposizione permette di superare un importante problema, ovvero quello dello spazio esterno richiesto dall'intervento con esoscheletri perpendicolari. Le connessioni sono a taglio, quindi si possono prevedere anche connessioni perimetrali che consentano un elevato grado di ridondanza dell'intervento.

Il comportamento strutturale, in questo caso, previene la nascita di fenomeni fuori dal piano che possono danneggiare la struttura se le pareti dell'edificio non sono collegate adeguatamente[4].

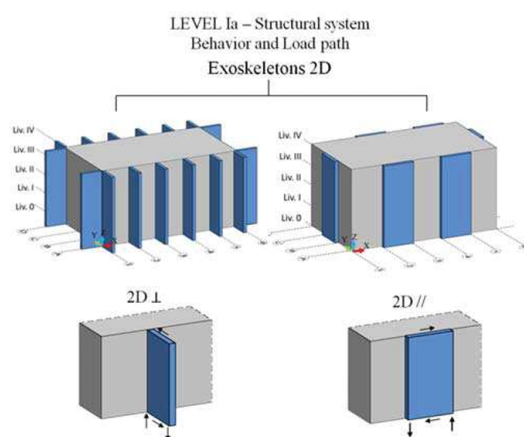


Figura 2.1: Configurazioni bi-dimensionali degli esoscheletri. Immagine estratta da [3] su concessione

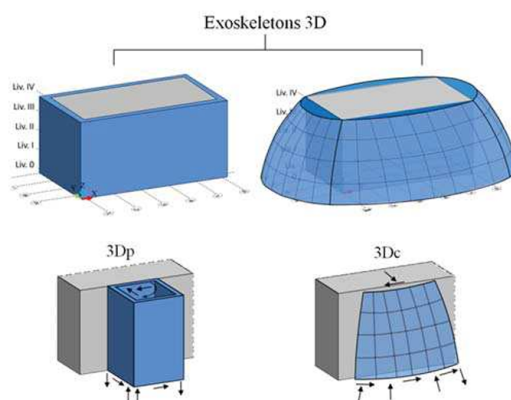


Figura 2.2: Configurazioni tri-dimensionali degli esoscheletri. Immagine estratta da [3] su concessione

Diagrid

Il sistema Diagrid è costituito da una griglia strutturale capace di sostenere sia le azioni orizzontali sia quelle verticali [10]. Grazie a un'ottimale disposizione degli elementi resistenti, questo sistema risulta particolarmente adatto per strutture molto sviluppate in elevazione. Inoltre, la configurazione flessibile della griglia consente un'ampia libertà compositiva, permettendo di ottenere anche un elevato valore estetico.

Capacità Dissipative

Oltre alla classificazione strutturale dovuta alla disposizione delle aste e degli esoscheletri, è possibile distinguere due tipologie di esoscheletri: esoscheletri rigidi o dissipativi.

2.2.2 Esoscheletri elastici versus dissipative: vantaggi e svantaggi

Esoscheletri rigidi

Il funzionamento di tali sistemi si basa sulla differenza di rigidezza tra la struttura esistente e l'esoscheletro. La distribuzione delle azioni sismiche all'interno del sistema accoppiato avviene infatti in funzione della rigidezza dei singoli elementi strutturali. Gli esoscheletri caratterizzati da un'elevata resistenza presentano anche da un'elevata rigidezza, ciò gli permette di assorbire una quota significativa dell'azione sismica. Da un lato, tale comportamento consente di intervenire anche in assenza di una conoscenza approfondita delle caratteristiche strutturali dell'edificio esistente; dall'altro, l'elevata rigidezza comporta un notevole impiego di materiale, rendendo la soluzione potenzialmente onerosa dal punto di vista economico.

In aggiunta, l'elevata rigidezza di questo intervento comporta un'importante azione tagliante alla base, rendendo necessarie fondazioni di notevoli dimensioni [11].

Gli esoscheletri rigidi sono anche utilizzati nel per ridurre i danni di edifici particolarmente sensibili agli spostamenti e ad elementi non strutturali.

Da un punto di vista progettuale essi rappresentano una soluzione valida, dal mo-

mento in cui si progettano per rimanere in campo elastico lineare e quindi le analisi risultano semplificate [11].

Esoscheletri dissipativi. Immagine estratta da [11] su concessione

Questa tipologia, oggetto dell'elaborato, è costituita da esoscheletri in acciaio cor-redati da elementi puntuali di dissipazione. Soluzioni dissipative permettono di controllare la risposta strutturale dissipando l'energia sismica tramite dei dispositivi sacrificali posti alla base (pareti dissipative) o tramite dissipatori localizzati (istere-tici, viscoelastici, viscosi, ecc...).

Questi elementi di dissipazione determinano una riduzione delle azioni sismiche, e quindi una riduzione delle dimensioni delle sezioni resistenti. In aggiunta, dato che la dissipazione energetica è localizzata solamente in alcuni punti della struttura, gli elementi possono essere progettati o per non danneggiarsi o si può prevedere un'a-gevole sostituzione a seguito di un intenso evento sismico, rispettando principi di riparabilità e adattabilità. D'altra parte, i dissipatori possono essere molto costosi, e il processo di progettazione può risultare particolarmente complicato, specialmente se si considera la difficoltà di modellazione di edifici esistenti.

I dissipatori possono essere inseriti all'interno di controventi, o utilizzati come colle-gamento tra la struttura esistente e l'esoscheletro. Nel caso di dissipatori inseriti alla base delle pareti esterne, la deformazione della struttura risulta pressoché costante lungo tutta l'altezza [11].

Le soluzioni dissipative richiedono una certa velocità relativa tra gli estremi liberi del dissipatore.

Quando la struttura viene modellata trascurando i tamponamenti, se ne sottostima la rigidità complessiva e, di conseguenza, si sovrastimano gli spostamenti; ciò com-porta anche una sovrastima dell'efficacia dei dissipatori.

Mentre l'intervento con esoscheletri rigidi può richiedere l'inserimento di irrigidi-menti locali, l'impiego di soluzioni dissipative, che necessitano di spostamenti della struttura, comporta invece l'indebolimento controllato di alcune sue parti. Ciò è necessario poiché, per garantire il corretto funzionamento dei dissipatori, è richiesta una certa duttilità: in assenza di adeguati spostamenti, infatti, non si sviluppereb-

bero le forze dissipative previste [11].

Di seguito si riporta una figura esplicativa delle diverse tipologie di esoscheletri (Figura 2.3):

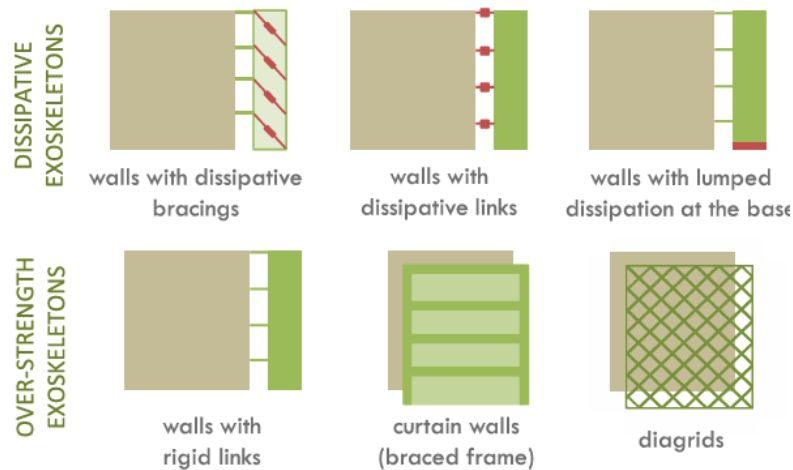


Figura 2.3: Tipologie di esoscheletri. Immagine estratta da [11] su concessione

2.2.3 Tipologie di dissipatori

L'energia sismica può essere dissipata tramite diversi meccanismi: snervamento dei metalli, frizione, passaggio di un fluido attraverso un orifizio, deformazione viscoelastica, trasformazione di fase dei metalli [12].

La dissipazione può essere attiva o passiva, la prima prevede l'adeguamento del comportamento dei dissipatori in funzione della risposta monitorata della struttura. Quindi, la forza dissipativa non è fissata, ma dipende dalle azioni esterne. Il sistema è un misto di ingegneria strutturale, processo di dati e sensoristica [13].

La dissipazione passiva è quella maggiormente diffusa, ed è a sua volta composta da dissipatori visco-elastici, dissipatori metallici a snervamento, dissipatori ad attrito e dissipatori fluido-viscosi (oggetti del caso studio).

Dissipatori visco-elastici

In genere composti da copolimeri o sostanze vetrose come la gomma bituminosa, gomma termoplastica ecc... Questi materiali possono avere larghe deformazioni a taglio e possono assumere la forma di sottili lamine. Questi dissipatori funzionano garantendo grandi deformazioni a taglio tra il piatto centrale e quelli laterali (Figure 2.4).

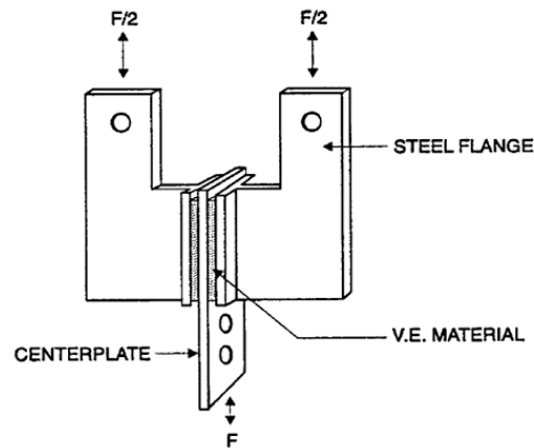


Figura 2.4: Dissipatore visco elastico. Immagine estratta da [14] su concessione

Questi sono materiali molto sensibili alla temperatura, per tal motivo sono necessarie accurate analisi preliminari.

Dissipatori metallici a snervamento

Si basano sulla dissipazione energetica per deformazione inelastica dei metalli che li compongono. Sono presenti in numerose configurazioni, ma le forme più usate per raggiungere un rapido snervamento sono quelle ad X e triangolari (Figure 2.5).

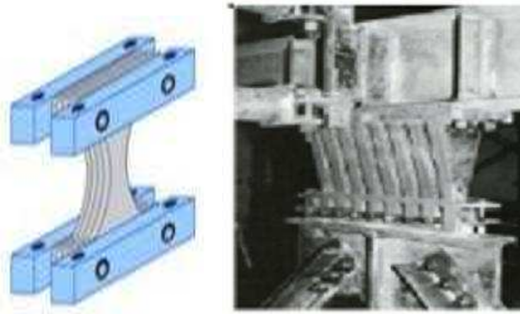


Figura 2.5: Dissipatori metallici a snervamento. Immagine estratta da [14] su concessione

Questa tipologia deve essere continuamente sottoposta ad ispezioni, inquanto può essere soggetta a rotture premature, anche a cause dell'azione ciclica del vento.

Dissipatori ad attrito

Il meccanismo è simile a quello di dissipazione dell'energia cinetica dei veicoli in movimento attraverso la frizione tra pneumatico e strada. Questi dissipatori presentano generalmente larghi, rettangolari e pressochè stabili cicli di isteresi, garantendo elevata capacità dissipativa (Figure 2.6).

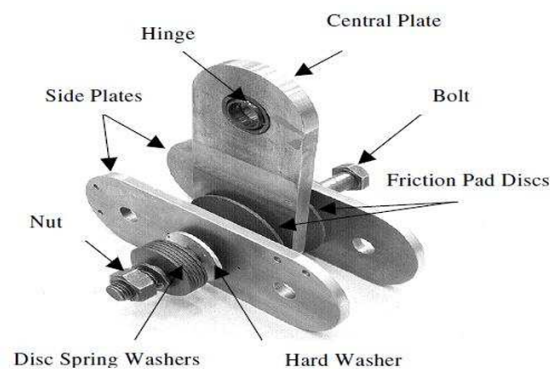


Figura 2.6: Dissipatori ad attrito. Immagine estratta da [14] su concessione

Dissipatori fluido-viscosi

La dissipazione si ha per effetto del passaggio di un fluido viscoso all'interno di un orifizio. Quindi questa tipologia è costituita da un pistone composto da tanti piccoli orifizi all'interno di una camera riempita di materiale viscoso siliconico.

Quando il sisma colpisce il dissipatore si innesca un moto che induce il passaggio del fluido tramite gli orifizi dissipando una considerevole quantità di energia (Figure 2.7).

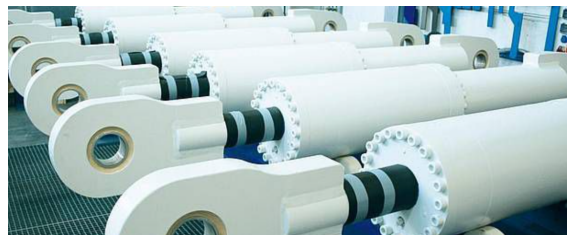


Figura 2.7: Dissipatori fluido-viscosi. Immagine estratta da [15] su concessione

Quest'ultima tipologia sarà oggetto di approfondimento nel seguito.

Capitolo 3

Studio Parametrico per l'identificazione di un criterio di correlazione tra indice di abbattimento, ξ , e coefficiente di smorzamento, α .

In questo capitolo viene condotta un'analisi comparativa preliminare finalizzata ad una profonda comprensione del comportamento strutturale degli esoscheletri dissipativi. Diversamente dalla tipologia costituita da strutture elastiche rigidamente vincolate alla struttura in RC, in questo caso è necessario progettare congiuntamente sia la struttura dell'esoscheletro sia i dispositivi dissipativi ospitati dalla prima. Questi ultimi, a seconda della tipologia adottata, presentano modelli di comportamento tra loro molto differenti, governati da parametri progettuali che devono essere opportunamente calibrati.

Considerata la complessità del problema e l'elevato numero di variabili in gioco, si rendono necessarie alcune ipotesi semplificative che consentano di discretizzare il

problema e renderne più semplice e pratica la progettazione.

3.1 Caratteristiche esoscheletri analizzati

La complessità nella progettazione degli esoscheletri, sia dissipativi che non dissipativi, risiede nell'elevato numero di configurazioni che essi possono assumere a causa della variabilità di:

- Sezioni che costituiscono l'esoscheletro;
- Disposizione degli esoscheletri rispetto alla facciata dell'edificio (ortogonali o paralleli ad essa);
- Natura degli esoscheletri (dissipativi o rigidi);
- Collegamenti tra edificio ed esoscheletro;
- Posizione degli esoscheletri.

Tale variabilità, se da un lato rende difficoltosa una progettazione efficiente, dall'altro apre alla possibilità di impiegare algoritmi di ottimizzazione in grado di individuare la configurazione ottimale, minimizzando opportune funzioni di costo e rispettando al contempo i vincoli necessari a garantire un corretto adeguamento sismico della struttura di base.

3.2 Modello dei dissipatori Fluido-Viscosi

Come già menzionato, i dissipatori fluido-viscosi sono dispositivi a comportamento dipendente dalla velocità. Per meglio approfondire il comportamento strutturale dei dissipatori fluido-viscosi rispetto a quanto fatto nel capitolo 2, si analizza il modello impiegato. Gli smorzatori viscosi attualmente in commercio sono dispositivi del tipo cilindro/pistone in cui la laminazione di un fluido siliconico attraverso un idoneo circuito idraulico permette la dissipazione dell'energia introdotta dal sisma nella struttura sotto forma di calore. Il comportamento meccanico degli attuali dispositivi commerciali è ben descritto dal modello di Maxwell (Figura 3.1) che vede uno smorzatore puro caratterizzato da un legame costitutivo forza-velocità, F_d -

v , non-lineare di tipo esponenziale (eq. 3.1) in serie con una molla rappresentativa della compressibilità del fluido (difetto del dispositivo) [16]:

$$F = C_{NL} \cdot v^\alpha = k_{oil} \cdot x \quad (3.1)$$

dove C_{NL} è il coefficiente di smorzamento del dispositivo non-lineare, α è l'esponente dello smorzatore (tipicamente per dispositivi commerciali $\alpha < 1$, ed in particolare $\alpha = 0.15 \div 0.30$), k_{oil} rappresenta la rigidità corrispondente alla compressibilità del fluido ed x rappresenta la corsa del pistone.

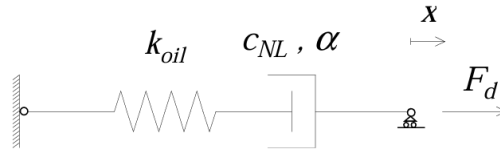


Figura 3.1: Modello dissipatori FVD. Immagine estratta da [17] su concessione

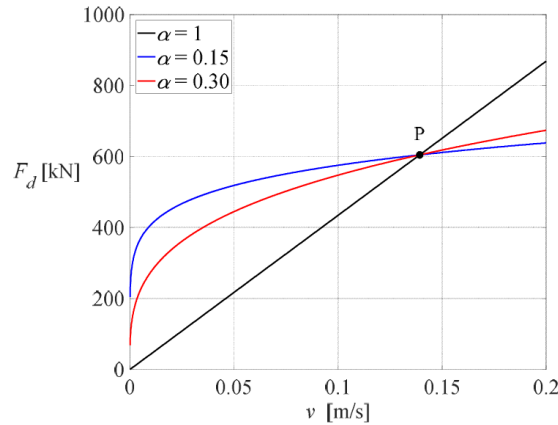


Figura 3.2: Legge F-v dissipatori. Immagine estratta da [17] su concessione

3.3 Analisi comparativa

L'analisi è stata inizialmente condotta su modelli bidimensionali a differenti gradi di libertà, per poi essere estesa a un caso studio tridimensionale. L'obiettivo di fondo è quello di definire una procedura per la progettazione degli esoscheletri dissipativi.

Si parte da una struttura dotata di elementi non lineari, quali i dissipatori fluido-viscosi, con l'intento di valutare se, in una fase di predimensionamento dell'intervento, l'impiego di analisi di tipo lineare possa ancora ritenersi fondato. Le analisi non lineari, infatti, comportano un notevole onere computazionale che ne limita l'applicabilità all'interno di algoritmi di ottimizzazione.

In tal senso, si possono individuare due possibili approcci progettuali:

Progettazione manuale dell'intervento

In questo caso si ipotizza una configurazione preliminare dell'esoscheletro — definendo la disposizione e le sezioni resistenti — e si eseguono analisi non lineari al fine di individuare la soluzione ottimale in termini di dissipatori. Tale procedura consente di esplorare il comportamento non lineare dei dispositivi, garantendo una progettazione più prestazionale; tuttavia, richiede di fissare a priori la configurazione dell'esoscheletro, con il rischio di ottenere una soluzione non ottimizzata e di conseguente spreco di materiale.

Progettazione ottimizzata dell'intervento

In questo secondo approccio, la configurazione geometrica dell'esoscheletro e le relative sezioni resistenti vengono considerate variabili. Si impiegano analisi dinamiche lineari, che permettono tempi di calcolo contenuti, ottenendo una configurazione ottimizzata in termini di disposizione, dimensionamento sezionale e caratteristiche dei dissipatori. Tale procedura, tuttavia, si basa sull'assunzione che i dissipatori mantengano le stesse caratteristiche lungo l'elevazione, senza possibilità di variazione ([17]). Sulla base di questo secondo approccio, nasce l'esigenza di un'analisi comparativa preliminare, finalizzata a individuare una correlazione tra il coefficiente di dissipazione non lineare (C_{NL}) e il fattore di smorzamento equivalente che verrà impiegato nelle analisi dinamiche lineari previste all'interno dell'algoritmo di ottimizzazione. A tal fine, è stata adottata una procedura proposta dal prof. Stefano Silvestri [17] (descritta in dettaglio nei paragrafi successivi), originariamente sviluppata per interventi con controventi dissipativi inseriti direttamente nei telai. Considerate le analogie tra tali sistemi e gli esoscheletri sismici, si è ritenuto opportuno verificarne l'applicabilità anche a questa tipologia di intervento.

D'altra parte, nel momento in cui si trascura il comportamento non lineare dei dissipatori, si compromette l'accuratezza della risposta strutturale.

Le analisi condotte in questo elaborato hanno pertanto i seguenti obiettivi:

1. Verificare se l'impiego di analisi dinamiche lineari conduca a risultati a favore di sicurezza — condizione necessaria in fase di predimensionamento — e, nel contempo, valutare se non si sottostimi eccessivamente il contributo dei dissipatori all'abbattimento dell'azione sismica;
2. Una volta confermata l'applicabilità dell'analisi lineare in fase preliminare, individuare correlazioni affidabili tra il fattore di smorzamento adottato nelle analisi dinamiche lineari e il coefficiente non lineare da utilizzare nelle analisi non lineari. Quest'ultimo aspetto riveste particolare importanza: le normative vigenti impongono infatti che, per strutture dotate di elementi non lineari (come i dissipatori), le verifiche strutturali vengano condotte anche in campo non lineare. È quindi fondamentale definire una correlazione coerente tra il valore del fattore di smorzamento equivalente e il coefficiente di dissipazione non lineare, così da garantire la consistenza tra i diversi livelli di analisi.

3.3.1 Tipi di analisi

Di seguito verranno eseguite analisi di tipo dinamica lineare (DL), time history lineare (TH_{LN}) e time history non lineare (TH_{NL}).

Analisi dinamica lineare - DL : L'analisi dinamica lineare si basa sul principio della decomposizione modale di un sistema elastico e sull'utilizzo dello spettro di risposta elastico (Figura 3.3). Un sistema a più gradi di libertà viene quindi ricondotto a un insieme di sistemi a singolo grado di libertà, ciascuno caratterizzato da un proprio periodo di vibrazione. L'azione sismica è rappresentata mediante lo spettro di risposta elastico, definito in funzione della zona sismica in cui è locata la struttura.

Lo spettro di risposta elastico tiene conto dello smorzamento del sistema, che ne riduce l'ampiezza. In assenza di dissipazione, un sistema perfettamente elastico continuerebbe a oscillare indefinitamente; nella realtà, invece, ogni sistema presenta

una dissipazione intrinseca che porta progressivamente all'arresto delle oscillazioni. Generalmente il valore di fattore di smorzamento per talai in calcestruzzo armato è fissato pari al 5%.

Nel caso di sistemi dissipativi, l'introduzione di dispositivi di dissipazione comporta una ulteriore riduzione dell'ampiezza dello spettro di risposta. Questo aspetto è particolarmente rilevante: nell'analisi dinamica lineare, infatti, la dissipazione non viene modellata come un fattore che interviene direttamente sulla risposta strutturale dopo l'impatto del sisma, ma viene rappresentata in modo equivalente attraverso una riduzione dello spettro di risposta stesso. In tal modo, si simula l'effetto dei dissipatori come se essi riducessero, in maniera fittizia, l'intensità dell'azione sismica agente sulla struttura ma in realtà riducono la risposta strutturale.

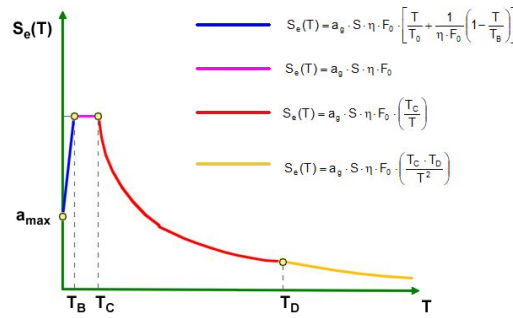


Figura 3.3: Spettro di risposta elastico normativo. Immagine estratta da [18] su concessione

Lo spettro normativo (Figura 3.3), in accordo con le NTC 2018, ha una riduzione che è funzione del fattore di smorzamento secondo la seguente formula:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \geq 0.55 \quad (3.2)$$

L'inserimento dei dissipatori all'interno dell'esoscheletro comporta un incremento del fattore di smorzamento del sistema, e di conseguenza una riduzione dell'ampiezza dello spettro di risposta elastico. In un'analisi dinamica lineare non è tuttavia possibile distinguere il contributo di ciascun dissipatore alla riduzione dell'azione sismica: il comportamento dissipativo viene infatti considerato nel suo complesso,

come effetto globale del sistema di dissipazione. La normativa italiana (NTC 2018) prescrive un valore massimo del fattore di smorzamento pari al 28%.

Il principale vantaggio dell'analisi dinamica lineare, o analisi multimodale, risiede nella rapidità computazionale. Un sistema continuo con un numero di gradi di libertà in funzione del numero di nodi, viene discretizzato in un numero limitato di gradi, riducendo notevolmente l'onere di calcolo. Tuttavia, nei casi in cui siano presenti elementi dissipativi, rappresentarne l'effetto solo attraverso una riduzione dello spettro di risposta può portare a sottostimare il reale contributo dei dissipatori.

Uno degli obiettivi di questo elaborato è proprio verificare che tale approssimazione non comporti perdite di prestazione eccessive, aspetto comunque accettabile in questa fase preliminare di analisi.

Grazie alla decomposizione modale del sistema elastico è inoltre possibile individuare su quale/i frequenza/e naturale/i intervenire. È sempre opportuno agire sul modo con maggiore massa partecipante, poiché esso rappresenta la quota più rilevante della risposta globale della struttura. Nelle strutture oggetto di intervento mediante esoscheletro, il primo modo di vibrare risulta quasi sempre predominante; di conseguenza, l'intervento si concentra sulla riduzione della frequenza corrispondente al periodo fondamentale.

