UNIVERSITÀ
DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

INFLUENZA DELL'INTERAZIONE PALLET-SCAFFALE NELLA VALUTAZIONE DELLO SMORZAMENTO EQUIVALENTE PER ANALISI SISMICHE

Candidato: Viola Sbaruffati

Relatore: Prof. Ing. Giammaria Gabbianelli
Correlatore: Ing. Bryan Chalarca Echeverri

A.A. 2025/2026

Indice

1 Introduzione generale sulle scaffalature industriali **7**

1.1 Eventi sismici rilevanti 8

1.2 Categorie e configurazioni tipiche delle scaffalature industriali in acciaio 16

1.3 Componenti delle scaffalature industriali in acciaio 28

1.3.1 Elementi strutturali 28

1.3.2 Elementi non strutturali 30

1.4 Processi produttivi per profili in acciaio sagomati a freddo 32

1.5 Profili sagomati a freddo: vantaggi e svantaggi 34

1.6 Evoluzione normativa per le scaffalature industriali in acciaio 35

2 Motivo della tesi e calibrazione del modello **37**

2.1 Progetti di ricerca precedenti 37

2.2 Obiettivo della tesi e approccio metodologico 43

2.3 Calibrazione degli isolatori 45

3 Modellazione e analisi svolte **51**

3.1 Carichi agenti sulla struttura 56

3.2 Confronto dei modelli appartenenti alla modellazione esplicita . . . 57

3.3 Analisi svolte 58

3.4 Smorzamento dei modelli 61

4 Risultati **65**

4.1 Attendibilità dei risultati per il modello con elemento isolatore . . . 65

4.2 Organizzazione dei risultati 67

4.3 Tempo di ritorno 30 anni 69
4.3.1 Profili di accelerazione in direzione X 69
4.3.2 Profili di accelerazione in direzione Y 72
4.3.3 Profili di drift in direzione X 75
4.3.4 Profili di drift in direzione Y 78
4.3.5 Confronto dei risultati 81
4.4 Tempo di ritorno 50 anni 84
4.4.1 Profili di accelerazione in direzione X 84
4.4.2 Profili di accelerazione in direzione Y 87
4.4.3 Profili di drift in direzione X 90
4.4.4 Profili di drift in direzione Y 93
4.4.5 Confronto dei risultati 96
4.5 Tempo di ritorno 98 anni 99
4.5.1 Profili di accelerazione in direzione X 99
4.5.2 Profili di accelerazione in direzione Y 102
4.5.3 Profili di drift in direzione X 105
4.5.4 Profili di drift in direzione Y 108
4.5.5 Confronto dei risultati 111
4.6 Tempo di ritorno 224 anni 114
4.6.1 Profili di accelerazione in direzione X 114
4.6.2 Profili di accelerazione in direzione Y 117
4.6.3 Profili di drift in direzione X 120
4.6.4 Profili di drift in direzione Y 123
4.6.5 Confronto dei risultati 126
4.7 Tempo di ritorno 475 anni 130
4.7.1 Profili di accelerazione in direzione X 130
4.7.2 Profili di accelerazione in direzione Y 132
4.7.3 Profili di drift in direzione X 135
4.7.4 Profili di drift in direzione Y 138
4.7.5 Confronto dei risultati 141
4.8 Tempo di ritorno 975 anni 144
4.8.1 Profili di accelerazione in direzione X 144
4.8.2 Profili di accelerazione in direzione Y 146

4.8.3 Profili di drift in direzione X 148
4.8.4 Profili di drift in direzione Y 150
4.8.5 Confronto dei risultati 152

5 Conclusioni **157**
5.1 Sintesi dei risultati 157
5.2 Limiti e sviluppi futuri 158

Elenco delle figure **161**

Elenco delle tabelle **165**

Capitolo 1

Introduzione generale sulle scaffalature industriali

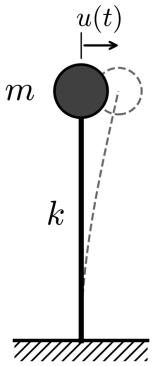
Dalla fine del XVIII secolo, con l'avvento della Rivoluzione Industriale, le esigenze di deposito, organizzazione e trasporto delle merci si sono evolute parallelamente allo sviluppo industriale. La produzione su larga scala e l'introduzione delle catene di stoccaggio hanno determinato la costruzione di magazzini sempre più ampi ed efficienti, caratterizzati dall'impiego delle prime scaffalature in ferro o acciaio, capaci di offrire una maggiore capacità di carico rispetto ai tradizionali scaffali in legno. L'espansione delle reti di distribuzione ha richiesto la progettazione di sistemi più flessibili e adattabili alle diverse esigenze di spazio, portando allo sviluppo delle scaffalature modulari. Queste ultime hanno consentito una gestione più funzionale delle merci e, a partire dagli anni Cinquanta, l'introduzione delle scaffalature porta-pallet ha rappresentato una svolta significativa nel settore dello stoccaggio. Lo stoccaggio verticale ha permesso una disposizione più efficiente dei prodotti e l'ottimizzazione dei flussi di merci all'interno dei magazzini, favorendo la rapida diffusione di tali sistemi che sono divenuti lo standard di riferimento nel settore logistico. L'evoluzione tecnologica ha consentito l'integrazione di sistemi automatizzati nei magazzini, incrementando l'efficienza, la velocità operativa e la precisione dei processi di stoccaggio. Nel contesto industriale attuale, le scaffalature metalliche sono progettate principalmente per ottimizzare lo spazio disponibile e ridurre in modo significativo i tempi di movimentazione delle merci.

Dal punto di vista strutturale, le scaffalature industriali erano inizialmente progettate per resistere principalmente ai carichi gravitazionali verticali generati dal peso delle merci stoccate. Attualmente, tuttavia, si considera anche l'effetto dei carichi orizzontali. Oggi, queste strutture sono realizzate mediante l'assemblaggio di profili in lamiera d'acciaio sottile sagomati a freddo. L'utilizzo di tali sezioni assicura leggerezza strutturale ed elevata flessibilità d'uso. Tuttavia, a causa degli spessori ridotti, in termini di resistenza a flessione e stabilità globale, questi elementi rientrano tipicamente nelle classi 3 o 4 secondo la classificazione dell'Eurocodice 3 [1].
Un aspetto rilevante per i profili sagomati a freddo è l'incrudimento dell'acciaio durante il processo produttivo, che aumenta la tensione di snervamento ma riduce significativamente la duttilità e la capacità di ridistribuzione plastica delle sollecitazioni. Questa limitazione, unita all'elevata snellezza geometrica dei componenti e alla suscettibilità a fenomeni di instabilità locali, globali e distorsionali, conferisce a tali strutture una marcata vulnerabilità alle azioni orizzontali dinamiche, in particolare agli eventi sismici.

1.1 Eventi sismici rilevanti

La vulnerabilità strutturale delle scaffalature industriali, nella maggior parte dei magazzini, non è ancora oggi adeguatamente considerata né affrontata. Spesso, infatti, l'assenza di presidi specifici o di dispositivi di dissipazione sismica porta a gravi danni, che possono spaziare dal collasso locale di singoli elementi strutturali e dalla caduta delle merci fino al danneggiamento dell'involucro edilizio circostante. L'instabilità anche di una sola porzione della struttura può causare, nei casi più estremi, il crollo a catena dell'intero sistema (il cosiddetto "*effetto domino*"), determinando non solo ingenti perdite economiche dovute all'interruzione dell'attività produttiva, ma soprattutto un elevato rischio per l'incolumità del personale presente nel magazzino.
Nel complesso, la risposta dinamica di questo tipo di strutture presenta generalmente un periodo di vibrazione elevato, proprietà riconducibile alla presenza di masse importanti a quote elevate, a fronte di una ridotta rigidezza laterale della struttura portante. Per comprendere questo comportamento è

possibile schematizzare la struttura come un oscillatore a un grado di libertà (rappresentato in figura 1.1), il cui periodo proprio di vibrazione è dato relazione riportata.



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

Figura 1.1: Oscillatore a singolo grado di libertà e formula del periodo

Il periodo di vibrazione risulta direttamente proporzionale alla massa e inversamente proporzionale alla rigidezza; pertanto, un elevato rapporto massa/rigidezza ne amplifica il valore. Un periodo di vibrazione elevato comporta una significativa flessibilità laterale della struttura, che durante un evento sismico si traduce in ampi spostamenti interpiano e in una marcata suscettibilità agli effetti del secondo ordine (effetti $P - \Delta$). Questi effetti riducono la stabilità globale del sistema e ne accelerano il collasso. Per valutare l'impatto di tali eventi sui sistemi di scaffalature, nei paragrafi successivi saranno analizzati i principali eventi sismici storici che hanno interessato e danneggiato i sistemi di stoccaggio industriale negli ultimi decenni.

Terremoto di Northridge

Il primo caso di studio più significativo sulla vulnerabilità sismica delle scaffalature industriali è quello avvenuto il 17 gennaio 1994 a Northridge. L'evento avvenuto nell'area di Los Angeles ha registrato un terremoto di magnitudo 6.7 e un'accelerazione di picco del suolo (PGA - Peak Ground Acceleration) di circa 0.63g, causando danni sia alle costruzioni civili sia ai sistemi di stoccaggio presenti in magazzini e centri di distribuzione. All'interno di queste strutture

numerose scaffalature in acciaio collassarono o subirono danni rilevanti, con conseguente caduta delle merci, interruzione delle attività logistiche e ingenti perdite economiche.
Questo evento causò inoltre 129 vittime e 22000 sfollati [2], evidenziando sia l'intensità dell'evento sia la necessità di integrare nella progettazione sismica degli edifici industriali la verifica degli elementi non strutturali. Il terremoto di Northridge costituisce un importante riferimento storico nell'evoluzione dei criteri di progettazione antisismica per i sistemi di stoccaggio industriale, sottolineando anche la necessità di comprendere il comportamento dinamico delle scaffalature[3].



Figura 1.2: Danni alle scaffalature del *Home Depot* di Santa Clarita durante il sisma [3].



Figura 1.2: Danni alle scaffalature del *Home Depot* di Santa Clarita durante il sisma (continua).

Terremoto di Christchurch

Un altro caso significativo nell'ambito delle scaffalature industriali è la sequenza sismica avvenuta tra il 2010 e il 2012 nella regione di Canterbury, nell'Isola Sud della Nuova Zelanda.
Durante questo periodo, infatti, sono stati registrati due eventi rilevanti: il terremoto di Darfield del 4 settembre 2010, di magnitudo 7.1, e la scossa di Christchurch del 22 febbraio 2011, di magnitudo 6.2.
Il secondo, nonostante la magnitudo minore, fu più severo in termini di danni e vittime principalmente per due fattori. Il primo è dovuto alla vicinanza dell'area urbana dall'epicentro, mentre il secondo è dovuto alle elevate accelerazioni registrate al suolo. Questa successione provocò ingenti perdite umane ed

economiche, con un forte impatto anche sul settore industriale e coinvolgendo i sistemi di stoccaggio presenti nei magazzini. I fenomeni che portarono al collasso delle scaffalature in acciaio furono molteplici. Si osservarono criticità nei collegamenti tra correnti e montanti, fenomeni di instabilità locale dei montanti, inadeguatezza delle piastre di base, attivazione di meccanismi di piano debole in entrambe le direzioni orizzontali e ribaltamento dei pallet [4].
Le conseguenze registrate resero evidente la necessità di analizzare più a fondo la vulnerabilità sismica dei sistemi di immagazzinamento, al fine di sviluppare criteri progettuali in grado di tenere conto degli eventi sismici e di rendere le strutture più sicure.



Figura 1.3: Esempi di danni alle scaffalature industriali [4].

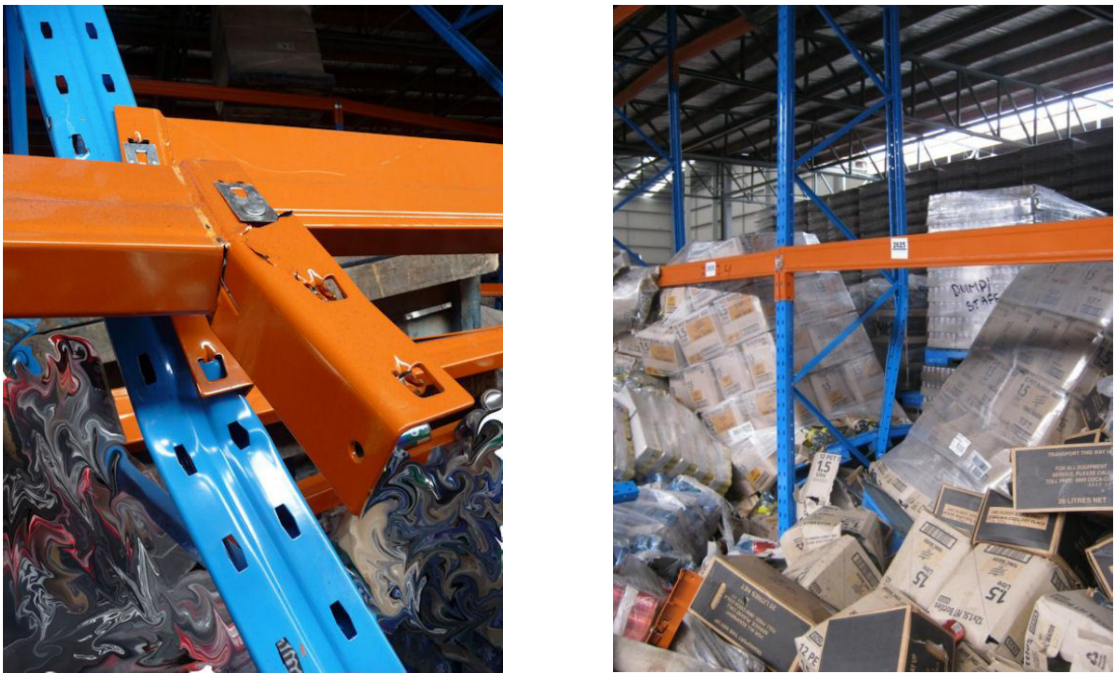


Figura 1.3: Esempi di danni alle scaffalature industriali (continua).

Terremoto dell'Emilia-Romagna

In ambito italiano uno dei casi di studio più rilevanti per la comprensione del comportamento dinamico delle scaffalature industriali è rappresentato dalla sequenza sismica dell'Emilia-Romagna del 2012.
Durante l'evento sono state registrate due scosse principali a pochi giorni di distanza l'una dall'altra. La prima è avvenuta il 20 maggio 2012 con una magnitudo di 6.0; mentre la seconda è avvenuta il 29 maggio con una magnitudo di 5.8.
Durante questo sisma, 27 persone hanno perso la vita e la zona di interesse, caratterizzata non solo da centri abitati ma anche da numerose infrastrutture e attività produttive, ha subito ingenti danni. Quest'area, nota per la presenza di imprese agricole, industrie alimentari e attività manifatturiere, subì gravi ripercussioni economiche, in particolare nel settore caseario, dove, a causa del crollo di numerose scaffalature in acciaio, si registrarono perdite di 400.000 forme di formaggio, per un ammontare stimato in 150 milioni di euro.

Come nel caso del terremoto di Christchurch, il crollo delle scaffalature può essere attribuito a diverse cause, tra cui ci sono sia carenze progettuali e costruttive sia la mancanza di un'adeguata manutenzione. Tra le motivazioni principali figurano l'assenza o il sottodimensionamento delle piastre di base dei montanti, che hanno compromesso la stabilità della struttura, nonché caratteristiche tipiche delle scaffalature, come la snellezza degli elementi. Si è osservato anche che, in alcuni casi, non solo si superava il carico massimo previsto, ma mancavano anche i dispositivi anticaduta che, lasciando la merce libera di cadere, hanno influenzato la risposta strutturale delle scaffalature[5].
La vicinanza al territorio rende questo evento particolarmente importante, ma, dal punto di vista dei sistemi di stoccaggio, ha evidenziato le possibili criticità delle scaffalature e il loro impatto in ambienti ad alta produttività.





Figura 1.4: Esempi di danni alle scaffalature industriali [6, 7].



Figura 1.4: Esempi di danni alle scaffalature industriali (continua).

Terremoto di Kumamoto

Il terremoto di Kumamoto, che ha interessato l'omonima prefettura sull'isola di Kyushu (Giappone sud-occidentale) nell'aprile 2016, rappresenta un altro evento di rilevante interesse per l'ingegneria sismica. Tale sequenza è stata infatti caratterizzata da due eventi principali a breve distanza temporale: una prima di magnitudo 6.5 (avvenuta il 14 aprile) seguita, dopo sole 28 ore, da un secondo evento di magnitudo 7.3 (avvenuto il 16 aprile).
La gravità di tale sequenza sismica ha messo in luce la vulnerabilità delle scaffalature industriali soggette a scosse ripetute, fenomeno che comporta un accumulo di plasticizzazione e un degrado della rigidezza in assenza del ripristino della capacità dissipativa originaria.
Un esempio rappresentativo di questo fenomeno è il ribaltamento e l'instabilità delle scaffalature all'interno dello stabilimento della Coca-Cola di Kumamoto. In questa sede si sono registrati ingenti danni agli elementi non strutturali e ai sistemi di stoccaggio. Tra le cause si è osservato che lo scorrimento e il moto relativo dei pallet rispetto alla struttura hanno causato il crollo di alcune scaffalature, comportando un'interruzione prolungata dell'attività produttiva e conseguenti perdite economiche rilevanti.
Questa sequenza sismica ha confermato la necessità di analizzare più a fondo

la risposta dinamica dei sistemi di stoccaggio, tenendo conto anche degli effetti cumulativi di più scosse ravvicinate.



Figura 1.5: Danni allo stabilimento della Coca Cola [8].

1.2 Categorie e configurazioni tipiche delle scaffalature industriali in acciaio

I sistemi di stoccaggio industriali rivestono un ruolo centrale nella catena logistica, in quanto rappresentano il punto di transito per tutte le merci commercializzate. Di conseguenza, è essenziale garantire spazi di deposito organizzati e ottimizzati, al fine di assicurare ambienti di lavoro efficienti e sicuri.
La progettazione di tali infrastrutture non può basarsi esclusivamente su soluzioni standardizzate, ma deve considerare molteplici vincoli tecnici e funzionali. Tra questi, si individuano tre elementi fondamentali:

1. **Caratterizzazione del carico (Unità di Carico - UDC)**: è necessaria la valutazione delle proprietà geometriche e meccaniche dei pallet stoccati, i quali costituiscono la massa sismica gravante sulla struttura e determinano le condizioni di vincolo e attrito all'interfaccia con i profili portanti;

2. **Flussi di movimentazione e cicli operativi**: si deve svolgere un'analisi delle dinamiche di carico e scarico e delle sollecitazioni impulsive o da fatica introdotte dai mezzi di movimentazione;

3. **Ottimizzazione spaziale ed esigenze geometriche**: si definiscono le altezze utili, le superfici disponibili e i franchi di sicurezza per l'accessibilità dei macchinari.

Oltre a questi, sono presenti le tipiche limitazioni dovute all'edificio ospitante, come la planarità e la capacità portante della pavimentazione, nonché la presenza di vincoli impiantistici che influenzano la progettazione di alcuni elementi, come le piastre di base o i sistemi di ancoraggio.
La sintesi di tutti i requisiti e delle necessità si traduce nell'impiego di strutture in acciaio componibili, realizzate prevalentemente con profili sagomati a freddo a parete sottile. La progettazione di tali strutture pone particolare attenzione alla regolarità in pianta e in altezza, al fine di ottenere una risposta sismica omogenea, prevenire effetti torsionali o concentrazioni di rigidezza e garantire un'elevata efficienza logistica.
Sono disponibili sul mercato diverse tipologie di scaffalature industriali, caratterizzate da configurazioni e proprietà strutturali differenti. Di seguito si presentano sinteticamente le tipologie più comuni.

Scaffalature porta-pallet

Le scaffalature porta-pallet sono il sistema di stoccaggio più diffuso nel settore logistico grazie anche alla loro versatilità. Dal punto di vista strutturale, si tratta di sistemi a configurazione fissa, composti da spalle verticali (formate da montanti e controventi) collegate da correnti orizzontali, su cui i pallet vengono appoggiati direttamente.
Queste scaffalature vengono generalmente disposte lungo una serie di corridoi

all'interno del magazzino, in modo da consentire l'accesso diretto a ogni unità di carico e garantire la regolarità geometrica, rendendo il sistema adatto a merci eterogenee.
Le scaffalature porta-pallet sono strutture che possono essere montate rapidamente, richiedono una manutenzione minima e si adattano facilmente a diverse esigenze operative. Oltre a essere robuste e in grado di sostenere carichi gravitazionali, anche di merci voluminose, queste strutture si montano rapidamente, richiedono poca manutenzione e si adattano facilmente a esigenze diverse. La possibilità di regolare l'altezza dei livelli di stoccaggio e di ampliare la struttura con l'introduzione di nuovi moduli la rende particolarmente flessibile e adatta a stoccare non solo pallet, ma anche contenitori di pesi e dimensioni differenti, come casse, bidoni e bobine. La facilità di prelievo manuale da questi scaffali, che può essere effettuata anche a livello del suolo, si contrappone alla bassa densità di stoccaggio, inferiore a quella dei sistemi ad accumulo compatti.



Figura 1.6: Scaffalature portapallet [9].

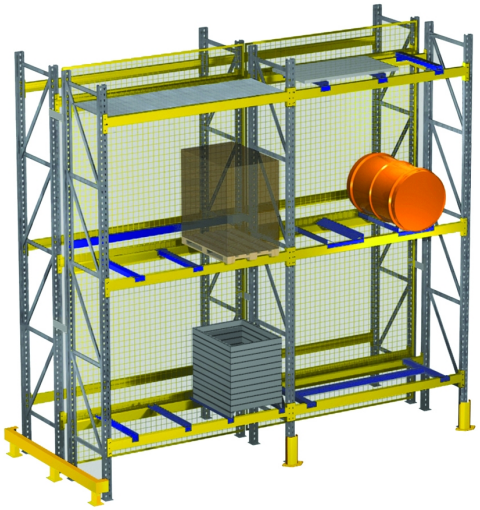


Figura 1.6: Scaffalature portapallet (continua).

Sistemi di stoccaggio intensivo ad accumulo (Drive-in e Drive-through)

Quando l'obiettivo principale è l'accumulo di merce e la massimizzazione dello spazio, le scaffalature porta-pallet possono essere configurate per lo stoccaggio ad alta intensità. Queste strutture permettono di raddoppiare la superficie utile per l'immagazzinamento, eliminando i corridoi di transito standard e creando corsie interne accessibili ai carrelli elevatori per il deposito o il prelievo dei pallet. Sebbene questa soluzione sia molto efficiente in termini di sfruttamento volumetrico, è raccomandata soprattutto per la gestione di grandi quantità di articoli omogenei a bassa o media rotazione. Si distinguono due principali varianti di questi sistemi:

- **Scaffalature Drive-in**: è la configurazione intensiva più diffusa. In questo caso, il carrello accede al canale da un unico punto per depositare il pallet sul fondo del canale. Poiché l'entrata e l'uscita del prodotto avvengono dallo stesso lato, l'ultima unità di carico stoccata risulta necessariamente la prima prelevata, seguendo quindi la logica LIFO (Last In – First Out).



Figura 1.7: Scaffalatura Drive-In [9]

- **Scaffalature Drive-through**: a differenza del tipo precedente, questa struttura consente il passaggio del carrello da entrambi i lati del blocco. Questa particolarità consente alla merce di uscire dal lato opposto a quello di ingresso, seguendo la logica FIFO (First In – First Out). In questo caso, il primo prodotto depositato sarà anche il primo a essere prelevato, rendendo questa soluzione adatta a prodotti che richiedono una rotazione cronologica rigorosa.



Figura 1.8: Scaffalatura Drive-Through[10]

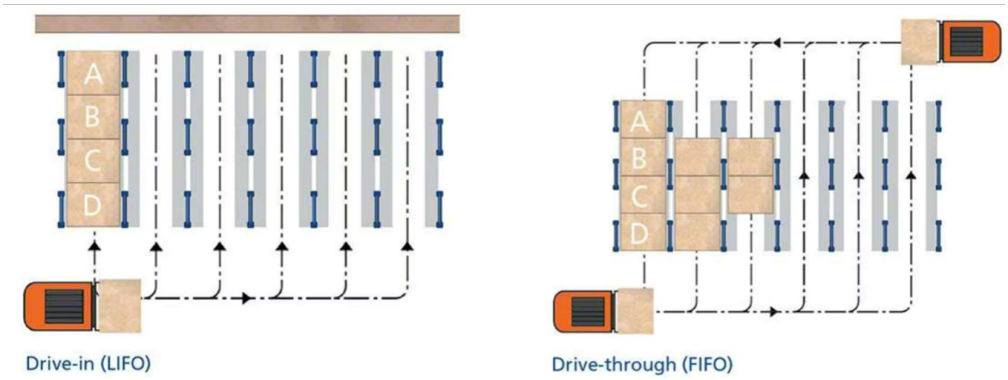


Figura 1.9: Logica LIFO e FIFO [10]

Scaffalature cantilever

Le scaffalature cantilever sono soluzioni progettate appositamente per l'alloggiamento di carichi lunghi, ingombranti o non pallettizzabili, come tubi, profili metallici, travi, pannelli, legname. Per questa tipologia di merci, i sistemi tradizionali con montanti e correnti frontali risultano fortemente limitanti o inadatti, poiché non rispondono alle necessità di contenimento specifiche di tali merci.

Diversamente dalle strutture esposte finora, queste scaffalature si compongono di soli tre elementi portanti: la base, i montanti verticali (ancorati al pavimento) e i bracci orizzontali sporgenti, che fungono da mensole perpendicolari alla colonna di riferimento e su cui i carichi vengono stoccati direttamente. Per garantire la stabilità del sistema e la resistenza alle sollecitazioni orizzontali, generate sia dal peso sia dalla movimentazione delle merci, sono presenti controventi che collegano i montanti tra loro. L'impianto può essere a singolo o doppio fronte a seconda della disponibilità degli spazi e delle esigenze operative, e i bracci sono regolabili per garantire un'elevata flessibilità operativa. In alcuni casi sono presenti anche ulteriori elementi, come i fermi terminali, per prevenire lo scivolamento della merce.

L'assenza di ostacoli strutturali garantisce un accesso libero, ordinato e diretto alla singola unità di carico tramite i corridoi, agevolando le operazioni di deposito e prelievo. Inoltre, per la movimentazione delle merci sono generalmente necessari macchinari specifici, come carrelli elevatori laterali, multidirezionali o gru a

bandiera, scelti in base alle dimensioni e al peso degli elementi da movimentare.

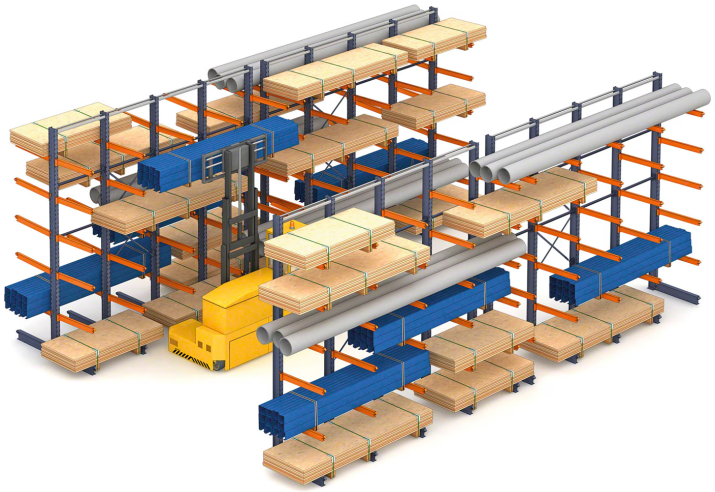


Figura 1.10: Scaffalature cantilever [10]

Scaffalature a ripiani (*picking*)

Le scaffalature a ripiani sono una delle soluzioni più diffuse per l'accesso diretto a merci di peso o ingombro ridotto e non pallettizzate, spesso contenute in contenitori alloggiati sui correnti della scaffalatura. Si tratta di una soluzione composta da una struttura metallica modulare, con montanti verticali ai quali vengono agganciati, imbullonati o incastrati, i ripiani orizzontali, realizzabili in diversi materiali (lamiera metallica, legno, grigliati) e idonei a sostenere carichi leggeri o medi uniformemente distribuiti. L'assenza di correnti frontali e la ridotta altezza interpiano consentono un accesso diretto e agevole al materiale desiderato, senza necessità di spostare temporaneamente altra merce.
Una delle principali caratteristiche di questi sistemi è l'elevata flessibilità: la configurazione modulare consente di regolare e adattare l'interasse tra i ripiani in altezza in base al prodotto da stoccare, rendendo la struttura facilmente riconfigurabile nel tempo.
Nonostante la densità di stoccaggio sia inferiore rispetto ai sistemi a pallet, queste configurazioni garantiscono una maggiore rapidità nelle operazioni di prelievo e,

grazie all'integrazione di scale, passerelle o soppalchi, possono consentire prelievi su più livelli.