In particolare, se tale periodo ricade in corrispondenza del plateau dello spettro di risposta, la riduzione dell'azione sismica risulta massima. Quindi, per edifici di altezza limitata, oggetti di intervento con esoscheletri, l'introduzione di dissipatori permette di avere una riduzione ancora più efficace. Gli edifici alti, invece, sono caratterizzati da periodi fondamentali elevati, che li collocano al di fuori del plateau: per questo motivo si dicono naturalmente isolati, in quanto le frequenze più importanti della struttura non coincidono con quelle in cui l'azione sismica concentra la propria energia (Figura 3.4).

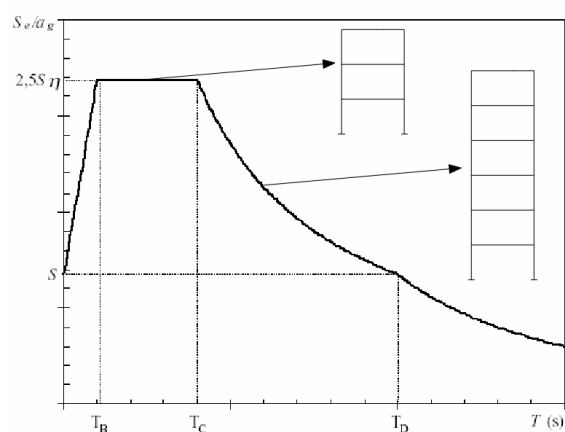


Figura 3.4: Spettro di risposta

Come meglio specificato di seguito, le analisi comparative verranno eseguite in riferimento ad un certo fattore di smorzamento, il quale poi verrà correlato ad un valore di coefficiente di dissipazione non lineare.

A differenza delle analisi dinamiche lineari, le analisi time history seguono il comportamento della struttura lungo tutta la durata del sisma. Quindi l'analisi viene eseguita somministrando alla struttura un certo numero di accelerogrammi di progetto (Figura 3.5) e se ne segue la risposta strutturale ad ogni passo.

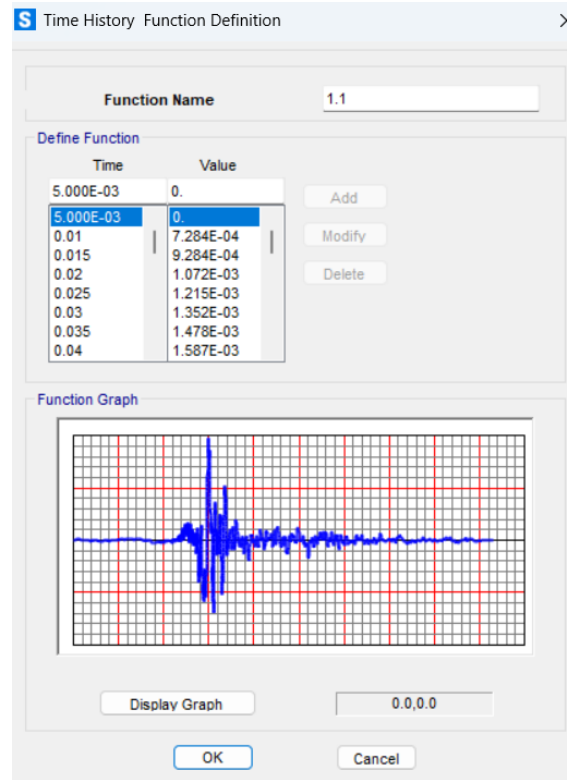


Figura 3.5: Accelerogramma

Analisi time history - TH_{LN} : La normativa italiana impone un minimo di 7 accelerogrammi sottoposti alla struttura, i quali devono essere spettrocompatibili con lo spettro di risposta della zona sismica di riferimento. Allo §3.2.3.6 le NTC18 indicano che l'utilizzo di storie temporali del moto del terreno naturali (le uniche qui considerate) è consentito verificato che: la loro scelta sia appresentativa 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.³ Inoltre, le NTC18 impongono che la media delle ordinate spettrali in pseudo-accelerazione, con smorzamento viscoso $\xi = 5\%$, di tutte le registrazioni selezionate (scalate o meno) deve essere compatibile con lo spettro obiettivo all'interno di un dato intervallo di periodi (T_{min} , T_{max}) che dipende dallo stato limite (SL) considerato e nel rispetto di certi limiti di tolleranza [19]. Le NTC18 (così come le NTC08), nel caso di strutture non isolate, fissano $T_{min} = 0.15s$, mentre fanno variare T_{max} a seconda se le analisi siano allo stato limite ultimo (stato limite di salvaguardia della vita, SLV; stato

limite di collasso, SLC) o allo stato limite di esercizio (stato limite di danno, SLD). In particolare, agli SLV e SLC, T_{max} è pari al maggiore tra 2 s e $2T$, essendo T il periodo fondamentale del modello strutturale, mentre allo SLD deve essere $T_{max} = 1.5 \cdot T$. Per quanto riguarda la tolleranza entro cui la spettro-compatibilità deve essere rispettata, il limite inferiore, al di sotto del quale non bisogna scendere, è pari al 90% dello spettro obiettivo, mentre non bisogna eccedere il 130% dello spettro obiettivo [19]. In aggiunta, la normativa consente di considerare 3 tipologie diverse di accelerogrammi:

- **Accelerogrammi naturali** ma spettrocompatibili. Quindi si impiegano accelerogrammi che sono stati registrati in passato in quell'area purchè questi ricadano nelle caratteristiche di spettrocompatibilità;
- **Accelerogrammi artificiali**, in cui il software va a creare artificialmente degli accelerogrammi che ricadano nelle caratteristiche di spettrocompatibilità;
- **Accelerogrammi scalati**, ovvero accelerogrammi reali che vengono scalati per essere resi spettrocompatibili, fino ad un fattore massimo di scala pari a 5.

Da un punto di vista applicativo, è possibile far riferimento sia agli accelerogrammi proposti dall'applicativo REXELweb, sia a quelli forniti direttamente dal software SAP2000.

È tuttavia evidente il principale limite di questa tipologia di analisi, ovvero il notevole onere computazionale. Un'analisi di questo tipo richiede infatti la risoluzione numerica delle equazioni differenziali del moto per ogni grado di libertà della struttura e per ogni intervallo temporale considerato.

La riduzione dell'onere di calcolo può avvenire essenzialmente in due modi: diminuendo il numero di passi temporali oppure riducendo il numero di gradi di libertà. Tuttavia, nel caso di strutture tridimensionali complesse, ridurre i gradi di libertà non è agevole, mentre un passo temporale eccessivamente ampio può portare a una risposta strutturale approssimata o non accurata.

Una possibile soluzione a questa problematica è rappresentata dalla Fast Nonlinear Analysis (FNA).

Le analisi time history si suddividono in due principali sottocategorie:

- FNA (Fast Nonlinear Analysis) – È un metodo meno oneroso dal punto di vista computazionale nei casi in cui le non linearità siano concentrate (come cerniere plastiche, dissipatori, ecc.). In questo approccio, le equazioni del moto non vengono risolte per ogni grado di libertà della struttura, ma si esegue preliminarmente una decomposizione modale del sistema (decomposizione delle equazioni del moto su base modale). Dopo questa fase di decomposizione, le equazioni del moto vengono risolte solo sul sistema ridotto, ossia considerando un numero limitato di gradi di libertà, corrispondenti ai modi di vibrare significativi individuati nell'analisi modale preliminare. Questo metodo richiede circa 1/100 del tempo necessario rispetto al metodo di integrazione diretta (DI). Grazie alla decomposizione modale, è inoltre possibile considerare agevolmente lo smorzamento equivalente del 5% tipico delle strutture in calcestruzzo, evitando l'impiego dello smorzamento proporzionale di Rayleigh.
- DI (Direct Integration) – In questo approccio, le equazioni del moto vengono integrate direttamente mediante metodi numerici (come il metodo di Newmark) per ogni grado di libertà e ogni passo di carico. Si tratta di un metodo notevolmente più oneroso dal punto di vista computazionale, in quanto il passo di integrazione deve essere pari a circa 1/100 del periodo fondamentale della struttura (ossia nell'ordine di 0,01 secondi) per evitare di perdere informazioni importanti sulla risposta strutturale del sistema. Di conseguenza, a ogni passo di integrazione viene risolto l'intero sistema di equazioni del moto, coinvolgendo tutti i gradi di libertà della struttura. Si evidenzia anche che, per analisi ad integrazione diretta, non è immediata l'implementazione della dissipazione pari al 5% dei telai in calcestruzzo. Ovviamente, tale smorzamento va considerato anche in questa analisi, e quindi si farà riferimento ad una dissipazione proporzionale alla Rayleigh 3.3:

$$C = \alpha K + \beta M \quad (3.3)$$

Da utilizzare nell'equazione dell'equilibrio dinamico 3.4:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (3.4)$$

In accordo con la normativa, bisogna calibrare il valore di α e β in modo tale da avere un fattore di smorzamento pari al 5% in $T_A = 0.9T_1$ e $T_B = 0.2T_1$ (figura 3.6):

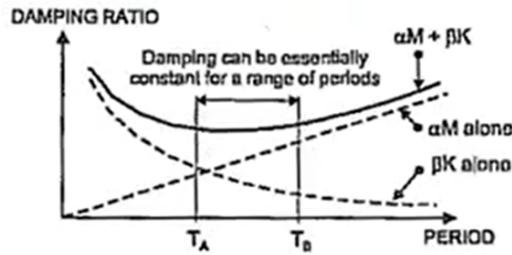


Figura 3.6: Curva $\xi - T$. Immagine estratta da [20] su concessione

Tralasciando l'elevato onere computazionale che ne limita l'applicazione efficiente all'interno di algoritmi di ottimizzazione, questa tipologia di analisi consente di adottare un approccio prestazionale più accurato, in quanto permette di seguire l'intero comportamento della struttura nel dominio del tempo e di considerare esplicitamente le non linearità del sistema, come i danneggiamenti localizzati o la presenza di elementi dissipativi non lineari, come nel caso in esame.

Inoltre, l'esecuzione di analisi time history consente di valutare il contributo dissipativo di ciascun dissipatore, evitando la condensazione di tutti gli effetti dissipanti all'interno di un unico fattore di smorzamento equivalente.

Analisi time history lineare - TH_{LN} : La risposta dei dissipatori fluido-viscosi è funzione della velocità differente assunta agli estremi dei dispositivi stessi. Il modo più corretto per rappresentare la risposta dei dissipatori è tramite un modello non lineare come da figura 3.2. Come si può notare, infatti, il dissipatore può essere modellato con un comportamento approssimato lineare se si considera un esponente pari a 1 nella legge Forza-Velocità, ma si va a sottostimare la dissipazione da esso

imposta (a parità di velocità la forza dissipativa è minore).

Nell'analisi comparativa eseguita si è andato ad analizzare il comportamento strutturale dei soli dissipatori, ovvero un comportamento unicamente funzione delle azioni dinamiche agenti sulla struttura. Dunque, nei modelli analizzati, gli esoscheletri esterni saranno modellati come delle strutture reticolari che non presentano alcuna rigidità laterale sotto effetto di azioni statiche ma, sotto effetto di azioni dinamiche, subiscono la velocità differenziata assunta dalla struttura di base, e dunque i dissipatori reagiscono. In time history lineare si imporrà, dunque, un esponente della legge $F-v$ pari ad 1 e una rigidità statica del dissipatore nulla. Il coefficiente di smorzamento lineare C_L va a modificare la pendenza del diagramma $F-v$. Nella figura 3.8 si è andato ad analizzare il comportamento di alcuni dissipatori (Figura 3.7) per studiarne la variabilità in funzione dei diversi coefficienti selezionati:

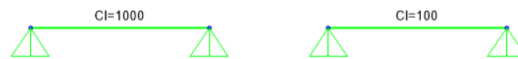


Figura 3.7: Modello dissipatori

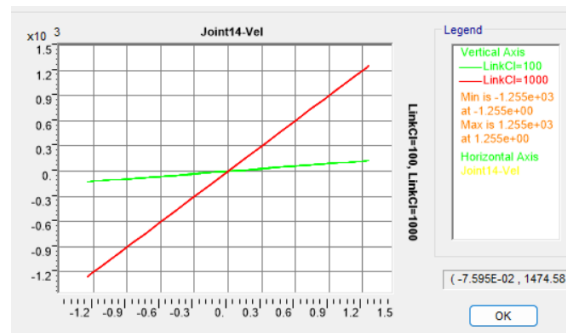


Figura 3.8: Legge $F-v$ dissipatori lineari-Variabilità C_I

Come si può notare, al crescere del coefficiente di dissipazione lineare C_L si ha un incremento del gradiente nel diagramma $F-v$; ciò vuol dire avere un dissipatore che, a parità di velocità, esplica una forza dissipativa maggiore.

Mentre nel diagramma Forza-Spostamento la pendenza rappresenta una rigidità nei confronti delle azioni statiche, la pendenza del diagramma Forza-Velocità rappresenta una sorta di "rigidità" nei confronti delle azioni dinamiche. La rigidità

dinamica è legata alla compressibilità del fluido presente nell’FVD e dalla rigidità dell’asta che sostiene il dispositivo.

Più C_L è elevato, più è efficace il dissipatore, ma cresce anche il suo costo; dunque, la soluzione più efficiente non sarà quella con un coefficiente più elevato, infatti il beneficio strutturale ha un andamento meno che lineare con l’andamento dei costi dei dissipatori. Ciò significa che, ad un certo valore di C_L , il risparmio in termini di sollecitazione sismica non giustifica il costo più elevato del dissipatore.

Da un punto di vista computazionale, l’analisi time history lineare è molto più dispendiosa di quella dinamica lineare, ma si pone come soluzione intermedia tra quest’ultima e l’analisi time history non lineare; infatti, la presenza di non linearità nell’equazione di equilibrio dinamico ne complica la risoluzione numerica.

Si osserva come la modellazione dei dissipatori è corretta dal momento in cui la rigidità statica è nulla, infatti il ciclo di isteresi del diagramma Forza-spostamento presenta un asse orizzontale e quindi pendenza nulla (Figura 3.9)

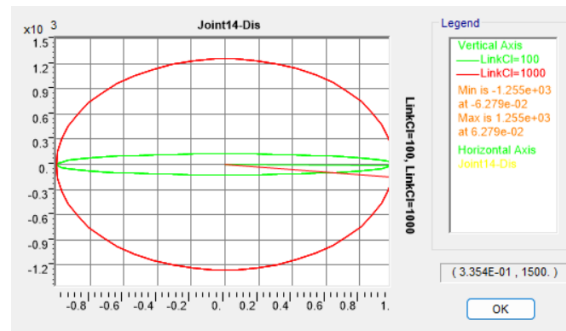


Figura 3.9: Legge F-d dissipatori lineari-Variabilità C_l

Analisi time history non lineari

Nel caso di analisi time history non lineari, si adotta la modellazione più realistica dei dissipatori, considerandoli come elementi non lineari. Per il modello di dissipatori selezionato, una rappresentazione adeguata è quella esponenziale, in cui l’esponente della legge Forza-Velocità (F-v) varia tra 0.1 e 1, mentre il coefficiente di smorza-

mento non lineare C_{NL} influisce sull'ampiezza del ciclo isteretico (Figura 3.10).

Di seguito si è mantenuto costante l'esponente $\beta = 0.15$ e si varia C_{NL} :

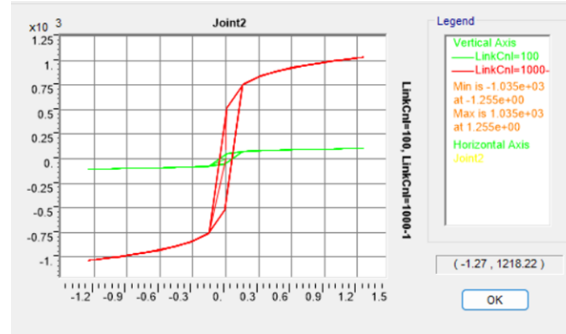


Figura 3.10: Legge F-v dissipatori non lineari-Variabilità Cnl

In figura 3.10 si osserva come un incremento del coefficiente di dissipazione non lineare (C_{NL}) comporta un contestuale incremento della "rigidezza dinamica" del dissipatore (la pendenza del ramo aumenta) e aumenta anche l'ampiezza del ciclo isteretico, perchè il dissipatore è in grado di esplicitare forze dissipative maggiori. Anche in questo caso la modellazione del dissipatore non presenta difetti, dal momento in cui la rigidezza statica è nulla, infatti il ciclo di isteresi Forza-spostamento presenta un asse orizzontale e quindi pendenza nulla (Figura 3.11:

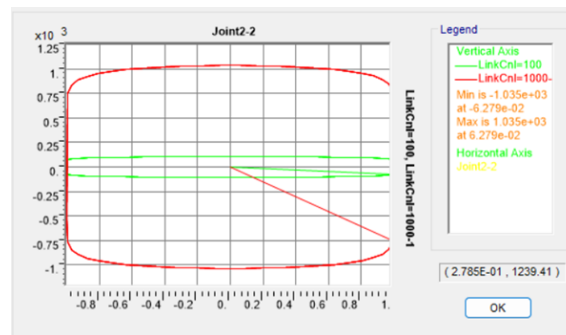


Figura 3.11: Legge F-d dissipatori non lineari-Variabilità Cnl

Sulla base di quello che è stato detto per le diverse analisi, e sulla tipologia di modelli utilizzati, si è resa necessaria un'analisi di tipo integrazione diretta. I motivi principali sono 2:

- La semplicità dei modelli bi-dimensionali non comporta oneri computazionali significativi;
- L'esoscheletro è modellato come una struttura staticamente labile, in quanto i diagonal dissipanti non presentano rigidità. Ciò implica che, durante la decomposizione modale prevista dalla FNA, che considera la rigidità completa della struttura accoppiata, il software può riscontrare errori di calcolo, compromettendo i risultati.

Si precisa che le analisi non lineari eseguite considerano esclusivamente la non linearità concentrata dei dissipatori e non eventuali danneggiamenti della struttura di base, poiché l'intervento con gli esoscheletri è progettato proprio per preservare l'integrità della struttura originaria.

3.4 Procedura semplificata per la progettazione sismica di strutture dotate di smorzatori viscosi

L'elaborato di tesi si basa sulla procedura ideata dal professore Stefano Silvestri [17], e fornisce delle semplici indicazioni progettuali per l'implementazione di controventi dissipativi ottenuti con smorzatori fluido-viscosi in strutture a telaio [17]. Nel caso in esame non si parla di dissipatori posizionati direttamente sulla struttura di base, ma su un esoscheletro. Quindi si analizzerà l'applicabilità di tale procedura anche in suddetto caso, e si cercherà di implementarla all'interno di un algoritmo genetico di ottimizzazione.

3.4.1 Ipotesi della procedura

Questo metodo, denominato "Direct Five-Step Procedure" è applicabile a:

- Strutture con un periodo fondamentale minore di 1.5 s; per strutture con periodi maggiori bisogna tenere in conto opportuni fattori correttivi dovuti agli effetti dei modi superiori. Questa condizione sarà sicuramente verificata per strutture su cui intervenire tramite gli esoscheletri dal momento in cui la loro elevazione risulta sempre limitata;

- Strutture che siano regolari in pianta ed in elevazione, infatti la disposizione dei dissipatori si ipotizza uniforme per ogni piano dell'esoscheletro [17].

In accordo con le NTC2018, le condizioni di **regolarità in pianta** sono date dai seguenti 3 punti:

- "la distribuzione di masse e rigidezze è approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali e la forma in pianta è compatta, ossia il contorno di ogni orizzontamento è convesso; il requisito può ritenersi soddisfatto, anche in presenza di rientranze in pianta, quando esse non influenzano significativamente la rigidezza nel piano dell'orizzontamento e, per ogni rientranza, l'area compresa tra il perimetro dell'orizzontamento e la linea convessa circoscritta all'orizzontamento non supera il 5% dell'area dell'orizzontamento" - **par.7.2.1,punto a)**
- **NTC 2018** Si riportano le figure esplicative 3.12-3.13-3.14 estratte da [21]:

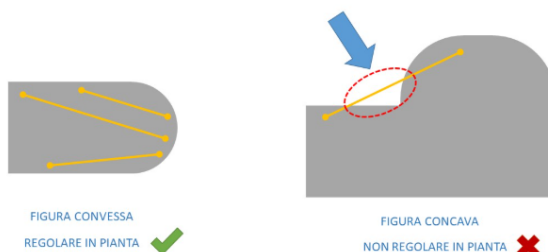


Figura 3.12: Condizione di convessità



Figura 3.13: Condizione sulle rientranze

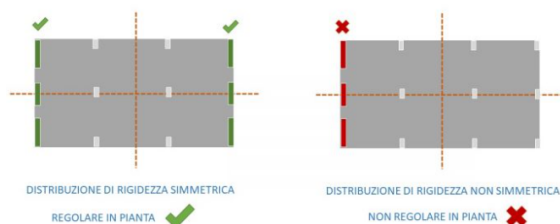


Figura 3.14: Condizione di simmetria

- "il rapporto tra i lati del rettangolo circoscritto alla pianta di ogni orizzontamento è inferiore a 4" - **par.7.2.1,punto b) - NTC 2018;**
- "ciascun orizzontamento ha una rigidezza nel proprio piano tanto maggiore della corrispondente rigidezza degli elementi strutturali verticali da potersi assumere che la sua deformazione in pianta influenzi in modo trascurabile la distribuzione delle azioni sismiche tra questi ultimi e ha resistenza sufficiente a garantire l'efficacia di tale distribuzione" - **par.7.2.1,punto c) - NTC 2018.**

Questa condizione implica la necessità di avere un impalcato sufficientemente rigido in piano, condizione che potrebbe venir meno in presenza di importanti restringimenti (figura 3.16).

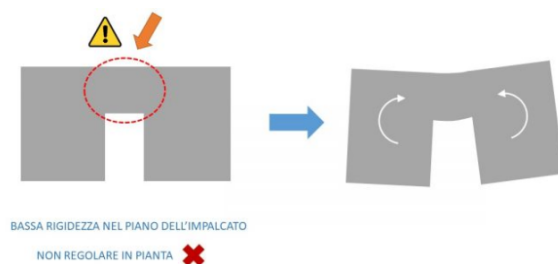


Figura 3.15: Condizione di rigidezza dell'impalcato

Le condizioni di **regolarità in altezza** sono date dai seguenti 4 punti:

- " tutti i sistemi resistenti alle azioni orizzontali si estendono per tutta l'altezza della costruzione o, se sono presenti parti aventi differenti altezze, fino alla sommità della rispettiva parte dell'edificio;" - **par.7.2.1,punto d) - NTC 2018;**

- "massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25%, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o di pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull'altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell'azione sismica alla base;" - **par.7.2.1,punto e) - NTC 2018;**
- "il rapporto tra la capacità e la domanda allo SLV non è significativamente diverso, in termini di resistenza, per orizzontamenti successivi (tale rapporto, calcolato per un generico orizzontamento, non deve differire più del 30% dall'analogo rapporto calcolato per l'orizzontamento adiacente); può fare eccezione l'ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti;" - **par.7.2.1,punto f) - NTC 2018;**
- "eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengano con continuità da un orizzontamento al successivo; oppure avvengano in modo che il rientro di un orizzontamento non superi il 10% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante, né il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro orizzontamenti, per il quale non sono previste limitazioni di restringimento"- **par.7.2.1,punto g) - NTC 2018.**

Questa condizione implica la necessità di avere un impalcato sufficientemente rigido in piano, condizione che potrebbe venir meno in presenza di importanti restringimenti (figura 3.16).

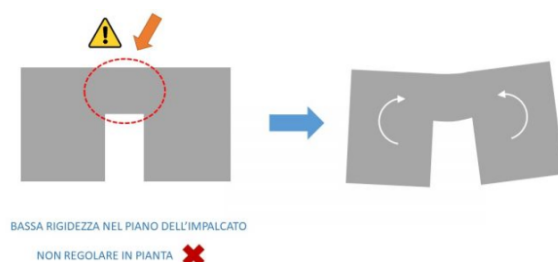


Figura 3.16: Condizione di rigidezza dell'impalcato

3.4.2 Vantaggi della procedura

Tale procedura nasce per colmare una lacuna importante presente nel quadro normativo italiano, infatti la progettazione di strutture con elementi dissipativi, seguendo la normativa, può passare unicamente tramite l'implementazione di analisi non lineari di tipo time history. Tali analisi risultano complesse, o comunque non sempre alla portata dei progettisti [17]. La procedura descritta nasce a seguito di studi e ricerche scientifiche, mettendo insieme basi teorico-scientifiche con le evidenze sperimentali a cui si è arrivati durante gli anni [17]. Le formule presenti in questa procedura consentono di eseguire analisi dinamiche lineari caratterizzate da un certo valore di fattore di smorzamento di partenza, per poi correlarlo ai coefficienti di smorzamento lineari e non, permettendo di eseguire verifiche non lineari richieste dalla normativa. Grazie all'algoritmo descritto di seguito è possibile stimare, essendo in una fase di predimensionamento, le seguenti quantità:

- Coefficiente di smorzamento lineare corrispondente al fattore di smorzamento ipotizzato;
- Parametri di risposta del sistema con smorzatori lineari (velocità massima del dissipatore, spostamento di interpiano e corsa massima del pistone);
- Coefficiente di smorzamento per il dispositivo commerciale non lineare;
- Parametri di risposta del sistema con smorzatori non lineari (forze statiche equivalenti orizzontali, forza assiale massima agente nei pilastri).

Per i fini di questa analisi parametrica, trascuriamo l'ultimo punto della procedura, dal momento in cui non ci interessa la stima delle azioni sulla struttura, ma per ogni

caso andremo a determinare manualmente le azioni agenti sulla struttura di base.

3.4.3 Procedura

In accordo con quanto riportato da Silvestri [17]:

"Step 1: Definizione degli obiettivi prestazionali

Selezione di una desiderata prestazione sismica (ad esempio: riduzione dell'effetto dell'azione sismica di progetto = -x%) e valutazione del corrispondente fattore di riduzione dello spettro elastico:

$$\bar{\eta} = 1 - \frac{x}{100}$$

fattore di smorzamento totale obiettivo:

$$\bar{\xi}_{\text{tot}} = \xi_{\text{intr}} + \bar{\xi}_{\text{visc}} = \frac{10}{\bar{\eta}^2} - 5$$

dove il fattore di smorzamento intrinseco si può assumere pari a $\xi_{\text{intr}} = 5\%$. Pertanto, il fattore di smorzamento viscoso obiettivo che deve essere fornito dai dispositivi vale:

$$\bar{\xi}_{\text{visc}} = \frac{10}{\bar{\eta}^2} - 10$$

Step 2: Coefficiente di smorzamento per dispositivi lineari

Si considera un posizionamento di interpiano e si ipotizza di inserire smorzatori viscosi tutti uguali a tutti i piani.

Assumendo inizialmente un comportamento lineare del tipo $F = c_L v$, e sfruttando l'Eq. (3), il coefficiente di smorzamento per il singolo smorzatore viscoso risulta:

$$c_L = \bar{\xi}_{\text{visc}} \cdot \omega_1 \cdot \frac{W}{g} \left(\frac{N+1}{n} \right) \cdot \frac{1}{\cos^2 \theta}$$

dove N è il numero totale di piani, n è il numero totale di smorzatori viscosi per piano per ogni direzione principale (x oppure y), W è il peso sismico totale dell'edificio, g è l'accelerazione di gravità, $\omega_1 = 2\pi/T_1$ è la pulsazione fondamentale, T_1 è il periodo fondamentale della struttura, mentre θ è l'angolo di inclinazione del singolo dispositivo rispetto all'orizzontale.

Step 3: Stima dei parametri di risposta del sistema con smorzatori lineari

Stima della velocità massima di lavoro del singolo smorzatore (corrispondente alla velocità di allungamento/accorciamento del pistone) e del massimo "interstorey drift" (spostamento differenziale di interpiano):

$$v_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1} \cdot \frac{2}{N+1} \cdot \cos \theta$$

$$ID_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1^2} \cdot \frac{2}{N+1}$$

dove $S_e(T_1, \bar{\eta})$ rappresenta l'ordinata spettrale dello spettro elastico in accelerazione delle componenti orizzontali in corrispondenza del periodo fondamentale T_1 di vibrazione della struttura nella direzione considerata, in cui si tiene conto del fattore di riduzione $\bar{\eta}$ dovuto alla presenza degli smorzatori.

Stima della forza massima negli smorzatori lineari:

$$F_{L,\max} = 2 \cdot \bar{\xi}_{\text{visc}} \cdot \frac{W}{g} \cdot S_e(T_1, \bar{\eta}) \cdot \frac{1}{n \cdot \cos \theta}$$

Stima della corsa massima negli smorzatori lineari:

$$s_{\max} = \frac{S_e(T_1, \bar{\eta})}{\omega_1^2} \cdot \frac{2}{N+1} \cdot \cos \theta$$

Step 4: Coefficiente di smorzamento per dispositivi non-lineari

Identificazione (mediante criterio energetico) del coefficiente di smorzamento per il dispositivo commerciale non-lineare:

$$c_{NL} = c_L \cdot (0.8 \cdot v_{\max})^{1-\alpha}$$

Stima della forza massima negli smorzatori non-lineari:

$$F_{NL,\max} = 0.8^{1-\alpha} \cdot F_{L,\max}$$

Al fine di ridurre la perdita di efficacia dello smorzatore posizionato in serie con l'asta di supporto, si consiglia di prevedere una rigidezza assiale del dispositivo (smorzatore + asta di supporto) almeno pari a:

$$k_{\text{axial}} \geq 10 \cdot c_L \cdot \omega_1$$

$$F_i = F_n \cdot \frac{z_i \cdot W_i}{\sum_{j=1}^N z_j \cdot W_j}$$

In relazione agli obiettivi del presente elaborato, il passaggio di maggior interesse è quello che correla il fattore di smorzamento con i coefficienti di smorzamento lineari e non lineari impiegati nelle leggi costitutive dei dissipatori.

3.5 Descrizione dei modelli analizzati

Le analisi svolte si basano su modelli di telaio a più gradi di libertà. Si è inizialmente proceduto con semplici calibrazioni monodimensionali su telai monopiano e monocampata, per poi passare a modelli planari più complessi fino ad un modello tri-dimensionale.

La zona sismica considerata è quella de L'Aquila, caratterizzata, in accordo con gli spettri di risposta nazionali, dai parametri riportati in tabella 3.17.

Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
a_q	0.252 g
F_o	2.303
T_C^*	0.369 s
S_S	1.168
C_C	1.343
S_T	1.000
q	1.732

Figura 3.17: Parametri spettro di risposta L'Aquila

Struttura di base

Sono stati analizzati complessivamente 8 modelli: 7 modelli planari, i cui esiti hanno consentito di validare le supposizioni iniziali, e un modello tridimensionale, utilizzato sia per confermare i risultati bi-dimensionali sia per verificarne la validità su un caso studio reale.

È opportuno ribadire che, nelle analisi dinamiche lineari, non si è modellato né l'esoscheletro né i dissipatori. L'obiettivo, infatti, è quello di valutare unicamente il contributo dinamico dei dissipatori, che viene riassunto in un incremento del fattore di smorzamento. Ciò significa che i modelli considerati in analisi dinamica lineare sono costituiti dalla sola struttura esistente, sulla quale l'azione sismica viene fittiziamente ridotta per tener conto dell'effetto dissipativo. Tale riduzione è, appunto, fittizia: i dissipatori non riducono l'intensità dell'azione sismica alla base, ma ne limitano gli effetti sulla struttura. Tuttavia, volendo rimanere nel campo della dinamica lineare, l'impiego di uno spettro di risposta richiede questo tipo di approssimazione.

Poiché l'analisi è condotta tramite combinazione multimodale, è possibile imporre un valore di fattore di smorzamento su tutti i modi o, in alternativa, attivare il dissipatore solamente su determinate frequenze, ossia sulle forme modali che maggiormente influenzano la risposta strutturale. Eseguendo l'analisi modale preliminare è quindi possibile individuare i modi di vibrare più rilevanti e far lavorare il dissipatore esclusivamente su tali frequenze.

Nella fattispecie, per tutti i modelli analizzati—come avviene comunemente per strutture non eccessivamente tozze—il primo modo di vibrare risulta dominante. Di conseguenza, è stato imposto un fattore di smorzamento pari al 25% unicamente sulla prima frequenza.

3.5.1 Modelli 2D

La prima discriminante progettuale riguarda la tipologia strutturale dell'esoscheletro. Gli elementi costituenti possono infatti essere sollecitati unicamente in modo assiale oppure presentare continuità ai nodi, assumendo un comportamento misto flessionale-assiale. Una configurazione particolarmente efficiente per far lavorare gli esoscheletri è la tipologia reticolare. Questa configurazione consente di avere elevata rigidezza nel piano, evita l'interazione tra diverse sollecitazioni (esistono unicamente sforzi assiali), permette un'agevole costruzione modulare ed offre vantaggi architettonici data la libertà compositiva che offrono.

Le connessioni tra la struttura esistente e l'esoscheletro sono state modellate come link rigidi, ossia connessioni assiali non dissipative. Le sezioni degli elementi dell'esoscheletro, in questa fase preliminare, sono mantenute costanti, e il materiale impiegato è l'acciaio, come consuetudine per questa tipologia di interventi.

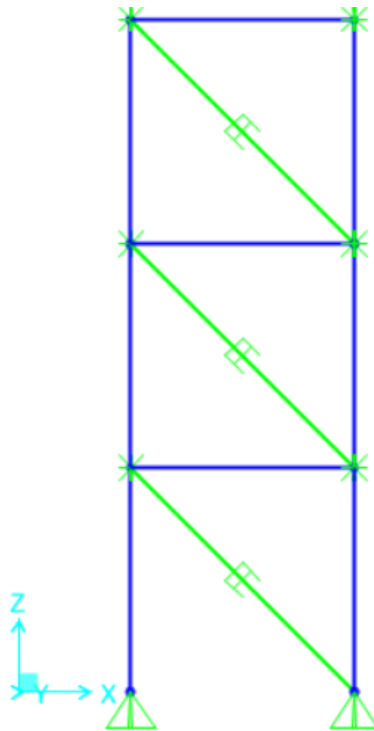


Figura 3.18: Modello tipo SAP2000

Un'ulteriore variabile progettuale è rappresentata dalla disposizione dei diagonal. Come già illustrato nei paragrafi precedenti, la configurazione più efficace è risultata quella del tipo Concentrically Braced Frame (CBF); pertanto, si considera un esoscheletro dotato di diagonali dissipativi di tipo fluido-viscoso.

Le caratteristiche sezionali e tipologiche dell'esoscheletro sono state fissate in quanto già investigate in letteratura per i sistemi ([22], [23],[3]), ad esse saranno invece rese variabili in una successiva fase di ottimizzazione. Nel contesto degli esoscheletri dissipativi, l'attenzione è dunque rivolta alla definizione della tipologia di dissipatori e all'analisi della variabilità dei loro parametri caratteristici. I diagonali sono stati sostituiti da dissipatori privi di rigidità (Figura 3.18), reattivi unicamente in campo dinamico. La struttura di base non riceve quindi alcun incremento di rigidità nei confronti delle azioni statiche orizzontali: i dissipatori sviluppano forze smorzanti solo quando sono messi in movimento dal moto della struttura.

Con questa modellazione è stato possibile riprodurre la configurazione tipica di

un esoscheletro concentrico, isolando però il contributo dissipativo per analizzare solamente il beneficio dovuto all'introduzione dei dissipatori.

Il comportamento di ciascun dissipatore è definito in funzione del tipo di analisi. Come anticipato, i dissipatori fluido-viscosi possono essere modellati tramite una legge forza-velocità lineare (esponente pari a 1) o non lineare (esponente generalmente variabile tra 0.1 e 1). Nei modelli SAP2000, per le analisi TH_{LN} si compilano i campi come mostrato in Figura 3.19.



The image shows a software interface for defining properties for linear analysis cases. It contains two sections: 'Properties Used For Linear Analysis Cases' and 'Properties Used For Nonlinear Analysis Cases'. The linear section has fields for 'Effective Stiffness' (0.) and 'Effective Damping' (490.). The nonlinear section has fields for 'Stiffness' (62000.), 'Damping Coefficient' (61.), and 'Damping Exponent' (0.15).

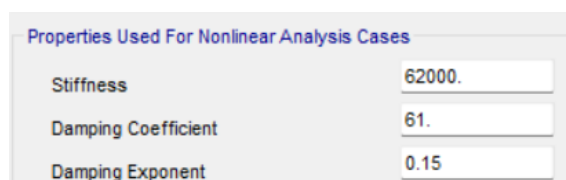
Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	0.
Effective Damping	490.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	62000.
Damping Coefficient	61.
Damping Exponent	0.15

Figura 3.19: Dissipatori lineari su SAP2000

La rigidezza è assunta nulla, per impedire che i dissipatori reagiscano alle azioni statiche. Il coefficiente di smorzamento lineare è variabile nei diversi modelli.

Nelle analisi time history non lineari, si impone un valore di $\beta = 0.15$, mentre il coefficiente di smorzamento non lineare è assunto come variabile. La rigidezza è quella del sistema fluido + asta di supporto del dispositivo (Figura 3.20). La procedura di Silvestri raccomanda di adottare una rigidezza minima dell'asta di supporto, tale da garantirne un comportamento sufficientemente rigido per assicurare il corretto funzionamento del dissipatore.



The image shows a software interface for defining properties for nonlinear analysis cases. It contains a section titled 'Properties Used For Nonlinear Analysis Cases' with fields for 'Stiffness' (62000.), 'Damping Coefficient' (61.), and 'Damping Exponent' (0.15).

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	62000.
Damping Coefficient	61.
Damping Exponent	0.15

Figura 3.20: Dissipatori non lineari su SAP2000

Sono state quindi variate sia le caratteristiche della struttura di base sia i coefficienti di smorzamento lineari e non lineari, in coerenza con la procedura di Silvestri.

La connessione tra esoscheletri e struttura è realizzata mediante link rigidi con comportamento assimilabile a pendoli, in grado di scambiare esclusivamente forze assiali. La configurazione del sistema accoppiato è riportata in Figura 3.21.

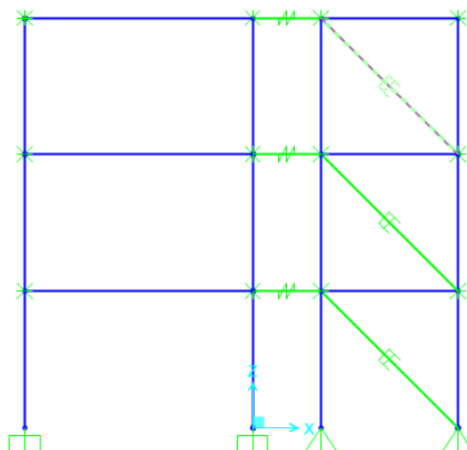


Figura 3.21: Sistema strutturale esoscheletro - struttura esistente

Per ogni modello 2D si è tenuto costante una lunghezza di campata pari a 5 m ed un'altezza di piano pari a 3 m. Gli esoscheletri hanno una campata e un'altezza pari a 3 m. Si sono considerati modelli a 3, 4 e 5 livelli (figura 3.22).

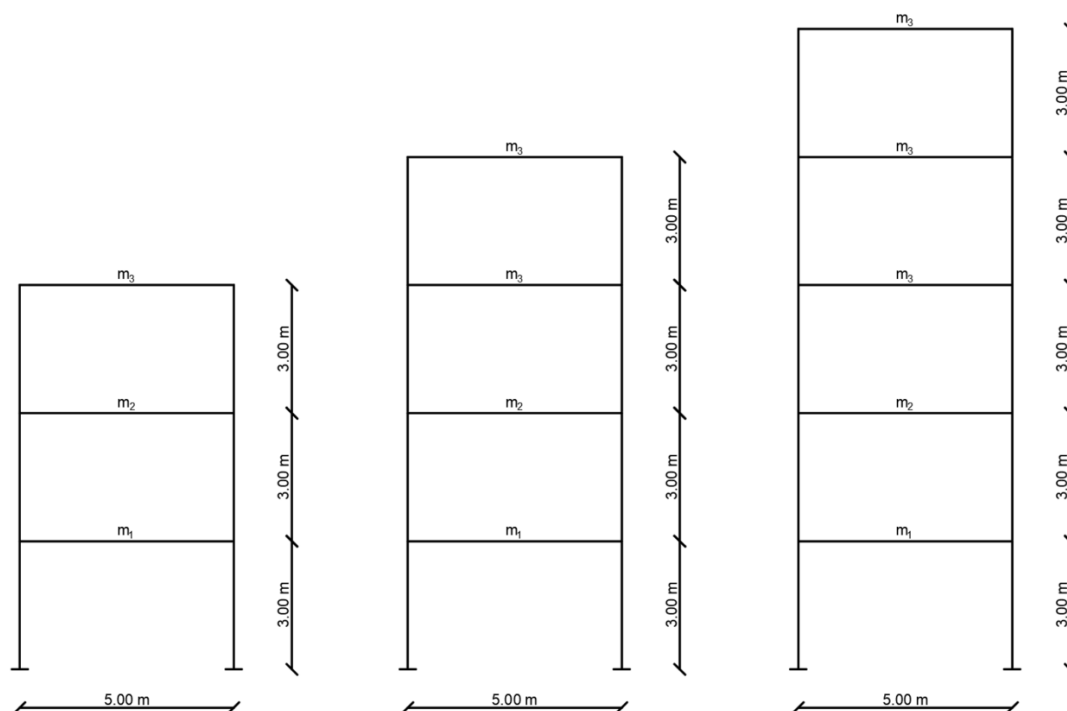


Figura 3.22: Modelli tipo a 3, 4 e 5 livelli

In funzione alle caratteristiche strutturali di ogni modello, se ne riportano anche le correlazioni ottenute tramite la procedure di Silvestri. La massa sismica è stata valutata a valle di un'analisi dei carichi su una struttura reale e in accordo alle NTC 2018 sommando ai carichi permanenti anche il 30% di carico variabile. Nella tabella 3.1, si riportano tutti e 7 i casi analizzati, con relative masse sismiche e caratteristiche sezionali dei telai.

	MODELLO	1	2	3	4	5	6	7
m1=	kg/m ²	520	700	700	700	520	700	700
m2=	kg/m ²	520	700	700	700	520	700	700
m3=	kg/m ²	614	700	700	550	520	700	550
m4=	kg/m ²			700	550	520	550	550
m5=	kg/m ²					520	550	550
Colonne 1	cm	30x30	30x30	40x40	40x40	40x40	40x40	40x40
Colonne 2	cm	30x30	30x30	30x30	30x30	40x40	40x40	40x40
Colonne 3	cm	30x30	30x30	30x30	30x30	30x30	30x30	30x30
Colonne 4	cm			30x30	30x30	30x30	30x30	30x30
Colonne 5	cm					30x30	30x30	30x30
Travi	cm	30x40	30x40	30x40	30x40	30x40	30x40	30x40

Tabella 3.1: Tabella riassuntiva

Di seguito (tabella 3.2) vengono riportate le correlazioni di Silvestri tra ξ e C_{NL} .

MODELLO	1	2	3	4	5	6	7	
ξ_{int}	5	5	5	5	5	5	5	
ξ_{visc}	20	20	20	20	20	20	20	
ξ_{tot}	25	25	25	25	25	25	25	
T_1	0.389	0.424	0.480	0.432	0.475	0.514	0.594	s
η	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	0.577	
ω_1	16.15	14.82	13.08	14.54	13.23	12.22	10.58	rad/s
W	406	515	687	613	637	785	748	kN
g	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	m/s ²
N	3	3	4	4	5	5	5	
n	2	2	2	2	2	2	2	
θ	45	45	45	45	45	45	45	°
CL	534	622	916	909	1031	1174	968	kNs/m
Se	4.90	4.90	4.90	4.90	4.87	4.90	4.90	
v_{max}	0.107	0.117	0.106	0.095	0.087	0.094	0.109	m/s
k_{axial}	86303	92231	119943	132212	136384	143451	102378	kN/m (dissipatori non lineari)
β	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	
C_{nl}	66	83	112	102	107	131	122	kNs ^{0.15} /m ^{0.15}

Tabella 3.2: Correlazioni Silvestri coefficienti di smorzamento modelli 1–7.

3.5.2 Modello 3D

Per confrontare un intervento tramite esoscheletri dissipativi ed esoscheletri elastici, si è utilizzato il modello tri-dimensionale presentato in [23]. Poiché la procedura di Silvestri è applicabile solo a strutture regolari in pianta, l'attenzione è stata rivolta al caso a pianta quadrata (Figura 3.23). La scala presente nella struttura rappresenta un elemento di leggera irregolarità che poi determinerà una variazione nella disposizione degli esoscheletri nella successiva fase di ottimizzazione. Gli esoscheletri sono stati disposti ortogonalmente alle facciate (Figura 3.24).

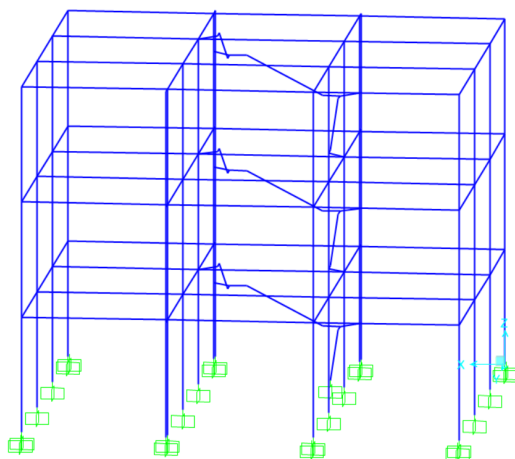


Figura 3.23: Modello 3D

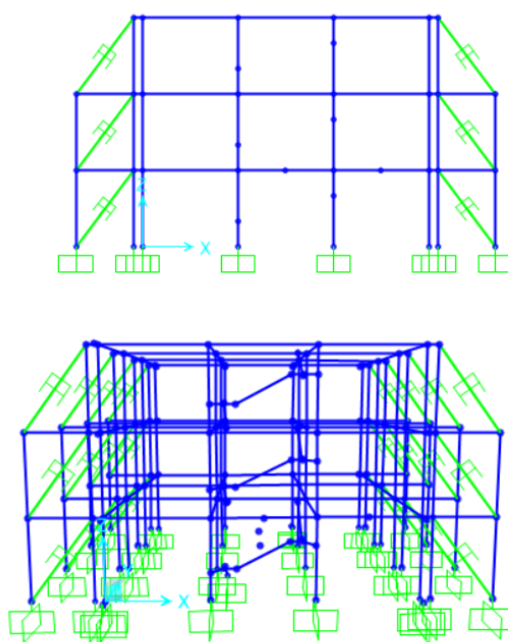


Figura 3.24: Modello 3D accoppiato

Le caratteristiche strutturali del modello sono riportate in tabella 3.3.

In tabella 3.4 si riportano le correlazioni tra il fattore di smorzamento e i coefficienti di smorzamento.

Modello		
Travi		
Travi livello 1-lungo x	40x45	
Travi livello 1-lungo y	30x40	
Travi livello 2-lungo x	30x45	
Travi livello 2-lungo y	30x40	
Travi livello 3-lungo x	30x45	
Travi livello 3-lungo y	30x40	
Scale	120x16	
Colonne		
Colonne livello 1	45x45	
Colonne livello 2	40x40	
Colonne livello 3	35x35	
Masse		
m1=	671	kg/m ²
m2=	671	kg/m ²
m3=	671	kg/m ²

Tabella 3.3: Modello 3D

È stato considerato un sisma prevalente lungo l'asse x. In accordo con le NTC 2018, si è applicato il 100% dell'azione sismica lungo x e il 30% lungo l'asse y.

3.6 Analisi ed interpretazione dei risultati

L'obiettivo dell'analisi parametrica è quello di motivare, in un'ottica di ottimizzazione, l'impiego dell'analisi dinamica lineare. Poiché ci si trova in una fase di predimensionamento, si intende verificare che l'analisi multimodale risulti sistematicamente cautelativa rispetto alle analisi di tipo Time History e che, optando per un approccio lineare, non si perda in misura significativa il contributo fornito dai dissipatori. A tal fine, si confronteranno i risultati ottenuti dalle analisi dinamiche lineari con quelli derivanti da analisi Time History, sia lineari sia non lineari.

Come parametro di confronto è stato assunto il taglio alla base della struttura.

In accordo con la normativa italiana, le analisi Time History sono state eseguite utilizzando sette accelerogrammi spettro-compatibili con lo spettro di risposta relativo

ξ_{int}	5	
ξ_{visc}	20	
ξ_{tot}	25	
T_1	0.637	s
η	0.577350269	
ω_1	9.863713198	rad/s
W	4447.854	kN
g	9.81	m/s ²
N	3	
n	2	
θ	37	°
CL	2804.688993	kNs/m
Se	3.618020626	
v_{max}	0.146470183	m/s
k_{axial}	276646.4784	kN/m (non linear damper)
β	0.15	
C_{nl}	453.312859	kNs ^{0.15} /m ^{0.15}

Tabella 3.4: Correlazioni Silvestri-Modello 3D

al sito de L'Aquila. Si riportano di seguito le tabelle che confrontano il taglio alla base della struttura per tutte le analisi condotte.

Per una più completa lettura del comportamento dinamico dei modelli, si riporta anche la percentuale di massa modale (Tabella 3.5). Tutte le strutture analizzate presentano un primo modo di vibrare che mobilita la gran parte della massa (superiore al 75%), condizione tipica nei telai piani privi di rilevanti irregolarità in elevazione.

Questa considerazione è particolarmente rilevante, poiché in configurazioni di questo tipo è possibile impostare il funzionamento dei dissipatori in modo da agire prevalentemente sull'abbattimento della frequenza principale.

	3 LIVELLI		4 LIVELLI		5 LIVELLI		
MODELLO	1	2	3	4	5	6	7
%massa modo 1	87%	86.847%	73%	75%	78%	72%	77%
%massa modo 2	11%	10.649%	12%	10%	12%	14%	13%
%massa modo 3	3%	2.503%	4%	4%	5%	7%	5.27%
%massa modo 4			12%	11%	2%	2%	1.55%
%massa modo 5					3%	6%	3.30%

Tabella 3.5: Percentuale masse modali per modelli a 3, 4 e 5 livelli.

Le tabelle [3.12-3.18] presentano gli esiti delle analisi eseguite:

- S-UND: analisi dinamica lineare non smorzata, con riferimento allo spettro di risposta elastico de L'Aquila ed un fattore di smorzamento pari al 5%, come consuetudine con strutture intelaiate in calcestruzzo armato;
- S-D: analisi dinamica lineare smorzata. In questo caso lo spettro di risposta elastico viene ridotto in funzione del fattore di smorzamento imposto pari al 25%. Il contributo dei dissipatori non viene modellato, ma se ne tiene conto come riduzione dell'azione sismica in ingresso al sistema;
- TH-UND: analisi time history non smorzata. Sono riportate in tabella n.7 colonne che fanno riferimento ai 7 accelerogrammi spettrocompatibili con lo spettro de L'Aquila. Di ogni modello sono riportati i valori di taglio alla base;
- TH-L: analisi time history smorzata tramite dissipatori lineari, ovvero caratterizzati da una legge Forza-Velocità lineare;
- TH-NL: analisi time history smorzata tramite dissipatori non lineari, ovvero caratterizzati da una legge Forza-Velocità esponenziale.