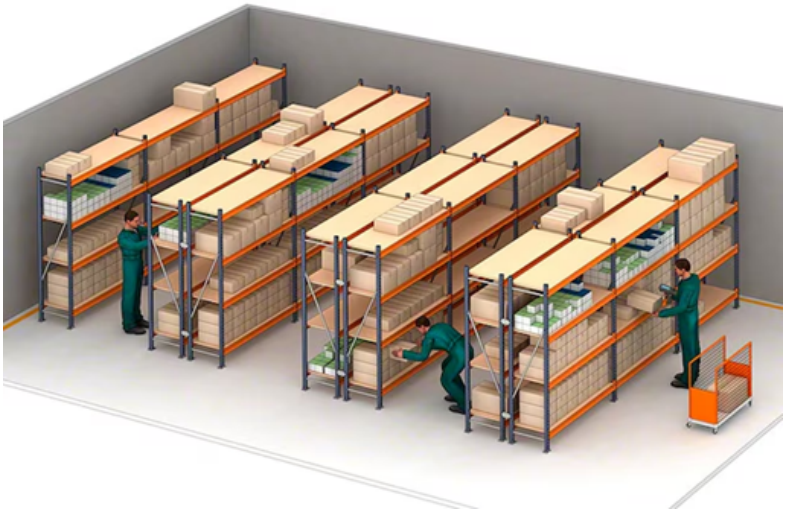


Figura 1.11: Scaffalature a ripiani [10]

Scaffalature *push-back*

Le scaffalature push-back sono una configurazione intermedia tra i sistemi porta-pallet tradizionali e quelli a stoccaggio intensivo e rappresentano il compromesso migliore tra una densità di stoccaggio elevata e una buona semplicità operativa.
La struttura portante è analoga a quella delle scaffalature porta-pallet, su cui vengono installati binari inclinati con ruote o rulliere telescopiche, che consentono di spingere le merci più in profondità man mano che il settore viene caricato.
Il sistema funziona secondo la logica LIFO. Durante la fase di carico, l'inserimento di un nuovo pallet spinge all'indietro quello precedentemente posizionato, facendolo arretrare lungo il piano inclinato; viceversa, in fase di scarico, il prelievo del pallet frontale determina l'avanzamento automatico del carico retrostante verso la posizione di prelievo. Come visto in precedenza, questo meccanismo canalizza tutte le operazioni su un'unica corsia frontale, riducendo significativamente il numero di corsie necessarie rispetto alle scaffalature tradizionali.
I sistemi push-back vengono generalmente utilizzati per merci omogenee per ridurre il rischio di errore e avere una buona gestione delle scorte. Inoltre, il

sistema è compatibile con l'impiego di carrelli elevatori frontali standard, evitando che i mezzi entrino all'interno della struttura e garantendo, di conseguenza, elevati standard di sicurezza operativa rispetto ai sistemi drive-in.

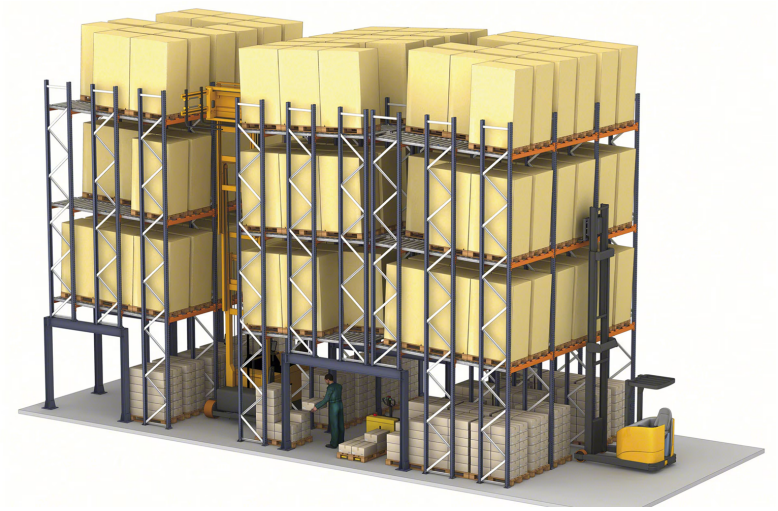


Figura 1.12: Scaffalature push-back [10]

Scaffalature autoportanti

Le scaffalature autoportanti rappresentano un sistema di stoccaggio industriale avanzato in cui la struttura metallica funge anche da elemento portante dell'intero edificio. Per questo motivo, in questa tipologia di configurazione non è presente alcuna struttura edilizia tradizionale separata: le pareti di tamponamento e la copertura sono ancorate direttamente alla scaffalatura stessa, che diventa, a tutti gli effetti, l'ossatura portante del magazzino.
La struttura di queste scaffalature, composta da montanti di grande altezza, collegati da correnti, sistemi di irrigidimento e controventature, si dimensiona non solo in base ai carichi gravitazionali dovuti alle merci stoccate, ma anche in base alla resistenza alle sollecitazioni orizzontali, come vento, neve e sisma. I singoli montanti vengono poi fissati a fondazioni appositamente progettate, che costituiscono il principale sistema di trasferimento dei carichi al suolo.
Dal punto di vista logistico, le scaffalature autoportanti consentono di realizzare magazzini ad elevata altezza (spesso superiori a 20-30 metri), massimizzando

lo sfruttamento del volume disponibile. È possibile scegliere la configurazione più adatta, utilizzando scaffalature porta-pallet, a stoccaggio intensivo o automatizzate, tramite l'uso di sistemi di movimentazione robotizzata.
La progettazione di queste tipologie di strutture è molto complessa perché richiede l'integrazione tra la struttura, gli impianti e l'involucro edilizio. Di pro, questi magazzini offrono un'elevatissima capacità di stoccaggio e un notevole aumento della produttività, a fronte di una superficie occupata in pianta ridotta. Di contro, richiedono investimenti iniziali considerevoli e una pianificazione molto accurata, poiché eventuali modifiche future risultano più onerose rispetto a quelle dei sistemi tradizionali.

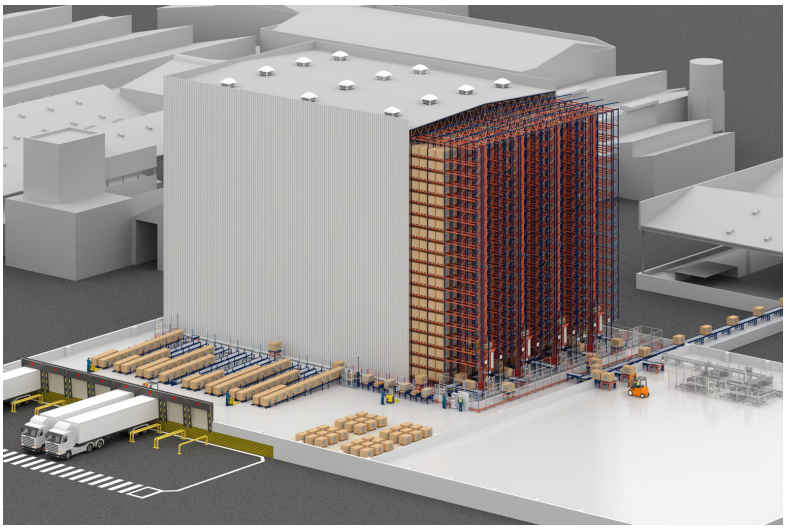


Figura 1.13: Scaffalature autoportanti [10]

Scaffalature a gravità(*Pallet flow*)

La soluzione più efficiente per le merci ad alta rotazione è rappresentata dalle scaffalature a gravità (o pallet flow). Questi sistemi si basano sulla logica FIFO e sono adatti a situazioni in cui è necessario mantenere un ordine cronologico nell'ingresso e nell'uscita dei prodotti, perché consentono alle unità di carico di avanzare automaticamente verso le zone di prelievo grazie all'integrazione di rulliere leggermente inclinate su strutture analoghe a quelle delle scaffalature a gravità. Come spiegato in precedenza, i sistemi FIFO prevedono la separazione

tra le aree di carico e di scarico, riducendo le interferenze operative e migliorando la sicurezza, ottimizzando di conseguenza i flussi logistici. In questo caso, un aspetto a cui è necessario prestare attenzione è lo stato del pallet, che non deve essere troppo danneggiato per garantire uno scorrimento fluido.

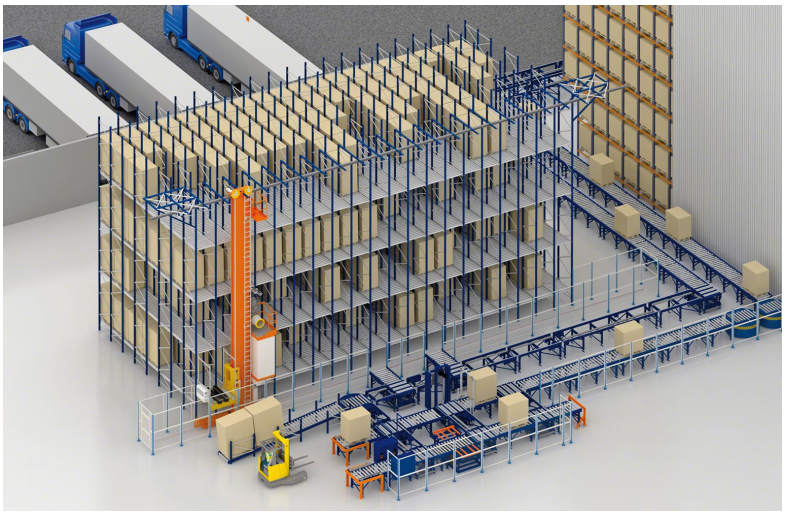


Figura 1.14: Schema di un magazzino con scaffalature a gravità [10].

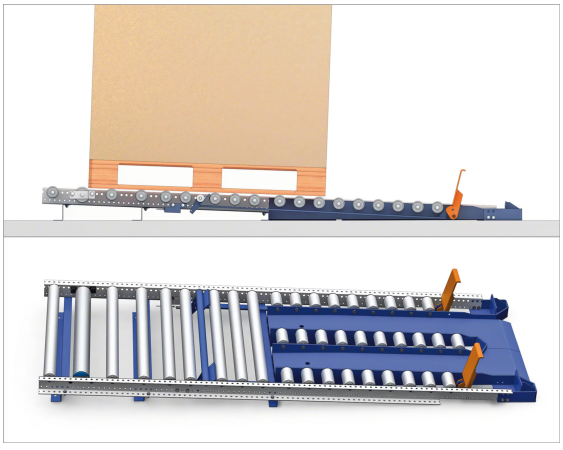


Figura 1.15: Rulliere per i sistemi a gravità [10]

Magazzini Automatici Verticali (MAV)

I Magazzini Automatici Verticali (MAV) assumono un ruolo sempre più rilevante nell'ottimizzazione degli spazi disponibili nei siti di stoccaggio. Essendo sistemi di deposito automatizzati, si sviluppano prevalentemente in altezza, raggiungendo in alcuni casi anche i 50 metri, e consentono una densità di stoccaggio significativamente superiore.
Dal punto di vista strutturale, i MAV sono spesso configurati come strutture autoportanti e quindi progettati per resistere non solo ai carichi verticali, ma anche a quelli orizzontali, come il vento e il sisma.
Dal punto di vista logistico, la movimentazione della merce è automatizzata tramite carrelli trasloelevatori gestiti da remoto e capaci di muoversi sia in verticale sia in orizzontale, consentendo il prelievo e il posizionamento delle unità di carico. Questi sistemi sono estremamente sicuri perché eliminano tutte le operazioni manuali di carico e spostamento delle merci, che vengono invece interamente affidate a sistemi robotizzati. Inoltre, vengono garantite la velocità di esecuzione e l'efficienza del sistema con la riduzione dei tempi di prelievo delle merci.

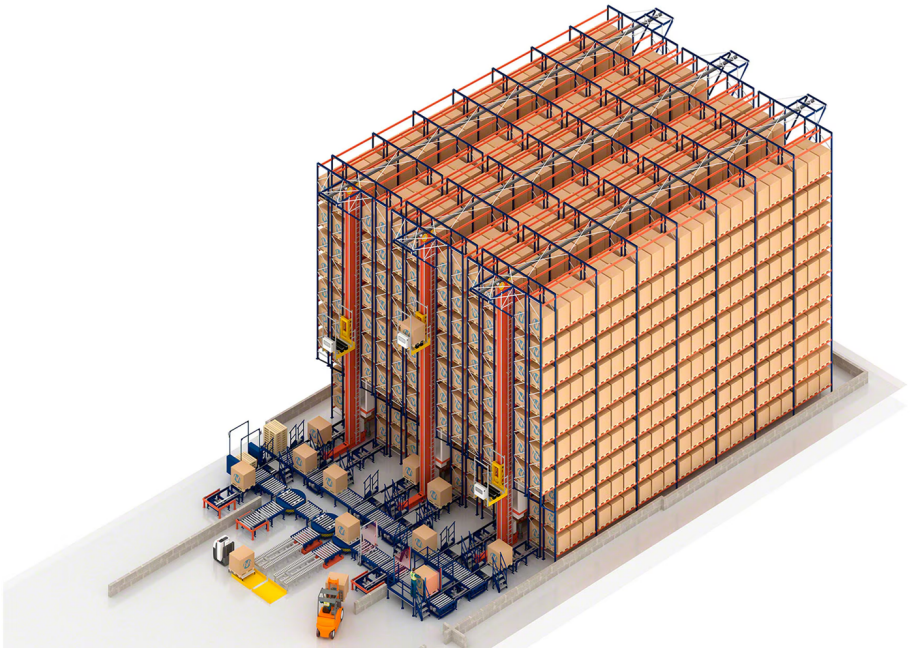


Figura 1.16: Schema di un magazzino con scaffalature autoportanti [10]

1.3 Componenti delle scaffalature industriali in acciaio

Di seguito si illustreranno brevemente gli elementi strutturali e non strutturali che compongono uno scaffale industriale in acciaio.

1.3.1 Elementi strutturali

I principali elementi strutturali sono:

Correnti

I correnti sono elementi metallici che costituiscono l'ossatura orizzontale portante lungo l'asse di sviluppo della scaffalatura. Oltre a fornire un collegamento tra gli elementi della struttura, hanno il compito di sostenere il carico e ripartirlo in modo omogeneo tra i montanti. Per rispondere ai diversi requisiti di carico è possibile adottare sezioni diverse: si possono trovare profili a sezione rettangolare o a doppia

C, chiamati anche *Box* e *Structural Beams*, caratterizzati da un'elevata rigidezza; oppure sezioni piegate a freddo, chiamate *Roll-formed*, pensate appositamente per sostenere i ripiani di stoccaggio tramite gradini interni.

Montanti

I montanti sono gli elementi portanti verticali della struttura e hanno il compito di sostenere e trasferire al suolo i carichi lavorando principalmente a compressione e contrastando, grazie anche ai sistemi di controventamento, le sollecitazioni orizzontali causate da eventi sismici o da possibili urti dovuti alle manovre di carico.
Per questi elementi si utilizzano generalmente sezioni sagomate a freddo, aperte a C o a U, oppure sezioni chiuse in acciaio ad alta resistenza. I montanti sono caratterizzati dalla presenza di forature a distanza regolare lungo tutta l'altezza dell'elemento, per consentire il collegamento di altri elementi, come correnti e diagonali, e garantire la massima flessibilità nella regolazione in altezza dei diversi livelli di stoccaggio in base alle esigenze logistiche. Alla base di ciascun montante è necessaria una piastra di ancoraggio che da un lato viene imbullonata all'estremità inferiore dell'elemento e dall'altra viene fissata al suolo tramite tasselli. Questo elemento risulta essere di particolare importanza perché consente una distribuzione più uniforme delle sollecitazioni e contribuisce a garantire la stabilità della struttura, preservandone l'integrità.

Controventi e traversi

Il sistema di controventamento è costituito da traversi (elementi orizzontali) e diagonali (elementi obliqui), che collegano due montanti adiacenti e che hanno il compito di incrementare la rigidezza e la stabilità della struttura. L'unione di questi elementi crea una vera e propria tralicciatura all'interno della spalla che permette di contrastare gli spostamenti laterali e le deformazioni quando sottoposta a carichi sia verticali che orizzontali.
In particolare, i diagonali hanno il compito di assorbire e distribuire le sollecitazioni di trazione e compressione all'interno del telaio; mentre i traversi uniscono orizzontalmente i due montanti per mantenerne l'allineamento. Anche in questo

caso le sezioni sono realizzate in acciaio ad alta resistenza con profili che richiedono sistemi di connessione dedicati, schemi di montaggio e forature apposite già previsti dal costruttore.

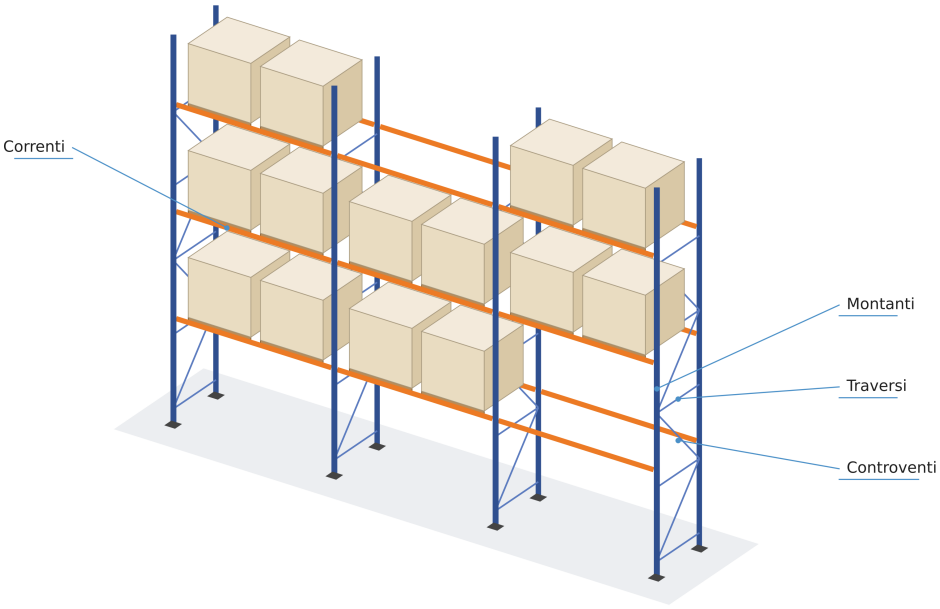


Figura 1.17: Elementi strutturali di una scaffalatura industriale

1.3.2 Elementi non strutturali

In aggiunta agli elementi principali descritti fino ad ora, una scaffalatura può essere integrata con elementi non strutturali e accessori che, pur non contribuendo all'aumento della capacità di carico della struttura, ne influenzano l'operatività, la funzionalità e la sicurezza. nella tabella seguente se ne illustrano alcuni.

Tabella 1.1: Elementi accessori delle scaffalature e relativa funzione

Elemento	**Funzione**
Piastra di spessoramento	La piastra di spessoramento è un elemento utile quando è necessario compensare eventuali irregolarità della pavimentazione in modo da livellare il piano d'appoggio e garantire la stabilità verticale della struttura.
Reti anticaduta	Le reti anticaduta sono dispositivi di protezione composti da reti elettrosaldate d'acciaio poste sui lati delle scaffalature che affacciano verso zone di passaggio o postazioni di lavoro per evitare la caduta delle merci.
Ripiani e supporti	I ripiani costituiscono i veri piani di appoggio per la merce non pallettizzabile o per i pallet danneggiati, ma non sostituiscono in alcun modo i correnti come elementi portanti principali. Si tratta infatti di elementi secondari che permettono la trasmissione dei carichi dati dagli articoli stoccati verso i correnti. Possono essere in rete metallica, legno o lamiera.
Paracolpi e protezioni dei montanti	I paracolpi (o protezioni per montanti) sono elementi installati alla base delle colonne, il cui compito è quello di preservare la struttura da impatti accidentali causati dai mezzi di movimentazione, evitando possibili danneggiamenti strutturali.

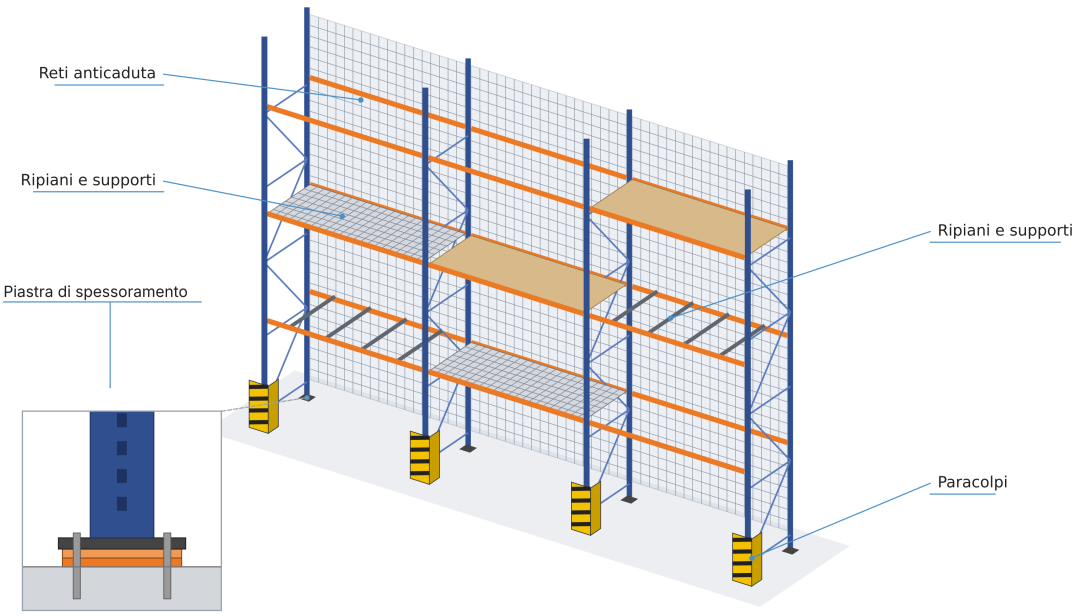


Figura 1.18: Elementi non strutturali di una scaffalatura industriale

1.4 Processi produttivi per profili in acciaio sagomati a freddo

I profili sagomati a freddo (CFS, Cold-Formed Steel) vengono utilizzati per gli elementi portanti delle moderne scaffalature industriali nei sistemi di stoccaggio. Tali elementi garantiscono un elevato rapporto tra resistenza e peso proprio, leggerezza e versatilità ottenibili per costi di produzione contenuti. A differenza delle sezioni laminate a caldo, la cui formatura avviene ad alte temperature, i profili CFS sono realizzati mediante deformazione meccanica a temperatura ambiente di nastri d'acciaio con spessori tipicamente millimetrici. Il ciclo produttivo tipico dei profili sagomati a freddo si articola in cinque fasi, la prima delle quali prevede la pulizia delle bobine di acciaio laminato a caldo per preparare la superficie alle fasi successive. La seconda fase è la laminazione a freddo durante la quale il nastro trattato passa all'interno di gabbie di laminazione per ridurne lo spessore. Successivamente si svolge una ricottura dell'acciaio ad alta temperatura, seguita

da una fase di calibrazione finale per garantire la planarità della lamiera ed eliminarne i difetti superficiali. L'ultima fase prevede la creazione di strisce di larghezza opportuna alla piegatura mediante rulli per la formazione della sezione, che seguono la foratura e il taglio degli elementi con la lunghezza richiesta [11].

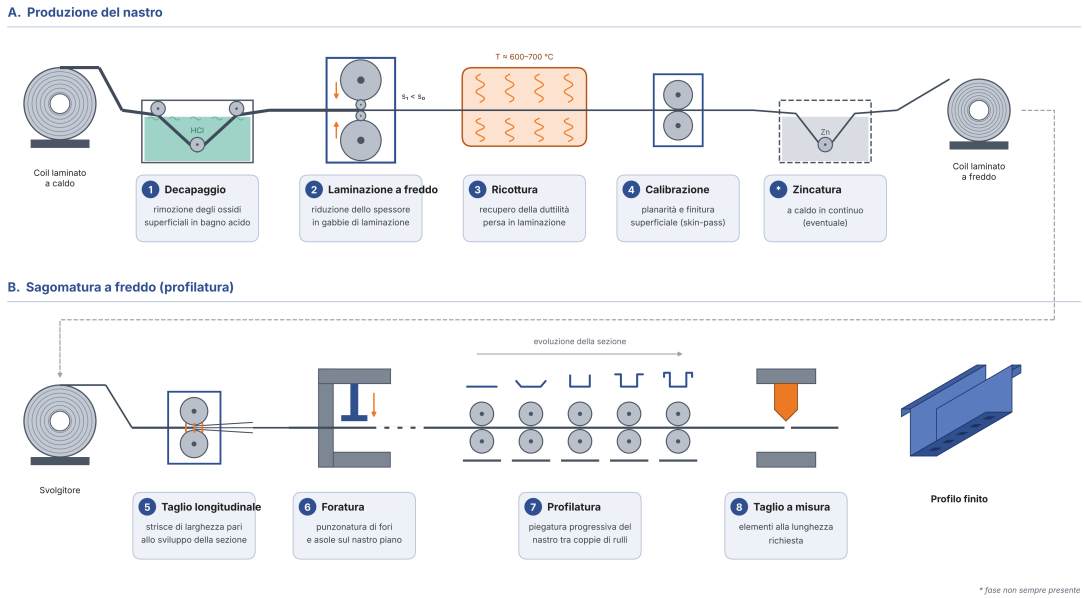


Figura 1.19: Tipico processo produttivo per una sezione formata a freddo

Uno degli aspetti a cui prestare maggiore attenzione nei profili sagomati a freddo è la deformazione plastica che avviene durante la piegatura. Questa fase, infatti, comporta delle modificazioni microstrutturali che generano incrudimento. Tale fenomeno comporta una distribuzione disomogenea delle caratteristiche meccaniche lungo la sezione: in particolare, nelle zone adiacenti alle pieghe o agli spigoli si trova un incremento della tensione di snervamento, della resistenza a trazione e della durezza che fa però fronte alla diminuzione della duttilità e della riserva plastica dell'elemento, in gran parte dissipata durante il processo produttivo.

1.5 Profili sagomati a freddo: vantaggi e svantaggi

Nel seguente paragrafo si riporta un elenco riassuntivo dei principali vantaggi e criticità dei profili formati a freddo con riferimento al loro utilizzo nelle strutture analizzate, cioè le scaffalature porta-pallet.
Gli aspetti positivi sono:

- Elevato rapporto resistenza-peso ed efficienza sezionale: la formatura dei CFS consente di realizzare sezioni a parete sottile con particolari funzionali (per esempio rilievi o nervature di irrigidimento), che ottimizzano i momenti d'inerzia e i moduli di resistenza rispetto all'area della sezione, permettendo di ridurre l'entità delle forze sismiche d'inerzia agenti sulla struttura.

- Incremento locale delle proprietà meccaniche: il processo di sagomatura incrudisce il materiale, determinando in corrispondenza degli spigoli e delle pieghe un incremento della tensione di snervamento e della resistenza a trazione.

- Elevata accuratezza dimensionale e flessibilità geometrica: il roll forming garantisce un'elevata tolleranza geometrica, ripetibilità industriale e la possibilità di sagomare profilati a sezione aperta con forature e passo di punzonatura personalizzati.

- Industrializzazione e sostenibilità logistica: la continuità del processo produttivo garantisce un'efficienza elevata, insieme alla leggerezza dei componenti che ne assicura la facilità di movimentazione.

Le criticità sono:

- Riduzione della duttilità e della riserva plastica: la deformazione plastica che viene accumulata durante la piegatura raggiunge la capacità deformativa dell'acciaio nelle zone d'angolo, riducendo quindi la duttilità locale del materiale e limitando la capacità dissipativa dell'elemento sotto azioni sismiche cicliche.

- Elevata suscettibilità ai fenomeni di instabilità: lo spessore ridotto degli elementi rende gli elementi a parete sottile fortemente suscettibili a fenomeni di instabilità locale, distorsionale e globale.

- Sensibilità alle imperfezioni e ai danneggiamenti meccanici: la risposta strutturale è fortemente condizionata dalla presenza di imperfezioni sia geometriche che di montaggio. Lo spessore ridotto rende i montanti sensibili anche ad urti accidentali, che comportano la diminuzione della capacità portante.

- Vulnerabilità alla corrosione in assenza di protezione: rispetto ai profili laminati a caldo che presentano spessori maggiori, le sezioni CFS presentano un maggiore rischio di corrosione.

- Limitazioni nei campi di applicazione: i CFS non sono adatti all'impiego in strutture massicce o in presenza di carichi concentrati di grossa entità.

1.6 Evoluzione normativa per le scaffalature industriali in acciaio

Per lungo tempo le scaffalature industriali sono state progettate senza regolamentazioni specifiche perché considerate come attrezzature piuttosto che come vere e proprie strutture. La loro costruzione si basava su regole di buona pratica e su qualche tentativo di adattamento delle normative per le costruzioni in acciaio che non prevedevano però verifiche specifiche per elementi con profili sagomati a freddo, con forature diffuse e collegamenti semirigidi.
Il primo passo verso la creazione di un documento normativo si deve alla *Fédération Européenne de la Manutention* (FEM), che ha pubblicato raccomandazioni tecniche, prima sulla progettazione statica delle scaffalature porta-pallet (FEM 10.2.02) e successivamente sulla progettazione sismica (FEM 10.2.08), che per anni sono state il riferimento principale in ambito europeo. La parte di progettazione statica è confluita nella norma europea UNI EN 15512:2009 che fissava i principi della progettazione delle scaffalature ma trascurava le azioni sismiche. Per questo motivo, nel 2010 in Italia è stata pubblicata la specifica tecnica UNI/TS 11379 che, insieme alle indicazioni FEM 10.2.08, regolava la componente sismica della progettazione.
Tramite lo sviluppo di progetti dedicati, tra cui SEISRACKS e SEISRACKS2,

sono state condotte campagne sperimentali e numeriche che hanno indagato diversi aspetti delle risposte sismiche delle scaffalature, come l'interazione tra unità di carico e struttura o il comportamento dei collegamenti.
Questi studi hanno contribuito allo sviluppo della normativa europea UNI EN 16681:2016, specifica per la progettazione sismica delle scaffalature in acciaio. Le normative europee attualmente vigenti sono, oltre alle EN 15512 (aggiornata nel 2022) e EN 16681:

- UNI EN 15620 che riguarda tolleranze, deformazioni e interspazi
- UNI EN 15635 che fornisce indicazioni sul corretto utilizzo, la manutenzione e le ispezioni richieste
- UNI EN 15878 che definisce le terminologie tecniche
- UNI EN 15095 che tratta i sistemi mobili e quelli automatici

Queste norme sono recepite in Italia e affiancano le seguenti norme nazionali:

- UNI 11575 sulle scaffalature drive-in e drive-through
- UNI 11598 sulle scaffalature cantilever
- UNI 11731 sulla gestione degli elementi danneggiati

A tutte queste si affiancano anche le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 con la relativa Circolare applicativa del 2019 che contengono i riferimenti per la definizione delle azioni sismiche e le verifiche delle strutture, in particolare quando la scaffalatura stessa costituisce una parte strutturale, come nel caso dei magazzini autoportanti. [CITAZIONE, HO IL SITO DA CUI HO PRESO LE INFO MA NON MI RICORDO IL SITO PER CREARE LE CIT]

Capitolo 2

Motivo della tesi e calibrazione del modello

2.1 Progetti di ricerca precedenti

Il progetto di ricerca europeo **SEISRACKS** (*Storage Racks In Seismic Areas*), sviluppato tra dicembre 2004 e giugno 2007, è il punto di partenza per lo studio del comportamento sismico delle scaffalature metalliche porta-pallet. L'obiettivo del progetto era infatti colmare il vuoto tecnico-normativo legato alla mancanza di linee guida ufficiali per la progettazione sismica e alla scarsa conoscenza sulla duttilità globale della struttura, sulle azioni sollecitanti e sul meccanismo di scorrimento dei pallet.