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													328	
S	D													199	39
TH	UND	332		302		313		261		256		321		275	
TH	L	246	26	150	50	209	49	159	32	178	18	211	57	138	50
TH	NL	221	33	121	60	194	38	128	51	162	37	174	46	106	61

Tabella 3.6: Comparazione del taglio massimo alla base-Modello 1

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													397	
S	D													241	39
TH	UND	395		357		408		328		313		341		378	
TH	L	237	40	162	55	219	56	179	43	187	21	247	50	170	55
TH	NL	242	39	125	65	200	51	141	57	170	46	196	43	131	65

Tabella 3.7: Comparazione del taglio massimo alla base – Modello 2.

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													459	
S	D													282	39
TH	UND	393		368		412		426		391		393		330	
TH	L	292	26	201	45	238	57	177	54	197	27	284	52	190	42
TH	NL	263	33	141	62	222	46	154	64	180	54	226	42	147	55

Tabella 3.8: Comparazione del taglio massimo alla base – Modello 3.

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													400	
S	D													247	38
TH	UND	382		326		364		370		378		380		316	
TH	L	283	26	166	49	216	55	166	50	185	30	265	55	169	46
TH	NL	247	35	127	61	205	44	149	60	178	53	214	44	134	58

Tabella 3.9: Comparazione del taglio massimo alla base – Modello 4.

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													360	
S	D													222	38
TH	UND	294		271		322		313		301		295		228	
TH	L	230	22	146	46	180	57	137	52	150	27	221	52	142	38
TH	NL	201	32	103	62	157	51	121	61	138	54	166	44	109	52

Tabella 3.10: Comparazione del taglio massimo alla base – Modello 5.

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													487	
S	D													304	38
TH	UND	403		402		393		420		390		438		340	
TH	L	200	50	326	19	215	34	258	52	200	48	203	28	316	7
TH	NL	292	27	156	61	227	42	180	57	203	48	245	44	168	51

Tabella 3.11: Comparazione del taglio massimo alla base – Modello 6.

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													435	
S	D													270	38
TH	UND	404		379		385		277		347		313		346	
TH	L	271	33	219	42	235	46	206	35	181	25	259	38	193	44
TH	NL	254	37	161	57	194	50	141	49	192	45	210	33	142	59

Tabella 3.12: Comparazione del taglio massimo alla base – Modello 7.

Facendo riferimento alle Tabelle 3.6 - 3.12, si evidenzia quanto segue:

- Come prevedibile, l'analisi dinamica lineare risulta più cautelativa rispetto alle Time History, restituendo valori di taglio alla base sempre superiori, anche nel confronto con gli accelerogrammi più severi. L'obiettivo è dimostrare che questo tipo di analisi, idoneo a essere integrato nell'algoritmo di ottimizzazione, garantisca un livello di cautela adeguato alla fase di predimensionamento, senza tuttavia discostarsi in modo eccessivo dai risultati delle analisi Time History, le uniche in grado di cogliere appieno la prestazionalità dei singoli dissipatori.

Qualora i risultati dell'analisi dinamica lineare mostrassero uno scostamento troppo marcato — eccessivamente cautelativo — significherebbe che tale approccio non è adeguato, poiché non consentirebbe di rappresentare in maniera efficace il contributo dei dissipatori.

- La riduzione percentuale ottenuta mediante analisi dinamica lineare risulta pressoché costante, intorno al 40%. Questo comportamento è imputabile al fatto che tutte le strutture analizzate, ad eccezione dell'ultima, presentano un periodo fondamentale compreso all'interno del plateau dello spettro di risposta. Poiché in tale intervallo lo spettro mantiene un andamento costante, l'imposizione di un medesimo fattore di smorzamento comporta, di conseguenza, una riduzione dello spettro sostanzialmente uniforme per tutti i modelli.
- Le analisi Time History non lineari evidenziano una prestazione superiore dei dissipatori. Confrontando infatti le riduzioni del taglio alla base con quelle ottenute dalle analisi Time History lineari, si osserva una diminuzione più marcata del tagliante, segno che il comportamento non lineare dei dispositivi consente di sfruttarne più efficacemente la capacità dissipativa.

Il passo successivo consiste nel confrontare la risposta media ottenuta dalle analisi Time History con quella derivante dall'analisi dinamica lineare, tenuto conto che gli accelerogrammi utilizzati sono spettro-compatibili con lo spettro di risposta de L'Aquila. La risposta media della struttura è stata calcolata come valore medio dei tagli alla base registrati nei sette accelerogrammi considerati.

MODELLO 1				
Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze %
S-UND	328			
S-D	199	39%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	294		S-UND vs TH-UND	10%
TH-L	184	37%	S-D vs TH-L	7%
TH-NL	158	46%	S-D vs TH-NL	20%

MODELLO 2				
Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze %
S-UND	397			
S-D	241	39%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	360		S-UND vs TH-UND	9%
TH-L	200	44%	S-D vs TH-L	17%
TH-NL	172	52%	S-D vs TH-NL	29%

MODELLO 3				
Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze %
S-UND	459			
S-D	282	39%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	388		S-UND vs TH-UND	15%
TH-L	226	42%	S-D vs TH-L	20%
TH-NL	191	51%	S-D vs TH-NL	32%

MODELLO 4				
Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze %
S-UND	400			
S-D	247	38%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	359		S-UND vs TH-UND	10%
TH-L	207	42%	S-D vs TH-L	16%
TH-NL	179	50%	S-D vs TH-NL	27%

MODELLO 5				
Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze %
S-UND	360			
S-D	222	38%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	289		S-UND vs TH-UND	20%
TH-L	172	40%	S-D vs TH-L	22%
TH-NL	142	51%	S-D vs TH-NL	36%

MODELLO 6				
Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze %
S-UND	487			
S-D	304	38%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	398		S-UND vs TH-UND	18%
TH-L	246	38%	S-D vs TH-L	19%
TH-NL	210	47%	S-D vs TH-NL	31%

MODELLO 7				
Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze %
S-UND	435			
S-D	270	38%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	350		S-UND vs TH-UND	20%
TH-L	223	36%	S-D vs TH-L	17%
TH-NL	185	47%	S-D vs TH-NL	31%

Tabella 3.13: Confronto tra tagli medi e differenze percentuali — Modelli 1–7

Come da tabelle 3.13, si evidenzia quanto segue:

- Passando dall'analisi S-UND all'analisi TH-UND si osserva una riduzione aggiuntiva del taglio alla base compresa tra il 10 e il 20%. Questa riduzione, relativamente contenuta, è attribuibile al fatto che gli accelerogrammi utilizzati sono spettro-compatibili, e quindi forniscono una risposta dinamica coerente con quella prevista dallo spettro elastico di riferimento;
- Passando dall'analisi S-D all'analisi TH-L si osserva una riduzione aggiuntiva del taglio alla base compresa tra il 15 e il 25%. Tale riduzione, in linea con quanto rilevato nel caso non dissipato, costituisce un'indicazione della buona coerenza tra il fattore di smorzamento adottato nelle analisi lineari e il coefficiente di smorzamento impiegato nelle analisi time history, suggerendo che la correlazione tra i due parametri risulta efficace.

- Passando dall'analisi S-D all'analisi TH-NL si osserva una riduzione aggiuntiva del taglio alla base compresa tra il 20 e il 40%. L'impiego di una modellazione non lineare dei dissipatori comporta quindi una diminuzione più marcata del taglio, evidenziando la maggiore efficienza dissipativa associata al loro comportamento non lineare.

Sulla base dei risultati delle analisi bi-dimensionali, è possibile affermare che, ricorrendo alle analisi dinamiche lineari nella fase di predimensionamento, la perdita di prestazione dei dissipatori non risulta eccessiva. Tale scostamento può essere stimato intorno al 30%, valore che conferma come l'approccio lineare, pur semplificato, riesca comunque a cogliere in modo soddisfacente il contributo dei dispositivi dissipativi.

A supporto e verifica di quanto emerso, vengono riportati anche i risultati dell'analisi tri-dimensionale.

MODELLO	3D
%massa modo 1	48%
%massa modo 2	0%
%massa modo 3	30%
%massa modo 4	10%
%massa modo 5	0%
%massa modo 6	5%

Tabella 3.14: Percentuali masse modali

		1		2		3		4		5		6		7	
S/TH	Tipo	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%	Vmax	Rid.%
S	UND													3016	
S	D													2401	20
TH	UND	4319		2491		3258		2138		2263		5342		1613	
TH	TH_L	2789	35	2023	19	2388	27	1564	27	1844	19	3196	40	1121	30
TH	TH_NL	2406	44	1846	26	1636	50	1436	33	1496	34	2142	60	876	46

Tabella 3.15: Comparazione del taglio massimo alla base lungo X - Modello 3D

Tipo di Analisi	Taglio medio alla base	Riduzione		Differenze % tra analisi
S-UND	3016			
S-D	2401	20%		
Tipo di Analisi	Taglio alla base			
TH-UND	3061		S-UND \rightarrow TH-UND	-1%
TH-L	2132	30%	S-D \rightarrow TH-L	11%
TH-NL	1691	45%	S-D \rightarrow TH-NL	30%

Tabella 3.16: Confronto tra tagli medi e differenze percentuali tra analisi – Modello 3D

I risultati ottenuti sulla struttura tridimensionale confermano il trend precedentemente individuato nei modelli planari. In particolare:

- Il taglio ottenuto mediante analisi dinamica lineare subisce una riduzione di circa il 20%, valore inferiore rispetto al 40% riscontrato nei modelli piani. Tale differenza è attribuibile al maggiore periodo fondamentale della struttura tridimensionale, che ricade al di fuori del plateau dello spettro di risposta. Di conseguenza, trovandosi sul ramo discendente, la struttura beneficia in misura minore dell'incremento del fattore di smorzamento, con una riduzione dello spettro — e quindi del taglio — meno marcata;
- Passando dall'analisi S-UND all'analisi TH-UND si osserva una sostanziale sovrapposizione dei risultati, confermando che gli accelerogrammi utilizzati sono effettivamente spettro-compatibili e riproducono in modo coerente la domanda sismica prevista dallo spettro di riferimento;
- Passando da S-D a TH-L, si ha una riduzione aggiuntiva dell' 11%;
- Passando da S-D a TH-NL, si nota una riduzione aggiuntiva del 30%, consistente con il caso planare.

Sulla base dei risultati ottenuti, si conferma la possibilità di adottare analisi dinamiche lineari all'interno dell'algoritmo di ottimizzazione, con un significativo beneficio in termini di riduzione dell'onere computazionale. Tale scelta comporta una perdita

solo contenuta del contributo dissipativo, che si è osservato essere dell'ordine del **30%**, valore pienamente accettabile nella fase di predimensionamento.

Capitolo 4

Formulazione del Problema di Ottimizzazione e Criteri di Settaggio dell'Algoritmo

4.1 Sviluppo di un approccio Displacement-Based

L'approccio adottato all'interno dell'algoritmo di ottimizzazione si basa sul controllo degli spostamenti di interpiano. L'obiettivo è definire un limite prestabilito di drift, così da garantire la verifica di tutti gli elementi strutturali. In questo contesto, l'esoscheletro e i dissipatori vengono progettati per evitare che la struttura di base raggiunga spostamenti tali da comprometterne la sicurezza [8].

La progettazione basata sulle forze (Force-Based) richiede una caratterizzazione affidabile della rigidezza elastica degli elementi strutturali. Questa operazione risulta relativamente semplice per l'acciaio, ma molto più complessa per strutture in calcestruzzo armato o in muratura. È infatti prassi considerare le sezioni in calcestruzzo come parzializzate, adottando una rigidezza effettiva della sezione fessurata corrispondente allo snervamento della prima barra di armatura. Tale rigidezza viene spesso assunta pari al 50% del valore della sezione integra, ma rimane comunque una stima approssimata.

Si osserva inoltre che la rigidezza non rappresenta una proprietà intrinseca della sezione. Se il momento resistente aumenta — ad esempio incrementando l'armatura o l'azione assiale — la rigidezza cresce in modo proporzionale. Per questo motivo la rigidezza non andrebbe considerata come un parametro fondamentale nella caratterizzazione della risposta strutturale, a differenza della curvatura di snervamento, che rimane pressoché invariata al variare dell'azione assiale o dell'armatura [24].

Nell'approccio Force-Based è inoltre necessario distinguere tra elementi primari ed elementi secondari: questi ultimi vengono progettati per resistere esclusivamente ai carichi verticali. Secondo le NTC2018, gli elementi secondari devono poter sopportare le azioni gravitazionali senza assorbire più del 15% dell'azione orizzontale totale.

Questa distinzione assume particolare rilevanza negli interventi basati su esoscheletri. Qualora l'esoscheletro fosse classificato come struttura primaria e l'edificio esistente come secondaria, quest'ultimo non potrebbe assorbire più del 15% delle azioni sismiche: di fatto verrebbe completamente scaricato dall'azione orizzontale. In un'ottica Force-Based, raggiungere un obiettivo così ambizioso richiederebbe un esoscheletro con una rigidezza almeno 7 volte superiore a quella della struttura di base, condizione che porta a soluzioni estremamente massicce e costose, difficilmente giustificabili nella pratica [8]. Una restrizione così severa può talvolta essere utile, ad esempio quando lo stato di conservazione e le proprietà strutturali dell'edificio esistente sono difficili da determinare; in tali casi, l'aggiunta di esoscheletri molto massicci consente di scaricare quasi completamente la struttura, riportandola a un livello di sicurezza accettabile [8].

L'approccio adottato in questo lavoro ha invece come riferimento esclusivo gli spostamenti e non prevede alcuna distinzione tra elementi primari e secondari. La struttura esistente non viene considerata “scaricata”, ma collabora attivamente all'interno del sistema accoppiato. Gli esoscheletri vengono quindi progettati affinché tutti gli elementi della struttura di base raggiungano un livello di sicurezza adeguato [8].

Il principale svantaggio di un approccio displacement-based consiste nella difficoltà di individuare a priori un valore di drift che garantisca la sicurezza della struttura;

tale valore deve infatti essere calibrato caso per caso. Tuttavia, se la struttura viene mantenuta interamente in campo elastico, si può escludere il verificarsi di meccanismi di collasso [8]. Per fissare un limite adeguato si farà riferimento alle indicazioni di Ghobarah [25] presenti nella tabella [4.1]

State of damage	Ductile MRF	Nonductile MRF	MRF with infills	Ductile walls	Squat walls
No damage	< 0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.2	< 0.1
Repairable damage – a) Light damage	0.4	0.2	0.2	0.4	0.2
Repairable damage – b) Moderate damage	< 1.0	< 0.5	< 0.4	< 0.8	< 0.4
Irreparable damage ($> yield$ point)	> 1.0	> 0.5	> 0.4	> 0.8	> 0.4
Severe damage – Life safe – Partial collapse	1.8	0.8	0.7	1.5	0.7
Collapse	> 3.0	> 1.0	> 0.8	> 2.5	> 0.8

Tabella 4.1: Limiti di spostamento interpiano

In questa sezione dell'elaborato, le procedure illustrate nel Capitolo 3 verranno applicate e integrate all'interno dell'algoritmo di ottimizzazione. Una volta determinata la configurazione ottimale dell'esoscheletro e definito il fattore di smorzamento più efficace, si procederà infine alla verifica della struttura di base.

È stato imposto un limite agli spostamenti di interpiano piuttosto stringente, riferito a uno Stato Limite di Operatività (SLO), pur considerando un'azione sismica di progetto allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). Tale scelta consente di ottenere un intervento strutturale ridondante e caratterizzato da livelli di sicurezza particolarmente elevati; talvolta necessari per strutture la cui operatività non può essere compromessa (come gli ospedali). Qualora dall'analisi emergesse un sovradimensionamento eccessivo delle sezioni, sarà possibile adottare limiti meno restrittivi in termini di drift, così da ottenere una progettazione più equilibrata.

4.2 Ottimizzazione tramite algoritmo evolutivo

Gli algoritmi di ottimizzazione possono essere classificati a seconda dell'approccio che utilizzano: deterministico o stocastico ([26]). L'approccio deterministico prevede la derivazione dell'OF e la definizione dei vincoli per ricercare la soluzione ottimale, senza alcun tipo di processo randomico; l'approccio stocastico, detto anche algoritmo metaeuristico, si basa su paradigmi di ricerca stocastici ispirati da diversi fenomeni naturali ([26]).

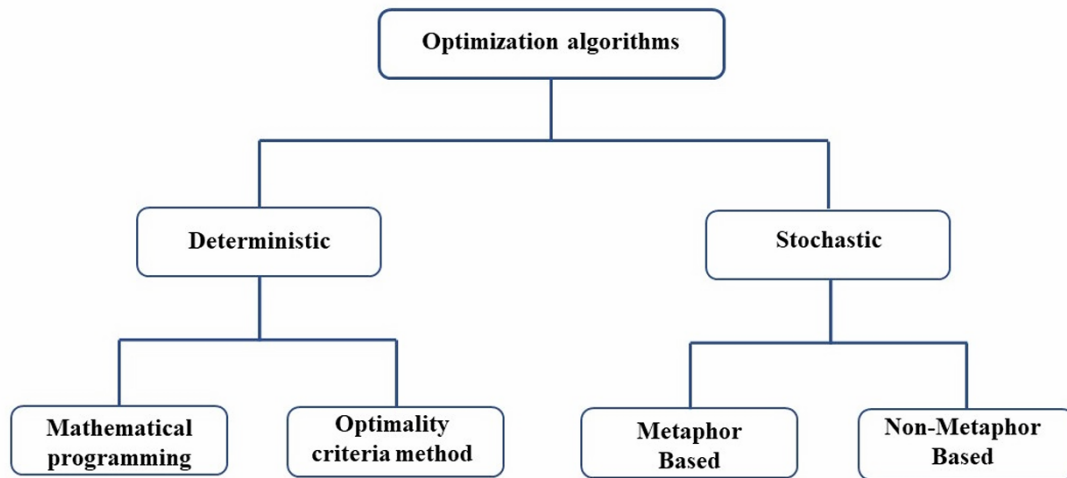


Figura 4.1: Classificazione degli algoritmi in campo di ottimizzazione. Immagine estratta da [26] su concessione

Nel campo degli algoritmi deterministici, la programmazione matematica è la prima tecnica che è stata adottata per definire la soluzione ottimale in problemi di programmazione lineare e non lineare ([26]). Ci sono molteplici tecniche di programmazione matematica che sono state ampiamente utilizzate negli anni. Tali tecniche vengono utilizzate per risolvere problemi teorici o dei piccoli problemi di ottimizzazione su casi reali ([26]). D'altra parte, gli algoritmi euristici o metaeuristici si sono dimostrati molto efficaci nei confronti di problemi di ottimizzazione reali ed altamente complessi e/o non convessi ([26]).

Il vantaggio principale di questi algoritmi è che non richiedono una conoscenza a priori del problema di ottimizzazione che si sta affrontando ([26]). . Gli algoritmi euristici e metaeuristici si possono considerare come gli algoritmi che includono randomizzazione ed esplorazione globale. La randomizzazione permette di passare da un'analisi in scala ridotta ad una ricerca globale; ciò li rende utilizzabili in problemi non lineari([26]).

Gli algoritmi stocastici, in accordo con Kashani ([27]), possono dividersi in "Metaphor based" e "Non-Metaphor based". I primi si ispirano a:

- Processi biologici: come l' algoritmo genetico proposto da Holland [28] e il "particle swarm" di Kennedy [29];

- Ispirati all'arte: come l'"Harmony search" di Geem et al. [30];
- Ispirati alla scienza: come l'algoritmo gravitazionale di Rashedi et al. [31];
- Ispirati ai sistemi sociali: come la "teaching-learning-based optimization" introdotta da Rao et al. [32].

Gli algoritmi evolutivi sono basati su processi biologici, e non richiedono nè derivabilità nè una formulazione esplicita delle condizioni di ottimalità. Il processo di ricerca della soluzione ottimale si basa solo su meccanismi ispirati all'evoluzione naturale come la selezione, riproduzione, mutazione e sopravvivenza del più adatto ([28]). Questa caratteristica li rende particolarmente applicabili nel caso in cui ci sia un dominio disomogeneo, discontinuo o con vincoli non lineari ([26]).

Tra gli EAs più noti rientrano i "Genetic Algorithms" (GA), le "Evolution Strategies", la "Genetic Programming", gli algoritmi di "swarm intelligence" come il "Particle Swarm Optimization" (PSO), così come approcci più moderni ibridi o multi-strategia come quelli analizzati da Cucuzza [26]. In ambito strutturale gli EAs si usano nella progettazione di telai, tralicci, definizione di topologie e dimensionamento sotto effetto di carichi multipli.

Gli algoritmi genetici (GA) fanno parte degli EAs, in questo algoritmo si simula l'evoluzione biologica partendo da una popolazione di **individui**, ognuno di essi è caratterizzato da un **cromosoma**, a sua volta composto dai singoli elementi che sono i **geni**.

L'idea centrale è che, generazione dopo generazione, gli individui più performanti secondo una funzione obiettivo ("fitness") avranno maggiori probabilità di trasmettere le proprie caratteristiche a nuove soluzioni, guidando così il processo verso regioni ottimali dello spazio di ricerca ([26]).

Gli operatori fondamentali di questo algoritmo sono:

- La prima fase si ha con la generazione randomica di una popolazione di individui. Questa fase randomica consente l'esplorazione di una vasta gamma individui, evitando una convergenza prematura ([25]);

- Per ogni individuo si calcola un valore della funzione obiettivo (OF), che poi viene eventualmente modificato da penalizzazioni riferite ai vincoli imposti. Nel caso strutturale la minimizzazione può riferirsi al peso o, ad esso correlato, il costo;
- La selezione degli individui che genereranno la nuova popolazione avviene tramite schemi ispirati alla teoria evolutiva. Nella tesi di Cucuzza è impiegata la Roulette Wheel Selection, che assegna probabilità di selezione proporzionali alla fitness: gli individui migliori hanno una maggiore probabilità di essere scelti come genitori [26];
- La crossover combina le caratteristiche di due genitori per generare i figli della successiva generazione. Le tecniche tipiche includono: Single-point crossover (i cromosomi vengono divisi in un punto casuale e scambiati) o Uniform crossover (ogni gene è scambiato con una data probabilità);
- La mutazione introduce casualmente variazioni nei geni, con lo scopo di evitare la convergenza prematura e migliorare l'esplorazione globale dello spazio delle soluzioni;
- Si esegue una fase di ordinamento, cosicchè i migliori cromosomi non vengano persi tra le generazioni.

In questo elaborato si è impiegato un GA.

4.2.1 Formulazione matematica del problema di ottimizzazione

Per ottimizzazione, in questo elaborato, si intende la determinazione di una configurazione strutturale degli esoscheletri che consenta di ridurre al minimo una funzione obiettivo (Objective Function - OF). Nella fattispecie questa OF è rappresentata dal costo in dollari dell'intervento. Si andrà a distinguere il costo dei dissipatori dal costo degli esoscheletri, così da determinare un'incidenza media dei due elementi che compongono l'intervento.

Il costo dell'acciaio degli esoscheletri è calcolato come (4.1):

$$C_{\text{EX}} = W_{\text{EX}} \cdot c_{\text{steel}} \quad (4.1)$$

Sulla base dei prezzi regionali e considerando il tasso di cambio $1 \text{ €} = 1.15 \$$, è possibile determinare il costo unitario dell'acciaio in dollari (c_{steel}). Il costo totale dell'acciaio di ciascun esoscheletro si ottiene moltiplicando il peso complessivo dell'acciaio per il suo costo unitario.

Il peso totale dell'acciaio impiegato negli esoscheletri è espresso da (4.2):

$$W_{\text{EX}} = N_{\text{EX}} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{EX}}} (A_i \cdot l_i) \quad (4.2)$$

Assumendo un costo unitario dell'acciaio pari a $1.90 \$/\text{kg}$ ([33]), il costo complessivo dell'acciaio degli esoscheletri è dato da (4.3):

$$C_{\text{EX}} = W_{\text{EX}} \cdot 1.90 \$/\text{kg} \quad (4.3)$$

Analizzando i dissipatori fluido-viscosi disponibili sul mercato ([34]), è possibile ricavare una correlazione tra la forza massima fornita dal dissipatore non lineare e il relativo costo in dollari (4.4):

$$C_{\text{dampers}} = 96.88 \cdot F_{\text{NLmax}}^{0.607} \quad (4.4)$$

La funzione obiettivo, espressa in dollari, risulta quindi (4.5):

$$\text{OF} = (C_{\text{EX}} + C_{\text{dampers}}) \phi_1 \phi_2 + \phi_3(N_{\text{EX}}) \quad (4.5)$$

La soluzione ottimale è quella attribuita al minimo valore di tale OF.