Il progetto si è articolato nei seguenti obiettivi primari:

- approfondire le condizioni di esercizio delle scaffalature e il meccanismo di attrito massa-struttura;
- caratterizzare il reale comportamento strutturale delle scaffalature in campo sismico;
- definire regole di progettazione per le scaffalature in condizioni sismiche.

In particolare, la caratterizzazione sperimentale dello scorrimento dei pallet ha previsto prove statiche su piano inclinato e dinamiche su tavola vibrante, evidenziando i seguenti aspetti chiave:

- **Caratterizzazione dell'attrito statico e dinamico:** le prove condotte nelle direzioni longitudinale (*down-aisle*) e trasversale (*cross-aisle*) su pallet in legno e in plastica hanno mostrato che il coefficiente di attrito varia principalmente in funzione del materiale del pallet e della finitura superficiale delle travi. Per i pallet in legno, la finitura delle travi ha prodotto differenze del 20–30% sull'attrito statico. I pallet in plastica hanno mostrato valori di attrito inferiori (circa 0.2) rispetto a quelli in legno (circa 0.5), e quasi indipendenti dalla finitura.

- **Soglie di accelerazione per lo scorrimento:** dalle prove dinamiche su tavola vibrante sono stati identificati due limiti di accelerazione: una soglia inferiore, al di sotto della quale il pallet rimane fermo per aderenza al corrente, e una soglia superiore, oltre la quale l'accelerazione trasmessa alla massa non aumenta ulteriormente poiché il carico è già libero di scorrere. La soglia superiore è risultata in generale inferiore rispetto al coefficiente di attrito statico.

- **Differenza di comportamento tra le due direzioni strutturali:** la soglia inferiore di accelerazione è risultata pari a 0.1 g in direzione trasversale (*cross-aisle*) e a circa 0.3 g in quella longitudinale (*down-aisle*). In entrambe le direzioni i pallet laterali hanno iniziato a scorrere prima di quello centrale. In direzione trasversale questo è dovuto alla deformazione fuori piano dei correnti, che fa ruotare i pallet vicini ai collegamenti trave-montante. In direzione longitudinale è dovuto all'angolo iniziale prodotto dall'inflessione dei correnti sotto i carichi verticali.

- **Dissipazione di energia e risposta sismica:** le prove dinamiche hanno mostrato che, in condizioni dinamiche severe, lo scorrimento è il fattore principale che governa la risposta della scaffalatura. I cicli di isteresi hanno evidenziato una dissipazione di energia per attrito. Se la caduta dei pallet viene impedita, lo scorrimento può quindi essere considerato una risorsa per la dissipazione globale dell'energia, con un effetto simile a un isolamento, e consente di ridurre le forze orizzontali di progetto.

Nel progetto SEISRACKS è stato studiato l'effetto dello scorrimento dei pallet sulla risposta sismica della scaffalatura. Dalle analisi numeriche è emerso che, se i pallet sono liberi di scorrere, la forza che trasmettono ai correnti è limitata dall'attrito. Parte dell'energia viene quindi dissipata per attrito, e la struttura risulta meno sollecitata rispetto al caso in cui il carico è considerato solidale con essa. Questa riduzione però non è costante: dipende dall'intensità del sisma, dal coefficiente d'attrito e dalla tipologia della struttura, con valori compresi circa tra 0.2 e 1.0. Sulla base di questi risultati è stato proposto di legare la riduzione al rapporto tra accelerazione e coefficiente d'attrito. Parallelamente è stato valutato il rischio di caduta della merce: con attriti bassi gli scorrimenti dei pallet possono raggiungere circa 30 cm. Per questo il progetto raccomanda di adottare dispositivi che impediscano la caduta dei pallet quando si utilizza una riduzione dello spettro.

I risultati di SEISRACKS hanno fornito dati utili alla stesura delle raccomandazioni normative europee FEM 10.2.08, confermando che per ottenere una stima realistica della risposta sismica delle scaffalature è necessario includere le diverse fonti di dissipazione dell'energia, tra cui lo scorrimento delle masse[12, 13].

Per superare i limiti individuati nella prima fase e nelle raccomandazioni FEM 10.2.08, tra il 2011 e il 2014 è stato sviluppato il progetto **SEISRACKS2**. In questa seconda fase sono stati verificati e aggiornati i criteri di progettazione sismica, tra cui i fattori di struttura e i fattori di modifica dello spettro. Tra questi c'è il fattore E_{D1}, che tiene conto dello scorrimento dei pallet e riduce lo spettro insieme al fattore di comportamento q. E_{D1} è espresso in funzione del rapporto tra coefficiente di attrito e accelerazione spettrale. La sua formulazione deriva dal progetto SEISRACKS e prevede che, se lo scorrimento è impedito, E_{D1} sia pari a 1.

Grazie a un'estesa campagna sperimentale e numerica, l'interazione tra pallet e correnti è stata analizzata sia con prove d'attrito sia con modelli analitici. Le prove hanno mostrato che in direzione trasversale il collegamento trave-montante non offre una resistenza a momento significativa, e che la resistenza è governata dall'attrito tra pallet e correnti.

Infine, l'indagine si è concentrata sulle forze orizzontali massime trasmesse ai correnti durante lo scorrimento dei pallet. Poiché il baricentro della massa si trova

sopra i correnti, durante il sisma si genera un momento ribaltante che aumenta il carico verticale sul corrente frontale e lo riduce su quello posteriore. Lo scorrimento inizia quindi sul corrente posteriore, mentre il corrente frontale assorbe la forza orizzontale aggiuntiva. La normativa invece assegna a ciascun corrente metà della forza totale. In questo modo il totale è stimato correttamente, ma la forza sul corrente frontale risulta sottostimata. È stato inoltre verificato che l'attrito dei pallet non riduce in modo significativo la lunghezza di libera inflessione dei correnti nel piano orizzontale, che va quindi assunta pari alla lunghezza del corrente.

I principali esiti della ricerca SEISRACKS2 hanno contribuito allo sviluppo della norma europea EN 16681 del 2016, consolidando i criteri di calcolo per le scaffalature metalliche porta-pallet[1].

Più recentemente, la ricerca si è concentrata invece sulla stima e sul controllo dello scorrimento. Se da un lato il movimento dei pallet limita le forze di inerzia trasmesse alla struttura, dall'altro uno scorrimento eccessivo può causare urti contro gli elementi strutturali o la caduta del carico. Tale criticità è particolarmente accentuata nella direzione ortogonale alle corsie, dove di solito non ci sono elementi che impediscono ai pallet di cadere, e può comportare ingenti perdite economiche e l'interruzione dell'operatività, specialmente nei magazzini automatici ad alta densità.

Fino a quel momento, le sperimentazioni su tavola vibrante volte a caratterizzare l'attrito pallet-trave si limitavano a porzioni ridotte di scaffalatura, trascurando parametri fondamentali della risposta sismica globale quali il periodo fondamentale di vibrazione, il contributo dei modi superiori e lo sfasamento della risposta dinamica tra i diversi livelli di carico. Inoltre, nei codici normativi veniva considerato esclusivamente l'effetto favorevole dello scorrimento sulle forze inerziali mediante la riduzione dello spettro di risposta, senza tuttavia fornire formulazioni analitiche dirette per stimare l'entità dello spostamento relativo, se non ricorrendo a complesse e onerose analisi dinamiche non lineari (*Time-History*).

Per colmare tale lacuna, un primo studio si è posto l'obiettivo di sviluppare una metodologia semplificata, compatibile con i quadri normativi vigenti, per valutare lo scorrimento dei pallet in direzione trasversale. Sulla base di estesi set di analisi parametriche non lineari condotte su molteplici configurazioni di scaffali, è stata proposta l'equazione empirica di previsione dello scorrimento denominata **ESPE**

(*Empirical Sliding Prediction Equation*). Tale formulazione è stata concepita per consentire un calcolo di prima approssimazione ed evitare l'esecuzione di analisi non lineari. La procedura è stata validata analizzando tre casi studio reali dotati di caratteristiche strutturali eterogenee e si articola in un algoritmo a cinque fasi utile per ricavare il profilo di scorrimento lungo l'altezza della scaffalatura in funzione della tipologia strutturale, della misura di intensità sismica (IM) e del livello di confidenza desiderato.

Dall'applicazione della formulazione ESPE sono emerse le seguenti evidenze[14]:

- **Misura di intensità e coefficiente di attrito:** il miglior indicatore dello scorrimento massimo è l'accelerazione spettrale al periodo fondamentale divisa per il coefficiente di attrito:

$$IM = \frac{S_a(T_1)}{\mu\, g} \tag{2.1}$$

  La PGA invece aumenta molto la dispersione dei risultati e non è consigliata. A parità di IM, lo scorrimento normalizzato rispetto a μ resta costante al variare del coefficiente di attrito.

- **Parametri di influenza primari:** lo scorrimento è fortemente condizionato dal numero di livelli di carico, dal rapporto di rigidezza e massa tra l'ultimo livello e il primo e dal periodo fondamentale della struttura (T_1).

- **Distribuzione dello scorrimento lungo l'altezza:** lo scorrimento massimo si verifica quasi sempre all'ultimo livello di carico. La forma del profilo cambia con l'intensità sismica: per intensità basse ha un andamento a S, per intensità elevate diventa esponenziale. Alla luce delle evidenze ottenute, si raccomanda l'impiego della stima media dello scorrimento, corrispondente a un livello di confidenza compreso tra il 55% e il 65%.

Contestualmente a questo studio teorico, è stato sviluppato il progetto europeo **ERIES-RACKSLIDE**, con l'obiettivo di contribuire all'aggiornamento della normativa europea per la progettazione sismica delle scaffalature mediante lo sviluppo di metodologie per la stima e la mitigazione dello scorrimento dei pallet. Il progetto ha adottato un approccio integrato numerico-sperimentale: le storie

temporali di spostamento, velocità e accelerazione ai diversi livelli di piano, ricavate da simulazioni numeriche, sono state applicate alla tavola vibrante 9DLAB della fondazione **EUCENTRE**, consentendo un confronto diretto tra le risposte sperimentali e le previsioni numeriche.

La campagna sperimentale ha riguardato due configurazioni rappresentative: un magazzino autoportante automatico e una scaffalatura porta-pallet di tipo convenzionale. L'interazione dinamica pallet-struttura è stata analizzata mediante prove statiche d'attrito e dinamiche (monoassiali e biassiali), perseguendo cinque obiettivi principali:

1. valutare lo scorrimento dei pallet in funzione della tipologia strutturale e dell'altezza del livello di carico;

2. verificare l'accuratezza del fattore E_{D1} previsto dalla EN 16681 per la riduzione dello spettro di risposta;

3. calibrare modelli numerici di contatto in grado di simulare l'interazione struttura-pallet;

4. verificare l'efficacia della strategia di progetto POS (*Plastic Ovalization Strategy*), che sfrutta l'ovalizzazione plastica dei fori dei bulloni delle diagonali per conferire duttilità ai telai trasversali e confinare il danno nei collegamenti;

5. calibrare relazioni empiriche per la stima dello scorrimento da integrare nelle future evoluzioni normative.

I risultati della campagna sperimentale hanno evidenziato la complessità dell'interfaccia di contatto. È emerso che il solo coefficiente di attrito statico potrebbe non bastare a descrivere compiutamente lo scorrimento. Inoltre, le componenti di moto lungo la corsia amplificano lo scorrimento in direzione ortogonale. In accordo con i modelli previsionali, le unità di carico sui livelli superiori hanno registrato gli scorrimenti più elevati. È stata inoltre confermata la dipendenza dello scorrimento dalla posizione del carico, dalla geometria della struttura e dalla finitura superficiale delle travi, in continuità con i risultati dei progetti SEISRACKS e SEISRACKS2. Inoltre, sono stati osservati

danneggiamenti locali nelle travi di luce maggiore a causa dei fenomeni di flessione fuori piano. In conclusione, il progetto ha generato un database sperimentale utile per la calibrazione di modelli analitici e numerici di scorrimento e di danno, volti a incrementare la sicurezza sismica delle scaffalature e a favorire il loro recepimento nelle future normative di settore[15, 16].

2.2 Obiettivo della tesi e approccio metodologico

Il comportamento sismico delle scaffalature industriali porta-pallet si differenzia significativamente da quello delle tradizionali strutture in acciaio. La peculiarità principale risiede nel fatto che le unità di carico non sono rigidamente connesse alla struttura, ma vi sono semplicemente appoggiate e vincolate dall'attrito all'interfaccia tra pallet e corrente. Inoltre, la massa delle merci rappresenta la quasi totalità della massa del sistema, mentre il peso proprio della struttura ne costituisce solo una piccola parte.

Durante un evento sismico, l'interazione dinamica genera complessi fenomeni di natura non lineare, tra cui lo scorrimento e il ribaltamento del pallet. Tali movimenti introducono meccanismi intrinseci di dissipazione dell'energia, limitando le forze d'inerzia trasmesse alla struttura, ma nel contempo comportano un rischio concreto di caduta del carico.

A livello europeo, i risultati di ampi progetti di ricerca (come SEISRACKS e SEISRACKS2) sono stati recepiti dalla norma UNI EN 16681. Questo standard riconosce l'effetto benefico della dissipazione energetica introducendo i fattori di modificazione dello spettro E_{D1} ed E_{D3}. Il fattore E_{D1} tiene conto dello scorrimento dei pallet, mentre il coefficiente di riduzione E_{D3} tiene conto della maggiore dissipazione energetica della struttura caricata. Mentre per la struttura in acciaio scarica si assume uno smorzamento viscoso intrinseco del 3%, l'adozione di un fattore E_{D3} pari a 0.80 per la struttura caricata equivale ad assumere uno smorzamento viscoso convenzionale di circa il 10–11%, rappresentativo dei meccanismi dissipativi dell'intero sistema [1].

In Italia, l'approccio definito dalle Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLP) risulta invece nettamente più cautelativo. Al fine di prevenire il collasso progressivo e sopperire all'imprevedibilità degli scorrimenti,

il documento nazionale prescrive di neutralizzare tali benefici ponendo i fattori E_{D1} ed E_{D3} pari a 1.0. Inoltre, si impone l'adozione di un coefficiente di smorzamento viscoso pari al 5%. L'adozione di valori diversi, comunque non superiori all'8%, è ammessa solo se rigorosamente giustificata dal progettista con evidenze sperimentali.

Questo evidente disallineamento tra la realtà fisico-meccanica del fenomeno e le prescrizioni del codice nazionale italiano costituisce la base del presente lavoro. La tesi si propone di analizzare l'influenza del movimento dei pallet sullo smorzamento, con l'obiettivo di fornire indicazioni su possibili valori più realistici da applicare in fase di progettazione.

La dissipazione energetica causata dall'attrito non è semplice da rappresentare con i metodi di calcolo tradizionali, come l'analisi statica equivalente o gli spettri di risposta elastici con fattori di riduzione. Per superare queste limitazioni, l'obiettivo della ricerca è quantificare il contributo dissipativo derivante dal movimento dei pallet per il caso in esame attraverso un approccio numerico a complessità crescente. Il percorso metodologico si articola nel confronto tra due differenti livelli di modellazione:

1. **Modello a massa fissa:** in questo primo caso i pallet sono rappresentati esclusivamente come masse solidali ai correnti, secondo la prassi normativa;

2. **Modello a scorrimento libero:** i pallet sono modellati esplicitamente consentendone solo lo scorrimento.

Attraverso l'esecuzione di analisi dinamiche non lineari, i risultati in termini di sollecitazione globale e risposte strutturali verranno utilizzati per calibrare quale possa essere l'incremento dello smorzamento viscoso equivalente da applicare al primo modello.

L'intento finale è fornire una stima dello smorzamento aggiuntivo indotto dallo *sliding*, offrendo ai progettisti uno strumento di calcolo semplificato ma consistente, evitando approcci eccessivamente conservativi o antieconomici e rappresentando al meglio il comportamento reale delle strutture. Per il presente lavoro si è proposto un primo step per il raggiungimento di tale obiettivo, tramite l'analisi del caso studio descritto nei paragrafi successivi.

2.3 Calibrazione degli isolatori

Il primo passo dell'analisi numerica ha riguardato la modellazione del comportamento del singolo pallet, con l'obiettivo di comprenderne la risposta allo scorrimento prima di procedere alla modellazione dell'intera scaffalatura. Come riferimento concettuale è stato preso lo studio di Chalarca et al. [**chalarca**], che hanno rappresentato il pallet mediante un modello 2D semplificato in OpenSees, costituito da un elemento a lunghezza nulla (*zero-length element*) con le proprietà di un isolatore a scorrimento piano (*flat slider bearing*) collegato rigidamente al baricentro della massa del pallet, posto a un metro di altezza sopra il piano di contatto.

Nel presente lavoro si è scelto di riprodurre lo stesso modello concettuale in SeismoStruct, con l'aspettativa di ottenere una finestra di analisi più ampia (in termini di combinazioni di parametri risolvibili senza problemi di convergenza) e risultati complessivamente più robusti.

Il pallet è stato quindi modellato tramite un elemento non lineare a lunghezza nulla, a cui è stato applicato direttamente un carico in sommità. È stato impiegato un isolatore di tipo *Friction Pendulum System* (Isolator 2), impostando un raggio di curvatura molto elevato, in modo da approssimare un comportamento di puro scorrimento attritivo su una superficie piana, coerente con la fisica del contatto pallet-corrente. A differenza dello studio di riferimento, non è stata riprodotta l'eccentricità verticale tra il punto di scorrimento e il baricentro della massa: la massa è stata applicata direttamente sul nodo dell'isolatore, escludendo quindi l'accoppiamento tra scorrimento orizzontale e ribaltamento che tale eccentricità introdurrebbe, e isolando così l'effetto puro dello scorrimento.

Rispetto allo studio originale è stato limitato il numero di combinazioni: per la presente analisi sono stati infatti assunti due valori del peso del pallet, pari a 5 e 10 kN (rappresentati come un carico verticale applicato in sommità all'elemento e convertiti in massa per l'analisi dinamica); sei valori di rigidezza iniziale, pari a 10, 1 000, 10 000, 100 000, 10 000 000 e 1 000 000 000 kN/mm (tutti quelli usati nello studio) e un coefficiente di attrito pari a 0.3.

All'interno del software si sono definiti due nodi strutturali con le stesse coordinate, uno dei quali è stato vincolato tramite incastro, e un terzo non

strutturale da usare come riferimento dell'elemento. I due nodi strutturali sono stati collegati tra loro tramite l'elemento Isolator 2 definito sopra.

È stato quindi applicato sul nodo libero il carico verticale e su quello incastrato l'accelerazione indotta dal sisma. Sono state poi condotte analisi dinamiche non lineari di tipo *Time-History*, utilizzando i 44 accelerogrammi monodirezionali del set FEMA al secondo livello di intensità, già impiegati nello studio di riferimento. Questo set, noto come *FEMA P-695 far-field ground motion set*, è composto da 44 registrazioni accelerometriche orizzontali relative ad eventi sismici storici verificatisi in diverse parti del mondo [17].

Già dai primi risultati ottenuti da queste analisi è emersa un'incongruenza, sia rispetto ai dati dello studio di riferimento, sia rispetto all'andamento atteso per il fenomeno fisico reale. Si è quindi ipotizzato che la causa fosse da ricercare nell'assenza di una relazione tra la rigidezza dell'isolatore e il carico applicato, ovvero nel fatto che i due parametri fossero stati imposti in maniera indipendente l'uno dall'altro.

Per verificare tale ipotesi, si è deciso di fissare non più la rigidezza in valore assoluto, bensì il rapporto rigidezza/carico (k/P), assumendo per quest'ultimo i valori 5000, 500, 75, 50, 25 e 10, in modo da coprire un ampio intervallo di possibilità. Da questa fase in avanti, i pesi utilizzati sono di 2.5 e 10 kN. Le analisi di calibrazione sono state condotte sulle combinazioni di massa, rapporto k/P e rigidezza corrispondenti riportate in Tabella 2.1.

L'obiettivo di questa fase di calibrazione era individuare per quali valori del rapporto k/P il modello fornisse risposte numericamente stabili e confrontabili con i risultati dello studio di riferimento. Le grandezze principalmente monitorate sono state lo spostamento e l'accelerazione, affiancate dalla velocità. I risultati ottenuti sono riportati nelle Figure 2.1 e 2.2, relativi a spostamento e accelerazione per i due pesi considerati, al variare della rigidezza.

Tabella 2.1: Combinazioni di carico, rapporto k/P e rigidezza adottate nelle analisi di calibrazione.

Caso	Carico [kN]	k/P [1/mm]	k [kN/mm]
1	2.5	5000	12500
2	2.5	500	1250
3	2.5	75	187.5
4	2.5	50	125
5	2.5	25	62.5
6	2.5	10	25
7	10	5000	50000
8	10	500	5000
9	10	75	750
10	10	50	500
11	10	25	250
12	10	10	100

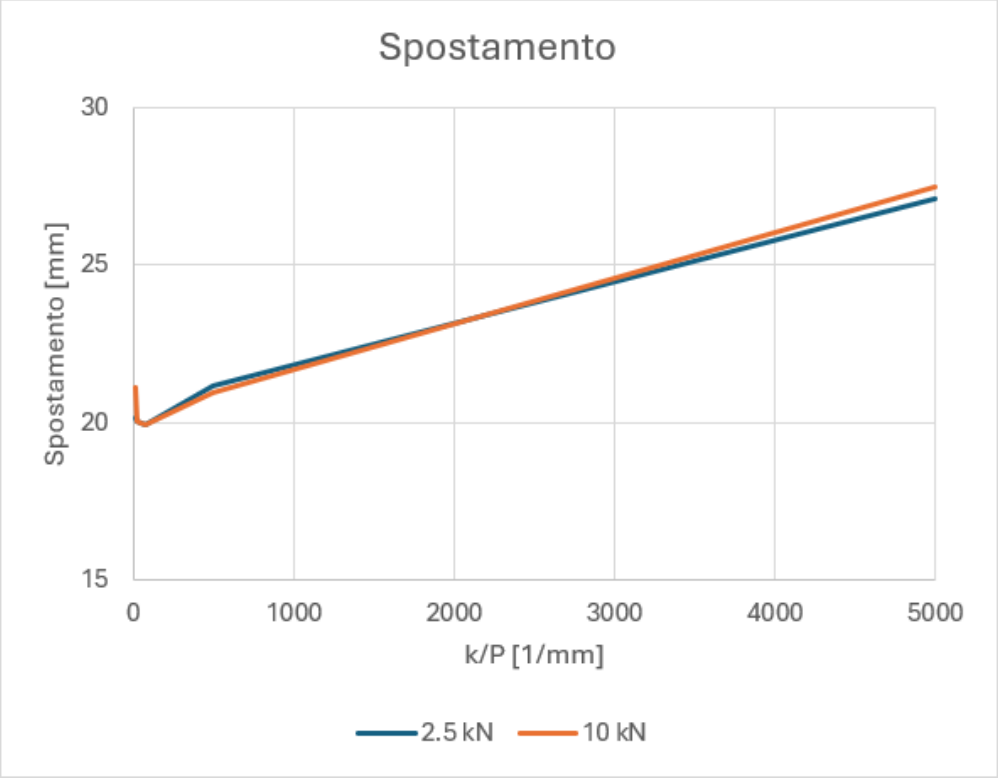


Figura 2.1: Spostamento dell'isolatore al variare del rapporto k/P, per i due pesi considerati.

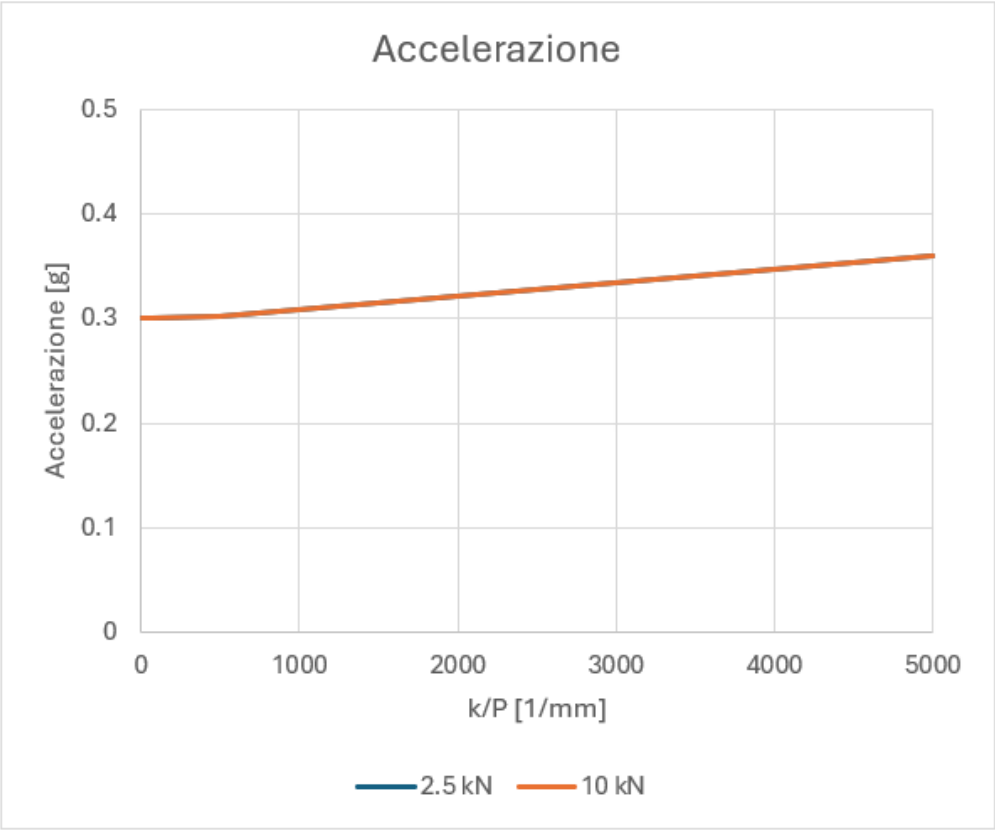


Figura 2.2: Accelerazione della massa al variare del rapporto k/P, per i due pesi considerati.

A questo punto si è proceduto a verificare quali tra questi risultati fossero attendibili, escludendo quelli riconducibili a instabilità numeriche del modello piuttosto che all'effettivo comportamento fisico del sistema. Da tale verifica è emerso che le risposte stabili si concentravano nell'intervallo di k/P compreso tra 25 e 50.

Per analizzare anche l'influenza del coefficiente d'attrito, che non era stata considerata precedentemente, si è svolto un confronto utilizzando alcuni accelerogrammi impiegati nel progetto ERIES-RACKSLIDE. Sono stati selezionati gli accelerogrammi registrati nei punti 3 center e 8 center, corrispondenti al centro di due piani di carico consecutivi, e nel punto 10 upright, posto lateralmente in corrispondenza del montante al piano superiore tra i due (Figura 2.3). Le intensità considerate, pari al 30, 50, 70 e 110%, sono state selezionate tra quelle disponibili

nella campagna sperimentale in modo da verificare il comportamento del modello a diversi livelli di intensità sismica. In questa fase si sono utilizzati due valori di massa, pari a 2.5 kN e 10 kN, e tre coefficienti di attrito, pari a 0.3, 0.4 e 0.5.

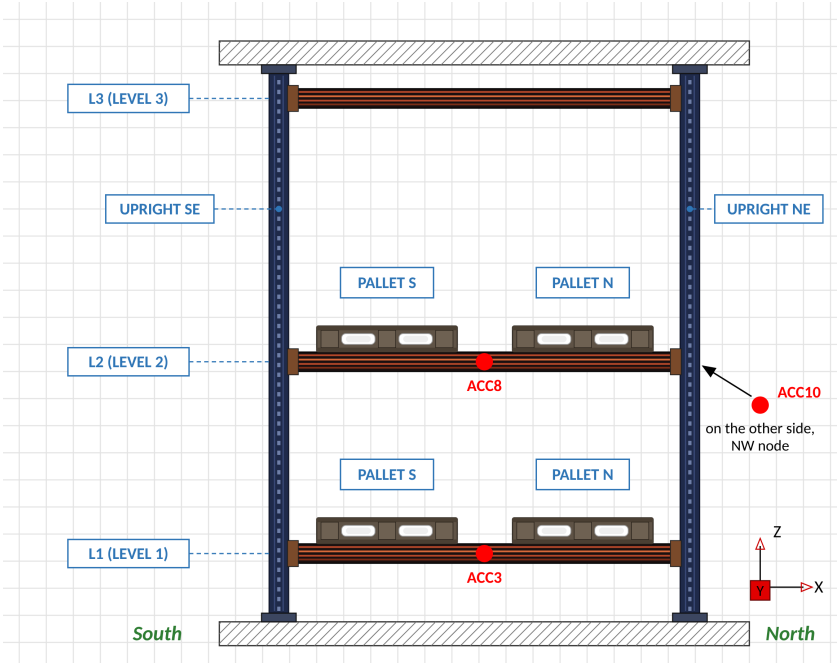


Figura 2.3: Posizione degli accelerometri ACC3, ACC8 e ACC10 del progetto ERIES-RACKSLIDE (adattata da [**rackslide_report**]).

Dalle analisi monodirezionali condotte è emerso che le intensità del 30% e del 50% fornivano risposte più stabili e attendibili, in linea con i dati sperimentali del progetto ERIES-RACKSLIDE. Alle intensità più elevate, in particolare al 110%, i risultati mostravano invece una forte influenza da parte di instabilità numeriche. Per tale motivo non sono stati confrontati con i dati sperimentali. Inoltre, alle intensità più elevate anche i dati sperimentali sono meno adatti al confronto: nelle prove gli scorrimenti in direzione trasversale erano limitati da fermi in legno a circa ±88 mm, e in alcuni casi i pallet hanno urtato i correnti.