Oltre ad una funzione di costo da minimizzare, si rende necessaria anche la definizione di vincoli (constraints-C) e variabili di progetto (design variables - DV). Si

riporta la formulazione come da [23].

$$\mathbf{x} = \left[\overbrace{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n}^{\text{Topology DV}}, \overbrace{x_{n+1}, \dots, x_{n+j}, \dots, x_{n+m}}^{\text{Size DV}} \right] \quad (4.6)$$

$$x_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad ; \quad x_{n+j}^{lower} < x_{n+j} < x_{n+j}^{upper} \quad (4.7)$$

$$D_i = \frac{\delta_i}{\delta_{allowable}} < 1 \quad \forall i = 1, \dots, N_{nodes} \quad ; \quad \delta_{allowable} = \frac{H_{story}}{\beta} \quad (4.8)$$

$$S_{j,1} = \frac{N_{Ed}}{\chi_a \cdot N_{Rd}} + \sqrt{\left(k_{ay} \cdot \frac{M_y^{Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N_y}}{\chi_{LT} \cdot M_y^{Rd}} \right)^2 + \left(k_{az} \cdot \frac{M_z^{Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N_z}}{M_z^{Rd}} \right)^2} < 1 \quad (4.9)$$

$$S_{j,2} = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} < 1 \quad ; \quad V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}} \right] V_{pl,Rd} \quad (4.10)$$

Dove N_{Ex} è il numero totale di esoscheletri, N_{El} è il numero di elementi di un singolo esoscheletro, A_i e l_i sono rispettivamente le aree delle sezioni e la lunghezza del singolo elemento i .

Un sistema di penalità (penalty) è impiegato per includere dei vincoli nella OF.

$$\phi_1 = \sum_{i=1}^{N_{nodes}} D_i^{inf} \quad (4.11)$$

$$\phi_2 = \sum_{j=1}^{N_{Ex}} \sum_{i=1}^{N_{el}} S_{i,j}^{inf} \quad ; \quad S_{i,j} = \max \left\{ S_{i,j,1} ; S_{i,j,2} \right\} \quad (4.12)$$

$$\phi_3 = \alpha \cdot N_{Ex} \quad (4.13)$$

La funzione di costo da minimizzare viene poi influenzata dalle penalizzazioni (eqs. 4.11-4.12-4.13). Le prime due penalizzazioni dipendono dai vincoli definiti nelle Eqs. 4.11–4.12, mentre l’ultima penalizzazione ha lo scopo di ridurre il numero di esoscheletri N_{Ex} nella configurazione ottimale.

Le variabili di progetto (DVs) rappresentano la quantità e la disposizione spaziale degli esoscheletri, oltre ai profili in acciaio assegnati ai loro elementi costitutivi. Esse sono definite nel vettore della Eq.4.6, in cui si distinguono due tipologie di variabili. Le variabili di Topologia definiscono il numero e la posizione degli esoscheletri. Il loro numero coincide con il numero di posizioni potenzialmente occupabili da un esoscheletro. Tali variabili sono binarie (Eq. 4.7); se il valore finale è 1, in quella posizione viene collocato un esoscheletro, mentre se è 0, la posizione rimane libera.

Le variabili di dimensionamento, invece, individuano la sezione in acciaio scelta per ciascun elemento degli esoscheletri. Ogni esoscheletro è composto da nove profili, ottenuti dal raggruppamento degli elementi come illustrato in Fig. 4.4. All’interno di una configurazione, tutti gli esoscheletri sono identici; pertanto, le variabili di dimensionamento sono nove. I valori assegnabili corrispondono ai profili in una lista di 150 sezioni circolari cave (CHS), conformi alla norma europea EN10219-2.

Il primo vincolo riguarda l’imposizione della soglia di drift interpiano, definita in Eq. 4.8. Per soddisfarlo, il rapporto tra il drift interpiano di ciascun nodo (N_{nodes}) dell’edificio in cemento armato (δ_i) e il drift interpiano massimo consentito ($\delta_{allowable}$), indicato come D_i , deve risultare inferiore a 1. In particolare, δ_i è definito come la differenza tra lo spostamento del nodo i -esimo e quello del nodo corrispondente al piano immediatamente inferiore. La soglia $\delta_{allowable}$ è definita come il rapporto tra l’altezza interpiano H_{storey} e un coefficiente β in accordo con [25]. Per integrare questo vincolo nella funzione obiettivo, viene introdotta la prima penalizzazione 4.11. A tal fine, si determina il valore di D_i per tutti i nodi della struttura (N_{nodes}); i nodi per cui $D_i > 1$ risultano non verificati e sono indicati come D_{inf} . Successivamente, come mostrato in Eq. 4.11, si sommano tutti i valori D_{inf} per ottenere ϕ_1 , che moltiplica il peso degli esoscheletri W_{EX} nella funzione obiettivo (Eq. 4.5). In

questo modo, la funzione obiettivo tiene conto sia della quantità sia della gravità delle violazioni del vincolo.

Il secondo vincolo riguarda le verifiche strutturali che gli elementi degli esoscheletri devono soddisfare secondo l'Eurocodice 3 [35]. I valori $S_{j,n}$ sono i rapporti domanda-capacità (DCR) dell'elemento j -esimo dell'esoscheletro rispetto alla verifica n -esima. Per essere rispettato, ogni valore deve risultare inferiore a 1. In particolare, $S_{j,1}$, definito in Eq. 4.9, si riferisce alla verifica combinata presso-flessione, includendo l'instabilità, secondo EC3 6.3.3.(6.61–6.62). Invece, $S_{j,2}$, definito in Eq. 4.10, riguarda la verifica combinata taglio-torsione, come indicato in EC3 6.2.7.(6.25) e (6.28). Come indicato in Eq. 4.12, le verifiche strutturali sono effettuate per tutti gli elementi di tutti gli esoscheletri, dove N_{EX} è il numero totale di esoscheletri nella configurazione, mentre N_{el} è il numero di elementi per esoscheletro. Analogamente a quanto fatto per ϕ_1 , la seconda penalizzazione ϕ_2 consente di includere il secondo vincolo nella funzione obiettivo. I valori dei DCR, sono determinati per ciascun elemento. Per ogni elemento si considera il valore massimo tra $S_{j,1}$ e $S_{j,2}$. I valori superiori a 1 sono classificati come non verificati e indicati come $S_{i,j}^{inf}$. Sommandoli si ottiene la penalizzazione ϕ_2 , come descritto in Eq. 4.12, che moltiplica il peso degli esoscheletri nella funzione obiettivo.

La terza penalizzazione (ϕ_3), invece, viene introdotta per considerare in modo implicito le problematiche legate alla fase costruttiva. Una configurazione con un numero minore di esoscheletri risulta preferibile per diversi motivi: lo spazio libero necessario attorno all'edificio cresce al crescere del loro numero, così come i tempi e i costi di trasporto, assemblaggio e montaggio. Inoltre, i nodi trave-pilastro del telaio in cemento armato a cui gli esoscheletri sono collegati richiedono generalmente interventi locali di rinforzo, e un loro minor numero implica una riduzione di tali interventi. Per questo motivo, (ϕ_3) è definita in Eq. 4.13 come il numero totale di esoscheletri N_{EX} moltiplicato per un coefficiente α , assunto pari a 10 in questo studio. Questo valore viene poi aggiunto al costo degli esoscheletri e dei dissipatori già moltiplicati per ϕ_1 e ϕ_2 . Ulteriori dettagli sulla procedura di calibrazione delle penalizzazioni, sulla velocità di convergenza dell'algoritmo e sull'accuratezza e affidabilità della procedura di ottimizzazione sono riportati in [36]. La procedura passo-per-passo e i principali operatori dell'algoritmo genetico utilizzato sono illustrati nel diagramma

di flusso in Fig. 4.2.

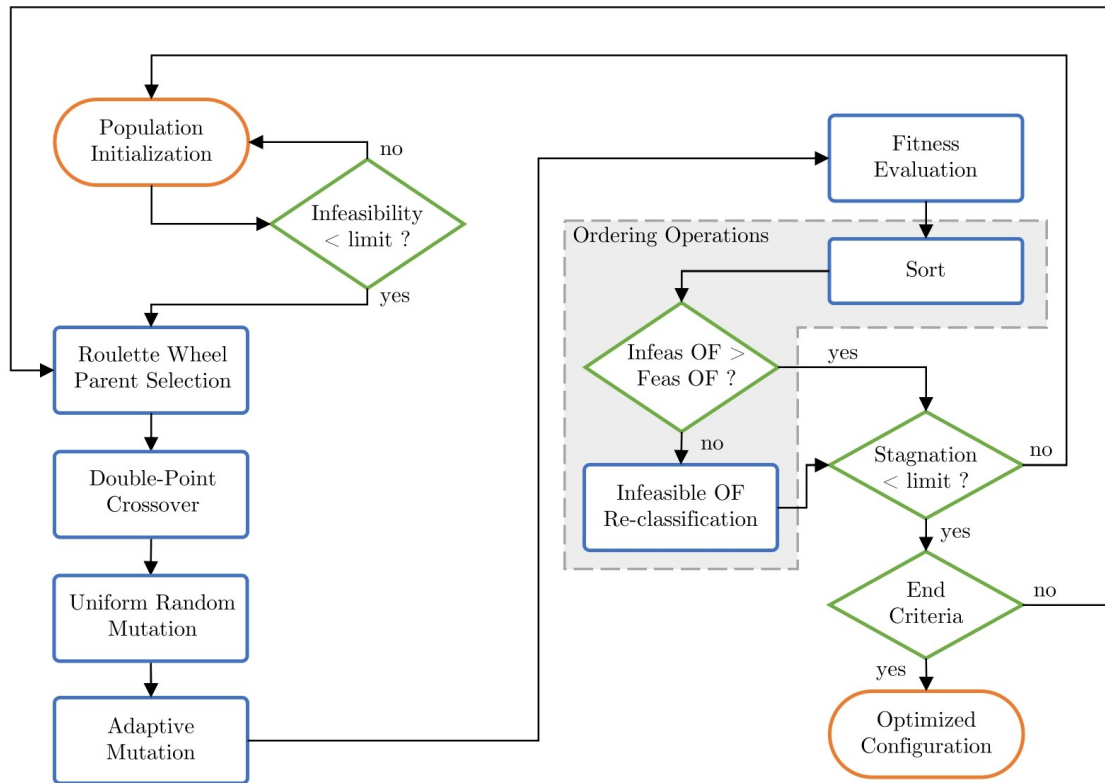


Figura 4.2: Flow chart algoritmo di ottimizzazione. Immagine estratta da [23] su concessione

4.2.2 Disposizione degli esoscheletri e valutazione dei costi di intervento

Preliminarmente all'ottimizzazione, e una volta definita la funzione di costo da minimizzare, è utile analizzare il costo dell'intervento in funzione della disposizione degli esoscheletri e del valore del fattore di smorzamento adottato. Il modello di base utilizzato è riportato in Figura 4.3, dove sono indicati tutti i 16 possibili punti nei quali è possibile collocare gli esoscheletri.

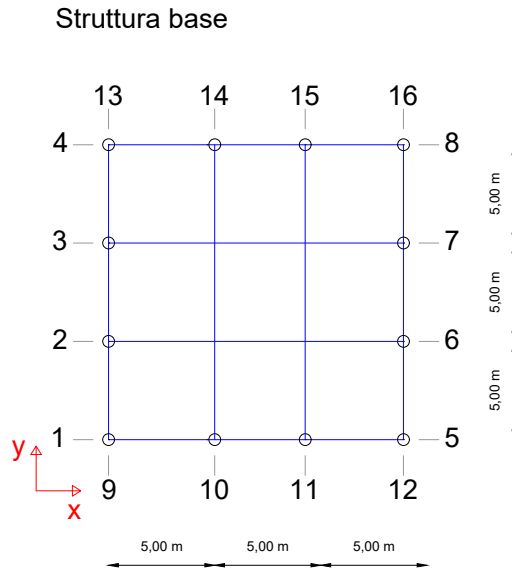


Figura 4.3: Modello base

L'algoritmo viene settato secondo i seguenti parametri (tabella 4.2).

	Caso Studio	
Variabili	16+9+1	
Numero di individui	100	
Numero di iterazioni	100–180	
Massa sismica	417	ton
Elementi critici / totale	109/114 = 96%	
Max. DCR	2.87	
DCR medio	1.73	
Max. DRIFT	48.7	mm

Tabella 4.2: Settaggio ottimizzazione

Per svolgere questa analisi preliminare, le sezioni degli esoscheletri vengono fissate e mantenute costanti in tutte le configurazioni, in modo da isolare le variazioni di costo legate unicamente alla quantità di esoscheletri e ai dissipatori. Le sezioni cave impiegate (CHS – Circular Hollow Sections) sono riportate in Figura 4.4.

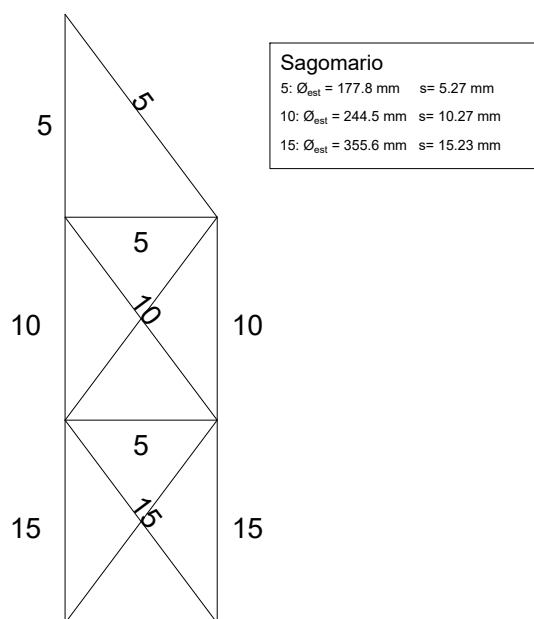


Figura 4.4: Modello esoscheletri

Sono stati analizzati complessivamente 15 casi, ottenuti combinando 5 differenti configurazioni (Figura 4.5) con tre valori di fattore di smorzamento .

- **Modello A:** esoscheletri presenti in tutti i punti di possibile ancoraggio (16 esoscheletri);
- **Modello B:** esoscheletri collocati agli angoli della struttura; questa disposizione, grazie alla regolarità dell'edificio, è risultata ottimale per sistemi non dissipativi (8 esoscheletri) come da [22];
- **Modello C:** esoscheletri posizionati unicamente in corrispondenza dei telai interni (8 esoscheletri);

- **Modello D:** disposizione casuale degli esoscheletri (7 esoscheletri);
- **Modello E:** esoscheletri collocati lungo le quattro facciate (4 esoscheletri).

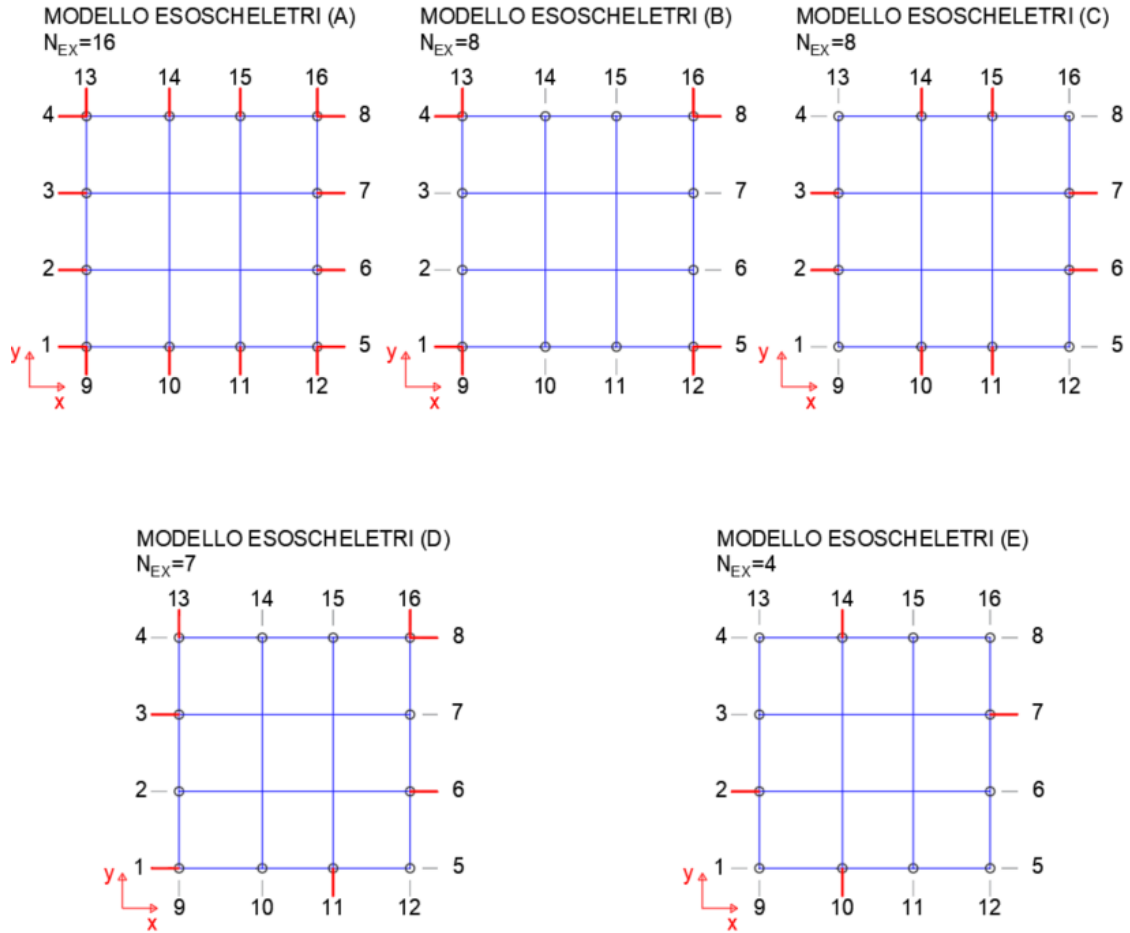


Figura 4.5: Configurazione di prova degli esoscheletri

Le cinque configurazioni sono state valutate con tre livelli di fattore di smorzamento:

$$\xi = 28\%, 16\%, 8\%. \quad (4.14)$$

Ne deriva un totale di 15 casi di studio. Gli esiti delle analisi sono riportati nella tabella seguente.

CASO	MOD. EX.	ISD limit	EXOSK POSITIONS	SECTIONS	ξ
1	A	H/600	[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[28]
2	B	H/600	[1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[28]
3	C	H/600	[0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[28]
4	D	H/600	[1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[28]
5	E	H/600	[0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[28]
6	A	H/600	[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[16]
7	B	H/600	[1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[16]
8	C	H/600	[0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[16]
9	D	H/600	[1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[16]
10	E	H/600	[0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[16]
11	A	H/600	[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[8]
12	B	H/600	[1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[8]
13	C	H/600	[0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0 0 1 1 0]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[8]
14	D	H/600	[1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 0 1]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[8]
15	E	H/600	[0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0]	[15 10 5 15 10 5 15 10 5]	[8]

	N_EX	Fnl_max_x (kN)	Fnl_max_y (kN)	C_DAMP	C_STEEL	C_TOT	D_check	S_check
1	16	163	163	\$102,431	\$128,400	\$230,831	SI	SI
2	8	300	401	\$70,241	\$56,175	\$126,416	NO	NO
3	8	303	303	\$74,636	\$64,200	\$138,836	NO	SI
4	7	303	303	\$74,636	\$64,200	\$138,836	NO	SI
5	4	584	584	\$55,527	\$32,100	\$87,627	NO	NO
6	16	98	98	\$75,086	\$128,400	\$203,487	SI	SI
7	8	180	240	\$51,490	\$56,175	\$107,665	NO	NO
8	8	182	182	\$54,712	\$64,200	\$118,912	NO	NO
9	7	182	182	\$54,712	\$64,200	\$118,912	NO	NO
10	4	350	350	\$40,704	\$32,100	\$72,804	NO	NO
11	16	34	34	\$39,469	\$128,400	\$167,870	NO	SI
12	8	62	83	\$27,066	\$56,175	\$83,241	NO	NO
13	8	63	63	\$28,759	\$64,200	\$92,959	NO	NO
14	7	63	63	\$28,759	\$64,200	\$92,959	NO	NO
15	4	121	121	\$21,396	\$32,100	\$53,496	NO	NO

Tabella 4.3: Configurazioni di prova degli esoscheletri

In un approccio basato sul controllo degli spostamenti, si è imposto un limite allo spostamento di interpiano pari ad $H/600$. Questo limite è stato selezionato in accordo con i limiti di performance definiti da Ghobarah [25], dove $H/500$ rappresenta lo spostamento di interpiano limite per avere dei danni leggeri a telai non duttili [23].

Le configurazioni sono considerate accettabili se rispettano contemporaneamente i limiti relativi allo spostamento massimo di interpiano della struttura di base $DRIFT_{max}$ e al demand-capacity ratio dell'esoscheletro DCR_{EXK} . Il DCR con-

fronta le sollecitazioni ottenute con la massima capacità dei singoli elementi dell'esoscheletro, tenendo conto sia della resistenza sia delle instabilità locali.

Per valori inferiori a 1, il DCR identifica l'elemento più sollecitato; al superamento dell'unità, invece, i valori crescono rapidamente poiché il parametro rappresenta la somma dei DCR degli elementi non verificati.

Analogamente, il parametro $DRIFT_{max}$ è definito come il rapporto tra lo spostamento di interpiano limite imposto e quello effettivamente ottenuto nelle colonne della struttura esistente. Anche in questo caso, valori superiori all'unità indicano il mancato soddisfacimento del requisito e sono somma degli spostamenti delle colonne non verificate.

Commento ai risultati

Dall'analisi emergono alcune considerazioni utili alla successiva fase di ottimizzazione:

- Il costo dei dissipatori risulta comparabile con quello degli esoscheletri, rendendo particolarmente vantaggioso l'impiego di un algoritmo di ottimizzazione capace di esplorare numerose configurazioni delle variabili di progetto;
- A parità di fattore di smorzamento, un aumento del numero di esoscheletri comporta un incremento significativo del costo dell'acciaio. Considerando il caso con massima dissipazione ($\xi = 28\%$), passando da 4 a 16 esoscheletri, il costo dell'acciaio aumenta di circa il 300%, mentre il costo dei dissipatori cresce dell'84%. In linea generale, con riferimento ai risultati ottenuti, configurazioni con pochi esoscheletri e dissipatori molto prestazionali risultano più economiche. Tuttavia, ogni disposizione produce variazioni nella forza massima dei dissipatori (secondo la procedura di Silvestri), con conseguente modifica dei costi, per cui non è possibile generalizzare senza un'analisi puntuale delle diverse soluzioni;
- La configurazione più economica è il caso n. 15, con 4 esoscheletri e fattore di smorzamento pari all'8%. Tale soluzione, tuttavia, non verifica la struttura:

$$DRIFT_{max} = 4.372$$

$$DCR_{EXK} = 0.912$$

- La configurazione più costosa (caso n. 1) presenta margini di sicurezza eccessivi, non compatibili con una progettazione efficiente:

$$DRIFT_{max} = 0.291$$

$$DCR_{EXK} = 0.249$$

4.2.3 Integrazione della procedura di predimensionamento nell'algoritmo genetico

Come descritto nel paragrafo 3.4.3, la procedura proposta da Silvestri consente il predimensionamento dei dissipatori. L'algoritmo genetico, nella sua formulazione corrente, permette il dimensionamento di una struttura intelaiata dotata di esoscheletri ad alta resistenza; è quindi necessario integrare la procedura rendendo il fattore di smorzamento un'ulteriore variabile di progetto.

Si seguirà la seguente logica:

1. Per ogni individuo analizzato dall'ottimizzatore si andranno a distinguere direzione x e y, andando ad evidenziare quelli che sono i modi principali in entrambe le direzioni; ciò servirà per definire il periodo fondamentale (T_x e T_y) nelle due direzioni:

```

1 [ret, NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, Periods,
   Frequency, CircFreq, EigenValue] = SM.Results.ModalPeriod
   ();
2
3 [ret, NumberResults, LoadCase, StepType, StepNum, ~, ...
4  Ux, Uy, Uz, SumUx, SumUy, SumUz, ...
5  Rx, Ry, Rz, SumRx, SumRy, SumRz] = ...
6  SM.Results.ModalParticipatingMassRatios();
7
8 [~, Princ_mode_x] = max(Ux);
9 [~, Princ_mode_y] = max(Uy);
10
```



```

11 Tx(ipop,1) = Periods(Princ_mode_x);
12 Ty(ipop,1) = Periods(Princ_mode_y);

```

2. Lo spettro di risposta elastico, e quindi l'accelerazione spettrale da considerare nella procedura, in ogni individuo verrà variato in funzione del fattore di smorzamento che compete al cromosoma considerato:

```

1 ag  = 0.331;    % ag in m/s^2 (0.331g)
2 F0  = 2.398;    % F0
3 Tc_star = 0.363; % Tc*
4
5 TB = 0.15;
6 TC = 0.45;
7 TD = 2.0;
8
9 xi_ref = 0.05;
10 eta = sqrt(10/(5 + Population(ipop).chrom( ...
11     PARAMS.totalExX + PARAMS.totalExY + PARAMS.VarSect +
12     1)));
13
14 % CALCOLO Sa(T1) SECONDO NTC2018
15 T = Tx(ipop,1);
16 if T == 0
17     Sa_Tx(ipop,1) = ag;
18 elseif T <= TB
19     Sa_Tx(ipop,1) = ag * eta * (1 + (F0 - 1) * (T / TB));
20 elseif T <= TC
21     Sa_Tx(ipop,1) = ag * eta * F0;
22 elseif T <= TD
23     Sa_Tx(ipop,1) = ag * eta * F0 * (TC / T);
24 else
25     Sa_Tx(ipop,1) = ag * eta * F0 * (TC * TD / T^2);
26 end
27
28 T = Ty(ipop,1);
29 if T == 0

```

```

30     Sa_Ty(ipop,1) = ag;
31 elseif T <= TB
32     Sa_Ty(ipop,1) = ag * eta * (1 + (F0 - 1) * (T / TB));
33 elseif T <= TC
34     Sa_Ty(ipop,1) = ag * eta * F0;
35 elseif T <= TD
36     Sa_Ty(ipop,1) = ag * eta * F0 * (TC / T);
37 else
38     Sa_Ty(ipop,1) = ag * eta * F0 * (TC * TD / T^2);
39 end

```

3. Si sono poi calcolate le forze massime all'interno dei dissipatori in entrambe le direzioni. Per arrivare alla stima delle forze massime dei dissipatori non lineari in commercio, si passa tramite le forze massima dei dissipatori lineari:

```

1 Population(ipop).Flmaxx = 2 * ( (Population(ipop).chrom(
    ...
2     PARAMS.totalExX + PARAMS.totalExY + PARAMS.VarSect + 1)
    ) - 5 ) / 100 * ...
3     (Population(ipop).weight + 4060) / 9.81 * Sa_Tx(ipop,1)
    * 9.81 / ...
4     (sum(Population(ipop).chrom(1 : PARAMS.totalExX)) * cos
    (53*pi/180));
5
6 Population(ipop).Fnlmaxx = 0.8^0.85 * Population(ipop).
    Flmaxx;
7
8 Population(ipop).Flmaxy = 2 * ( (Population(ipop).chrom(
    ...
9     PARAMS.totalExX + PARAMS.totalExY + PARAMS.VarSect + 1)
    ) - 5 ) / 100 * ...
10    (Population(ipop).weight + 4060) / 9.81 * Sa_Ty(ipop,1)
    * 9.81 / ...
11    (sum(Population(ipop).chrom(PARAMS.totalExX + 1 :
    PARAMS.totalExX + PARAMS.totalExY)) * cos(53*pi/180));
12
13 Population(ipop).Fnlmaxy = 0.8^0.85 * Population(ipop).
    Flmaxy;

```

4. Determinata la forza massima, si può finalmente stimare il costo dei dissipatori. Considerando che l'eq. 4.5 fa riferimento al costo di un singolo dissipatore, e considerato che ogni esoscheletro ha 3 dissipatori, si andrà a moltiplicare tale costo per 3 e per il numero di esoscheletri per quell'individuo. Alla fine, si vanno a sommare i costi dei dissipatori disposti lungo x e y, e si somma anche il costo dell'acciaio degli esoscheletri.

```

1 Population(ipop).costdampersx = (96.88 * (Population(ipop).
    Fnlmaxx)^0.607) * 3 * ...
2     sum(Population(ipop).chrom(1 : PARAMS.totalExX));
3
4 Population(ipop).costdampersy = (96.88 * (Population(ipop).
    Fnlmaxy)^0.607) * 3 * ...
5     sum(Population(ipop).chrom(PARAMS.totalExX + 1 : PARAMS
    .totalExX + PARAMS.totalExY));
6
7 Population(ipop).totalcostdampers = Population(ipop).
    costdampersx + ...
8                                     Population(ipop).
    costdampersy;
9
10 Population(ipop).coststeel = Population(ipop).weight *
    101.97 * 1.90;

```

4.2.4 Caso studio

Per il calcolo delle forze massime trasmesse dai dissipatori nelle due direzioni principali si utilizza un unico valore di fattore di smorzamento . Ciò in quanto i dissipatori devono lavorare in modo congiunto, garantendo una riduzione complessiva della risposta pari al valore di smorzamento assegnato.

Capitolo 5

Caso studio

5.1 Struttura di base considerata

Con riferimento ai dati riportati in [8], la struttura di base analizzata è un edificio in calcestruzzo armato con pianta quadrata (figura 5.1), localizzato nel comune de L'Aquila. In condizioni di Stato Limite Ultimo (SLU) l'edificio soddisfa tutte le verifiche previste dalla normativa nei confronti dei carichi verticali; tuttavia, le verifiche nei confronti dell'azione sismica non risultano rispettate.

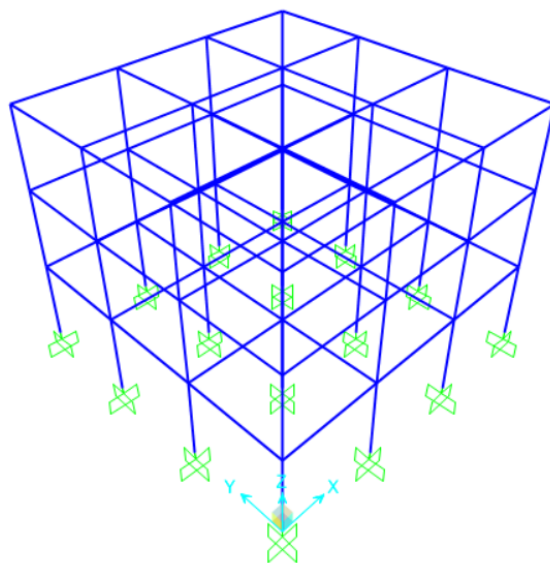


Figura 5.1: Assonometria modello base

La struttura di base presenta un'altezza interpiano pari a 4 m, mentre la lunghezza delle campate è pari a 5 m. Ne deriva una configurazione perfettamente regolare sia in pianta sia in elevazione. Le sezioni resistenti degli elementi in calcestruzzo armato sono le seguenti:

- Travi: 40x50
- Pilastri P1 (primo piano): 50x50
- Pilastri P2 (secondo piano): 45x45
- Pilastri P3 (terzo piano): 40x40

Le travi presentano la stessa distribuzione in entrambe le direzioni, ma quelle orientate lungo l'asse x svolgono il ruolo di travi principali, in quanto soggette all'applicazione dei carichi verticali; le travi ortogonali, invece, assumono funzione secondaria.

Nella tabella 5.1 sono riportate le caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati nella struttura di base.

Materiali

C35/45	
modulus of elasticity 'E'	34.077 GPa
poisson 'U'	0.2
shear modulus 'G'	14.20 GPa
weight per unit volume	24.99 kN/m ³
B450C	
modulus of elasticity 'E'	199.90 GPa
poisson 'U'	0.3
weight per unit volume	76.97 kN/m ³

Tabella 5.1: Proprietà dei materiali della struttura esistente

5.2 Carichi

Per determinare l'azione sismica, bisogna prima definire i carichi che agiscono sulla struttura.

Vertical Loads

I carichi verticali della struttura sono riportati in tabella 5.2.

G_1	8 kN/m ²
G_2 , $slab$	3.6 kN/m ²
G_2 , fa	10 kN/m
Q	4 kN/m ²

Tabella 5.2: Carichi verticali su struttura esistente

G_1 , G_2 , $slab$, e Q agiscono sulle travi principali, mentre G_2 , fa è la tamponatura, ed è applicato alle travi perimetrali della struttura.

Carichi sismici La zona sismica di riferimento è L'Aquila, in Italia. Lo spettro di risposta elastico usato in analisi dinamica lineare, e gli accelerogrammi spettro-compatibili usati in analisi Time History fanno riferimento ai seguenti parametri:

- Stato limite: Salvaguardia delle vite (SLV)
- Classe d'suo: II
- Vita nominale: 50 anni
- Tipo di suolo: B
- Topografia: T1

A queste caratteristiche, in accordo con le NTC2018, si attribuisce uno spettro di risposta elastico con i seguenti parametri:

- Accelerazione di picco del suolo (ag/g): 0.331 g
- Fattore di amplificazione (F_0): 2.398

- Periodo di riferimento (T_c^*): 0.363 s

Lo spettro di risposta elastico considerato è il seguente riportato in figura 5.2.

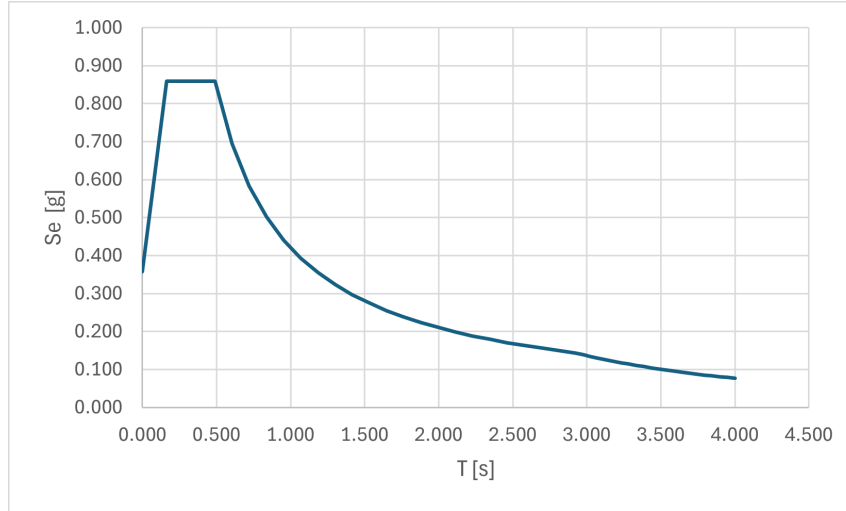


Figura 5.2: Spettro di risposta elastico de L'Aquila

5.3 Struttura di base considerata

Per le analisi dinamiche lineari si procederà a utilizzare direttamente lo spettro di risposta, opportunamente modificato di volta in volta in funzione del fattore di smorzamento assegnato all'i-esimo individuo. In particolare, lo spettro di risposta standard, riferito a uno smorzamento intrinseco del calcestruzzo pari al 5%, viene ridotto per ciascun individuo mediante il parametro η definito in (5.1).

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (5.1)$$

Lo spettro di risposta, e quindi l'azione sismica, verrà abbattuta in accordo alle eqs. 5.2.

$$S_e(T) = \begin{cases} a_g S \eta F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right], & 0 \leq T \leq T_B, \\ a_g S \eta F_0, & T_B \leq T \leq T_C, \\ a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C}{T} \right), & T_C \leq T \leq T_D, \\ a_g S \eta F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right), & T \geq T_D. \end{cases} \quad (5.2)$$

L'azione sismica rappresentata dallo spettro di risposta, viene poi combinata nelle diverse direzioni in accordo alla combinazione sismica 5.3.

5.4 Analisi Time History non lineari

Le analisi Time History, in accordo con le NTC 2018, saranno condotte utilizzando sette accelerogrammi spettro-compatibili, come previsto al §7.3.5. Le azioni sismiche verranno considerate in entrambe le direzioni principali, applicando il 100% dell'azione in una direzione e il 30% in quella ortogonale (5.3), per un totale di 14 analisi Time History eseguite. Gli accelerogrammi impiegati sono gli stessi adottati nelle analisi parametriche bidimensionali riportate nel Capitolo 3.

$$E = 1.00 \cdot E_X + 0.3 \cdot E_Y + 0.3 \cdot E_Z \quad (5.3)$$

5.5 Esoscheletri ortogonali

Gli esoscheletri oggetto del caso studio sono ortogonali alla facciata dell'edificio, collegati rigidamente alla struttura di base in corrispondenza dei nodi trave-pilastro e con controventi dissipativi su una delle due diagonali.

Materiali e sezioni

Il materiale costituente è l'acciaio S355. Sarà oggetto dell'ottimizzazione la selezione delle sezioni ottimali per minimizzare la funzione di costo. In particolare,

la tipologia di sezioni impiegata è quella delle CHS (sezioni cave circolari). In tabella 5.3 si riportano le caratteristiche delle sezioni a disposizione dell'algoritmo di ottimizzazione.

ID	ϕ_e [mm]	s [mm]	Tipologia	Area [mm ²]
1	101.6	5	CHS	1.517
2	114.3	6.3	CHS	2.138
3	139.7	8	CHS	3.310
4	168.3	8	CHS	4.029
5	177.8	10	CHS	5.272
6	219.1	10	CHS	6.569
7	244.5	10	CHS	7.367
8	193.7	14.2	CHS	8.008
9	219.1	14.2	CHS	9.141
10	244.5	14.2	CHS	10.274
11	273.0	14.2	CHS	11.545
12	273.0	16	CHS	12.918
13	323.9	14.2	CHS	13.816
14	244.5	20	CHS	14.106
15	355.6	14.2	CHS	15.230
16	273.0	20	CHS	15.896
17	406.4	14.2	CHS	17.496
18	323.9	20	CHS	19.095
19	273.0	25	CHS	19.478
20	355.6	20	CHS	21.086
21	323.9	25	CHS	23.476
22	355.6	25	CHS	25.965
23	406.4	25	CHS	29.955
24	406.4	30	CHS	35.475
25	457.0	30	CHS	40.244
26	508.0	30	CHS	45.050
27	406.4	40	CHS	46.043
28	457.0	40	CHS	52.402
29	610.0	30	CHS	54.664
30	762.0	25	CHS	57.884
31	508.0	40	CHS	58.811
32	711.0	30	CHS	64.183
33	762.0	30	CHS	68.989
34	610.0	40	CHS	71.628
35	508.0	50	CHS	71.942
36	711.0	40	CHS	84.320
37	610.0	50	CHS	87.965
38	762.0	40	CHS	90.729
39	711.0	50	CHS	103.830
40	762.0	50	CHS	111.841
41	711.0	60	CHS	122.711

Tabella 5.3: Proprietà geometriche delle sezioni CHS

La scelta della tipologia di sezione ricade sulle sezioni circolari in quanto presentano

un secondo momento d'inerzia identico nelle due direzioni principali. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante poiché, se da un lato l'esoscheletro deve sopportare azioni più intense nel proprio piano, assorbendo parte dei carichi trasferiti dalla struttura esistente, dall'altro è comunque soggetto anche alle sollecitazioni fuori piano dovute alla sua massa, che non è trascurabile. La resistenza fuori piano degli esoscheletri è infatti sensibilmente inferiore a quella nel piano, in ragione delle caratteristiche geometriche del sistema; per questo motivo la forma degli elementi incide in modo determinante sulla stabilità dell'intervento di retrofit.

La questione assume ulteriore importanza nel caso di esoscheletri disposti ortogonalmente all'edificio, nei quali l'estremità più esterna non è collegata alla struttura principale, rendendo quella porzione particolarmente vulnerabile ai fenomeni di imbarcamento. Inoltre, poiché il processo di ottimizzazione si basa sull'impiego di profili commerciali in acciaio, un ulteriore vantaggio delle Circular Hollow Sections è l'ampia disponibilità di misure presenti sul mercato. Questi profili, inoltre, permettono di raggiungere aree di sezione più elevate rispetto ad altre tipologie come HEA o IPE, mantenendo al tempo stesso dimensioni esterne della stessa grandezza [8].

Vincoli

Gli esoscheletri sono incastrati al suolo, con travi e diagonali semplicemente appoggiate e colonne continue fino all'ultimo livello della struttura.

Diagonali

La configurazione a croce di Sant'Andrea comporta che i controventi risultino alternativamente sollecitati a trazione e a compressione. Quando lavorano a compressione, tali elementi possono essere soggetti a fenomeni di instabilità, i quali impediscono il raggiungimento della piena resistenza sezionale. Tuttavia, nell'ambito delle analisi dinamiche lineari adottate durante il processo di ottimizzazione, non è possibile verificare direttamente l'instabilità dei controventi.

Questo aspetto verrà pertanto valutato a valle dell'ottimizzazione, sottoponendo la

struttura a un'analisi Time History non lineare. Trascurando in una prima fase tali instabilità, si assume che i due diagonali presentino la stessa capacità resistente: la resistenza a compressione viene quindi considerata pari a quella a trazione, evitando di introdurre distinzioni tra i due elementi all'interno della procedura di ottimizzazione.

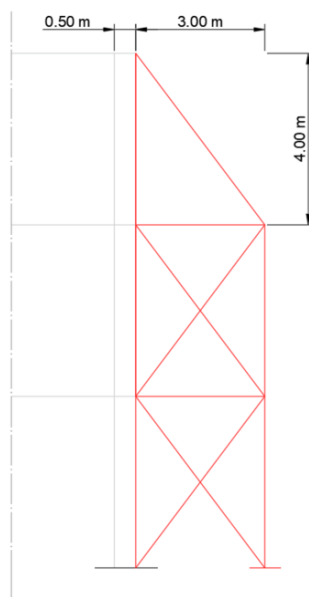


Figura 5.3: Modello esoscheletri per ottimizzazione

Dissipatori

In fase di predimensionamento, la dissipazione viene rappresentata incrementando il fattore di smorzamento, mentre i diagonali sono modellati come elementi rigidi, in quanto non è possibile introdurre direttamente i dissipatori nel modello destinato alle analisi dinamiche lineari. Di conseguenza, l'effetto dissipativo viene interpretato in modo fittizio come una riduzione dell'azione sismica alla base della struttura, anziché come dissipazione dell'energia trasmessa alla struttura a fronte di un'azione sismica invariata.

Una volta definita la correlazione tra il fattore di smorzamento e il coefficiente non lineare del dissipatore, e sulla base delle relazioni proposte da Silvestri, è possibile procedere alla modellazione esplicita dei dispositivi dissipativi (5.4). In questa fase i

diagonali vengono affiancati dai dissipatori veri e propri, caratterizzati dai parametri riportati in tabella 5.4.

	Lungo x	Lungo y
β	0.15	0.15
K_{ax}	1 357 019 kN/m	1 357 019 kN/m
C_{nl}	806 kN s ^{0.15} /m ^{0.15}	806 kN s ^{0.15} /m ^{0.15}

Tabella 5.4: Valori dei parametri lungo x e lungo y

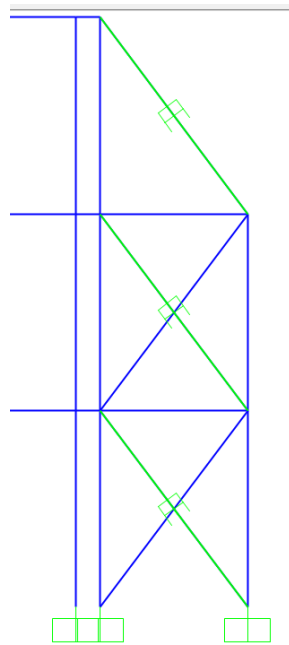


Figura 5.4: Modello Esoscheletri Dissipativi per analisi TH_{NL}

In accordo alle caratteristiche di massa e rigidità della struttura accoppiata (esoscheletro + struttura base), è possibile calcolare le caratteristiche dei dissipatori distinguendole nelle due direzioni (5.5); la regolarità del caso ha portato al medesimo dimensionamento in entrambe le direzioni.

Parametro	Valore	Unità
ξ_{int}	5	–
ξ_{visc}	20	–
ξ_{tot}	25	s
T_{1x}	0.366	s
T_{1y}	0.366	s
η	0.577	–
ω_{1x}	17.17	rad/s
ω_{1y}	17.17	rad/s
W	4090	kN
g	9.81	m/s ²
N	3	–
n_x	2	–
n_y	2	–
θ	53	°
C_{Lx}	7904	kN·s/m
C_{Ly}	7904	kN·s/m
S_{ex}	0.496	g
S_{ey}	0.496	g
$v_{\text{max } x}$	0.0853	m/s
$v_{\text{max } y}$	0.0853	m/s
$k_{\text{axial } x}$	1 357 018	kN/m
$k_{\text{axial } y}$	1 357 018	kN/m
β	0.15	–
C_{nlx}	806	kN·s ^{0.15} /m ^{0.15}
C_{nly}	806	kN·s ^{0.15} /m ^{0.15}

Tabella 5.5: Parametri utilizzati nel modello

Capitolo 6

Interpretazione dei risultati

6.1 Risultati dei processi di ottimizzazione

Sono state eseguite n.10 analisi, di cui si sono riportati i risultati ottenuti per il migliore cromosoma, ovvero l'individuo con la minore OF.

RUN	it num	EXOSK POSIZIONI	SEZIONI	ξ	N_EX
1	100	[0 0 1 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0]	[25 20 15 25 18 5 6 10 12]	24	4
2	100	[1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1]	[23 18 13 24 22 5 4 11 10]	26	4
3	100	[1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 1]	[24 19 23 20 7 4 11 12]	25	4
4	105	[0 0 1 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0]	[27 23 17 26 23 5 5 12 13]	18	4
5	100	[0 1 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 0]	[24 22 11 25 12 18 7 5 10 13]	24	4
6	100	[0 0 1 0 1 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0]	[24 21 13 24 22 19 6 4 10 10]	26	4
7	100	[1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1]	[25 21 20 25 26 7 12 17]	19	4
8	180	[1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1]	[24 19 22 20 15 4 18 10]	27	4
9	93	[0 1 1 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1]	[27 24 21 27 17 5 8 12]	20	4
10	100	[1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 1]	[24 20 10 23 18 5 6 10 11]	26	4

	T1x	T1y	Fnl_max_x	Fnl_max_y	COSTO_DISSIP
	s	s	kN	kN	\$
1	0.351	0.351	525	525	\$52,036.39
2	0.369	0.369	558	558	\$54,017.60
3	0.366	0.366	541	541	\$53,034.77
4	0.342	0.343	407	407	\$44,627.30
5	0.358	0.358	524	524	\$52,013.34
6	0.369	0.369	558	558	\$54,038.15
7	0.338	0.338	430	430	\$46,130.49
8	0.368	0.368	574	574	\$54,973.29
9	0.348	0.348	444	444	\$48,020.11
10	0.361	0.361	558	558	\$54,039.04

	COSTO_DISSIP	COSTO_ACC	COSTO TOT	DRIFT_best	DCR EXK	DCR CLS
	\$	\$	\$		max	
1	\$52,036	\$48,211	\$100,248	0.996	0.821	1.0260
2	\$54,018	\$43,900	\$97,917	0.9998	0.8038	1.1000
3	\$53,035	\$45,683	\$98,718	0.9984	0.7997	1.1000
4	\$44,627	\$57,061	\$101,689	0.9963	0.8483	1.1100
5	\$52,013	\$47,602	\$99,616	0.9957	0.6850	1.0700
6	\$54,038	\$44,420	\$98,458	0.9991	0.7945	1.1000
7	\$46,130	\$58,538	\$104,669	0.9981	0.6946	1.0500
8	\$54,973	\$42,445	\$97,417.90	0.9984	0.8676	1.1000
9	\$48,020	\$60,034	\$108,054	0.9993	0.7980	1.0750
10	\$54,039	\$44,137	\$98,176	0.9950	0.8310	1.0650
μ	\$51,293	\$49,203	\$100,496			
σ	\$3,681	\$6,704	\$3,426			

Tabella 6.1: Tabella di confronto analisi eseguite

In tabella 6.1 si confrontano i migliori individui e di essi viene riportata:

- **Numero progressivo delle analisi eseguite;**
- **Numero di iterazioni eseguite;**
- **Posizione degli esoscheletri:** In accordo con la figura 4.5 i primi 16 geni (singoli elementi di un cromosoma) fanno riferimento al posizionamento degli esoscheletri. In particolare, dove è presente "1" l'esoscheletro viene posizionato, mentre dove è presente "0" l'esoscheletro non è previsto in quella posizione;
- **Sezioni degli esoscheletri:** I successivi 9 geni fanno riferimento alla sezione di ogni elemento dell'esoscheletro (figura 6.1). Con riferimento al sagomario a disposizione dell'ottimizzatore (tabella 5.3), a ciascun gene viene attribuito un valore che coincide con l'ID di una sezione del sagomario;

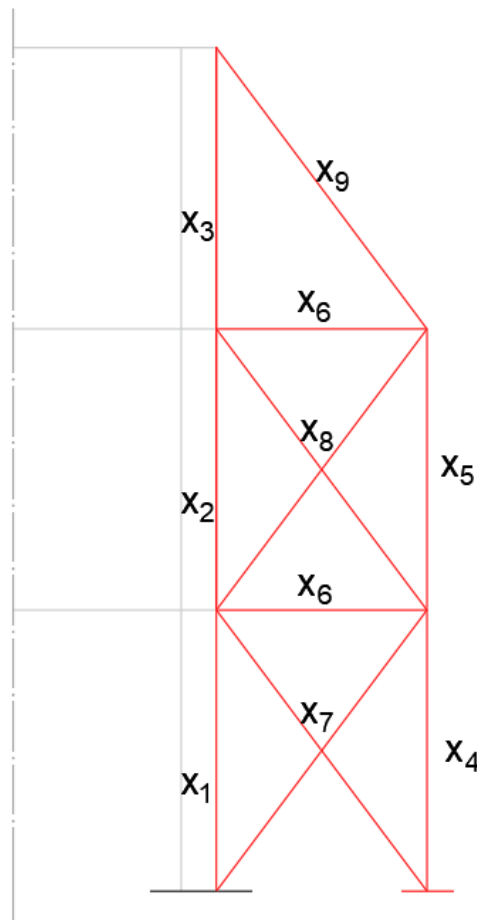


Figura 6.1: Posizione degli elementi dell'esoscheletro

- **Fattore di smorzamento:** L'ultimo gene del cromosoma si riferisce al valore del fattore di smorzamento;
- **Numero di esoscheletri;**
- **Periodi principali della struttura accoppiata sia lungo x che lungo y:** Tali valori sono necessari per stimare le forze dissipative massime in accordo con la procedura di Silvestri;
- **Stima delle forze massime per ogni dissipatore lungo x e lungo y:** Calcolate in accordo con la procedura semplificata di Silvestri;
- **Costo dei dissipatori:** Tramite la funzione di costo 4.4 è stato possibile

calcolare il costo in dollari dei dissipatori;

- **Costo dell'acciaio:** Determinato tramite la funzione di costo 4.3;
- **Costo totale del miglior individuo dell'analisi:** Dato dalla somma dei due costi precedentemente calcolati;
- $DRIFT_{best}$: È il massimo spostamento interpiano della colonna più sollecitata. In ottica di ottimizzazione questo valore deve tendere a 1. Se fosse troppo basso avremmo una struttura di base più scaricata, ma un intervento più costoso; viceversa, per valori superiori all'unità, si avrebbe una struttura di base che non rispetta il limite imposto pari a $H/600$;
- DCR_{EXK} : È il demand-capacity ratio dell'esoscheletro. Tendendo all'unità, l'elemento più sollecitato dell'esoscheletro si avvicina alla sua condizione limite di resistenza. È fondamentale che questo valore non sia troppo vicino all'unità, dal momento che, in analisi dinamica lineare, si stanno trascurando gli effetti del secondo ordine, quali l'instabilità degli elementi dell'esoscheletro;
- DCR_{CLS} : È il demand-capacity ratio della struttura di base. Tendendo all'unità, l'elemento più sollecitato della struttura di base si avvicina alla propria condizione limite di resistenza nei confronti della presso-flessione.