Gli spostamenti ottenuti dalle analisi condotte in questo lavoro, riportati in Figura 2.4, risultano essere confrontabili con quelli misurati sperimentalmente; le modeste differenze osservate possono essere attribuite alla molteplicità di fattori che intervengono durante il fenomeno reale e alla diversa modalità di rappresentazione del sistema. Nel progetto ERIES-RACKSLIDE, infatti, il provino

riproduce in scala reale una porzione della scaffalatura, mentre l'obiettivo di questa fase di lavoro è rappresentare un singolo pallet e verificare che l'ordine di grandezza delle analisi numeriche svolte sia paragonabile ai risultati reali.

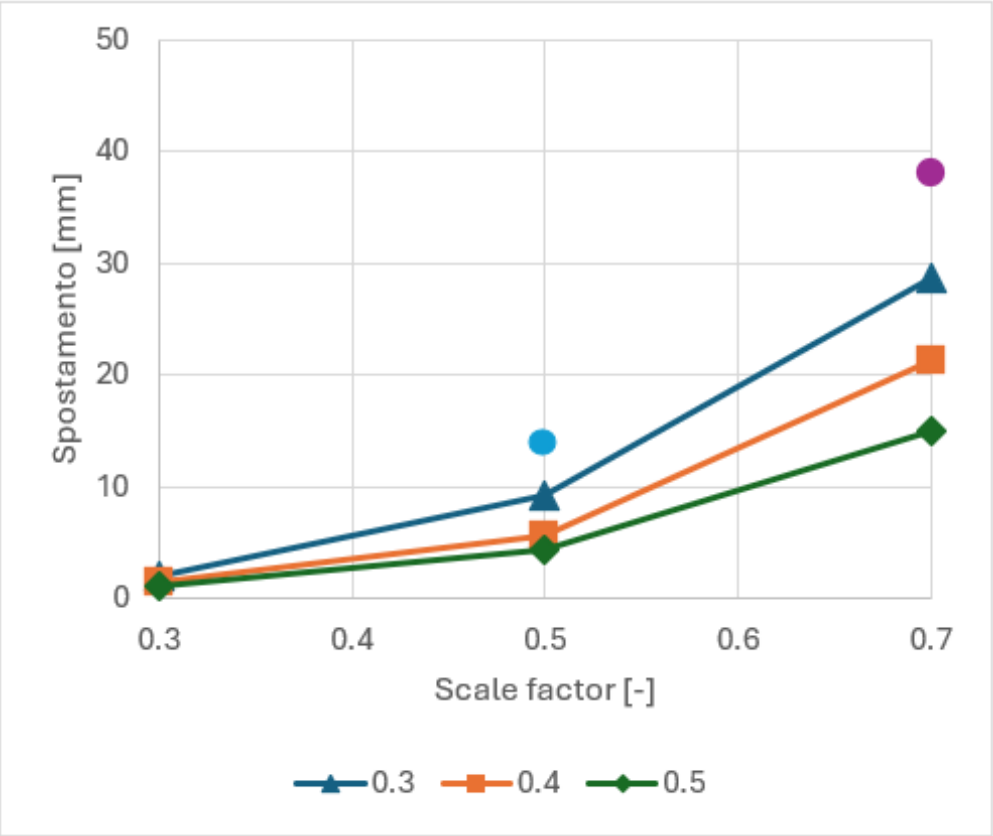


Figura 2.4: Confronto tra gli spostamenti ottenuti dal modello numerico e quelli misurati nelle prove del progetto ERIES-RACKSLIDE.

Sulla base di questi riscontri, gli isolatori sono stati ritenuti correttamente calibrati, ed è stato pertanto possibile procedere alla modellazione completa della scaffalatura.

Capitolo 3

Modellazione e analisi svolte

La struttura oggetto del presente caso studio è una scaffalatura di tipo IPA, corrispondente al telaio testato nell'ambito del progetto di ricerca europeo SEISRACKS2.

La geometria della struttura si sviluppa su quattro campate da 2.7 m, per una lunghezza complessiva di 10.8 m. In altezza si trovano quattro livelli con interpiano di 2.0 m, a cui si aggiungono 20 cm di prolungamento in sommità per esigenze di ingombro logistico, raggiungendo quindi un'altezza totale di 8.2 m.

La spalla della scaffalatura, avente larghezza 1.1 m, è costituita da un sistema di montanti, traversi e diagonali.

Gli approcci per rappresentare il fenomeno dello scorrimento dei pallet sono molteplici; tra questi ne sono stati analizzati tre aventi un livello di complessità crescente e suddivisibili in due categorie.

La prima categoria prevede una modellazione semplificata, in cui i pallet non vengono rappresentati esplicitamente ma considerati come carichi distribuiti direttamente sui correnti delle scaffalature.

La seconda categoria consiste nella modellazione esplicita, nella quale le unità di carico sono modellate individualmente. Per rappresentare il contatto tra pallet e struttura sono state calibrate due tipologie di elementi (*link*): un modello bilineare e un modello con elemento isolatore.

La struttura di base rimane comune a tutti i modelli, nei quali varia unicamente la modalità con cui vengono rappresentati i pallet. Le sezioni reali dei diversi

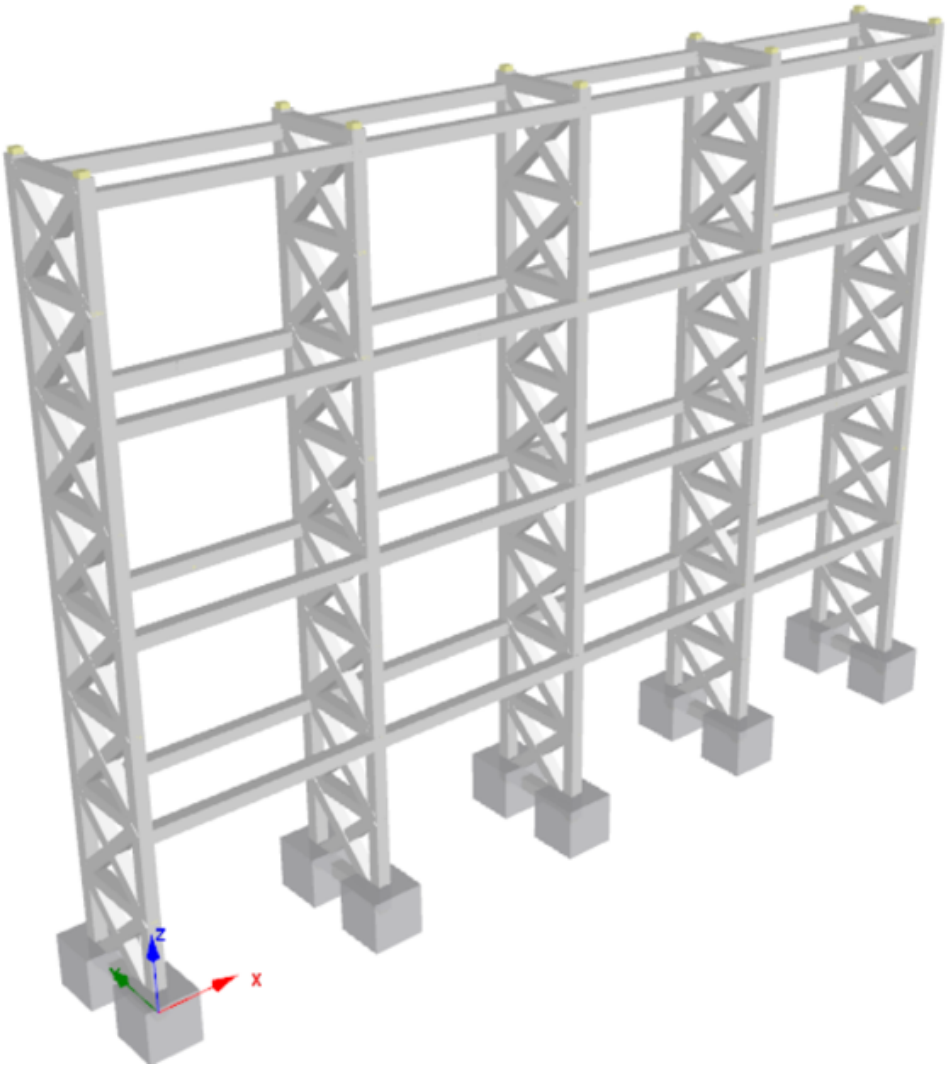
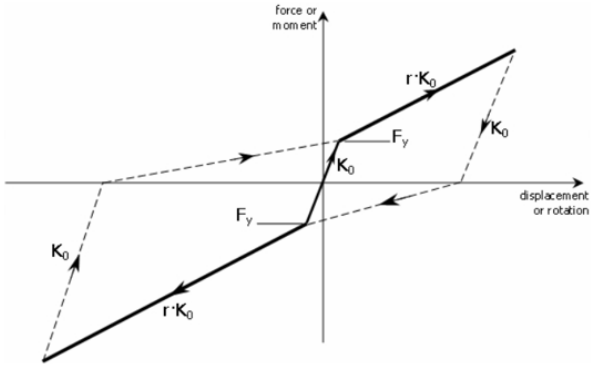


Figura 3.1: Geometria della scaffalatura oggetto del caso studio.

elementi non sono state rese disponibili per riservatezza; quindi, durante la fase di modellazione, sono state definite delle sezioni equivalenti che ne conservano i valori di rigidezza e inerzia.

Si evidenzia che per le diagonali, i traversi e i correnti sono stati utilizzati gli elementi di tipo `elfrm` (elementi elastici di tipo *frame*), mentre per i montanti sono stati impiegati gli elementi `elfrmH` (elementi elastici con cerniere plastiche concentrate alle estremità). Questo elemento schematizza la non linearità attraverso molle rotazionali concentrate agli estremi dell'asta, mantenendo la parte centrale elastica. Questa modellazione permette di definire curve di risposta momento-rotazione in maniera indipendente per le due direzioni trasversali rispetto all'asta per ognuna delle due cerniere. Nel caso in esame sono state adottate delle curve bilineari simmetriche (`bl_sym`), per le quali si è valutata la rigidezza iniziale (K_0), la forza di snervamento (F_y) e il rapporto di incrudimento post-snervamento (r), al fine di rappresentare al meglio il comportamento dei montanti. I valori utilizzati sono riportati in Figura 3.2.

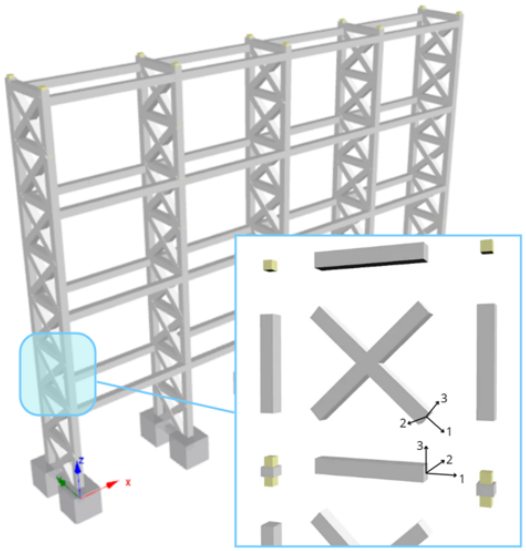


	K₀ [kN/m]	Fy [kN]	r [-]
Cerniera A – Asse 2	20000	10.54	0.005
Cerniera A – Asse 3	20000	2.84	0.005
Cerniera B – Asse 2	20000	10.54	0.005
Cerniera B – Asse 3	20000	2.84	0.005

Figura 3.2: Legame bilineare simmetrico adottato per le cerniere dei montanti e valori dei parametri.

Un altro aspetto da analizzare è la rappresentazione delle non linearità, sia per gli elementi di controventamento sia per le connessioni, per le quali sono stati introdotti degli elementi di collegamento non lineari (`NLlink`). Questi elementi consentono di disaccoppiare la risposta lungo ciascuno dei sei gradi di libertà locali, assegnando a ognuno una legge costitutiva indipendente.

Per rappresentare l'instabilità degli elementi di controventamento (diagonali ed elementi orizzontali della spalla) sono stati posti dei link alle estremità dell'asta, ai quali è stata assegnata una curva bilineare asimmetrica lungo la direzione assiale. In questo modo è possibile rappresentare il diverso comportamento dell'elemento a trazione e a compressione, permettendo anche la rotazione della connessione bullonata. I valori definiti per il link sono riportati in Figura 3.3.



	Traverso	Diagonale
K_0^+ [kN/m]	17600	17600
F_y^+ [kN]	30	30
r^+ [-]	0.001	0.001
K_0^- [kN/m]	24000	17600
F_y^- [kN]	-13	-7
r^- [-]	0.0001	0.0001

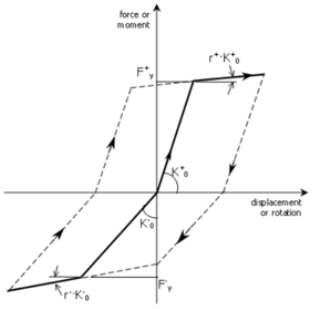


Figura 3.3: Posizione dei link negli elementi di controventamento della spalla, legame bilineare asimmetrico adottato e valori dei parametri.

Le connessioni alla base dei montanti e i nodi trave-montante sono stati modellati invece con un approccio differente, mediante elementi link a comportamento rotazionale non lineare, ai quali è stata assegnata una legge isteretica di tipo *pinched* asimmetrico (`pinched-asm`). Tale modello consente di definire in modo indipendente i rami a momento positivo e negativo della curva inviluppo, tenendo conto della diversa risposta che questi collegamenti esibiscono nei due versi di rotazione. Consente inoltre di riprodurre lo strozzamento (*pinching*) dei cicli isteretici, che rappresenta il degrado della capacità delle connessioni delle scaffalature.

La calibrazione dei link è stata condotta fissando al 60% il rapporto tra la resistenza flessionale della connessione e quella dell'elemento collegato. In

particolare, per la connessione di base il momento massimo della connessione nel piano è stato posto pari al 60% del momento resistente del montante, mentre per il nodo trave-colonna il momento massimo della connessione è stato posto pari al 60% del momento resistente della trave. Il momento resistente degli elementi è stato valutato in campo elastico, a causa della bassa riserva plastica tipica dei profili sagomati a freddo, tramite la formula:

$$M_{Rd} = \frac{W_{el}\, f_{yk}}{\gamma_{M0}} \tag{3.1}$$

assumendo $\gamma_{M0} = 1$.

Nella modellazione esplicita si inserisce anche la rappresentazione dei pallet. A questo scopo, in ciascuna campata sono stati introdotti tre elementi trasversali che collegano i due correnti (Figura 3.4).

Figura 3.4: Modello esplicito: elementi trasversali tra i correnti e link di contatto dei pallet.

Come per gli altri elementi orizzontali della struttura, anche per questi sono stati utilizzati gli elementi elastici `elfrm`, a cui sono stati assegnati una sezione rettangolare cava di 300×100×10 mm e un materiale fittizio caratterizzato da rigidezza molto elevata e massa trascurabile. In questo modo gli elementi trasversali non modificano la distribuzione delle masse della struttura, mantenendo un comportamento rigido.

Nella mezzeria di ciascuno di questi elementi è stato poi inserito il link rappresentante il contatto tra pallet e scaffalatura, per il quale sono state adottate due diverse formulazioni. In un modello sono stati utilizzati dei link non lineari (`NLlink`), nei quali si sono definite delle curve forza-spostamento bilineari simmetriche (`bl_sym`) lungo le due direzioni orizzontali; nel secondo modello si sono invece definiti degli elementi di tipo isolatore (`Isolator2`).

Modello con elemento bilineare In questo modello la rappresentazione del contatto pallet-struttura è affidata a un elemento link non lineare (`NLlink`). Nelle due direzioni orizzontali, trasversali all'asse del link, sono stati assegnati due legami simmetrici elastici-perfettamente plastici, aventi rigidezza iniziale pari a

10 kN/mm. È stata poi calcolata la forza di snervamento, corrispondente alla soglia oltre la quale il pallet inizia a scorrere. Per definire tale valore si è calcolato il prodotto tra il coefficiente di attrito (0.3) e il peso del singolo pallet (8 kN), ottenendo quindi:

$$F_y = \mu W = 0.3 \cdot 8 = 2.4 \text{ kN} \tag{3.2}$$

Prima di raggiungere tale soglia il pallet si muove in maniera solidale con la struttura; successivamente, la forza trasmessa rimane costante e pari alla resistenza per attrito, ma il pallet inizia a scorrere.

Modello con isolatore Nel modello con elemento isolatore il contatto viene rappresentato tramite un elemento di tipo `Isolator2` (*Friction Pendulum System*), adattato per rappresentare un appoggio ad attrito. Il coefficiente di attrito è stato posto pari a 0.3, coerentemente con il modello precedente, sia a velocità nulla sia ad alta velocità, in modo da renderlo indipendente dalla velocità di scorrimento. Al fine di ottenere una superficie di contatto orizzontale, è stato assegnato un valore molto alto al raggio di curvatura della superficie di scorrimento, in modo da annullare il meccanismo di ricentraggio tipico degli isolatori. Diversamente da quanto avviene per il modello con elemento bilineare, in questo caso la soglia di scorrimento varia a seconda dello sforzo normale agente e si adatta quindi alle variazioni del peso del pallet durante l'analisi. Le rigidezze assegnate nelle due direzioni trasversali all'isolatore sono state calibrate utilizzando lo stesso rapporto rigidezza/carico utilizzato nella fase precedente (Paragrafo 2.3), cioè un rapporto pari a 50 mm^{-1}. Moltiplicando tale valore per il peso del singolo pallet (8 kN), si è ottenuta una rigidezza pari a 400 kN/mm. Lungo le altre direzioni si sono assegnate delle rigidezze maggiori.

3.1 Carichi agenti sulla struttura

I carichi verticali agenti sulla struttura sono quelli che rappresentano le unità di carico; per questo motivo la loro rappresentazione varia tra la modellazione semplificata e quella esplicita.

Il peso del singolo pallet è stato fissato pari a 8 kN. In ogni campata sono presenti tre pallet, per un carico complessivo di 24 kN per campata.

Nel caso di modellazione semplificata i pallet non vengono rappresentati esplicitamente. Per questo il loro peso è applicato come un carico verticale distribuito su entrambi i correnti di ciascuna campata. Il valore del carico è stato ottenuto ripartendo il peso dei tre pallet sui due correnti e distribuendolo sulla lunghezza della campata, pari a 2.7 m. Si ottiene quindi:

$$q = \frac{3W}{2L} = \frac{3 \cdot 8}{2 \cdot 2.7} = 4.44 \text{ kN/m} \tag{3.3}$$

In questo caso la massa dei pallet risulta perfettamente vincolata alla struttura, escludendo lo scorrimento relativo tra pallet e correnti.

Nella modellazione esplicita, invece, ciascun pallet viene rappresentato singolarmente attraverso un carico concentrato pari a 8 kN, applicato a un nodo collegato all'elemento trasversale tramite il link di contatto. In questo caso la massa del pallet risulta quindi concentrata nel nodo e può interagire con la struttura attraverso il link, che consente lo scorrimento relativo.

3.2 Confronto dei modelli appartenenti alla modellazione esplicita

I due modelli appartenenti alla modellazione esplicita hanno il compito di descrivere lo stesso fenomeno, cioè lo scorrimento per attrito del pallet sui correnti. In entrambi i modelli si ha lo stesso coefficiente di attrito, ma i due differiscono nel modo in cui la soglia di scorrimento viene definita e calcolata durante l'analisi.

Nel modello bilineare la soglia è un parametro assegnato a priori, pari al prodotto tra il coefficiente di attrito e il peso statico del pallet, che rimane costante per tutta la durata dell'analisi. Il legame elastico-perfettamente plastico consente di rappresentare lo scorrimento in maniera semplice, attraverso la definizione di pochi parametri facilmente comprensibili dal punto di vista fisico. La risposta lungo ciascun grado di libertà è però indipendente dalle altre, comportando una risposta disaccoppiata lungo le due direzioni orizzontali del link. In presenza di

azioni bidirezionali, come quelle utilizzate nel presente lavoro, la resistenza allo scorrimento potrebbe quindi risultare sovrastimata.

Nel modello con elemento isolatore, invece, la forza di attivazione viene aggiornata durante tutto lo svolgimento dell'analisi, in quanto viene calcolata istante per istante. Inoltre, le due direzioni risultano accoppiate, in quanto lo scorrimento si attiva nel momento in cui la risultante delle due forze orizzontali raggiunge il limite di attrito. Si potrebbe quindi affermare che tale modellazione sia più coerente con il comportamento reale del contatto. Di contro, l'elemento `Isolator2` non è propriamente adatto alla rappresentazione di questo fenomeno, in quanto si tratta di un elemento sviluppato appositamente per la rappresentazione dell'isolamento alla base di una struttura, e ha quindi richiesto l'adozione di alcuni parametri fittizi per essere adattato al caso in esame.

La diversa complessità di rappresentazione del fenomeno si rispecchia anche sui tempi di calcolo delle analisi. Con il modello bilineare, un set di 20 analisi associato a un tempo di ritorno richiede circa un'ora; nel secondo caso, invece, a causa della presenza dell'elemento isolatore, una singola analisi può arrivare a richiedere lo stesso tempo.

Entrambi i modelli presentano alcune semplificazioni comuni. I pallet vengono rappresentati come masse concentrate collegate alla struttura in un unico punto, e non vengono considerati né il ribaltamento o la rotazione dei pallet, né eventuali urti con gli elementi adiacenti.

Un'altra semplificazione riguarda il coefficiente di attrito, che viene assunto costante e pari a 0.3, mentre, come visto nel Capitolo **??**, nella realtà questo valore varia a seconda dei materiali e dello stato delle superfici.

Si riporta in Tabella 3.1 un riepilogo dei principali aspetti positivi e dei limiti delle due proposte di modellazione.

3.3 Analisi svolte

Il comportamento dinamico dei modelli è stato caratterizzato mediante un'analisi agli autovalori. Tutti i modelli presentano gli stessi periodi fondamentali nelle due direzioni: 1.557 s per il primo modo in direzione x (longitudinale) e 0.641 s per il primo modo in direzione y (trasversale).

Tabella 3.1: Aspetti positivi, limiti e semplificazioni dei due modelli espliciti.

Modello	**Aspetti positivi**	**Limiti**
Bilineare (`NLlink`)	• Definizione di pochi parametri con chiaro significato fisico • Assenza di forza di richiamo fittizia durante lo scorrimento • Robustezza numerica e risultati stabili • Tempi di calcolo ridotti (circa 1 ora per 20 analisi)	• Soglia di scorrimento fissa • Direzioni orizzontali disaccoppiate (possibile sovrastima della resistenza allo scorrimento per azioni bidirezionali)
Isolatore (`Isolator2`)	• Forza di attrito calcolata in funzione dello sforzo normale istantaneo • Direzioni orizzontali accoppiate • Maggiore aderenza al comportamento reale del contatto	• Elemento nato per gli isolatori sismici e adattato con parametri fittizi • Sensibilità ai parametri numerici dell'analisi • Tempi di calcolo elevati (fino a circa 1 ora per una singola analisi)
Semplificazioni comuni: pallet rappresentato come massa concentrata collegata a un unico punto; ribaltamento e rotazione del pallet non considerati; urti con altri elementi non considerati; coefficiente di attrito assunto costante e pari a 0.3.		

Il divario tra i periodi nelle due direzioni rispecchia la diversa configurazione resistente della scaffalatura. In direzione longitudinale la rigidezza laterale è affidata alle sole connessioni semirigide trave-montante, mentre in direzione trasversale le spalle sono controventate. Nei modelli con modellazione esplicita il periodo trasversale è inferiore e la risposta torsionale è concentrata in un unico modo. Ciò è attribuibile alla presenza degli elementi trasversali rigidi, che, collegando i correnti delle due file di montanti, ne irrigidiscono la risposta nel piano orizzontale. I modelli con elemento bilineare e con elemento isolatore presentano invece periodi e masse partecipanti praticamente coincidenti. In campo elastico la diversa rigidezza dei link di contatto non influenza quindi la risposta, e le differenze tra i due modelli emergono soltanto in campo non lineare.

La risposta sismica dei modelli è stata valutata mediante analisi dinamiche non lineari, organizzate secondo una *Multiple Stripe Analysis*. In questa procedura la struttura è sottoposta a diversi livelli di intensità sismica, a ciascuno dei quali è associato un insieme di record. La risposta è quindi valutata statisticamente per ogni livello di intensità. Nel caso in esame sono stati considerati 8 livelli di intensità, corrispondenti ad altrettanti tempi di ritorno, e per ciascuno di essi 20 coppie di accelerogrammi, per un totale di 160 analisi per modello. L'azione sismica è applicata alla base come accelerazione imposta, assegnando un accelerogramma a ciascuna delle due direzioni orizzontali principali della scaffalatura.

Questo tipo di analisi consente di seguire nel tempo l'evoluzione della risposta e di cogliere i fenomeni non lineari introdotti nei modelli, come la plasticizzazione delle connessioni e lo scorrimento dei pallet.

Gli accelerogrammi sono stati selezionati con riferimento al sito di Corfinio, comune della provincia dell'Aquila, in zona a sismicità medio-alta.

Come misura d'intensità (IM) è stata adottata l'accelerazione spettrale media $AvgSa$, valutata su un intervallo di riferimento definito in funzione dei periodi propri della struttura. Per ciascun tempo di ritorno, gli accelerogrammi sono stati selezionati in modo da garantire la coerenza con la pericolosità sismica del sito. Nella Tabella 3.2 sono riportati i tempi di ritorno considerati e i corrispondenti valori di $AvgSa$. I risultati delle analisi, presentati nel capitolo successivo, sono espressi in funzione dei livelli di intensità così definiti.

I livelli di intensità considerati coprono un ampio intervallo, così da descrivere

Tabella 3.2: Tempi di ritorno considerati e corrispondenti valori di $AvgSa$.

Tempo di ritorno [anni]	***AvgSa* [g]**
30	0.070
50	0.110
98	0.182
224	0.316
475	0.494
975	0.746
2475	1.213
4975	1.698

la risposta della struttura dal campo elastico fino a condizioni prossime al collasso.

3.4 Smorzamento dei modelli

Nei modelli impliciti è stato adottato uno smorzamento viscoso alla Rayleigh, in cui la matrice di smorzamento è una combinazione lineare della matrice delle masse e della matrice di rigidezza:

$$\mathbf{C} = a_0 \, \mathbf{M} + a_1 \, \mathbf{K} \tag{3.4}$$

Il rapporto di smorzamento associato al modo n vale quindi:

$$\xi_n = \frac{a_0}{2 \, \omega_n} + \frac{a_1 \, \omega_n}{2} \tag{3.5}$$

I coefficienti a_0 e a_1 sono stati calcolati imponendo il valore di smorzamento desiderato in corrispondenza di due periodi di riferimento, scelti in modo da comprendere i primi sei modi di vibrare della struttura: il periodo del primo modo, $T_1 = 1.56\,\text{s}$, e quello del sesto modo, $T_6 = 0.36\,\text{s}$. Si ottiene:

$$a_0 = \frac{2 \, \xi \, \omega_1 \, \omega_6}{\omega_1 + \omega_6} \qquad a_1 = \frac{2 \, \xi}{\omega_1 + \omega_6} \tag{3.6}$$

Come mostra la Figura 3.5, lo smorzamento coincide con il valore imposto in corrispondenza dei due periodi di riferimento. Tra i due periodi è leggermente

inferiore, con un minimo pari a circa il 78% del valore imposto per un periodo di circa 0.75 s. Al di fuori di questo intervallo cresce invece rapidamente: per i periodi lunghi a causa della componente proporzionale alla massa, per i periodi brevi a causa di quella proporzionale alla rigidezza. Di conseguenza, i modi superiori al sesto risultano fortemente smorzati.

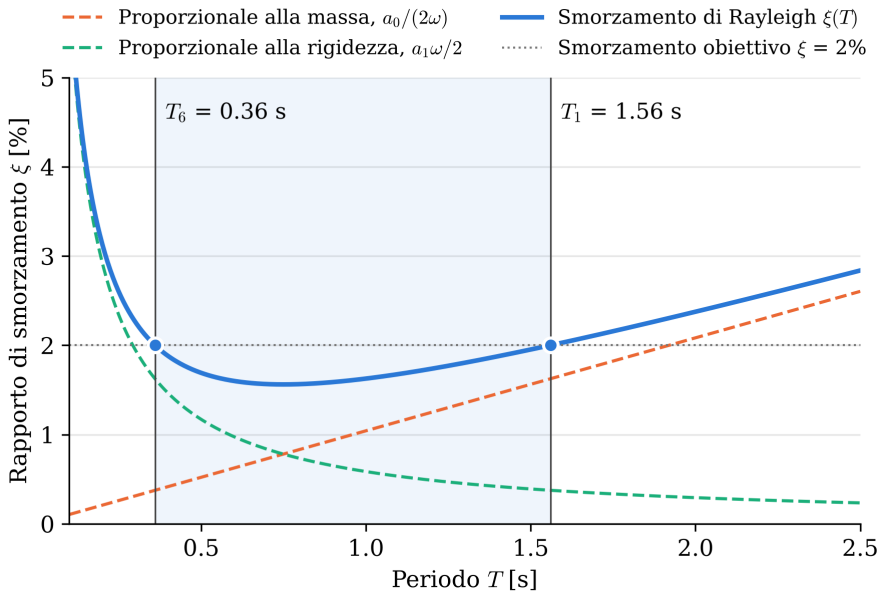


Figura 3.5: Andamento del rapporto di smorzamento alla Rayleigh in funzione del periodo, con $\xi = 2\%$ imposto ai periodi $T_6 = 0.36\,\text{s}$ e $T_1 = 1.56\,\text{s}$.

Sulla base di queste ipotesi sono stati definiti i seguenti modelli:

- modello esplicito;
- modello implicito con isolatore;
- modello implicito bilineare con smorzamento pari al 2%;
- modelli impliciti bilineari con smorzamento pari a 5, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 25, 30 e 35%.

La serie di modelli impliciti bilineari con smorzamento crescente permette di individuare il valore di smorzamento viscoso equivalente che riproduce meglio

la risposta del modello esplicito, coerentemente con l'obiettivo descritto nel Paragrafo 2.2.

Capitolo 4

Risultati

Nel presente capitolo verranno presentati i risultati delle analisi dinamiche non lineari condotte, con l'obiettivo di comprendere in che modo lo scorrimento dei pallet influenzi lo smorzamento totale della struttura analizzata. Prima di illustrare l'organizzazione del seguente capitolo, è necessario fare una premessa sull'attendibilità dei risultati del modello con l'elemento isolatore.

4.1 Attendibilità dei risultati per il modello con elemento isolatore

È necessario chiarire fin da subito che, per il confronto dei risultati, sono stati utilizzati solo due tipi di modelli, escludendo del tutto la modellazione con elemento isolatore. Questa configurazione, pur essendo quella teoricamente più completa e conforme alla realtà, ha presentato risposte non attendibili perché influenzate da instabilità numerica.

Tali instabilità sono state facilmente individuabili perché hanno prodotto risultati chiaramente incompatibili con la realtà. Per comprendere ciò che si intende, si riporta un esempio di risposta in accelerazione lungo la direzione Y del nodo indicato in rosso all'interno della Figura 4.1, ottenuta per l'analisi 1 con un tempo di ritorno di 30 anni.

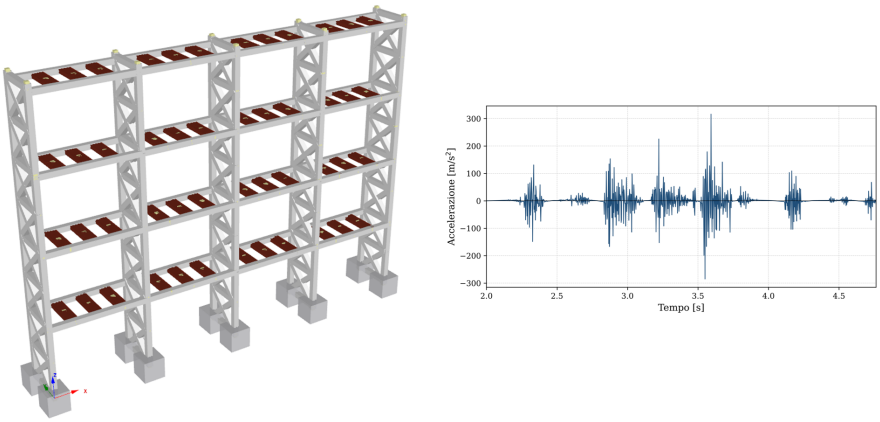


Figura 4.1: Modello con elemento isolatore: nodo considerato (in rosso) e relativa risposta in accelerazione in direzione Y per l'analisi 1 con tempo di ritorno di 30 anni.

Come si può notare dalla figura, tale punto raggiunge un'accelerazione massima dell'ordine di 300 m/s^2, che corrisponde a un valore di circa 30 g e che non risulta essere compatibile con le accelerazioni previste in una struttura di questo tipo. Per comprendere in maniera ancora più chiara l'inaffidabilità di questi risultati, si riporta di seguito il paragone tra questo andamento e quella stessa analisi svolta nel modello con elemento bilineare.

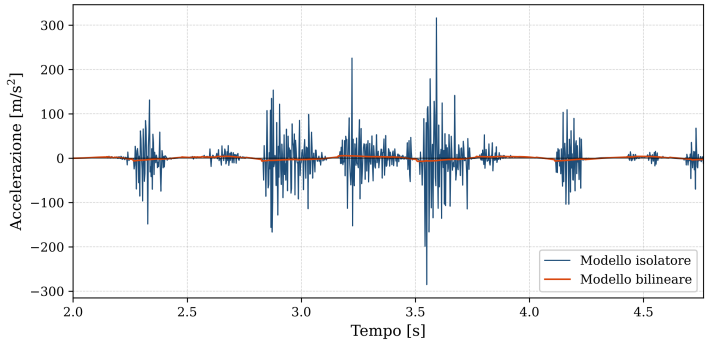


Figura 4.2: Confronto della risposta in accelerazione in direzione Y dello stesso nodo tra il modello con elemento isolatore e il modello con elemento bilineare (analisi 1, tempo di ritorno di 30 anni).

Nel caso di elemento bilineare la massima accelerazione raggiunta è di circa 7.5 m/s^2, cioè un valore circa 40 volte più piccolo rispetto a quello ottenuto con il modello isolatore.

Comportamenti come questi sono presenti nella netta maggioranza delle analisi condotte e, come appena visto, già dal tempo di ritorno più basso. Una possibile

causa risiede nel brusco cambiamento di rigidezza che la struttura subisce al momento in cui si attiva l'elemento isolatore, che rende complessa la convergenza delle analisi anche con passi temporali molto piccoli (soprattutto per i tempi di ritorno più alti).

Per questo motivo si è ritenuto opportuno escludere tale modello dall'analisi dei risultati e si lascia l'approfondimento delle cause e soluzioni delle instabilità a uno sviluppo futuro del presente lavoro di tesi.

4.2 Organizzazione dei risultati

I risultati di tutte le analisi svolte vengono riportati analizzando separatamente ciascun tempo di ritorno. Come già spiegato nel capitolo precedente, la scaffalatura è stata sottoposta a 20 coppie di accelerogrammi, applicate simultaneamente per ciascun tempo di ritorno. Degli otto tempi di ritorno analizzati ne verranno presentati sei, perché per i tempi di 2475 e 4975 anni tutte le analisi hanno portato al collasso della scaffalatura per tutti i modelli considerati.

Per ciascun tempo di ritorno verranno analizzati sia i profili di drift, cioè il valore di massimo spostamento interpiano tra due livelli consecutivi rapportato all'altezza dell'interpiano stesso, sia i profili di accelerazione, cioè i valori di massima accelerazione assoluta registrata a ciascun livello della struttura.

I risultati saranno presentati in due modalità. In prima battuta, per ciascun modello si vedranno i profili ottenuti dalle singole analisi e la relativa mediana, al fine di valutare non solo l'andamento medio della risposta, ma anche la dispersione dovuta alla variabilità degli accelerogrammi scelti. Successivamente, verrà riportato in un unico grafico il confronto tra le mediane di tutti i modelli. Questo tipo di rappresentazione consente di valutare l'influenza dello scorrimento, confrontandolo con i modelli impliciti in cui tale fenomeno è considerato tramite un valore di smorzamento equivalente fissato a 2, 5, 7, 10, 12, 15, 18, 20, 25, 30 e 35%. Confrontando i profili di risposta, è possibile individuare, per ogni tempo di ritorno, un intervallo di smorzamento in cui ricade la risposta sismica della scaffalatura caricata e osservare come tale si modifichi all'aumentare dell'intensità sismica.

All'interno dei grafici riportati saranno presenti denominazioni sintetiche dei modelli, raccolte nella tabella seguente.

Tabella 4.1: Denominazioni sintetiche dei modelli riportate nei grafici.

Modello	**Denominazione**
Modello esplicito con elemento bilineare con damping del 2%	Damp2.0, slidElasticPP
Modello implicito con damping del 2%	Damp2.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 5%	Damp5.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 7%	Damp7.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 10%	Damp10.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 12%	Damp12.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 15%	Damp15.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 18%	Damp18.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 20%	Damp20.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 25%	Damp25.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 30%	Damp30.0, slidRigid
Modello implicito con damping del 35%	Damp35.0, slidRigid

Dopo aver svolto le analisi, si è osservato se fosse opportuno rappresentarle tutte, basando il criterio di scelta su verifiche strutturali secondo due livelli.

Il primo criterio è di tipo globale ed è basato su valori limite di drift interpiano. Si è assunto il collasso della struttura per un drift massimo del 10% in direzione X e del 4% in direzione Y.

Il secondo criterio, invece, è locale e si basa sulla risposta degli elementi. In primis, sono state verificate le rotazioni delle connessioni trave-montante, dei collegamenti alla base e dei montanti, confrontandole con l'ultimo punto della curva che rappresenta il loro legame (cioè il quarto punto della curva "*pinched_asm*" per le connessioni e il terzo punto della curva "*bil_sym*" per il montante, entrambe descritte nel Capitolo 3).Successivamente, sono state effettuate verifiche di resistenza sui collegamenti di base (sia a taglio che a trazione) per valutare un possibile fallimento della connessione.

Le analisi che hanno portato al collasso sono state escluse dal calcolo della mediana e dei profili perché i valori ottenuti non sarebbero stati rappresentativi della risposta della struttura e avrebbero alterato la valutazione dei valori mediani. Si sottolinea che questa esclusione non dipende da problemi di convergenza della simulazione numerica, ma è dovuta a un collasso strutturale individuato grazie ai criteri appena descritti.

Inoltre, bisogna osservare che, all'aumentare del tempo di ritorno, il numero di analisi utilizzate si riduce perché collassa un numero maggiore di scaffalature e, di conseguenza, la mediana diventa rappresentativa dei casi meno severi di quel set. Per ottenere una minima rappresentatività statistica dei risultati, si è scelto di porre un limite inferiore di 5 analisi su 20 in cui la struttura non deve essere collassata. Se questa condizione non viene rispettata, i risultati dei modelli non vengono rappresentati e il modello viene escluso dal confronto tra le mediane.

In generale, nei grafici relativi ai singoli modelli, i profili sono indicati con linee sottili, mentre la mediana è evidenziata con un tratto più spesso. Sull'asse delle ascisse si trova la grandezza di riferimento che sarà il drift interpiano (riportato in punti percentuali) oppure l'accelerazione massima di piano (riportata in g), mentre sull'asse delle ordinate si trovano i piani della struttura. Inoltre, nel caso in cui il numero di analisi considerate per alcuni modelli fosse inferiore a 20, viene riportata una voce in basso a destra di ciascun grafico che indica quale sia il numero di analisi non collassate e quindi utilizzate per il calcolo dei profili e della mediana.

Di seguito si riportano i risultati in ordine crescente di tempo di ritorno.

4.3 Tempo di ritorno 30 anni

4.3.1 Profili di accelerazione in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione X ottenuti per il tempo di ritorno di 30 anni. Per questo tempo di ritorno nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura, per nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

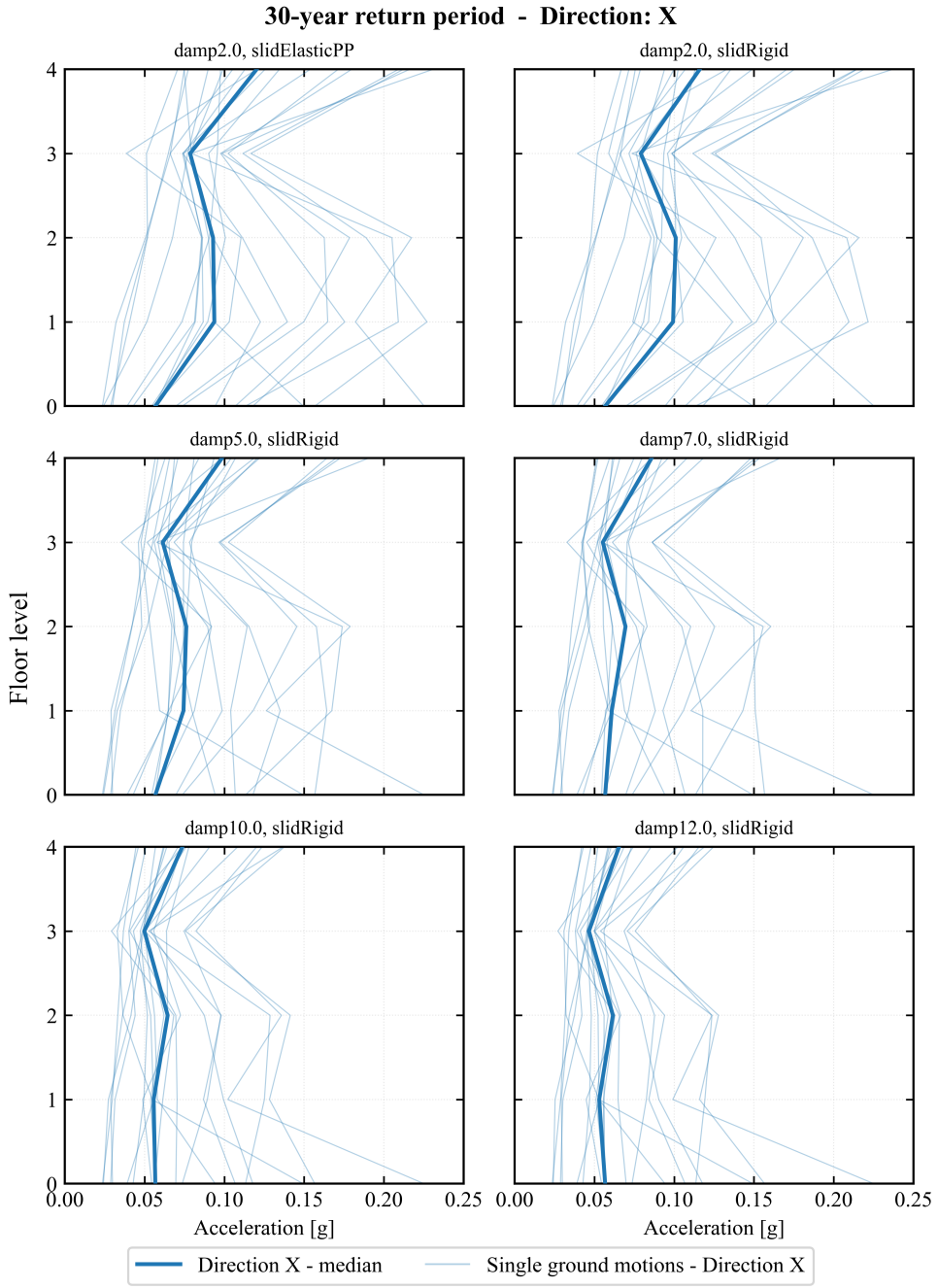


Figura 4.3: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

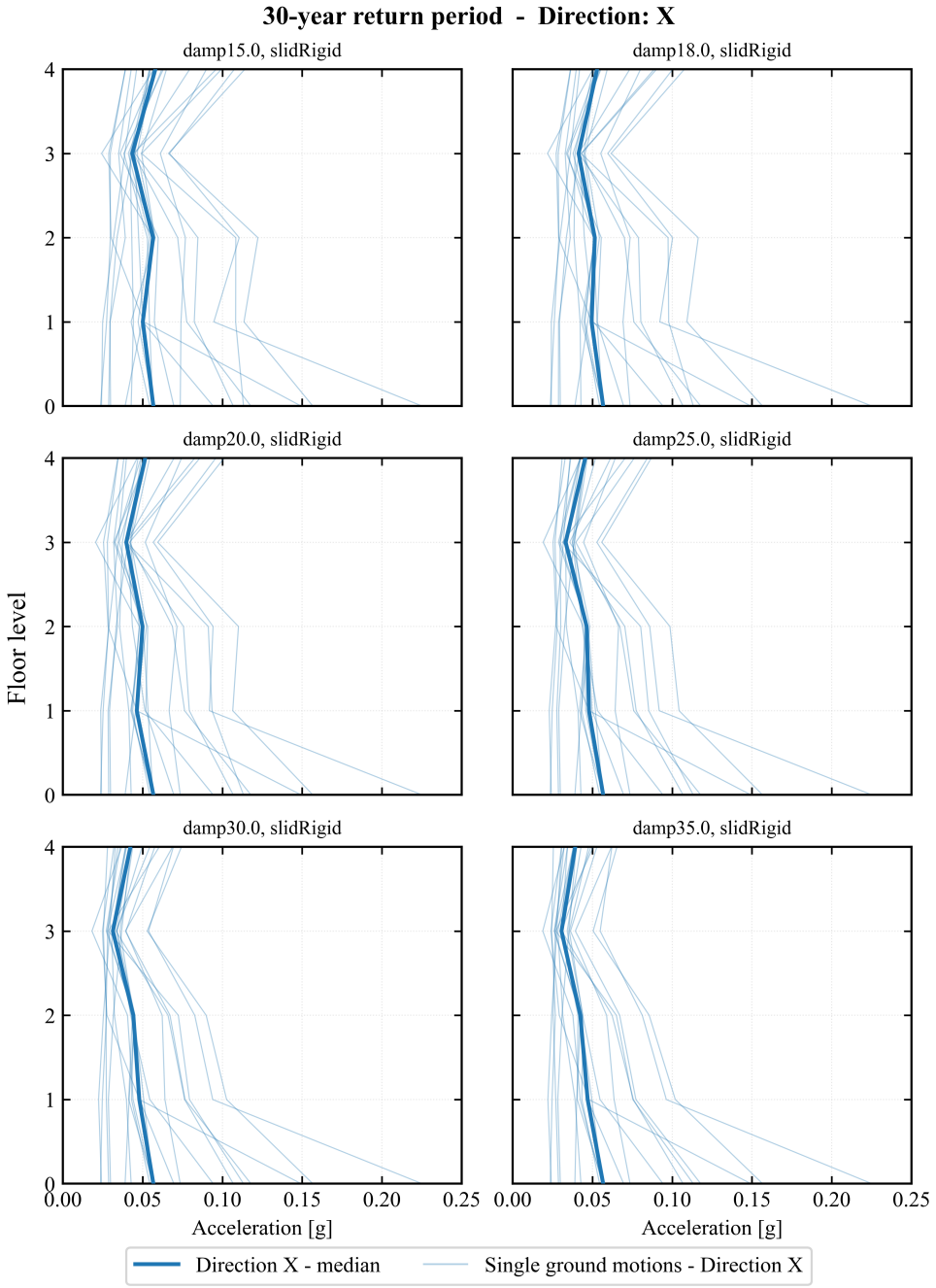


Figura 4.4: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,06 g ed è uguale per tutti i modelli. Lungo l'altezza l'accelerazione cresce ai primi due livelli, si riduce al terzo e torna

a crescere in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,12 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,10 g con il 5%, a circa 0,07 g con il 10% e a circa 0,04 g con il 35%. Per gli smorzamenti più alti le accelerazioni ai piani diventano inferiori a quella al suolo.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori ai piani che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 0,22 g. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori ai piani restano sotto circa 0,10 g.

Il modello esplicito è quasi coincidente con il modello implicito al 2%, sia come mediana sia come dispersione. Ai primi due livelli l'accelerazione mediana è di circa 0,10 g in entrambi i modelli e in sommità di circa 0,12 g. A questo livello di intensità i pallet non scorrono, quindi il modello esplicito si comporta come quello rigido.

4.3.2 Profili di accelerazione in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano nella direzione Y ottenuti per il periodo di ritorno di 30 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

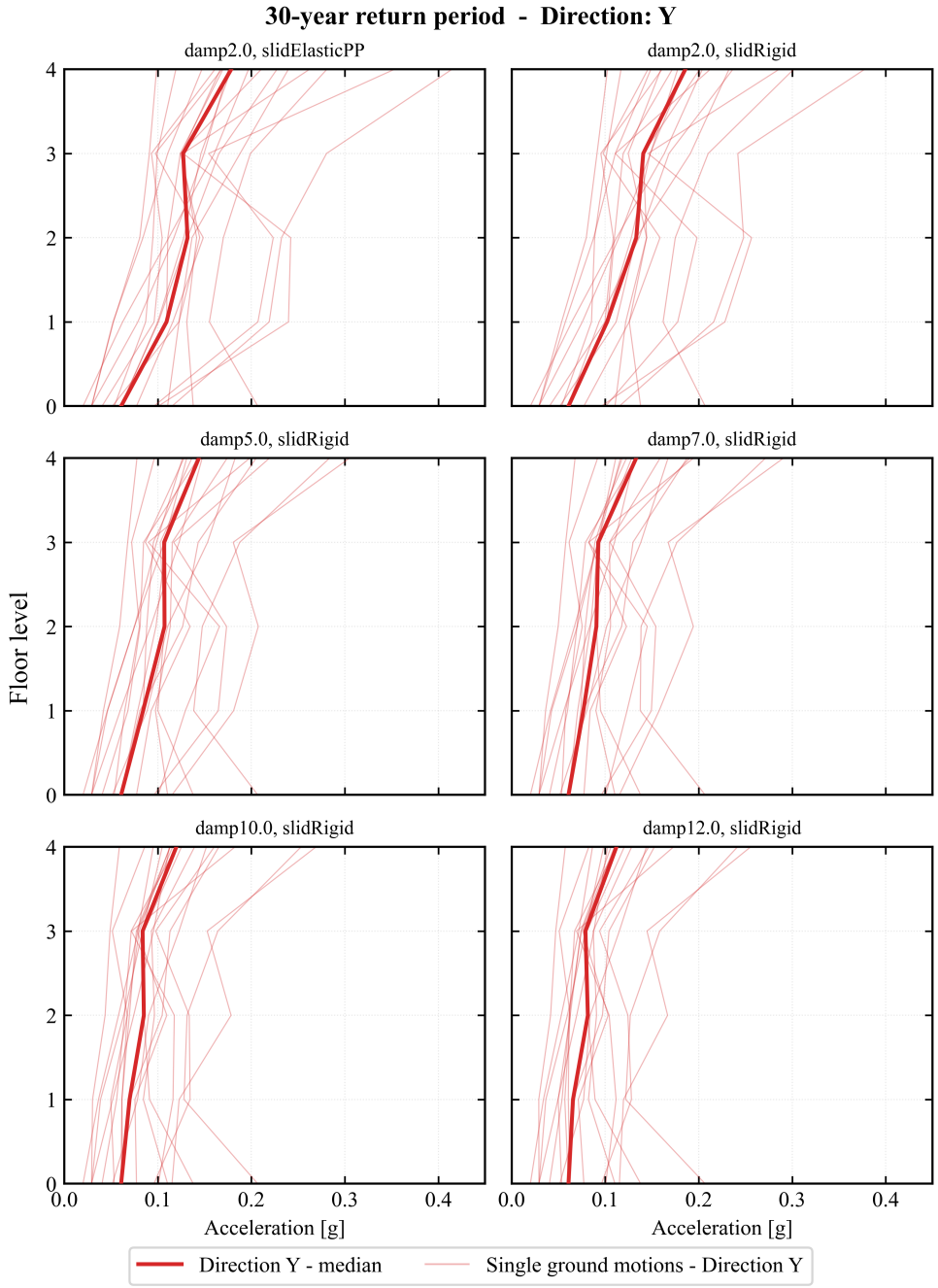


Figura 4.5: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

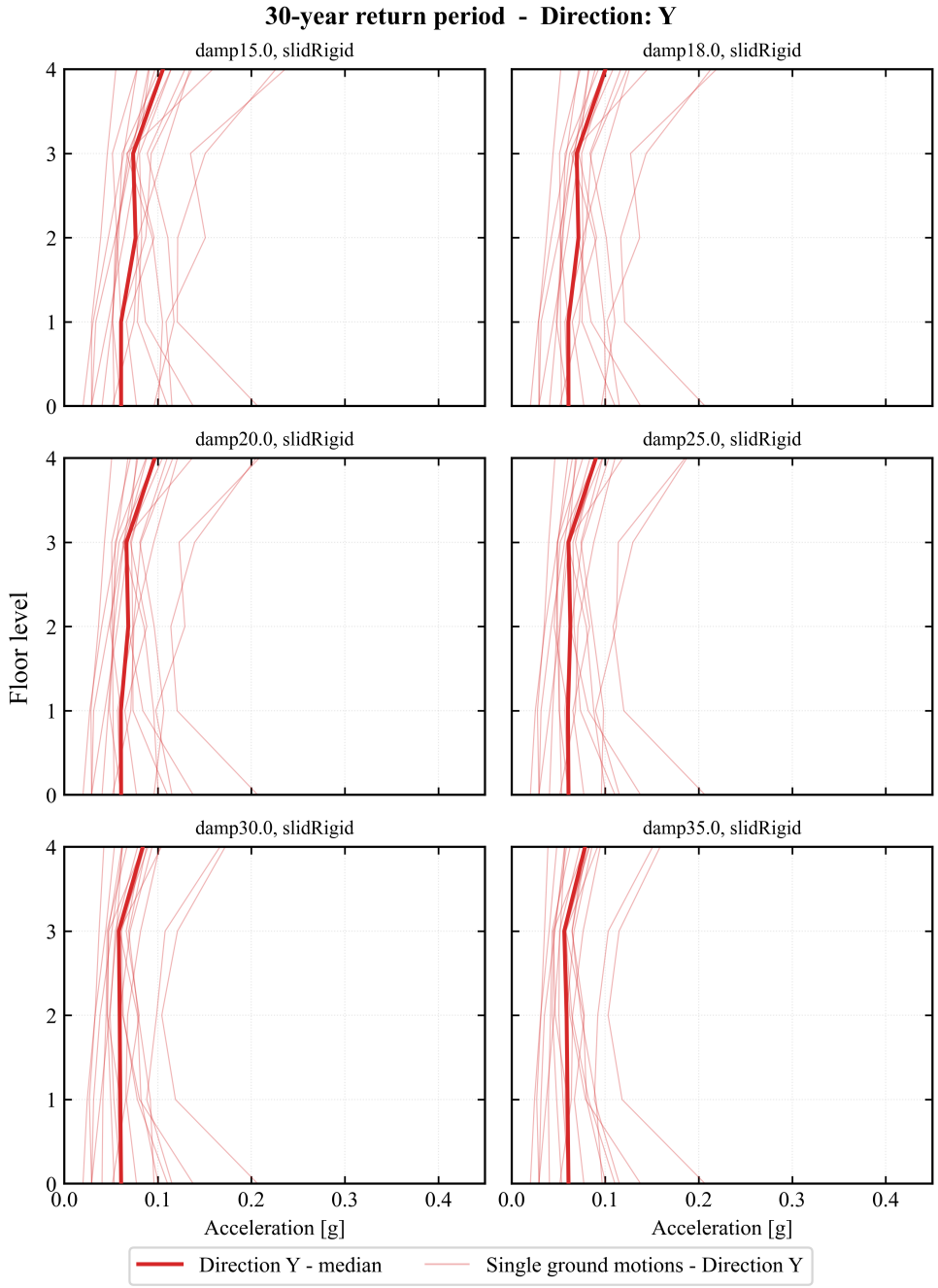


Figura 4.6: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,06 g ed è uguale per tutti i modelli. In direzione Y l'accelerazione cresce con l'altezza in modo più regolare che in direzione

X e raggiunge il valore massimo in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,19 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,15 g con il 5%, a circa 0,12 g con il 10% e a circa 0,08 g con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, soprattutto in sommità, dove per lo smorzamento al 2% si arriva a circa 0,37 g. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori in sommità restano sotto circa 0,16 g.

Il modello esplicito è molto vicino al modello implicito al 2%. In sommità l'accelerazione mediana è di circa 0,18 g, contro circa 0,19 g, e agli altri livelli le differenze sono piccole. Anche la dispersione è simile, con un valore massimo in sommità di circa 0,4 g.