Il numero di individui analizzati in ogni iterazione è stato sempre imposto pari a 100.

6.2 Discussione dei risultati

Con riferimento ai risultati emersi dalle analisi eseguite, si riporta quanto segue.

6.2.1 Analisi su struttura base

Alla struttura base è stato attribuito un fattore di smorzamento pari al 5%, come valore intrinseco delle strutture intelaiate in c.a. Con le sue caratteristiche strutturali, l'edificio presenta un'elevata percentuale di elementi che non soddisfano livelli minimi di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche. Con riferimento alla struttura base e all'elemento più sollecitato, si ha un **valore di DCR pari a 2.87** (figura

6.2), valore che non garantisce la sicurezza strutturale, ma consente di evidenziare il margine di miglioramento ottenibile tramite l'intervento di rinforzo, evitandone la demolizione;

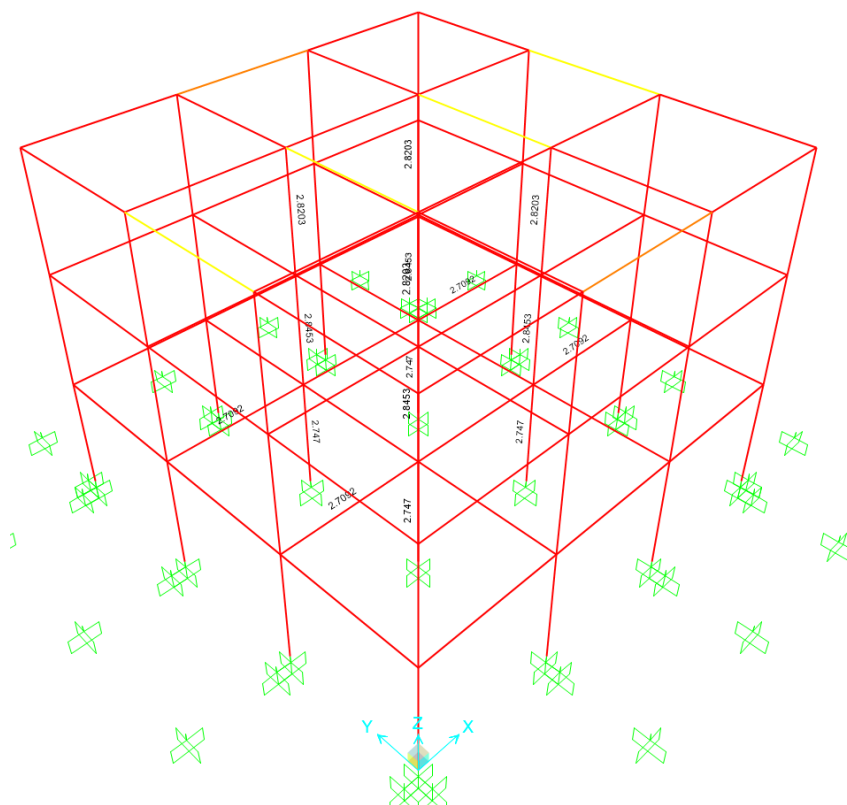


Figura 6.2: DCR struttura base

6.2.2 Difficoltà di convergenza

Nonostante la simmetria della struttura e la sua regolarità in pianta e in elevazione, l'algoritmo di ottimizzazione non riesce a stabilizzarsi immediatamente su una singola configurazione degli esoscheletri (figura 6.6).

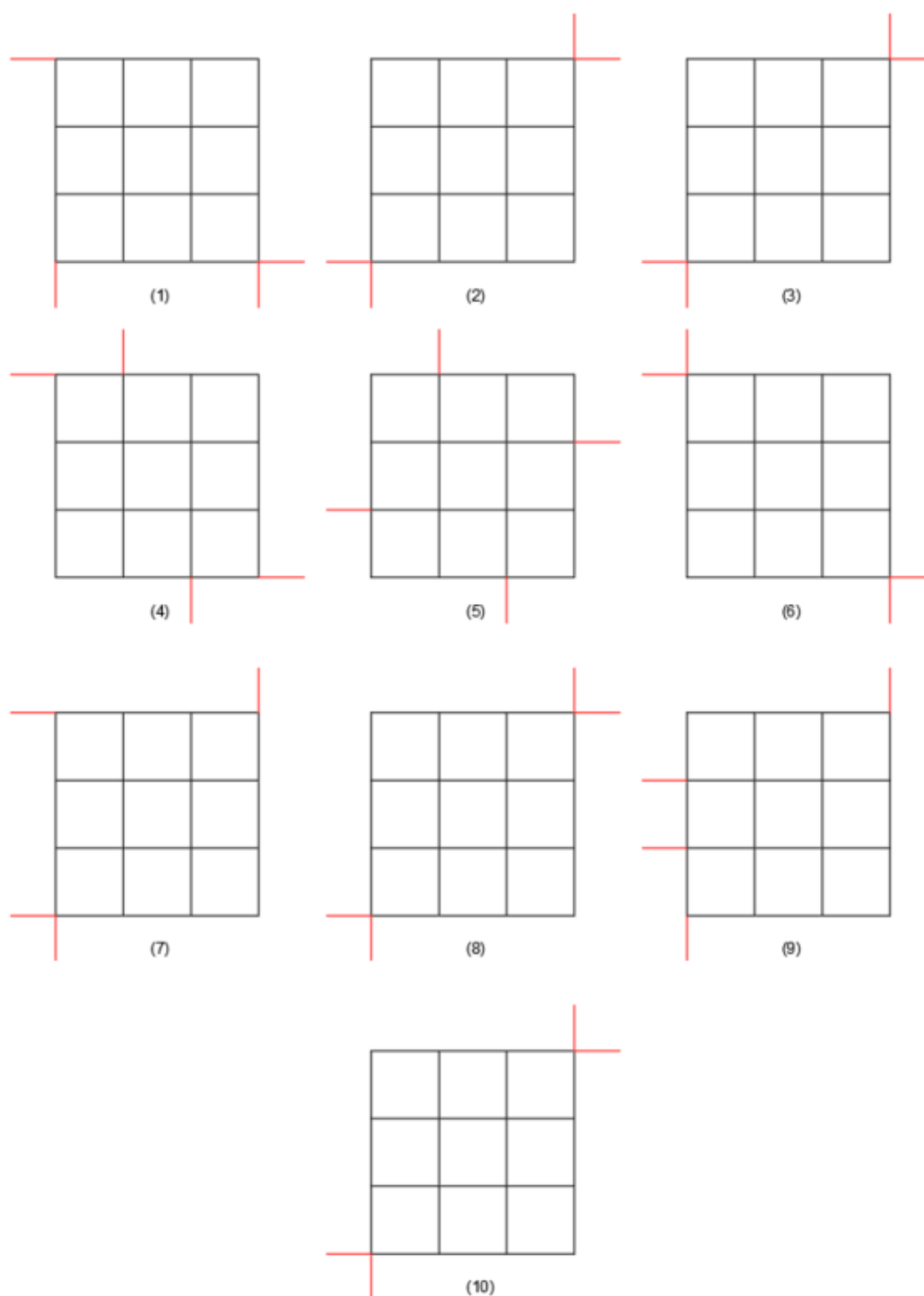


Figura 6.3: Configurazioni ottimali ottenute per le 10 runnate

Il 50% delle analisi evidenzia una distribuzione ottimale degli esoscheletri simmetrica

rispetto alle due diagonali del quadrato e con posizionamento su 2 dei 4 angoli (Analisi 2, 3, 6, 8, 10). Tale configurazione era attesa, dal momento che, nel caso di esoscheletri non dissipativi [22], la soluzione ottimale prevedeva esoscheletri in corrispondenza di tutti e 4 gli angoli.

Nelle altre distribuzioni ottimali non si ha una configurazione geometricamente simmetrica, ma dal punto di vista strutturale possono comunque essere considerate tali. Infatti, nella configurazione simmetrica rispetto alle diagonali del quadrato non si generano effetti torsionali e si vincola la traslazione nelle due direzioni; nei casi non geometricamente simmetrici si vincolano comunque le traslazioni, ma compaiono piccoli effetti torsionali che, dal punto di vista ingegneristico, possono essere trascurati in virtù del fatto che tutti gli esoscheletri, prevedendo lo stesso dimensionamento, hanno la stessa rigidità.

La disomogeneità dei risultati ottenuti dall'ottimizzazione è giustificabile dal ridotto numero di individui e di iterazioni adottate in fase di settaggio dell'algoritmo. Come in ogni processo metaeuristico, è necessario condurre un fine processo di calibrazione dei parametri di settaggio per ottenere stime accurate e robuste su un campione significativo di runnate. Sulla base di considerazioni precedenti riscontrate in letteratura [22], il candidato ha adottato i settaggi riportati in tabella 4.2. A differenza delle analisi mostrate in [22], il problema di ottimizzazione richiede maggiore capacità esplorativa poiché l'aggiunta della nuova variabile, ξ , aumenta la dimensione del dominio dello spazio di ricerca. L'analisi 8, infatti, mostra come, aumentando il numero max di iterazioni a 180, è probabile che l'algoritmo converga alla soluzione attesa. Tali considerazioni andrebbero verificate su un campione statisticamente significativo di runnate per cui è possibile altresì valutare quale tra il numero di individui e quello di iterazioni è più efficace ai fini dell'accelerazione del processo di convergenza.

A rendere il processo decisionale dell'algoritmo ancora più complesso contribuisce la funzione di costo implementata per i dissipatori (figura 6.4).

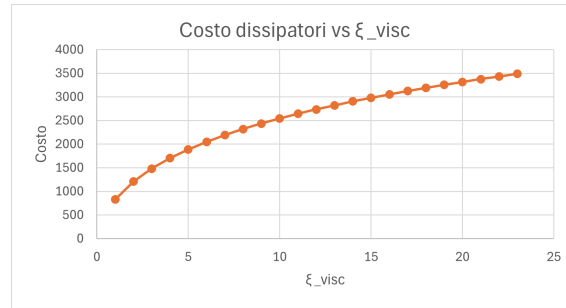


Figura 6.4: Legge di costo dei dissipatori

Come si può notare, per valori bassi del fattore di smorzamento i costi crescono rapidamente. L'appiattimento della funzione di costo per valori alti induce una certa “indecisione” nell’algoritmo, che, operando in un intervallo di alta dissipazione, fatica a individuare in modo rapido e univoco un valore ottimale di smorzamento. Per questo motivo 7 analisi su 10 mostrano valori di fattore di smorzamento molto vicini tra loro, ma quasi mai identici. La situazione limite di questo ragionamento è quella in cui la funzione di costo risulta costante: in tali condizioni il dissipatore non riuscirebbe a comprendere quale soluzione sia migliore, e non riuscirebbe a convergere.

Alla luce di ciò, superato un valore del fattore di smorzamento pari al 24%, le soluzioni possono essere considerate tra loro equivalenti dal punto di vista della dissipazione.

Sulla base di quanto appena discusso, è di fondamentale importanza che il progettista **calibri la funzione di costo** prima di approcciare l’algoritmo di ottimizzazione. La funzione implementata in questo lavoro presenta un esponente e un coefficiente fissati (96.88 e 0.607), tarati a partire da preventivi economici disponibili. Sarà onere del progettista una corretta determinazione preliminare della funzione di costo, sulla base di ulteriori preventivi o di valori riportati nei prezziari disponibili in letteratura.

6.2.3 Considerazioni generali

- Si osserva come, introducendo la variabile “dissipazione”, l’algoritmo debba valutare due aspetti tra loro contrapposti. All’aumentare della dissipazione cresce il costo dei dissipatori, ma diminuisce quello dell’acciaio impiegato, e vicever-

sa. Anche questo contribuisce a rendere più complessa la convergenza con un numero ridotto di iterazioni;

- Tutte le soluzioni individuate presentano un numero di esoscheletri pari a 4, ovvero la metà rispetto al caso con esoscheletri non dissipativi [22];
- Le soluzioni ottimali individuate presentano differenze di costo molto contenute: la massima differenza individuata è pari al 6%;
- Tutti gli individui presentano un $DRIFT_{best}$ superiore al 99% ma inferiore all'unità, condizione che garantisce il rispetto del limite imposto pari a $H/600$ e, al contempo, un uso efficiente della capacità resistente della struttura di base;
- Tutti gli individui hanno un DCR dell'esoscheletro inferiore all'85%, condizione favorevole per evitare fenomeni di instabilità che in questa fase di progettazione preliminare vengono trascurati;
- L'elemento strutturale più sollecitato della struttura di base ha un DCR prossimo all'unità, a conferma del fatto che gli esoscheletri garantiscono un adeguato livello di sicurezza strutturale.

6.3 Risultati dell'analisi sull'individuo migliore

6.3.1 Individuo migliore

L'individuo che si andrà ad analizzare, in quanto soluzione di minor costo, è quello riferito all'analisi n.8 (figura 6.5).

OUTPUTS	
Cromosoma	[1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 24 19 10 24 18 5 4 10 11 27]
Costo	\$97,417.90
DRIFT	0.9984
DCR EXK	0.8676
DCR CLS	1.1000

Tabella 6.2: Individuo di minor costo

Sezioni	ϕ_e [mm]	s [mm]	Tipologia	Area [mm ²]
x1	406.4	30	CHS	35.475
x2	273	25	CHS	19.478
x3	244.5	14.2	CHS	10.274
x4	406.4	30	CHS	35.475
x5	323.9	14.2	CHS	15.23
x6	177.8	10	CHS	5.272
x7	168.3	8	CHS	4.029
x8	244.5	14.2	CHS	10.274
x9	273	14.2	CHS	11.545

Tabella 6.3: Caratteristiche geometriche delle sezioni utilizzate

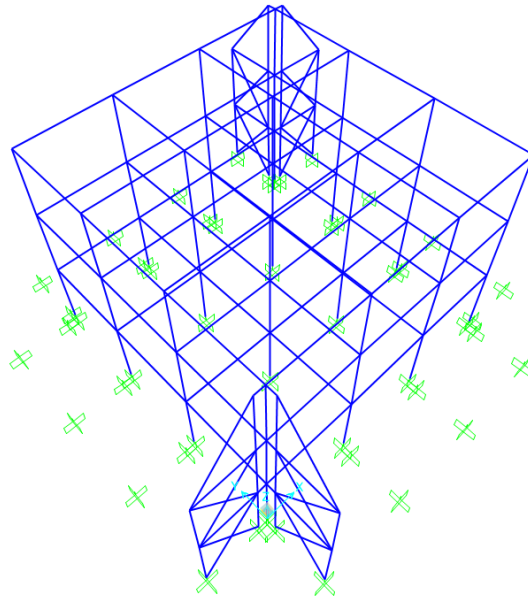


Figura 6.5: Individuo di minor costo

6.3.2 Discussione dei risultati dell'ottimizzazione

In figura 6.6 sono riportati i risultati delle iterazioni svolte durante il processo di ottimizzazione. In particolare, vengono mostrati:

- il valore minimo della OF a ciascuna iterazione, corrispondente alla prestazione dei migliori individui nel corso dell'evoluzione;
- l'andamento del processo di stagnazione, utile per comprendere se l'algoritmo sta esplorando in modo efficace lo spazio delle soluzioni o se si è bloccato su un individuo che non rappresenta la scelta migliore;
- i valori di $DRIFT_{ratio}$ ottenuti per il migliore individuo di ogni iterazione;
- i valori minimi del parametro DCR registrati per il migliore individuo di ogni iterazione.

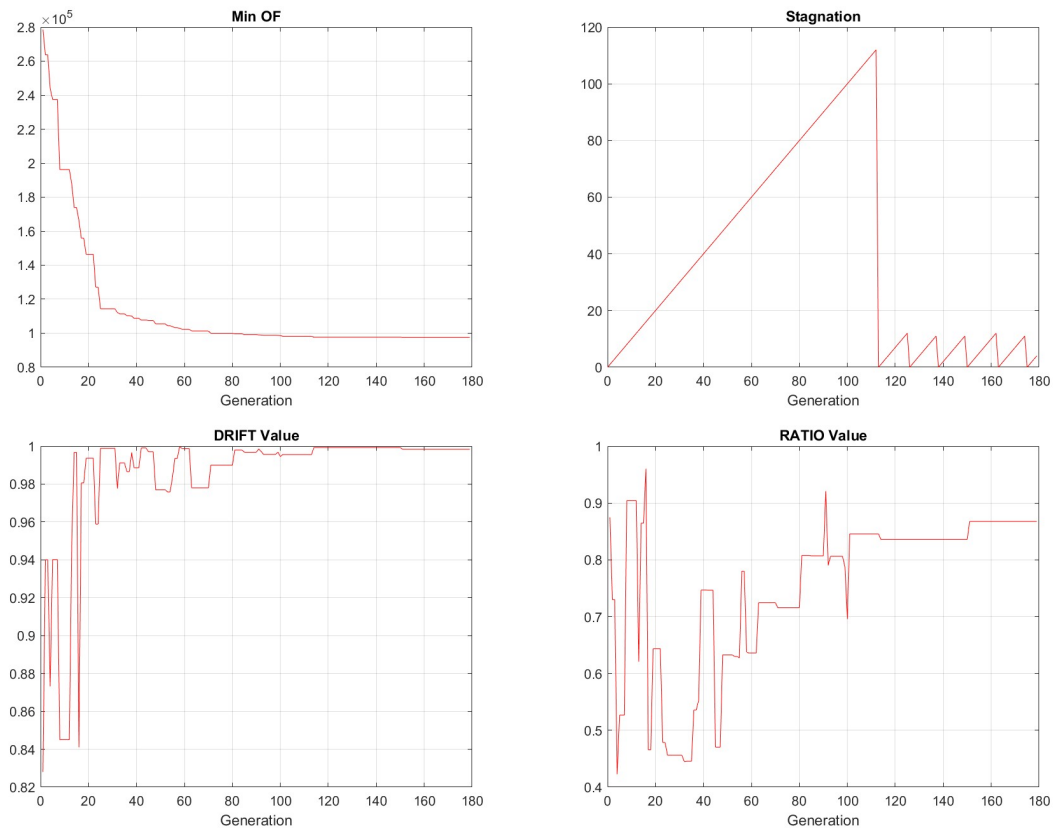


Figura 6.6: Grafici dell'ottimizzazione:

(1) Evoluzione della OF; (2) Stagnazione della soluzione; (3) Rapporto di spostamento inter piano della struttura base; (4) Demand-capacity ratio degli esoscheletri

Nei grafici si può apprezzare quanto segue:

- nell'analisi n.8 si sono eseguite n.180 iterazioni per aumentare l'esplorazione dell'algoritmo;
- Figura 6.6-1: la OF ha un andamento complessivamente decrescente, fino ad attestarsi su un valore prossimo a quello finale;
- Figura 6.6-2: la stagnazione dell'algoritmo si verifica quando una stessa configurazione viene selezionata come migliore per più di 12 iterazioni consecutive. Questa condizione può verificarsi per due motivi: o l'algoritmo non sta funzionando correttamente, oppure la soluzione trovata è effettivamente la migliore. Si può notare come all'iterazione n.110 sia presente un salto: ciò indica che dall'iterazione n.98 l'ottimizzatore forniva sempre lo stesso cromosoma ottimale. Superato questo salto, e generate nuove popolazioni, ogni 12 iterazioni si osserva un ulteriore salto, segno che le soluzioni individuate sono buone e non frutto di una stagnazione;
- Figura 6.6-3-4: i due grafici presentano un andamento antitetico; quando cresce il DCR decresce il *DRIFT* della struttura di base. La soluzione ottimale trovata è quella che garantisce valori sufficientemente elevati sia di DCR sia di *DRIFT*, sfruttando al meglio la capacità resistente disponibile.

Capitolo 7

Validazione dei risultati ottenuti

7.1 Modellazione della struttura per analisi TH_NL

A valle dell'ottimizzazione e dell'implementazione della procedura di Silvestri all'interno dell'algoritmo, si rende necessaria la validazione dei risultati ottenuti e, quindi, delle ipotesi formulate in partenza.

Con questo obiettivo, sulla struttura accoppiata ottimizzata è stata eseguita una modellazione rigorosa dei dissipatori, i quali presentano le caratteristiche definite tramite la procedura di Silvestri (tabella 7.2 e tabella 7.1).

ξ_{int}	5	W	4090 kN
ξ_{visc}	21	g	9.81 m/s ²
ξ_{tot}	26 s	N	3
T_{1x}	0.369 s	n_x	2
T_{1y}	0.369 s	n_y	2
η	0.577350269	θ	53°
ω_{1x}	17.16717297 rad/s	C_{Lx}	7904.729723 kN·s/m
ω_{1y}	17.16717297 rad/s	C_{Ly}	7904.729723 kN·s/m
S_{ex}	0.496 g	$v_{\text{max } x}$	0.085302951 m/s
S_{ey}	0.496 g	$v_{\text{max } y}$	0.085302951 m/s
$k_{\text{axial } x}$	1,357,018.624 kN/m	$k_{\text{axial } y}$	1,357,018.624 kN/m
β	0.15	C_{nlx}	806.9246133 kN·s ^{0.15} /m ^{0.15}
		C_{nly}	806.9246133 kN·s ^{0.15} /m ^{0.15}

Tabella 7.1: Correlazione tra i parametri di dissipazione

	Lungo x		Lungo y	
β	0.15		0.15	
K_{ax}	1,357,019	kN/m	1,357,019	kN/m
C_{nl}	806	kN s ^{0.15} /m ^{0.15}	806	kN s ^{0.15} /m ^{0.15}

Tabella 7.2: Parametri dei dissipatori lungo le direzioni x e y

I dissipatori non lineari sono stati disposti in corrispondenza di una delle due diagonali dell'esoscheletro (figura 7.1).

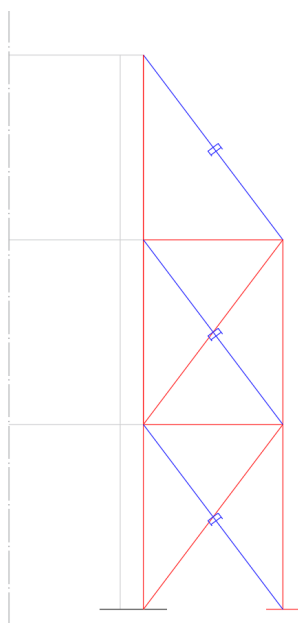


Figura 7.1: Modellazione dell'esoscheletro dissipativo

Dovendo eseguire un'analisi non lineare, in accordo con le NTC 2018, si applicano 7 accelerogrammi spettro-compatibili, gli stessi utilizzati nel capitolo 3. In particolare si considerano 14 combinazioni, poiché ciascun accelerogramma viene applicato prima al 100% in una direzione e successivamente nella direzione ortogonale.

7.2 Validazione della modellazione per le analisi time history

Una condizione nota, ma che è opportuno ribadire per evitare errori di modellazione quando si implementano analisi più complesse, come le analisi time history non lineari, è che, avendo selezionato accelerogrammi spettro-compatibili, le sollecitazioni agenti sulla struttura non devono discostarsi in maniera significativa passando da un'analisi dinamica lineare con spettro elastico a un'analisi time history basata sugli stessi accelerogrammi. Di seguito (tabella 7.3) si riportano i valori di taglio alla base della struttura di partenza, in assenza di esoscheletri, sia in analisi time history che in dinamica lineare.

	100X30Y				100Y30X			
	Fx		Fy		Fx		Fy	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Dinamica lineare non dissipata	3911	-3911	1173	-1173	1173	-1173	3911	-3911
TH_NL non dissipata	3785	-3902	1262	-1301	1262	-1301	3785	-3693
Variazione (%)	3%	0%	-8%	-11%	-8%	-11%	3%	6%

Tabella 7.3: Confronto tagli alla base della struttura iniziale: DL vs TH_{NL}

Dal momento che la spettro-compatibilità è definita tra lo spettro di risposta elastico di riferimento e la media dei 7 accelerogrammi considerati, i valori di taglio alla base riportati per le analisi TH_{NL} sono già mediati sui 7 accelerogrammi. Il discostamento tra analisi dinamica lineare e analisi time history risulta contenuto: tra i valori riscontrati si osserva una variazione compresa tra +6% e -11%. Tali scarti confermano il corretto settaggio dell'analisi time history che si andrà a utilizzare. Si riporta, a conferma di quanto appena detto, un grafico di confronto dei tagli alla base anche delle struttura base con esoscheletri, sia in analisi DL che TH_{NL} (figura 7.2).