4.3.3 Profili di drift in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione X ottenuti per il periodo di ritorno di 30 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

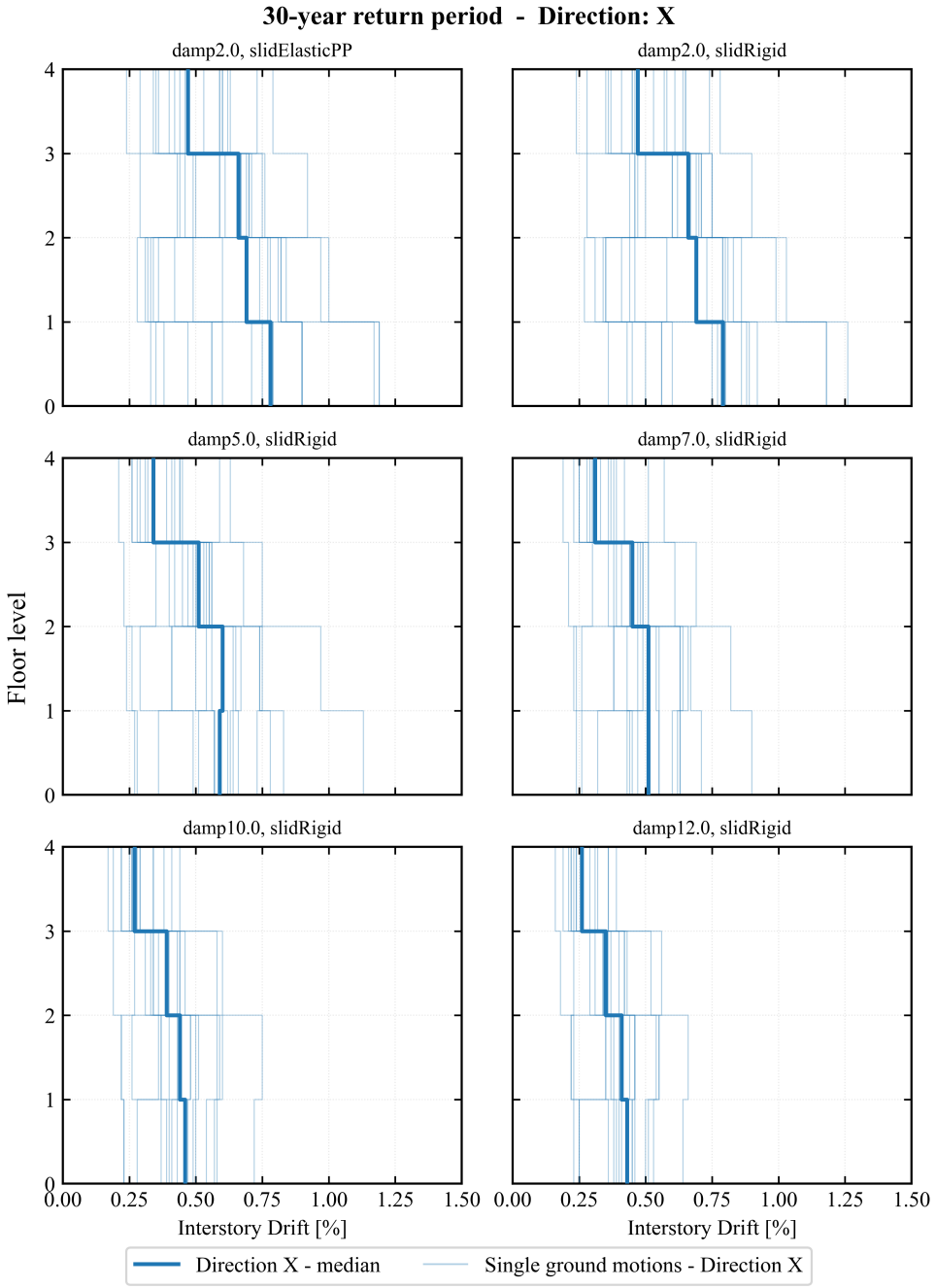


Figura 4.7: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

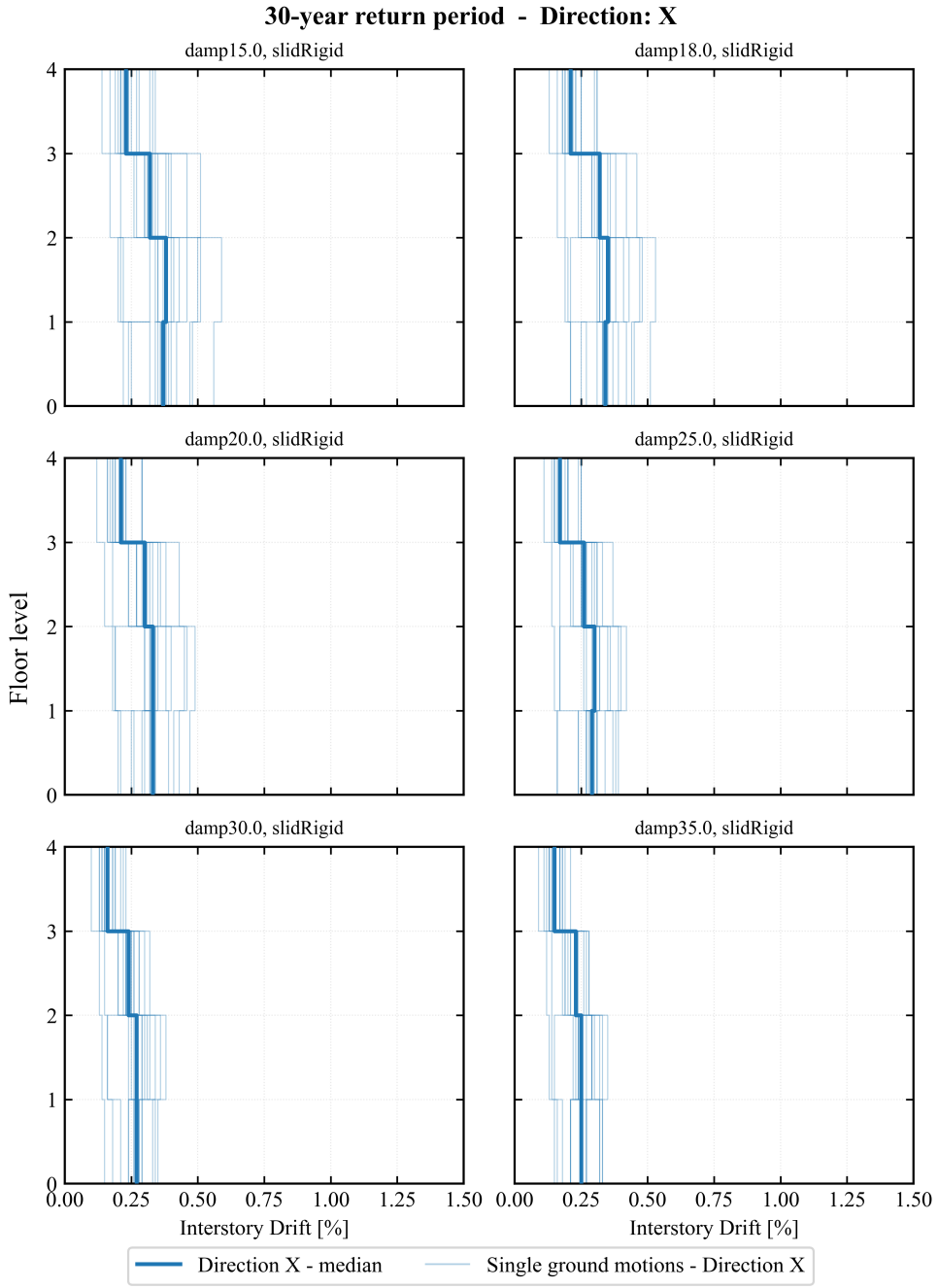


Figura 4.8: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è

pari a circa 0,8%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 0,45%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 0,6% con il 5%, a circa 0,45% con il 10% e a circa 0,25% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una certa dispersione, con valori al primo interpiano che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 1,25%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano tutti sotto circa 0,35%.

Il modello esplicito è quasi coincidente con il modello implicito al 2%, sia come mediana sia come dispersione: al primo interpiano il drift mediano è di circa 0,8% in entrambi i modelli e il valore massimo è di circa 1,2%.

4.3.4 Profili di drift in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione Y ottenuti per il periodo di ritorno di 30 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

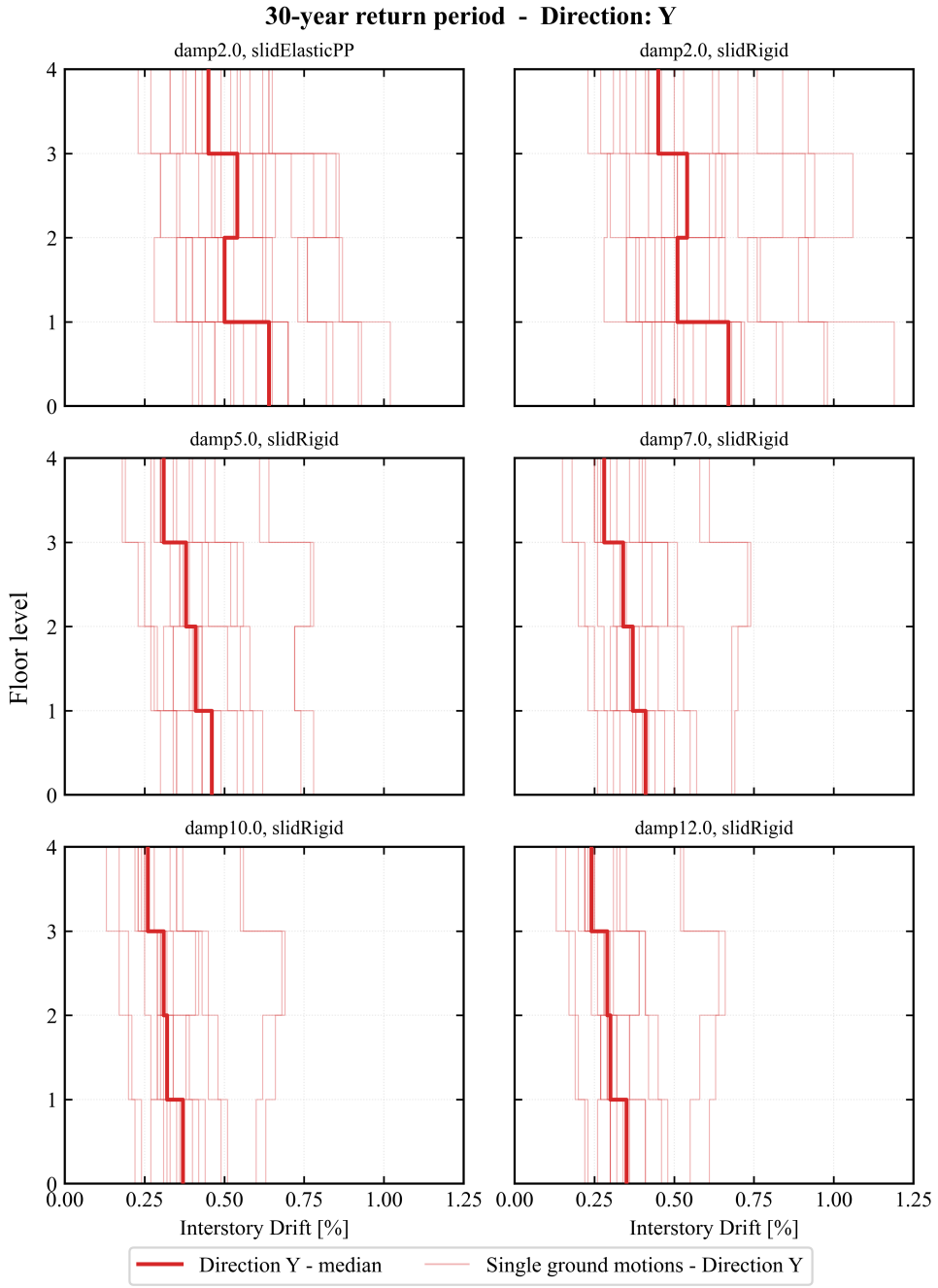


Figura 4.9: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

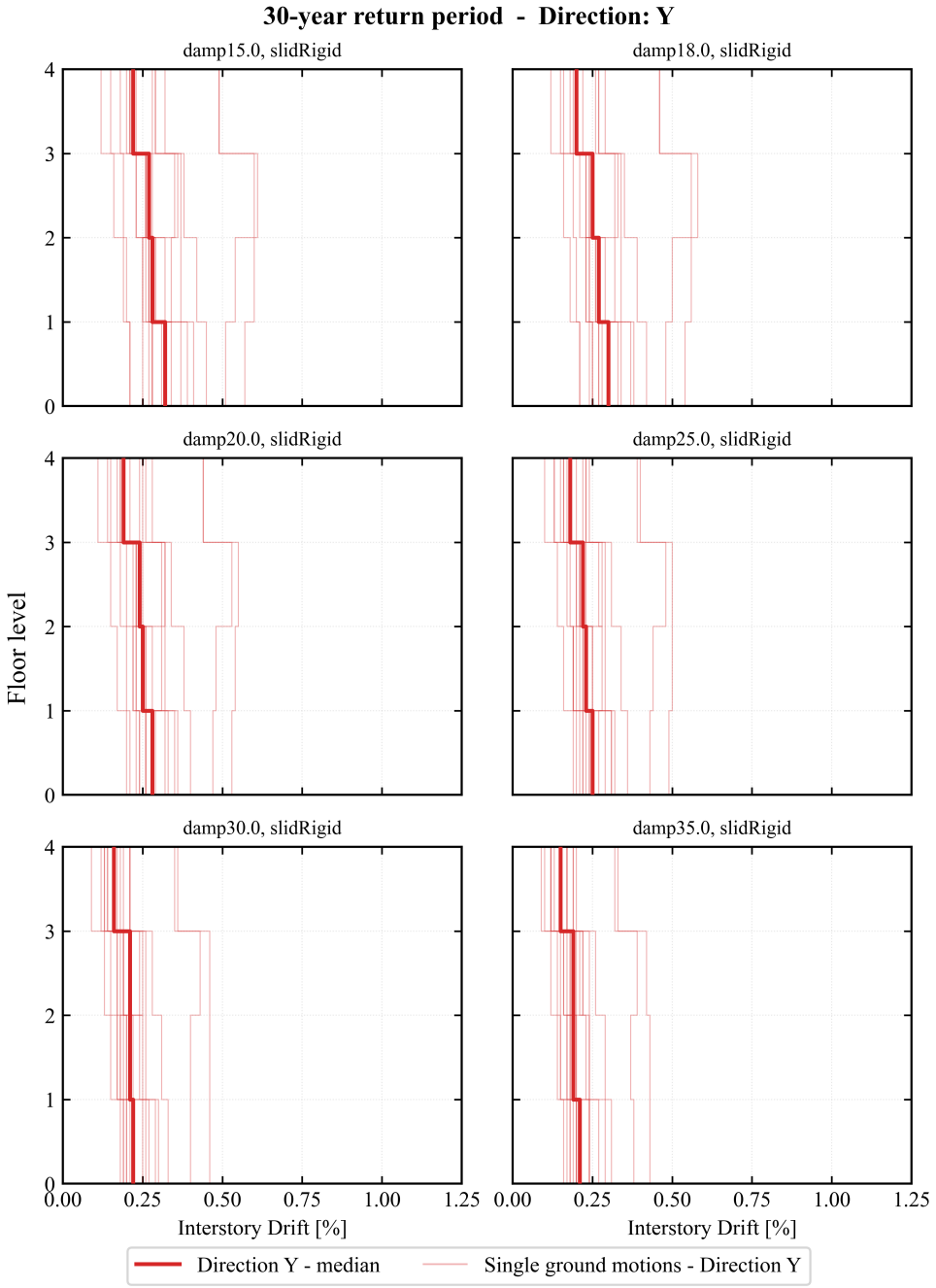


Figura 4.10: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 30 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano, si riduce al secondo, cresce leggermente al terzo e raggiunge il valore minimo all'ultimo interpiano.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è pari a circa 0,65%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 0,45%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 0,45% con il 5%, a circa 0,35% con il 10% e a circa 0,2% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una certa dispersione, con valori al primo interpiano che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 1,2%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano sotto circa 0,45%.

Il modello esplicito è quasi coincidente con il modello implicito al 2%: al primo interpiano il drift mediano è di circa 0,65% in entrambi i modelli. La dispersione è leggermente più bassa, con valori massimi di circa 1,0% contro circa 1,2%.

4.3.5 Confronto dei risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i profili mediani dell'accelerazione di piano e del drift interpiano nelle direzioni X e Y per il periodo di ritorno di 30 anni. Le curve blu si riferiscono ai modelli con modellazione implicita dello scorrimento, in cui tale effetto è rappresentato da uno smorzamento equivalente compreso tra il 2% e il 35%, mentre la curva arancione si riferisce al modello con modellazione esplicita, con un elemento di scorrimento bilineare e uno smorzamento viscoso pari al 2%. A questo tempo di ritorno nessuna scaffalatura collassa, quindi tutti i modelli sono confrontati sugli stessi 20 accelerogrammi.

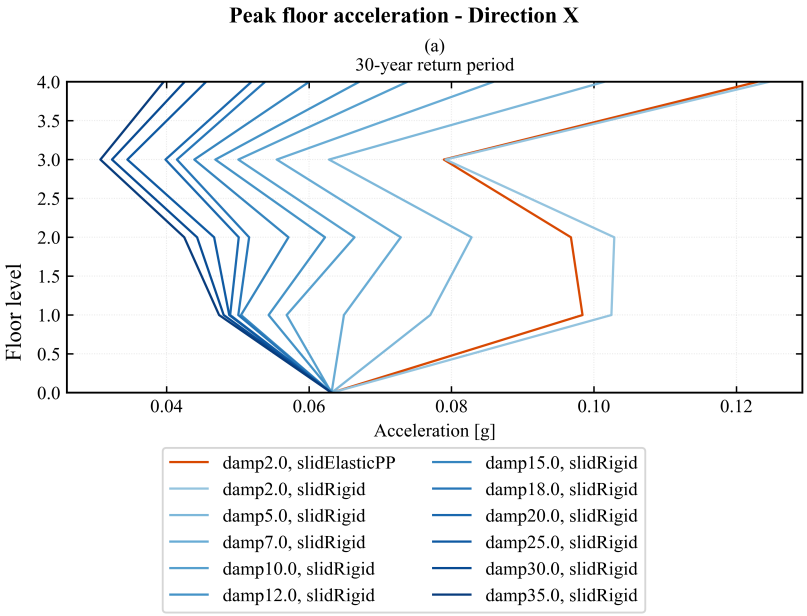


Figura 4.11: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 30 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

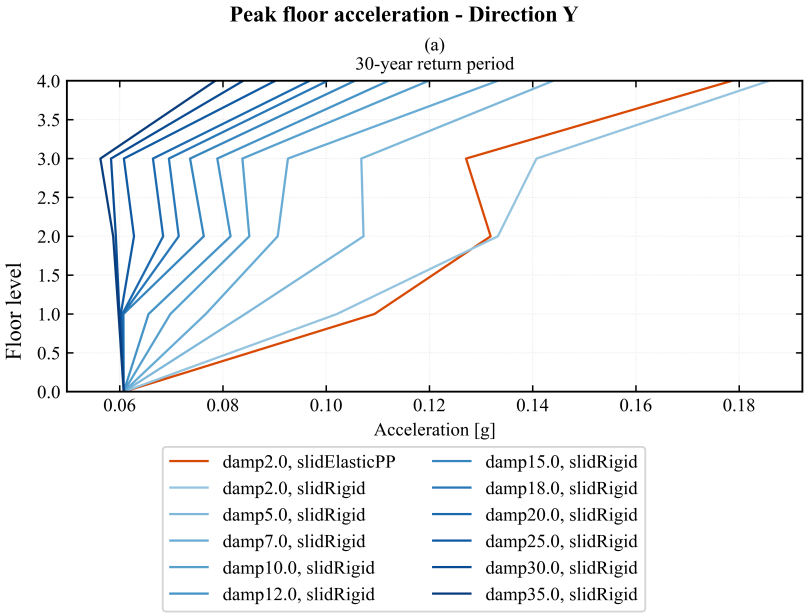


Figura 4.12: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 30 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

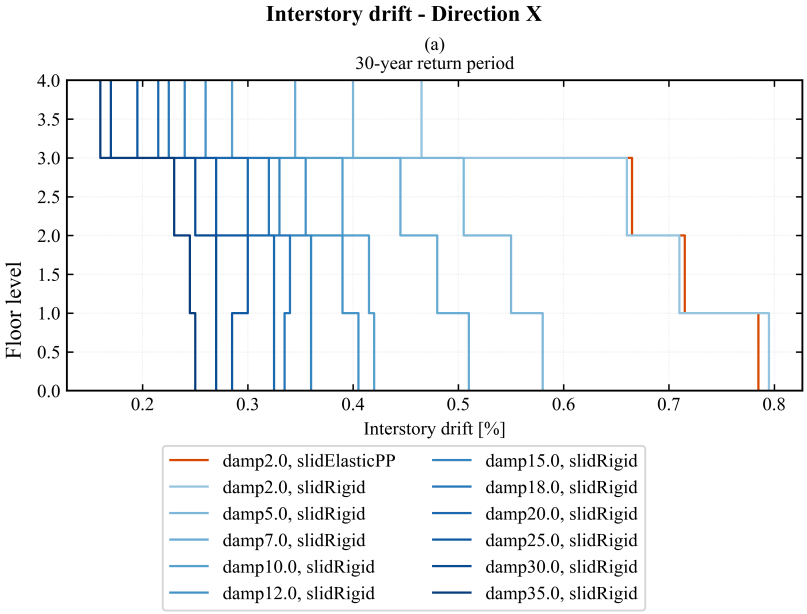


Figura 4.13: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 30 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

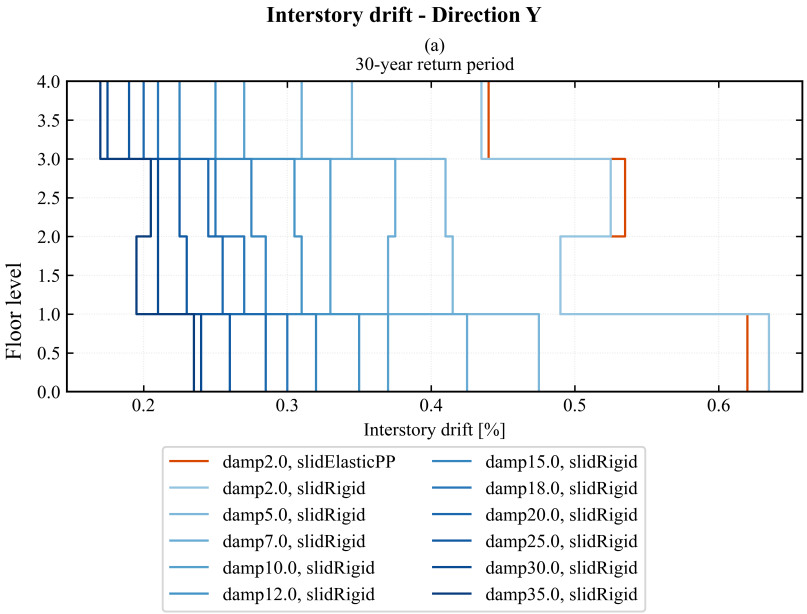


Figura 4.14: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 30 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

Nei modelli impliciti la risposta diminuisce all'aumentare dello smorzamento. In sommità l'accelerazione passa da circa 0,12 g con smorzamento al 2% a circa

0,04 g con smorzamento al 35% in direzione X, e da circa 0,19 g a circa 0,08 g in direzione Y. Allo stesso modo, il drift al primo interpiano passa da circa 0,8% a circa 0,25% in direzione X e da circa 0,6% a circa 0,25% in direzione Y.

Il modello esplicito dà risultati quasi coincidenti con quelli del modello implicito con smorzamento al 2%. A questo livello di intensità i pallet verosimilmente non scorrono, quindi il modello esplicito si comporta come quello rigido. I modelli impliciti con smorzamento più elevato risultano quindi meno cautelativi, poiché sottostimano le accelerazioni e il drift.

4.4 Tempo di ritorno 50 anni

4.4.1 Profili di accelerazione in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 50 anni. Per questo tempo di ritorno nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura, per nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

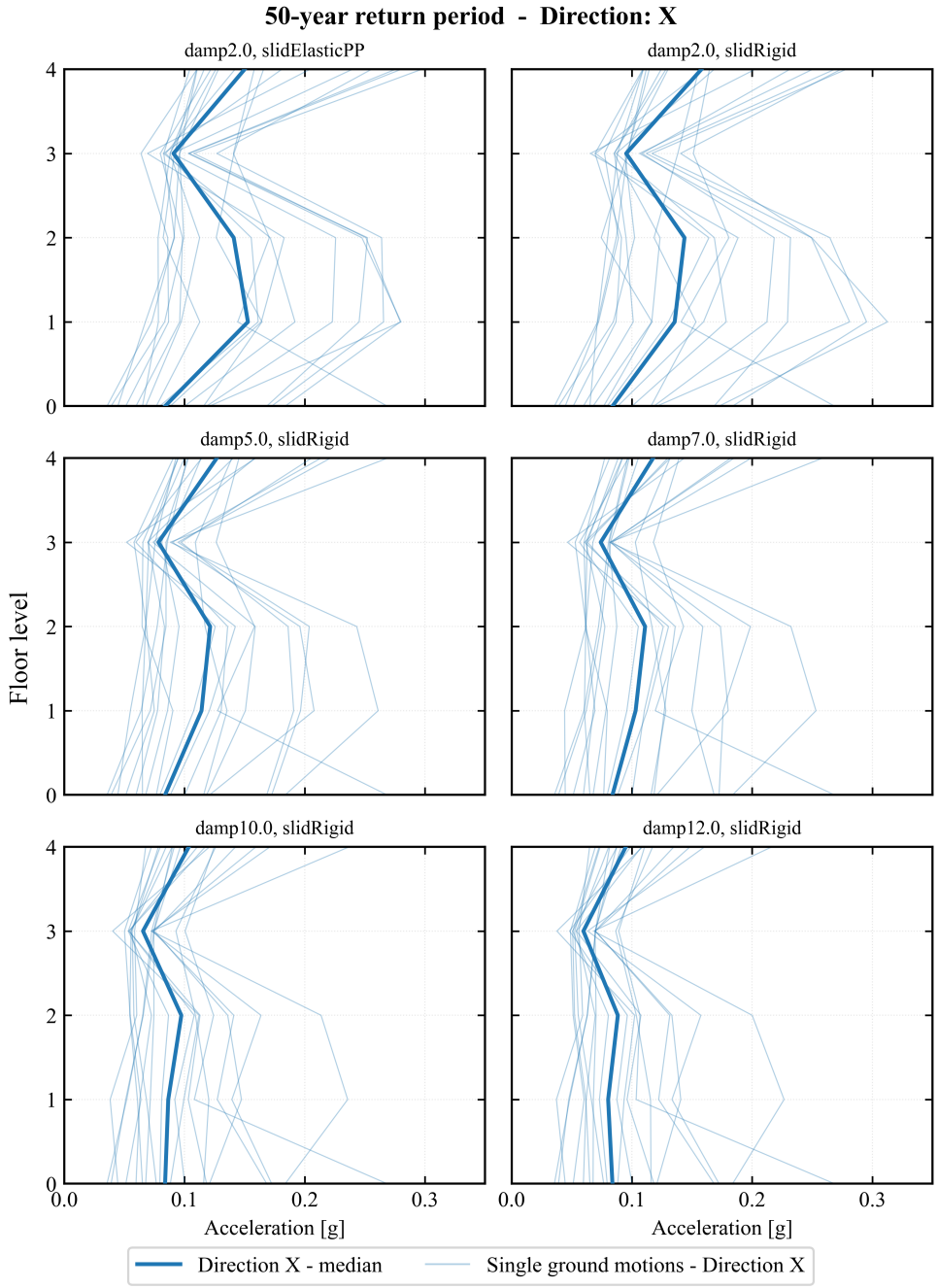


Figura 4.15: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

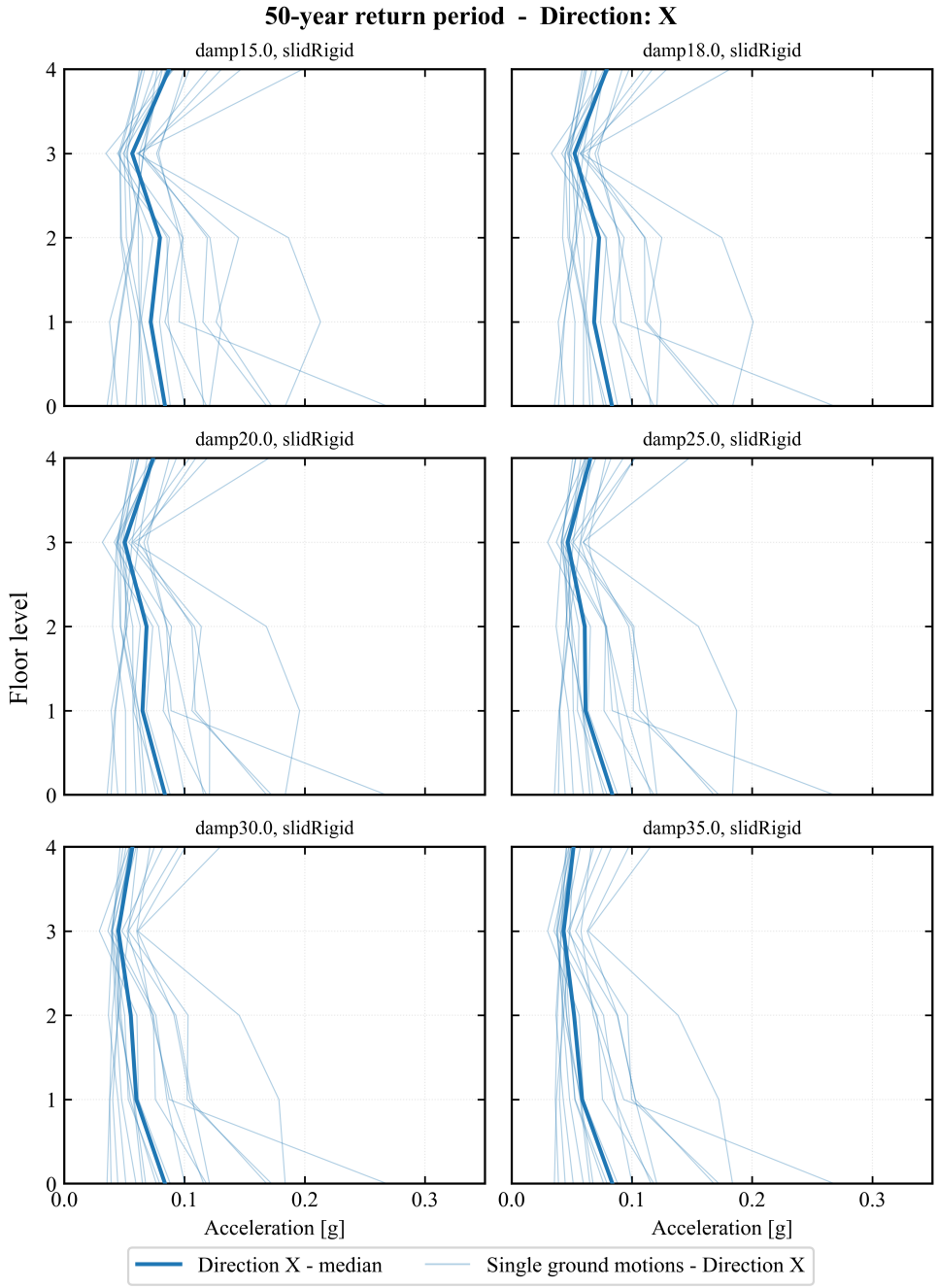


Figura 4.16: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è di circa 0,08 g ed è la stessa per tutti i modelli. Rispetto al tempo di ritorno di 30 anni, i valori sono più alti, ma l'andamento

lungo l'altezza resta simile: l'accelerazione cresce ai primi due livelli, si riduce al terzo e torna a crescere in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,16 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,13 g con il 5%, a circa 0,10 g con il 10% e a circa 0,05 g con il 35%. Per gli smorzamenti più elevati le accelerazioni ai piani diventano inferiori a quelle al suolo.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata soprattutto per gli smorzamenti più bassi, con valori che arrivano anche a circa 0,3 g. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e le curve si raccolgono attorno alla mediana.

Il modello esplicito resta vicino al modello implicito con smorzamento al 2%. Le differenze sono piccole: l'accelerazione al primo livello è di circa 0,15 g contro circa 0,13 g, mentre in sommità è di circa 0,15 g contro circa 0,16 g. Anche a questo livello di intensità il modello esplicito si comporta quindi in modo simile al modello rigido, e i modelli impliciti con smorzamento più alto sottostimano la risposta.

4.4.2 Profili di accelerazione in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano nella direzione Y per il periodo di ritorno di 50 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

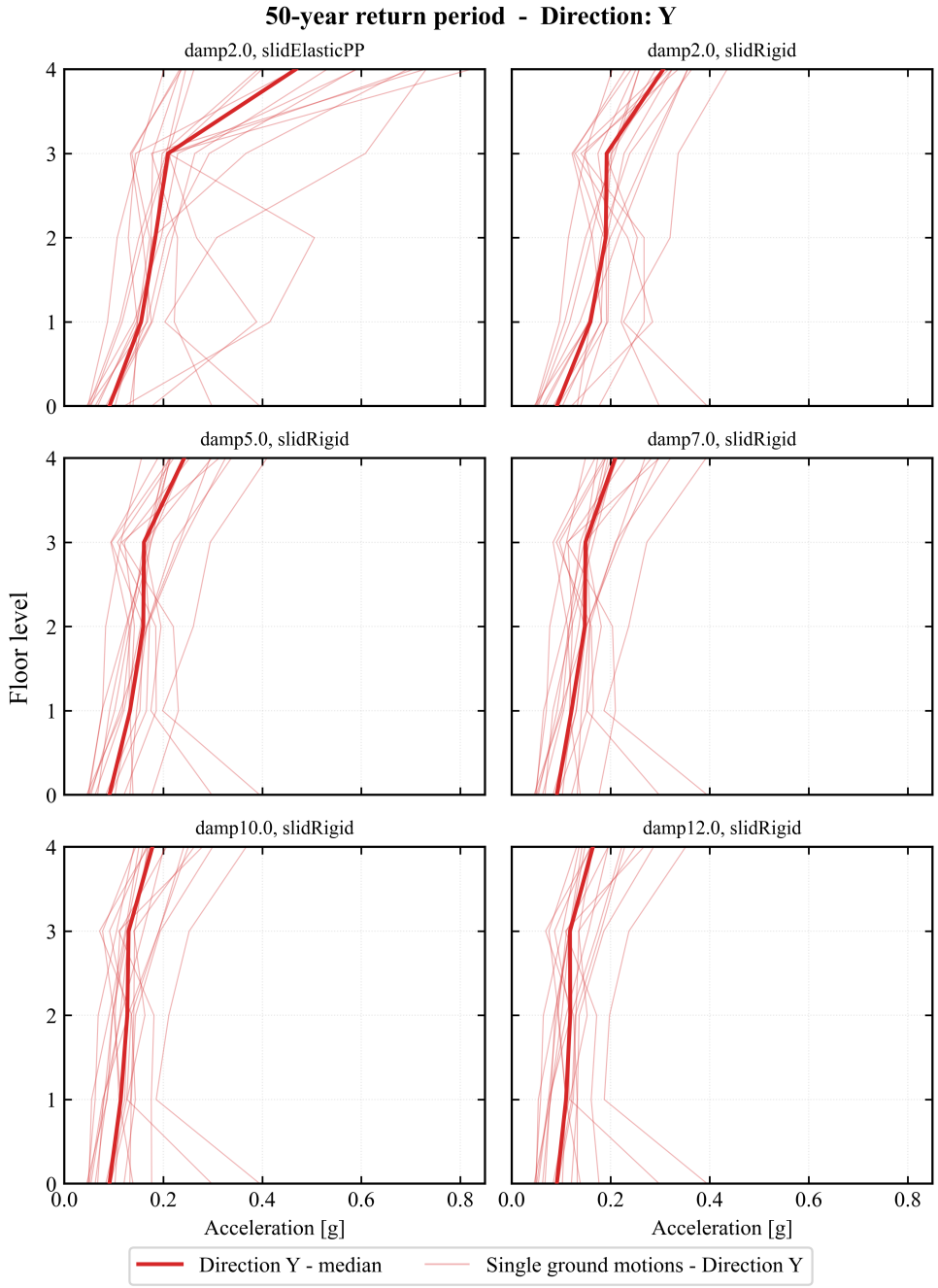


Figura 4.17: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

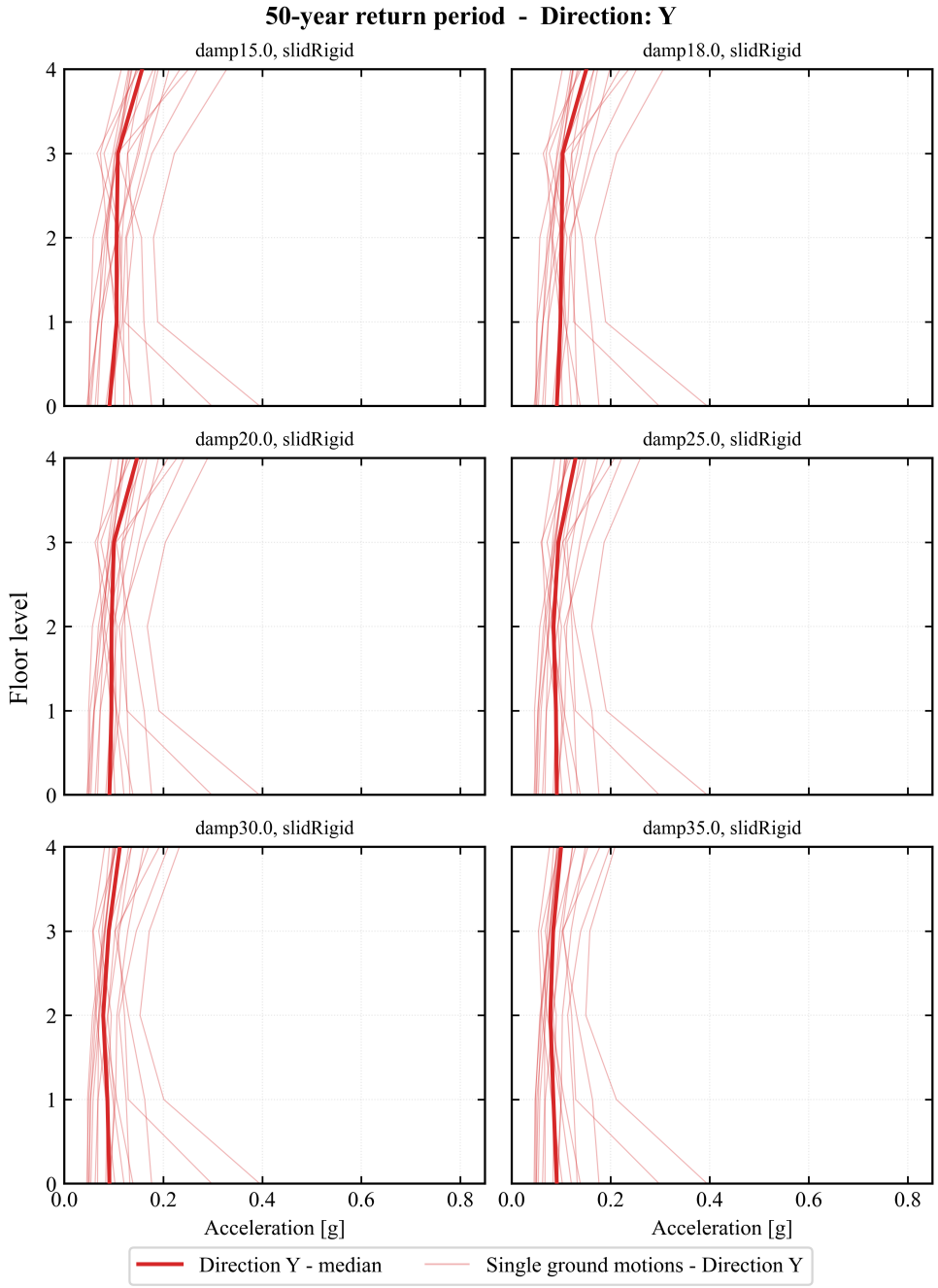


Figura 4.18: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è di circa 0.09 g ed è la stessa per tutti i modelli. In direzione Y l'accelerazione cresce con l'altezza in modo più regolare che in direzione

X e raggiunge il valore massimo in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0.30 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,24 g con il 5%, a circa 0,18 g con il 10% e a circa 0,10 g con il 35%. Anche la dispersione tra i singoli accelerogrammi si riduce all'aumentare dello smorzamento.

Il modello esplicito, invece, si discosta dal modello implicito del 2%. Fino al terzo piano i valori sono simili, mentre in sommità l'accelerazione raggiunge circa 0,47 g, contro circa 0,30 g del modello implicito. Anche la dispersione in sommità è molto più elevata, con alcuni accelerogrammi che superano 0,6 g. In direzione Y, quindi, il modello esplicito dà accelerazioni in sommità più elevate rispetto a tutti i modelli impliciti.

Questo picco è dovuto allo scorrimento dei pallet dell'ultimo livello, che a questa intensità inizia ad attivarsi per alcuni accelerogrammi. Quando i pallet scorrono e invertono il moto, il passaggio dalla fase di scorrimento a quella di aderenza provoca dei picchi di accelerazione.

4.4.3 Profili di drift in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione X per il periodo di ritorno di 50 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

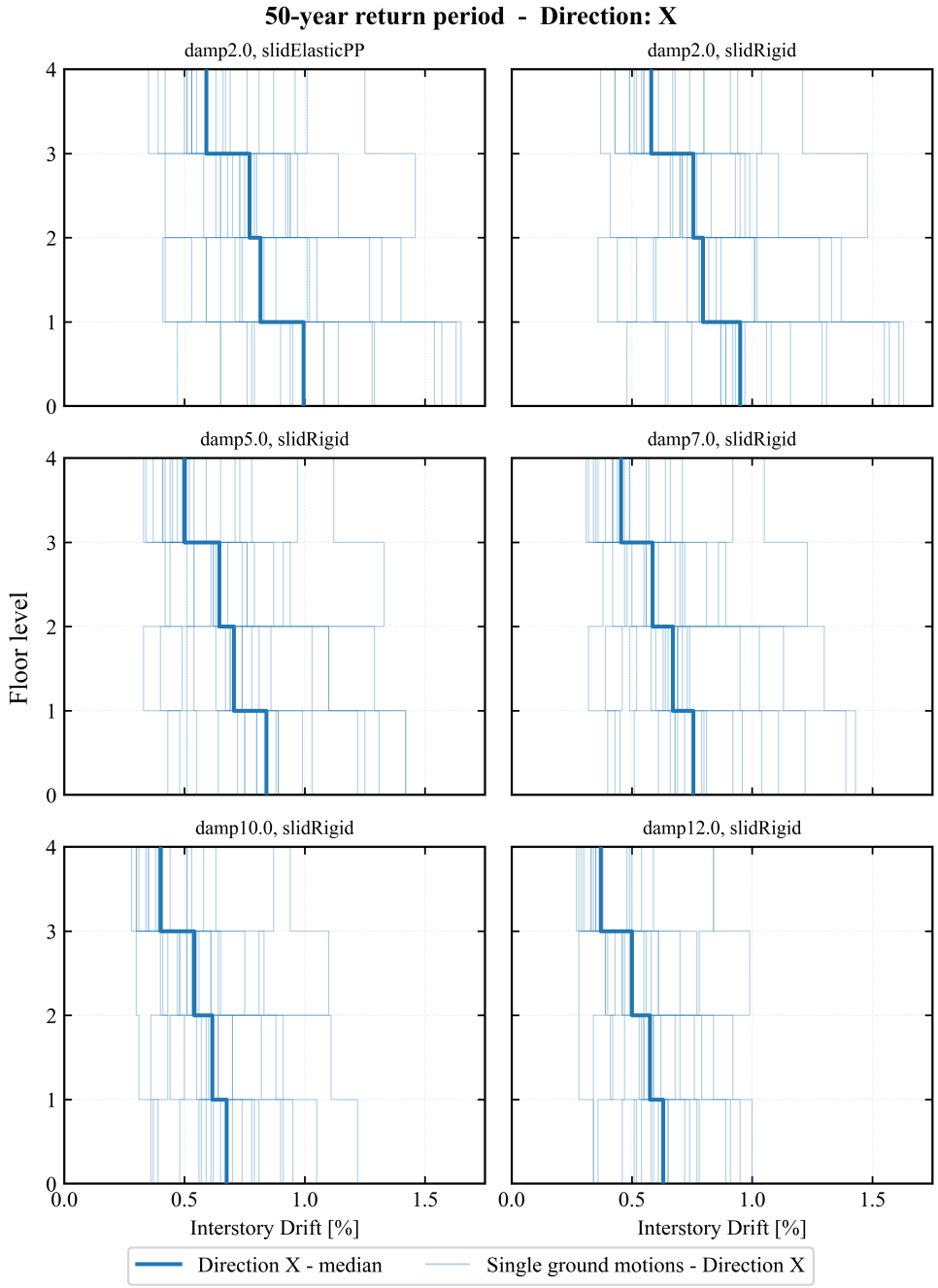


Figura 4.19: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

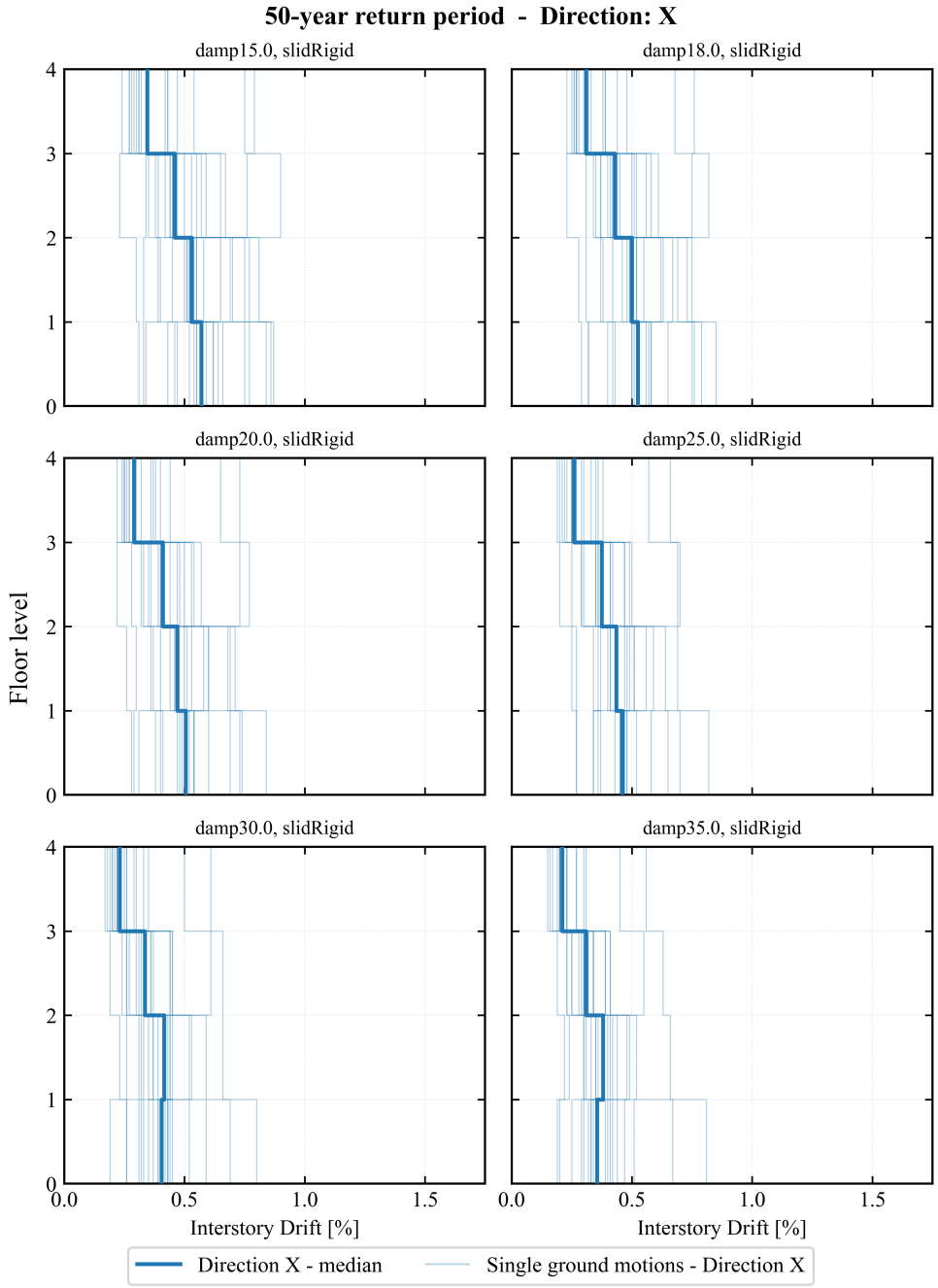


Figura 4.20: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità. Rispetto al tempo di ritorno di 30 anni, i valori sono più alti ma l'andamento lungo

l'altezza resta lo stesso.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è pari a circa 0,95%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 0,6%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 0,85% con il 5%, a circa 0,65% con il 10% e a circa 0,35% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che per gli smorzamenti più bassi arrivano a circa 1,6%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce.

Il modello esplicito è molto vicino al modello implicito al 2%. Al primo interpiano il drift è di circa 1,0%, contro circa 0,95%, e agli altri interpiani le differenze sono trascurabili. A differenza delle accelerazioni in direzione Y, per il drift in direzione X i due modelli danno quindi risultati quasi coincidenti.

4.4.4 Profili di drift in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione Y per il periodo di ritorno di 50 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

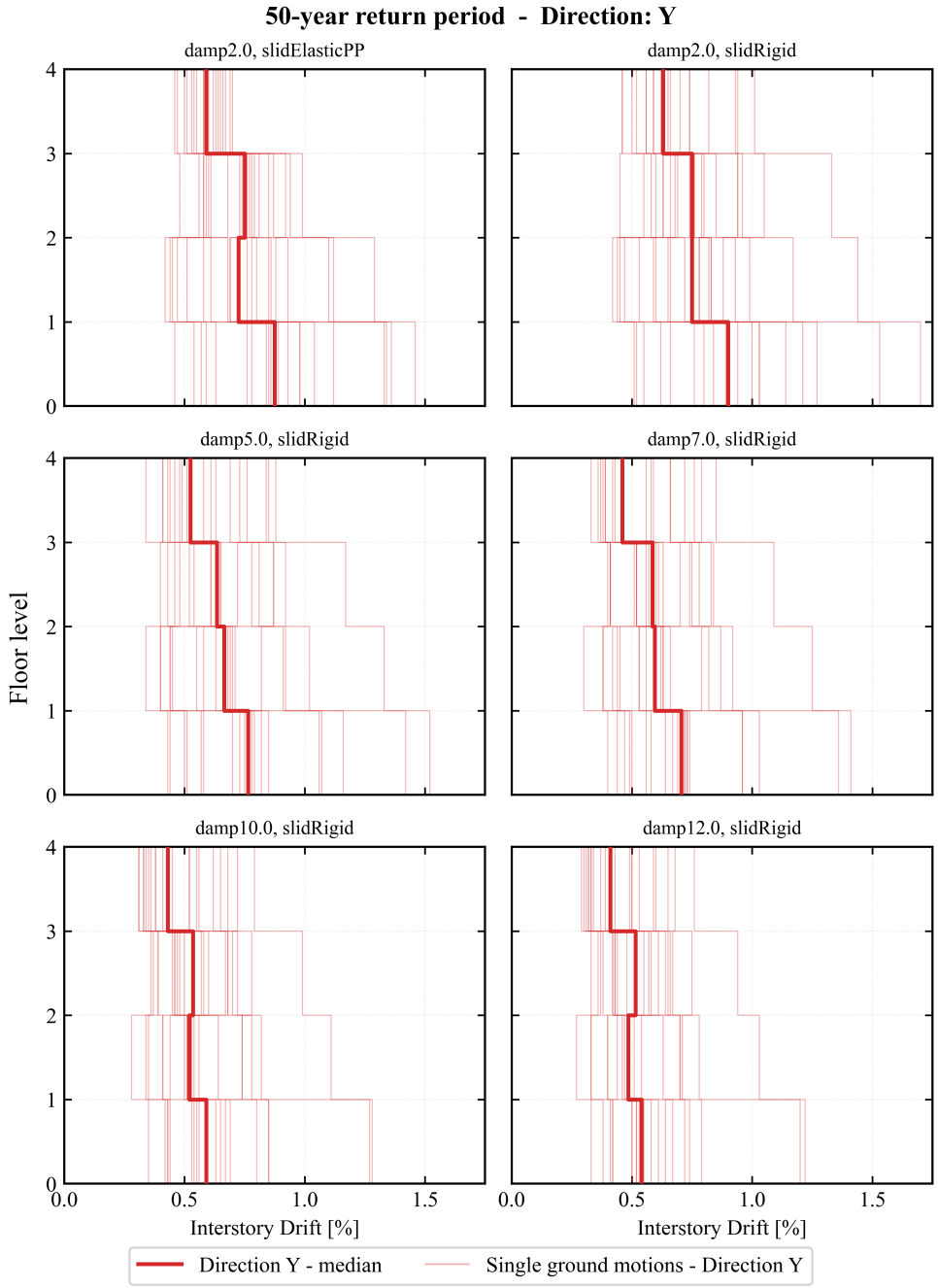


Figura 4.21: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

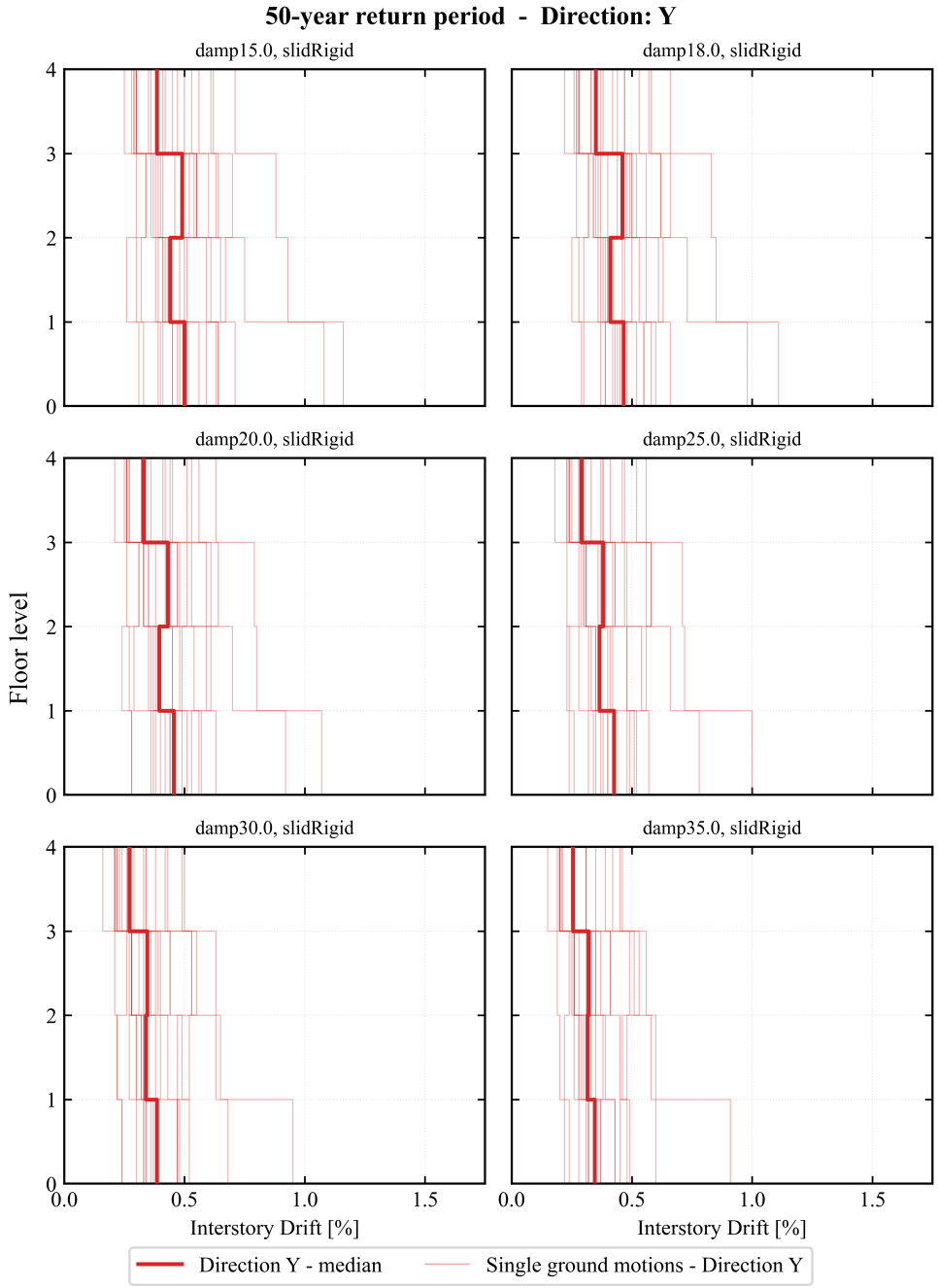


Figura 4.22: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 50 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano, si riduce al secondo, resta circa costante al terzo e raggiunge il valore minimo all'ultimo interpiano. Rispetto al tempo di

ritorno di 30 anni, i valori sono più alti ma l'andamento lungo l'altezza è simile.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è pari a circa 0,9%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 0,6%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 0,75% con il 5%, a circa 0,6% con il 10% e a circa 0,35% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 1,7%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce.

Il modello esplicito è molto vicino al modello implicito al 2%, con valori di poco inferiori: al primo interpiano il drift è di circa 0,87%, contro circa 0,9%. Anche la dispersione dei singoli accelerogrammi è leggermente più bassa, con valori massimi di circa 1,45%. Quindi, mentre per le accelerazioni in direzione Y i due modelli si discostano in sommità, per il drift danno risultati quasi coincidenti.

4.4.5 Confronto dei risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i profili mediani dell'accelerazione di piano e del drift interpiano nelle direzioni X e Y per il periodo di ritorno di 50 anni. Le curve blu si riferiscono ai modelli con modellazione implicita dello scorrimento, in cui tale effetto è rappresentato da uno smorzamento equivalente compreso tra il 2% e il 35%, mentre la curva arancione si riferisce al modello con modellazione esplicita, con un elemento di scorrimento bilineare e uno smorzamento viscoso pari al 2%. A questo tempo di ritorno nessuna scaffalatura collassa, quindi tutti i modelli sono confrontati sugli stessi 20 accelerogrammi.

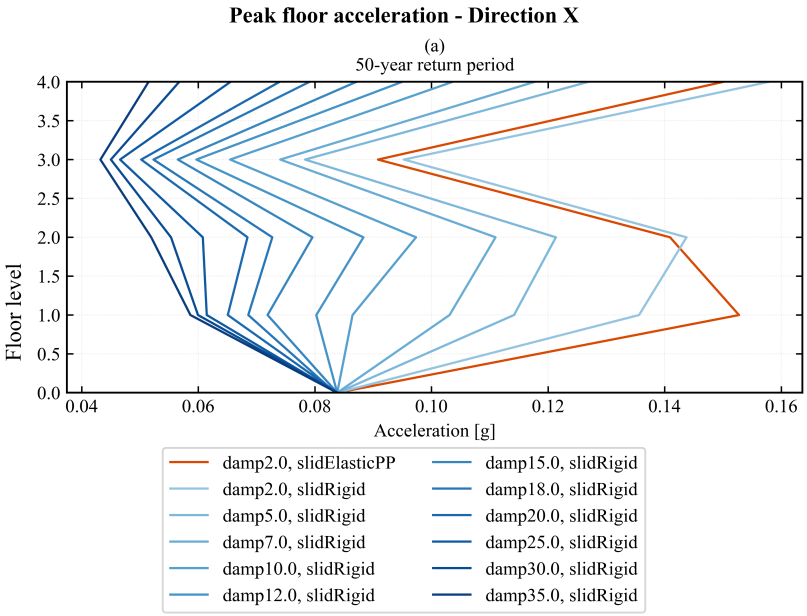


Figura 4.23: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 50 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

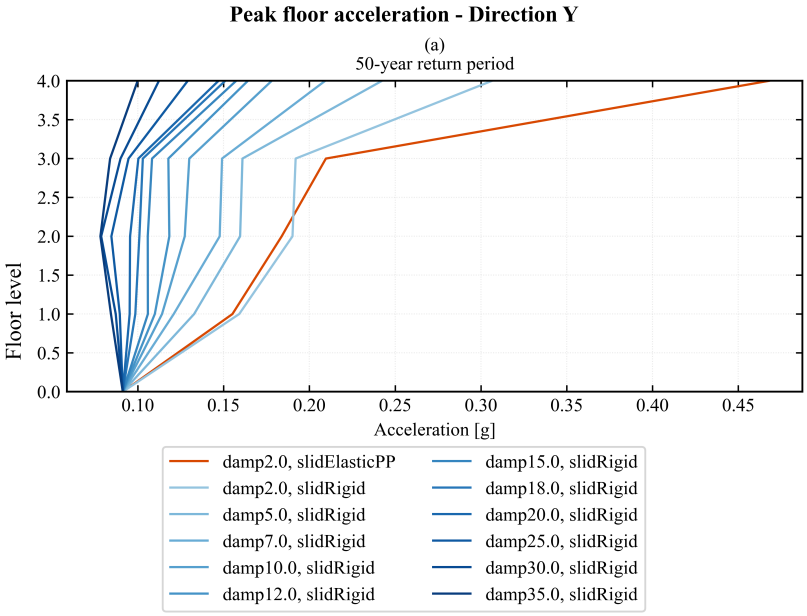


Figura 4.24: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 50 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

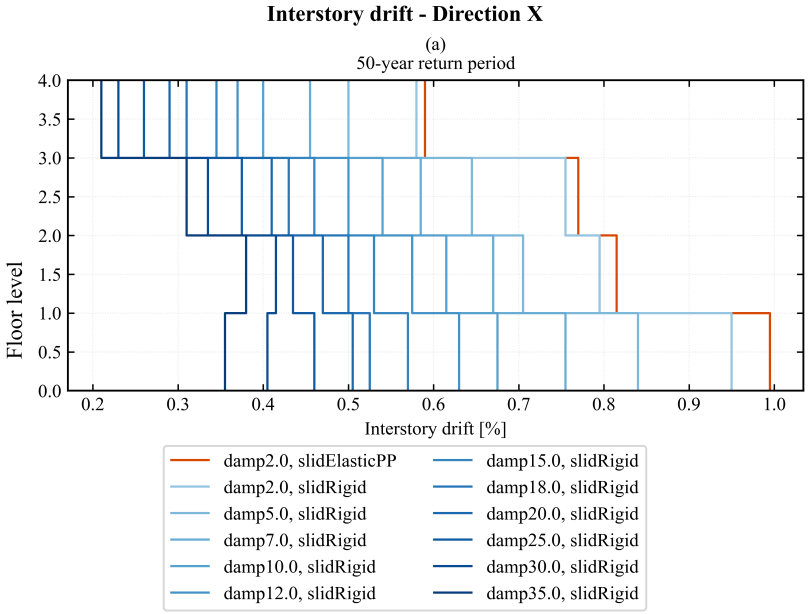


Figura 4.25: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 50 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

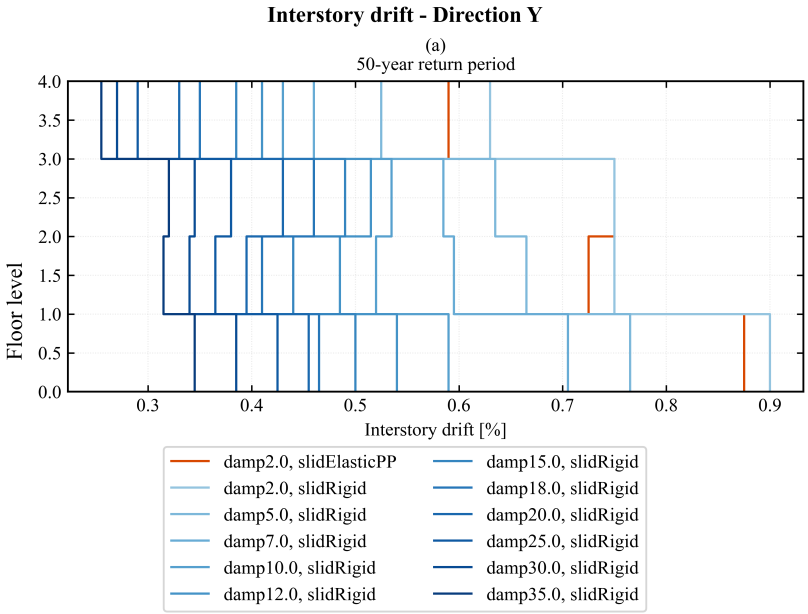


Figura 4.26: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 50 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

Per il tempo di ritorno di 50 anni i valori sono più alti rispetto ai 30 anni, ma l'andamento lungo l'altezza è lo stesso. L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,08

g in direzione X e circa 0,09 g in direzione Y.