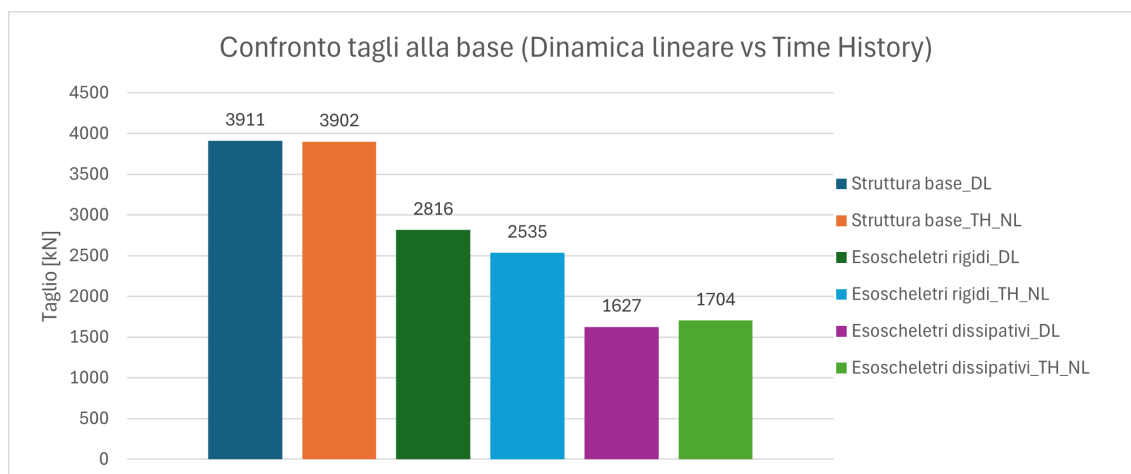


Figura 7.2: Confronto del taglio alla base tra struttura base, esoscheletri rigidi ed esoscheletri dissipativi

7.3 Validazione dell'impiego di analisi dinamiche lineari in presenza di dissipatori non lineari

Una volta verificata la correttezza dei settaggi dell'analisi e degli accelerogrammi impiegati, si passa alla validazione dell'impiego di analisi dinamiche lineari anche in presenza di dissipatori non lineari.

Questa assunzione è particolarmente forte, poiché in analisi dinamica lineare non si modella il comportamento del singolo dispositivo dissipativo: il loro contributo viene infatti rappresentato mediante un incremento del fattore di smorzamento della struttura. Per validare questo approccio si confrontano i tagli alla base della struttura di partenza in presenza di esoscheletri rigidi ed esoscheletri dissipativi.

In tabella si riportano:

- struttura base + esoscheletri ad alta resistenza: tagli alla base ottenuti tramite analisi dinamica lineare;
- struttura base + esoscheletri dissipativi: tagli alla base ottenuti tramite analisi dinamica lineare;
- struttura base + esoscheletri ad alta resistenza: tagli alla base ottenuti tramite analisi time history non lineare;
- struttura base + esoscheletri dissipativi: tagli alla base ottenuti tramite analisi time history non lineare.

Le differenze che si riscontrano in questo caso sono esclusivamente imputabili all'approssimazione del contributo dei dissipatori in analisi dinamica lineare.

Se si confronta il valore medio di taglio alla base (tabella 7.4), si nota come l'approssimazione ottenuta sia complessivamente ottima: la **perdita media** di prestazione tra un approccio e l'altro è infatti di circa il 2%. Nella tabella, con riferimento alle analisi time history, si confrontano i tagli medi dei 7 accelerogrammi.

	100X30Y				100Y30X				
	Fx		Fy		Fx		Fy		
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	
D_L non dissipata	2816	-2816	845	-845	845	-845	2816	-2816	
D_L dissipata	1628	-1628	488	-488	488	-488	1628	-1628	MEDIA
Variazione (%)	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%	42%

	100X30Y				100Y30X				
	Fx		Fy		Fx		Fy		
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	
TH_NL non dissipata	2536	-2513	845	-838	845	-838	2536	-2513	
TH_NL dissipata	1663	-1705	360	-430	360	-430	1663	-1609	MEDIA
Variazione (%)	34%	32%	57%	49%	57%	49%	34%	36%	44%

Tabella 7.4: Confronto tagli alla base della struttura accoppiata – D_L e TH_{NL}

Mentre nel paragrafo precedente era sufficiente analizzare la sola risposta media per validare il settaggio dell'analisi time history, in questo caso è necessario valutare i dati accelerogramma per accelerogramma e verificare, per i diversi sismi, quanto si perde in termini di prestazione dei dissipatori.

In particolare, si assume che vi sia una perdita di prestazione in analisi dinamica lineare quando il taglio alla base della struttura in tale analisi risulta maggiore rispetto a quello dell'analisi time history non lineare ($\Delta < 0$). Data la simmetria della struttura, i tagli alla base sono gli stessi sia considerando un'azione predominante in una direzione sia nella direzione ortogonale; si riportano pertanto gli esiti solo per 7 accelerogrammi (tabella 7.5).

ACCELEROGRAMMA	Δ
1	-5.28%
2	9.88%
3	10.84%
4	6.48%
5	-12.44%
6	16.96%
7	-24.28%

Tabella 7.5: Variazione delle prestazioni dei dissipatori

Nella maggior parte dei casi la perdita di prestazione si attesta intorno al 10%, e solo in un caso raggiunge il 24%, valore comunque pienamente accettabile in fase preliminare di progettazione.

Questo valore del 24% è perfettamente confrontabile con la perdita di prestazioni riscontrata nel capitolo 3, in cui si era osservato un valore pari a circa il 30%.

7.4 Validazione della procedura di Silvestri

Per evidenziare l'applicabilità della procedura di Silvestri si può effettuare un confronto a posteriori delle forze massime stimate nei singoli dissipatori (tabella 7.6).

	Fnlmax_x [kN]	Fnlmax_y [kN]
Dinamica lineare	541	541
TH_NL		
1	536	536
2	563	563
3	526	526
4	543	543
5	535	535
6	537	537
7	499	499

Tabella 7.6: Valori massimi delle forze non lineari dei dissipatori

La differenza massima riscontrata è pari all'8%; le correlazioni impiegate possono quindi ritenersi più che soddisfacenti ai fini del predimensionamento.

7.5 Confronto tra esoscheletri rigidi e esoscheletri dissipativi

Infine, è opportuno confrontare l'intervento tramite esoscheletri rigidi con quello mediante esoscheletri dissipativi.

In primo luogo si analizza il valore di taglio alla base per le diverse soluzioni (figura 7.3).

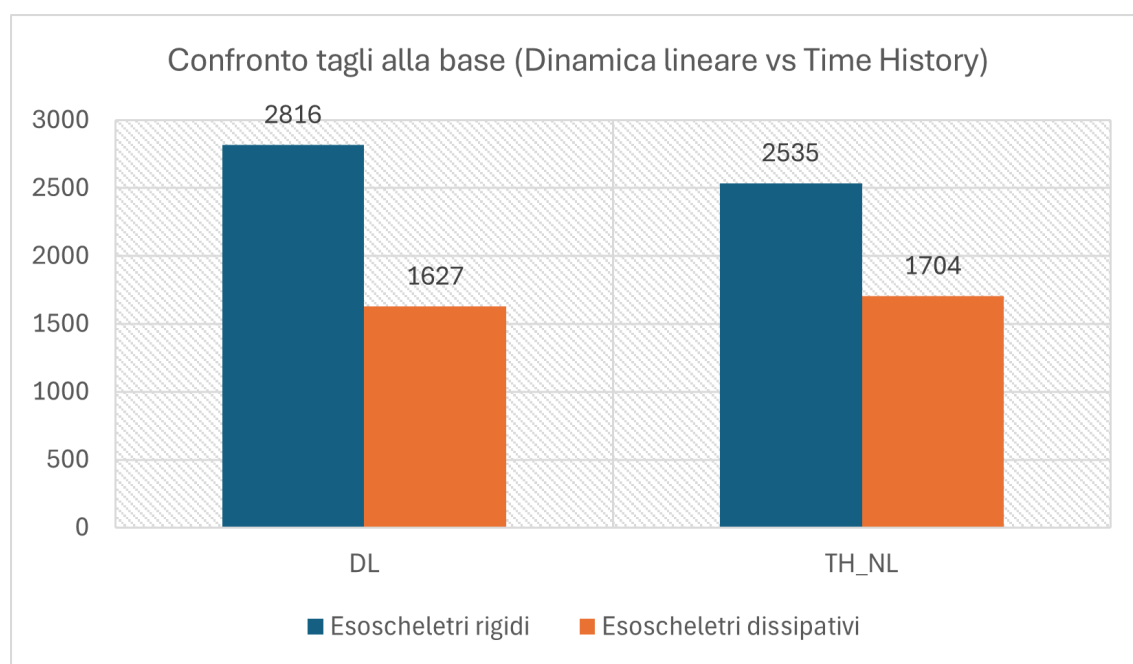


Figura 7.3: Confronto del taglio alla base tra struttura base, esoscheletri rigidi ed esoscheletri dissipativi

Del grafico 7.3 va evidenziato che, nel caso dissipato, l'analisi time history non lineare presenta dei tagli alla base maggiori di quelli dell'analisi dinamica lineare. Questo risultato non è dovuto alla differenza tra un'analisi e l'altra, ma alle assunzioni che sono state fatte nella correlazione tra fattore di smorzamento e coefficiente non lineare. L'approssimazione nella modellazione dei dissipatori va poi ad accumularsi e si traduce in una complessiva approssimazione della risposta strutturale in termini, ad esempio, di taglio alla base. Da una parte, nel caso della sola struttura base, l'analisi dinamica lineare risulta cautelativa mostrando dei valori di taglio maggiori,

dall'altra l'introduzione dei dissipatori comporta un'approssimazione a causa delle correlazioni introdotte.

Successivamente si confronta il costo dei due interventi. Gli esoscheletri rigidi presentano una configurazione con doppio esoscheletro in ciascun angolo della struttura (figura 7.4).

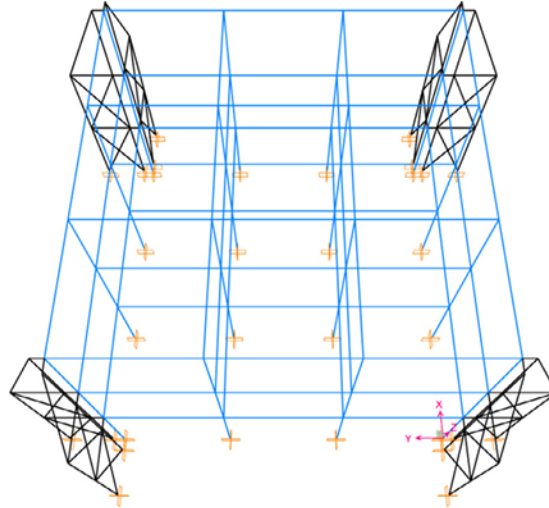


Figura 7.4: Modello di struttura accoppiata con esoscheletri rigidi[22]

Le sezioni individuate dall'ottimizzatore nel caso di esoscheletri rigidi sono riportate in tabella (7.7).

Sezioni	ϕ_e [mm]	s [mm]	Tipologia	Area [mm ²]
x1	457	30	CHS	40.244
x2	323.9	25	CHS	23.476
x3	323.9	14.2	CHS	13.816
x4	610	30	CHS	54.664
x5	406.4	30	CHS	35.475
x6	219.1	10	CHS	6.569
x7	219.1	10	CHS	6.569
x8	219.1	14.2	CHS	9.141
x9	273	25	CHS	19.478

Tabella 7.7: Sezioni ottimali esoscheletro rigido

Data la topologia selezionata, le dimensioni delle sezioni e il peso specifico dell'acciaio, si ha un peso complessivo dell'intervento pari a 593,96 kN, che corrispondono a **60.567,05 kg**.

Definito il peso dell'acciaio, e il costo al kg, è possibile effettuare un confronto tra intervento con esoscheletri dissipativi e non dissipativi (tabella 7.8).

	Costo
Eesoscheletri rigidi	\$ 97,417.00
Eesoscheletri dissipativi	\$ 115,077.00

Tabella 7.8: Tabella di confronto dei costi di intervento

Quindi l'intervento con esoscheletri dissipativi, nel caso in esame, ha mostrato un **risparmio in termini economici pari al 15%..**

Capitolo 8

Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto ha avuto l'obiettivo di sviluppare una procedura semplice e sufficientemente affidabile per il predimensionamento di esoscheletri dissipativi. L'intero percorso è stato costruito partendo da un'analisi critica della letteratura e da uno studio parametrico finalizzato a comprendere fino a che punto le analisi dinamiche lineari possano rappresentare in modo coerente il comportamento reale di dispositivi non lineari. Il punto chiave dell'elaborato è stato l'utilizzo di una relazione tra il fattore di abbattimento ξ utilizzato nella modellazione lineare, e il coefficiente di dissipazione non lineare C_{NL} , tipico del legame esponenziale dei dissipatori. Tale relazione permette di utilizzare, in fase preliminare, analisi rapide dal punto di vista computazionale, senza perdere eccessiva accuratezza nella valutazione della risposta globale dell'intervento.

Le verifiche condotte sul caso studio tridimensionale hanno mostrato che la procedura proposta conduce a risultati coerenti e tendenzialmente in favore di sicurezza, confermando quindi la possibilità di impiegare un modello semplificato nelle fasi iniziali di progetto, rimandando le analisi non lineari alle sole fasi di verifica finale. Nel complesso, la metodologia sviluppata rappresenta un passo verso un processo di progettazione più rapido ed automatizzato, in grado di rendere gli esoscheletri dissipativi una soluzione maggiormente competitiva anche dal punto di vista economico.

Risultati principali della ricerca

- È stata definita e validata una procedura speditiva per il predimensionamento di esoscheletri dissipativi, basata su analisi dinamiche lineari con smorzamento equivalente;
- È stata individuata una correlazione operativa tra ξ e C_{NL} , utilizzabile per passare dalle analisi lineari alle corrispondenti analisi non lineari dei dissipatori fluido-viscosi; Le analisi dinamiche lineari si sono rivelate coerenti con le risposte time-history non lineari, con un comportamento generalmente in favore di sicurezza;
- La procedura di Silvestri, originariamente formulata per controventi dissipativi interni ai telai, si è dimostrata applicabile anche agli esoscheletri, mantenendo la stessa logica progettuale;
- L'algoritmo genetico sviluppato è risultato efficace nell'individuare la configurazione ottimale dell'intervento, combinando distribuzione degli esoscheletri, dimensionamento delle sezioni e parametri dissipativi;
- Dal confronto con gli esoscheletri rigidi è emerso che le soluzioni dissipative consentono riduzioni delle sezioni e del numero di moduli necessari, a parità di prestazione, rendendo l'intervento più conveniente dal punto di vista economico;
- Le analisi non lineari finali hanno confermato la coerenza tra il modello semplificato e il comportamento reale del sistema dotato di dissipatori.

Futuri sviluppi

Il presente elaborato si è basato su un procedimento di predimensionamento di natura pratica, finalizzato alla progettazione di un sistema di dissipatori integrato all'interno degli esoscheletri. Il vantaggio principale di tale approccio consiste nella rapidità di progettazione, che permette di dimensionare in maniera speditiva sia gli esoscheletri sia i dispositivi di dissipazione.

Questa procedura presenta tuttavia alcune limitazioni direttamente connesse alle ipotesi alla base del metodo di Silvestri, impiegato all'interno dell'ottimizzatore. In particolare:

- Regolarità dell'edificio. La regolarità in elevazione è fondamentale poiché collegata all'ipotesi, correlata, di adottare dissipatori con caratteristiche costanti lungo tutta l'altezza dell'esoscheletro.
- Dissipatori omogenei in elevazione. La procedura presuppone che i dispositivi abbiano proprietà uniformi sui vari impalcati.
- Strutture con periodi inferiori a 1.5 s. Tale condizione risulta ampiamente soddisfatta per le tipologie strutturali normalmente interessate da interventi tramite esoscheletri.

Tra questi tre aspetti, l'ambito che si presta maggiormente a sviluppi futuri riguarda la possibilità di variare la distribuzione dei dissipatori lungo l'elevazione. L'integrazione di una procedura basata sugli autovalori permetterebbe infatti di attribuire caratteristiche differenziate in altezza. Il metodo di Silvestri mantiene il vantaggio della semplicità, essendo immediato da applicare e richiedendo unicamente l'analisi modale della struttura di base.

Un potenziale approccio per diversificare la distribuzione dei dissipatori, già proposto in letteratura, è quello di Mazza [12]. La procedura, basata sugli autovettori, prevede una preliminare analisi statica non lineare (pushover) della struttura di base, finalizzata alla definizione della curva tagliante-spostamento del piano di copertura (V_F-d). Sulla base del periodo fondamentale della struttura (T_1) e del relativo

autovettore (ϕ_1) , è possibile ricondurre la risposta a un sistema equivalente ad un grado di libertà e determinare un performance displacement (d_p^*) .

La procedura riportata in [12] richiede un doppio ciclo iterativo, a partire da valori ipotizzati di rapporto di massa e rigidezza. Questa formulazione, per quanto efficace, non consente un'immediata integrazione nell'algoritmo genetico nella sua forma attuale, pur costituendo un'interessante direzione per futuri sviluppi. L'output finale, ottenuto al termine del doppio ciclo, è l'espressione del coefficiente di smorzamento non lineare di ciascun dissipatore, per ogni livello della struttura (8.1):

$$C_{NL,tot_j} = \frac{(2\pi)^{3-\beta}, (d_p)^{1-\beta}, \xi_{v,DB}}{(T_{1,DEXF})^{2-\beta}} \cdot \frac{S_j \cdot \sum_{i=1}^n (m_{i,DEXF}, \phi_i^2)}{\lambda \cdot \sum_{i=1}^n [S_i, f_i^{1+\beta}, (\phi_i - \phi_{i-1})^{1+\beta}]}, \quad j = 1, \dots, n \quad (8.1)$$

dove:

- β è l'esponente della legge esponenziale del dissipatore;
- d_p è il performance displacement della struttura di base, valutato sulla curva taglio-spostamento della struttura reale e non sul sistema equivalente ad un grado di libertà;
- $\xi_{v,DB}$ è il rapporto di smorzamento equivalente corrispondente a d_p ;
- $T_{1,DEXF}$ è il periodo fondamentale del sistema accoppiato esoscheletro dissipativo (DEX)–telaio (F);
- $S_j = \sum_{i=j}^n (m_{i,DEXF}, \phi_i)$;
- $m_{i,DEXF}$ è la massa dell'i-esimo impalcato;
- ϕ_i è l'autovalore relativo al modo fondamentale e al piano considerato;
- $\lambda = 2^{2+\beta} \frac{\Gamma^2(1+\frac{\beta}{2})}{\Gamma(2+\beta)}$, con Γ funzione gamma di Eulero;
- f_i è il fattore di amplificazione dei dissipatori, variabile in funzione della loro configurazione.

Inoltre, come sviluppi futuri della ricerca, risulta interessante migliorare l'accuratezza delle analisi implementate all'interno del processo di ottimizzazione, superando i limiti dell'analisi dinamica lineare attraverso tecniche di "surrogate modelling". Queste tecniche richiedono di condurre una fase di "training" su un campione limitato, ma rappresentativo di possibili configurazioni strutturali tipo, ai fini dell'individuazione di un pattern utile per la generazione di nuove configurazioni strutturali. Tale fase di "training" verrà effettuata tramite analisi in time history. Con i risultati di questa fase di "training" si avrà il punto di partenza per una predizione a basso onere computazionale di nuovi individui generati artificialmente sulla base del "dataset" accuratamente selezionato e successivamente analizzato. Le perdite di accuratezza nella modellazione del comportamento dissipativo verranno così superate.

Capitolo 9

Bibliografia

- [1] Janine M Benyus. Biomimicry: Innovation inspired by nature. *Morrow New York*, 1997.
- [2] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers, 2013.
- [3] Gianmaria Di Lorenzo, Eleonora Colacurcio, Agustina Di Filippo, Antonio Formisano, Alfredo Massimilla, and Raffaele Landolfo. State-of-the-art on steel exoskeletons for seismic retrofit of existing rc buildings. *International Journal*, 37(1-2020), 2020.
- [4] Gianmaria Di Lorenzo, Roberto Tartaglia, Alessandro Prota, and Raffaele Landolfo. Design procedure for orthogonal steel exoskeleton structures for seismic strengthening. *Engineering Structures*, 275:115252, 2023.
- [5] Gianmaria DI LORENZO, Colacurcio Eleonora, Agustina Di Filippo, Antonio Formisano, Alfredo Massimilla, Raffaele Landolfo, et al. Stato dell’arte sugli esoscheletri in acciaio per il retrofit sismico di costruzioni esistenti in calcestruzzo armato. In *Atti del XXVII Congresso CTA*, volume 1, pages 179–186, 2019.
- [6] A Caverzan, M Lamperti Tornaghi, and P Negro. Taxonomy of the redevelopment methods for non-listed architecture: from façade refurbishment to the

-
- exoskeleton system. In *JRC, Conference and workshop Reports, Proceedings of Safesust Workshop, Ispra, November*, pages 26–27, 2016.
- [7] Sebastiano D’Urso and Bruno Cicer. From the efficiency of nature to parametric design. a holistic approach for sustainable building renovation in seismic regions. *Sustainability*, 11(5):1227, 2019.
- [8] Jana Candelaria Olivo Garcia. Optimization of steel exoskeletons for the seismic retrofit of reinforced concrete structures via genetic programming. 2023.
- [9] Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA). Standards for evaluation of seismic capacity and guidelines for seismic rehabilitation of existing reinforced concrete buildings. Technical report, 1990. Revised 1990 (in Japanese).
- [10] Terri Meyer Boake. *Diagrid structures: systems, connections, details*. Walter de Gruyter, 2014.
- [11] Chiara Passoni, Jack Guo, Constantin Christopoulos, Alessandra Marini, and Paolo Riva. Design of dissipative and elastic high-strength exoskeleton solutions for sustainable seismic upgrades of existing rc buildings. *Engineering Structures*, 221:111057, 2020.
- [12] Fabio Mazza. Dissipative steel exoskeletons for the seismic control of reinforced concrete framed buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(3):e2683, 2021.
- [13] Dr. H. Narendra Adithya G. S., Shankarling S. Mandewali. Seismic energy dissipation: Art of the scenario. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 03, 2016.
- [14] Dr. H. Narendra Adithya G. S., Shankarling S. Mandewali. Seismic energy dissipation: Art of the scenario. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2016.
- [15]
- [16] C Christopoulos and A Filiatrault. *Principles of passive supplemental damping and seismic*. IUSS Press, Pavia, Italy, 2006.

- [17] Stefano Silvestri. Una procedura semplificata per la progettazione sismica di strutture dotate di smorzatori viscosi. *Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni*, 2019.
- [18]
- [19] Iunio Iervolino Roberto Baraschino, Georgios Baltzopoulos. Sulla selezione degli accelerogrammi secondo la circolare applicativa delle ntc18. *Progettazione sismica*, 12, 2019.
- [20]
- [21] Marco de Pisapia. Regolarità in pianta: come evitare un errore del 13
- [22] Jana Olivo; Raffaele Cucuzza; Gabriele Bertagnoli; Marco Domaneschi. Optimal design of steel exoskeleton for the retrofitting of rc buildings via genetic algorithm. *Computers and Structures*, 2024.
- [23] Raffaele Cucuzza; Jana Olivo; Gabriele Bertagnoli; Giuseppe Andrea Ferro; Giuseppe Carlo Marano. Performance-based optimization of steel exoskeletons: An alternative approach to standard regulations. *Journal of Building Engineering*, 2025.
- [24] M.J.N. Priestley. Displacement-based approach to rational limit states design of new structures. 1998.
- [25] Ahmed Ghobarah. On drift limits associated with different damage levels. 28, 2004.
- [26] Raffaele Cucuzza. *Innovative Computational Techniques and Constructability Issues for the Optimum Structural Design of Steel Structures*. PhD thesis, Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, 2023.
- [27] A. Kashani; C. Camp; M. Rostamian; K. Azizi; and A. Gandomi. Population-based optimization in structural engineering: a review. *Artificial Intelligence Review*, 2022.
- [28] John H. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1992.

-
- [29] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, pages 1942–1948, 1995.
 - [30] Zong Woo Geem, Joong Hoon Kim, and G. V. Loganathan. A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. *Simulation*, 76(2):60–68, 2001.
 - [31] E. Rashedi, H. Nezamabadi-Pour, and S. Saryazdi. Gsa: A gravitational search algorithm. *Information Sciences*, 179(13):2232–2248, 2009.
 - [32] R. V. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia. Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3):303–315, 2011.
 - [33] Regione Piemonte. *Prezzario dei Lavori Pubblici*. 2025. Disponibile su: <https://www.servizi.piemonte.it/rsr/servizi-sp/dwd/OperePubbliche/prezzario/2025/pdf/sez01.pdf>.
 - [34] Alexandros A. Taflanidis Ioannis Gidaris. Performance assessment and optimization of fluid viscous dampers through life-cycle cost criteria and comparison to alternative design approaches. *Bull Earthquake Eng*, 2015.
 - [35] EN1993-1-1. *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. The European Union Per Regulation, Brussels, Belgium, 2005.
 - [36] Jana Olivo, Raffaele Cucuzza, Gabriele Bertagnoli, and Marco Domaneschi. Optimal design of steel exoskeleton for the retrofitting of rc buildings via genetic algorithm. *Computers & Structures*, 299:107396, 2024.