Nei modelli impliciti la risposta diminuisce all'aumentare dello smorzamento. In sommità l'accelerazione passa da circa 0,16 g con smorzamento al 2% a circa 0,05 g con smorzamento al 35% in direzione X, e da circa 0,30 g a circa 0,10 g in direzione Y. Il drift al primo interpiano passa da circa 0,95% a circa 0,35% in direzione X e da circa 0,9% a circa 0,35% in direzione Y.

Il modello esplicito dà drift quasi coincidenti con quelli del modello implicito al 2%: al primo interpiano circa 1,0% contro circa 0,95% in direzione X, e circa 0,87% contro circa 0,9% in direzione Y. Anche le accelerazioni in direzione X sono simili, con differenze piccole: al primo livello circa 0,15 g contro circa 0,14 g, in sommità circa 0,15 g contro circa 0,16 g.

L'unica differenza importante riguarda l'accelerazione in sommità nella direzione Y. Fino al terzo livello i due modelli sono simili, ma all'ultimo livello il modello esplicito raggiunge circa 0,47 g, contro circa 0,30 g del modello implicito al 2%. Questo è dovuto al fatto che, per alcuni accelerogrammi, i pallet dell'ultimo livello iniziano a scorrere. In sommità infatti l'azione sismica è maggiore e la forza d'inerzia dei pallet supera la soglia d'attrito. Quando i pallet scorrono e invertono il moto, il passaggio dalla fase di scorrimento a quella di aderenza provoca dei picchi di accelerazione. In direzione X questo non avviene, perché le accelerazioni in sommità sono più basse e i pallet non scorrono.

Nel complesso, a 50 anni lo scorrimento dei pallet inizia ad attivarsi, ma non riduce la risposta: aumenta l'accelerazione in sommità e lascia il drift quasi invariato. Il modello implicito non riesce a cogliere questo effetto, perché aumentando lo smorzamento la risposta si riduce sempre. I modelli impliciti con smorzamento più alto sottostimano quindi la risposta, soprattutto in termini di accelerazione in sommità.

4.5 Tempo di ritorno 98 anni

4.5.1 Profili di accelerazione in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 98 anni. Per questo tempo di ritorno nessuna

analisi ha portato al collasso della scaffalatura, per nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

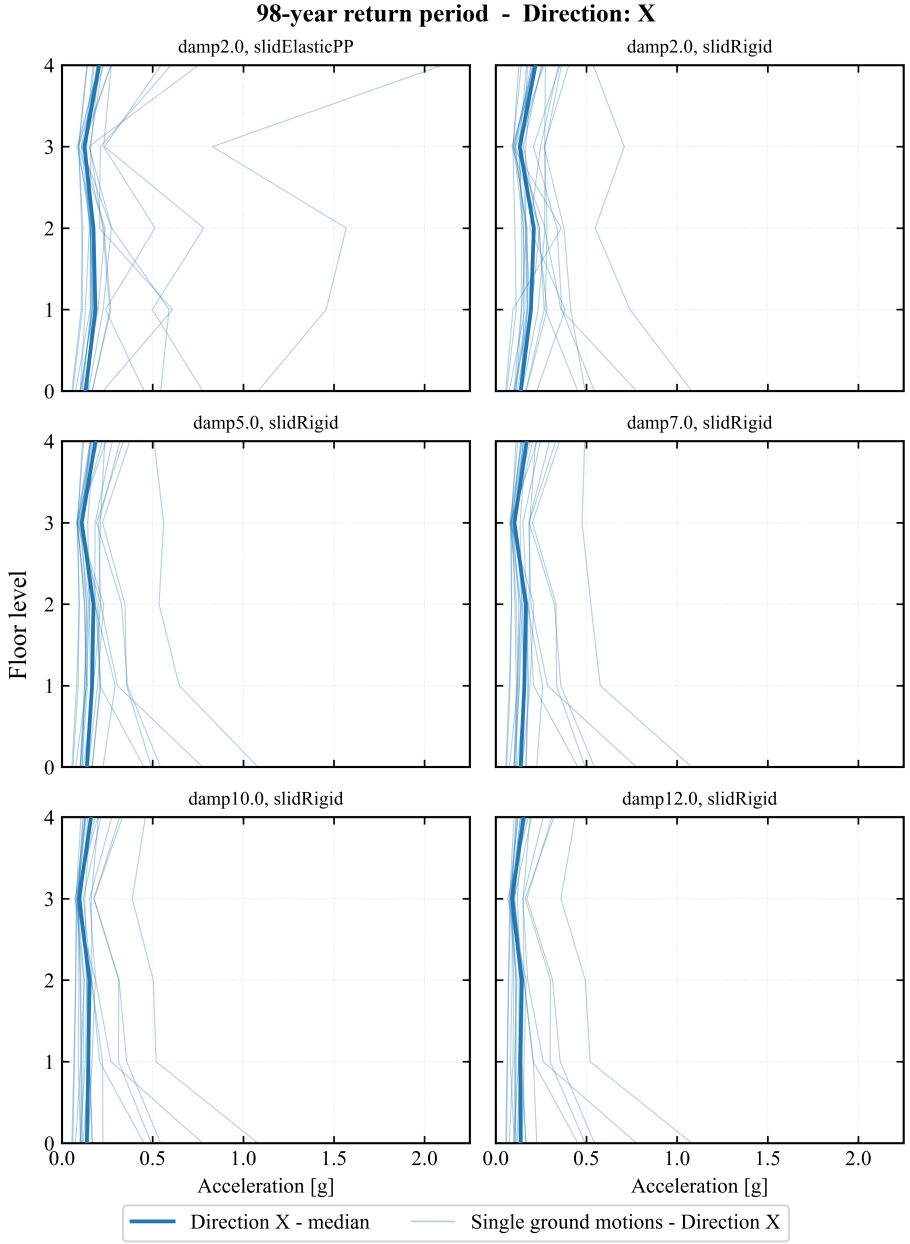


Figura 4.27: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

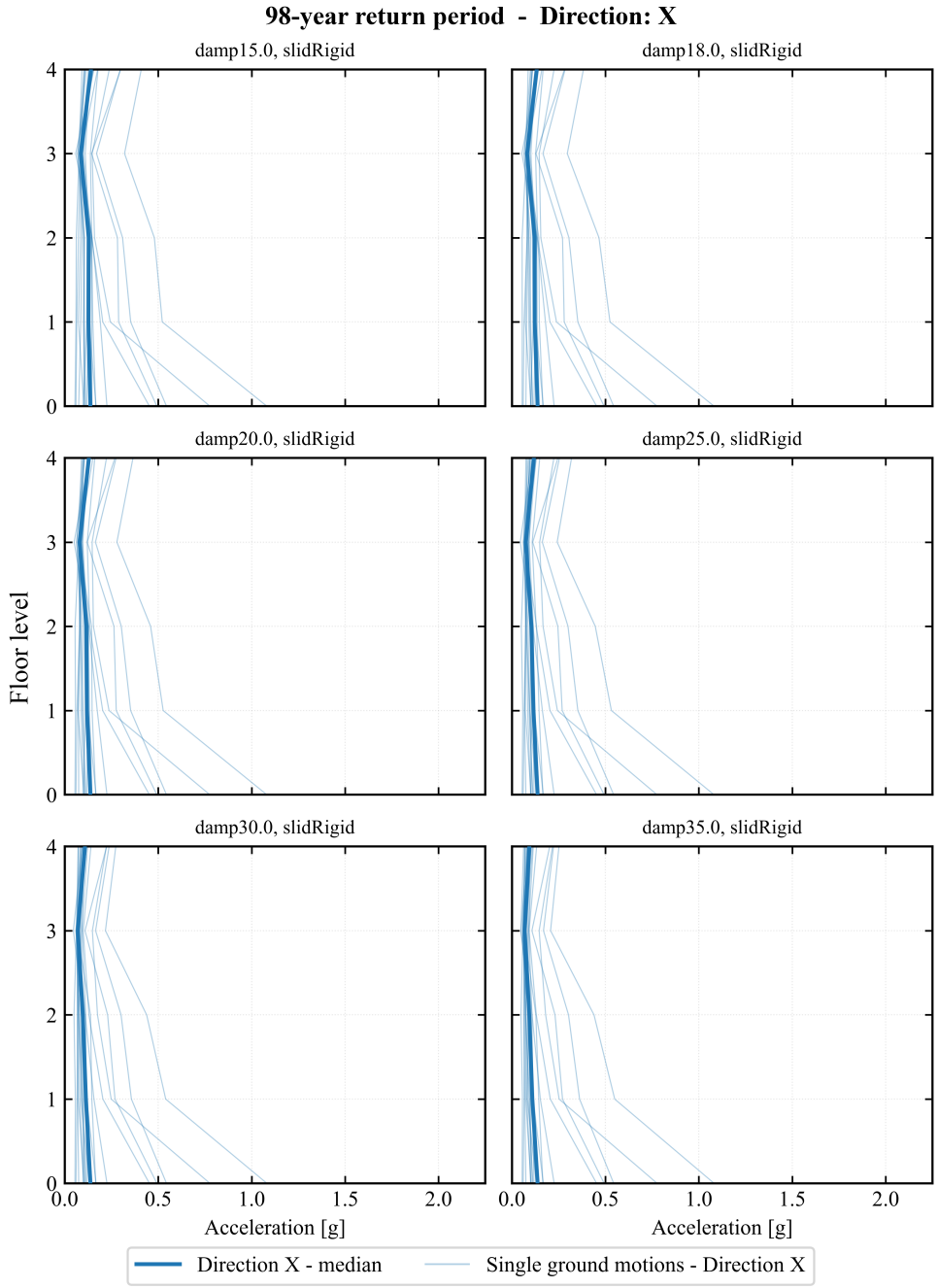


Figura 4.28: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,13 g. Rispetto ai 50 anni l'amplificazione lungo l'altezza è più bassa: le accelerazioni ai piani sono di poco superiori a quella

al suolo, con il valore minimo al terzo livello e una risalita in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,22 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,18 g con il 5%, a circa 0,15 g con il 10% e a circa 0,1 g con il 35%. Per gli smorzamenti più alti le accelerazioni ai piani diventano inferiori a quella al suolo.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata. Al suolo un accelerogramma arriva a circa 1,07 g, mentre ai piani i valori restano in generale sotto circa 0,7 g.

Il modello esplicito ha una mediana molto simile a quella del modello implicito al 2%: circa 0,19 g contro circa 0,2 g al primo livello, e circa 0,2 g contro circa 0,22 g in sommità. La differenza è nei singoli accelerogrammi. Nel modello esplicito alcuni danno picchi molto più alti, fino a circa 1,45 g al primo livello, circa 1,55 g al secondo e circa 2,1 g in sommità. Questi picchi sono dovuti allo scorrimento dei pallet, che a 98 anni si attiva per alcuni accelerogrammi anche in direzione X.

4.5.2 Profili di accelerazione in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 98 anni. Per questo tempo di ritorno nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura, per nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

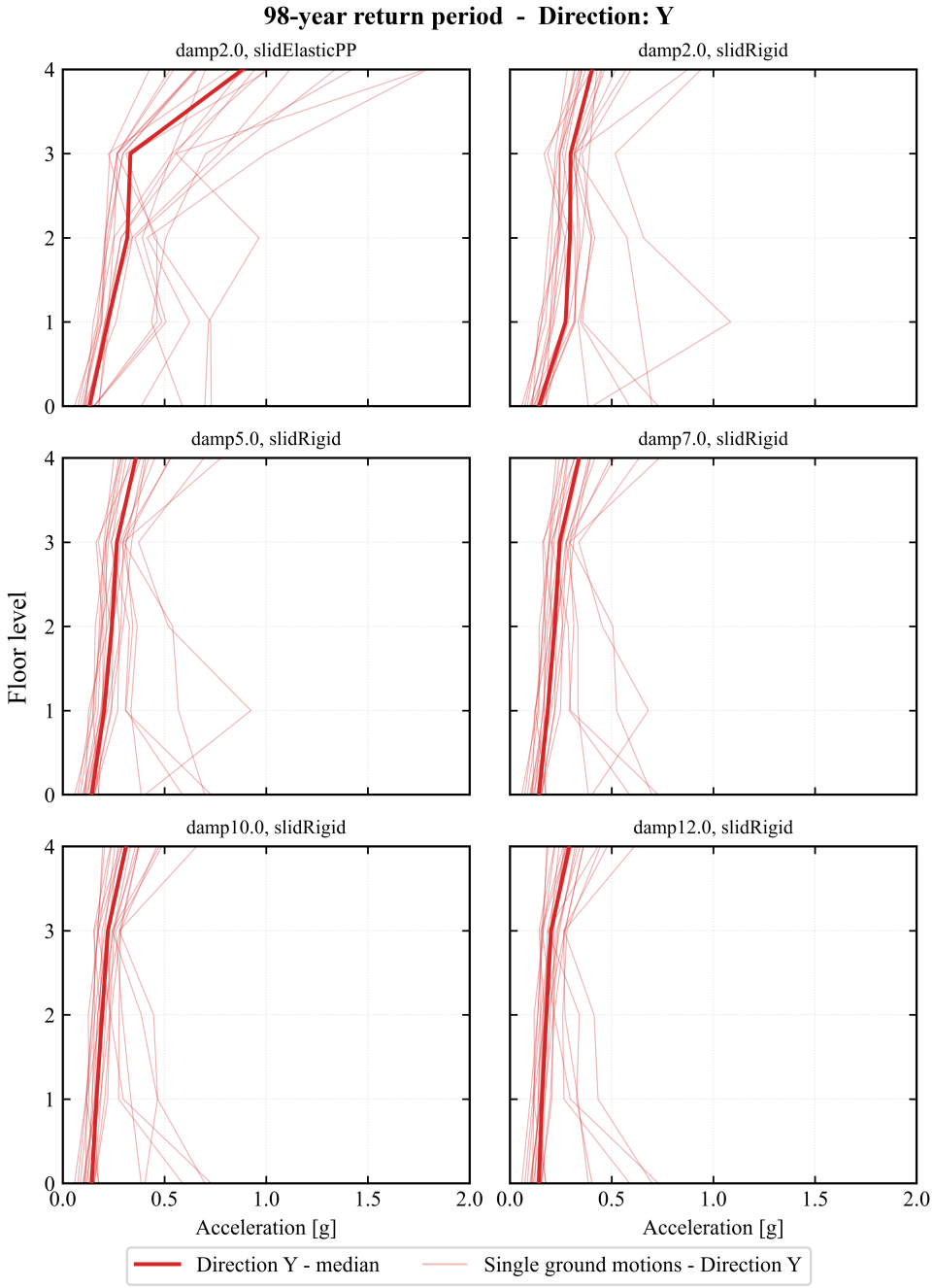


Figura 4.29: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

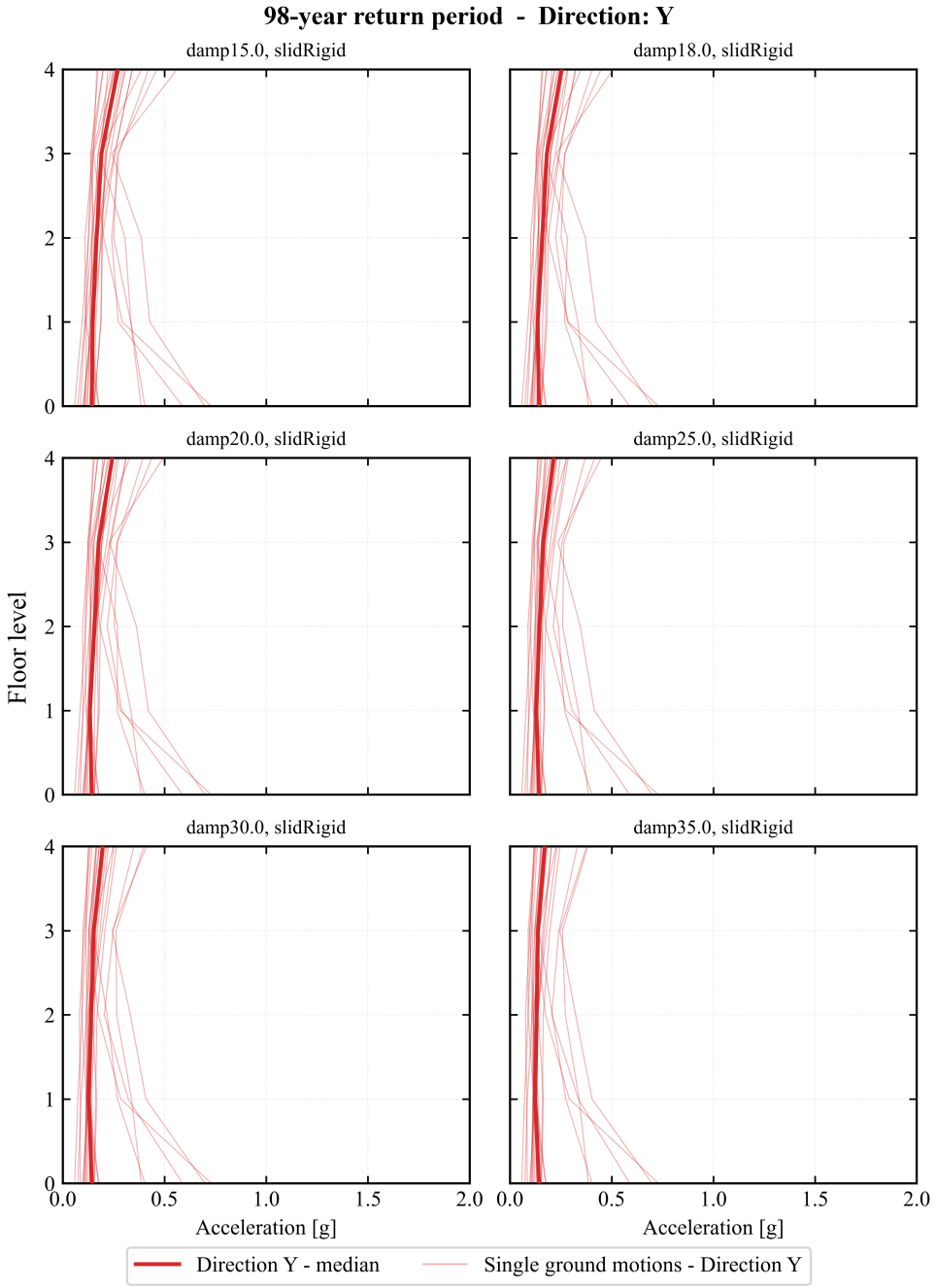


Figura 4.30: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,13 g. In direzione Y l'accelerazione cresce con l'altezza e raggiunge il valore massimo in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,4 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,36 g con il 5%, a circa 0,31 g con il 10% e a circa 0,17 g con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata. Nel modello implicito al 2% alcuni arrivano a circa 1,1 g al primo livello e a circa 0,9 g in sommità. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori in sommità restano sotto circa 0,4 g.

Il modello esplicito si discosta dal modello implicito al 2% soprattutto agli ultimi livelli. Al primo livello l'accelerazione è un po' più bassa, circa 0,23 g contro circa 0,27 g. Salendo la differenza cresce: al terzo livello si ha circa 0,43 g contro circa 0,3 g, e in sommità circa 0,9 g contro circa 0,4 g. Anche la dispersione in sommità è molto più alta, con diversi accelerogrammi tra circa 1 g e circa 1,8 g. Rispetto ai 50 anni lo scorrimento dei pallet interessa più accelerogrammi, e il picco in sommità diventa più evidente anche nella mediana. Come ai tempi di ritorno precedenti, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet.

4.5.3 Profili di drift in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione X per il periodo di ritorno di 98 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

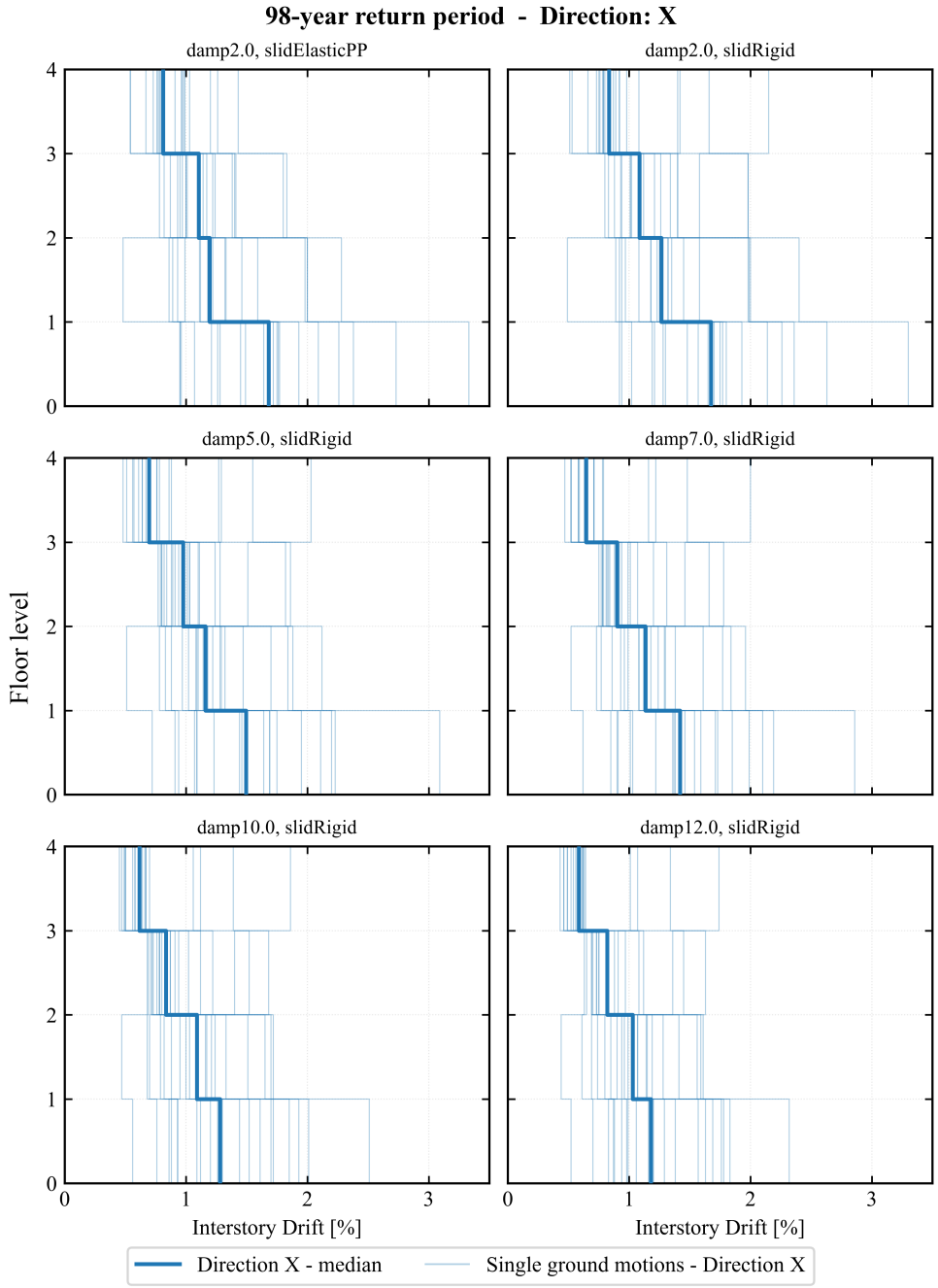


Figura 4.31: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

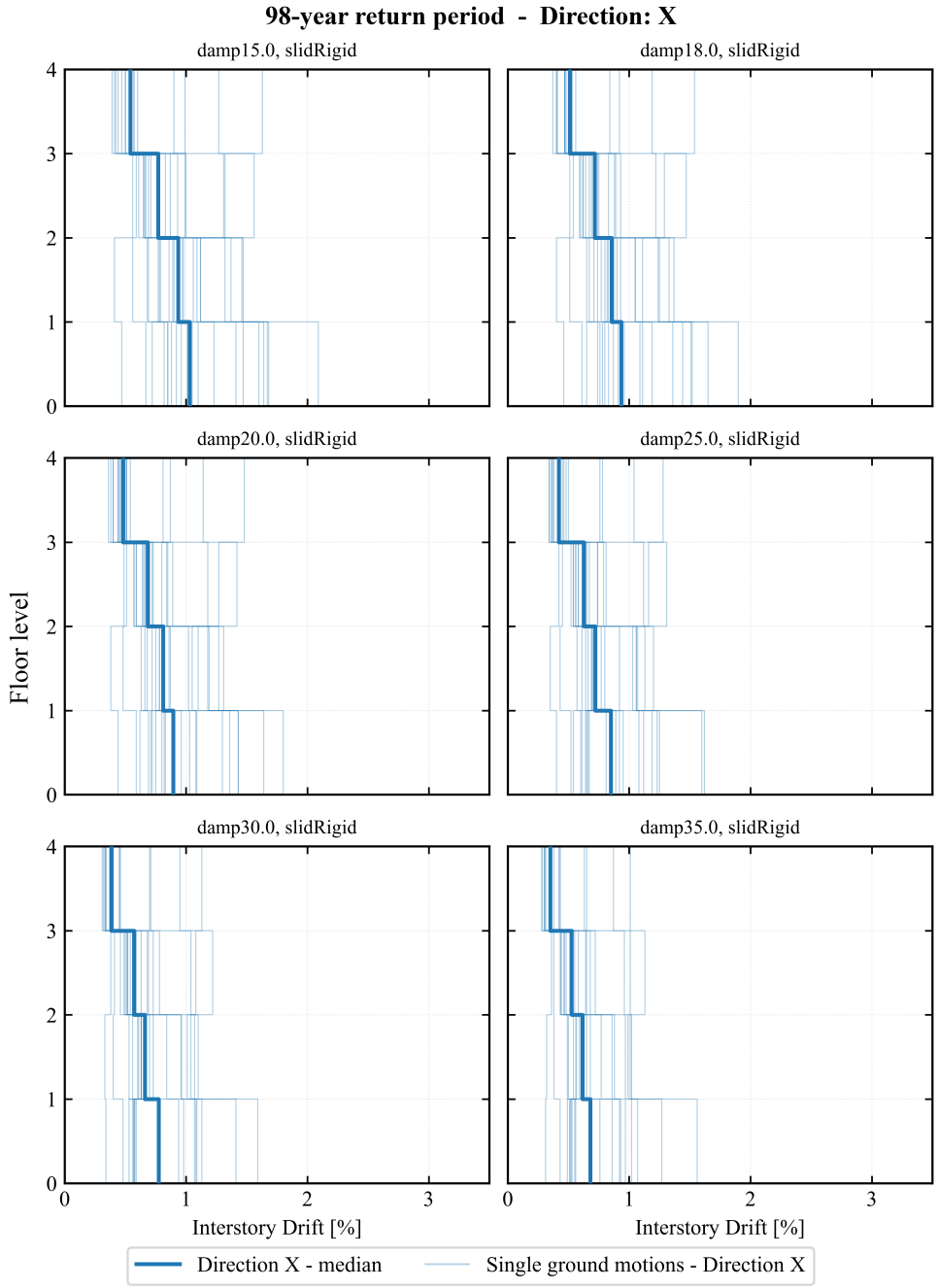


Figura 4.32: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità, con lo stesso andamento dei tempi di ritorno più bassi.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è pari a circa 1,7%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 0,85%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 1,5% con il 5%, a circa 1,3% con il 10% e a circa 0,7% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 3,3%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano sotto circa 1,55%.

Il modello esplicito è quasi coincidente con il modello implicito al 2%, sia come mediana sia come dispersione. Al primo interpiano il drift mediano è di circa 1,7% in entrambi i modelli e il valore massimo è di circa 3,3%. Agli altri interpiani le differenze sono trascurabili. Anche se a 98 anni i pallet scorrono per alcuni accelerogrammi, questo non modifica il drift in direzione X: il suo effetto si vede solo sui picchi di accelerazione.

4.5.4 Profili di drift in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione Y per il periodo di ritorno di 98 anni. Per questo tempo di ritorno, nessuna analisi ha portato al collasso della scaffalatura in nessuno dei modelli considerati; di conseguenza, i profili e le mediane sono calcolati su tutte e venti le analisi.

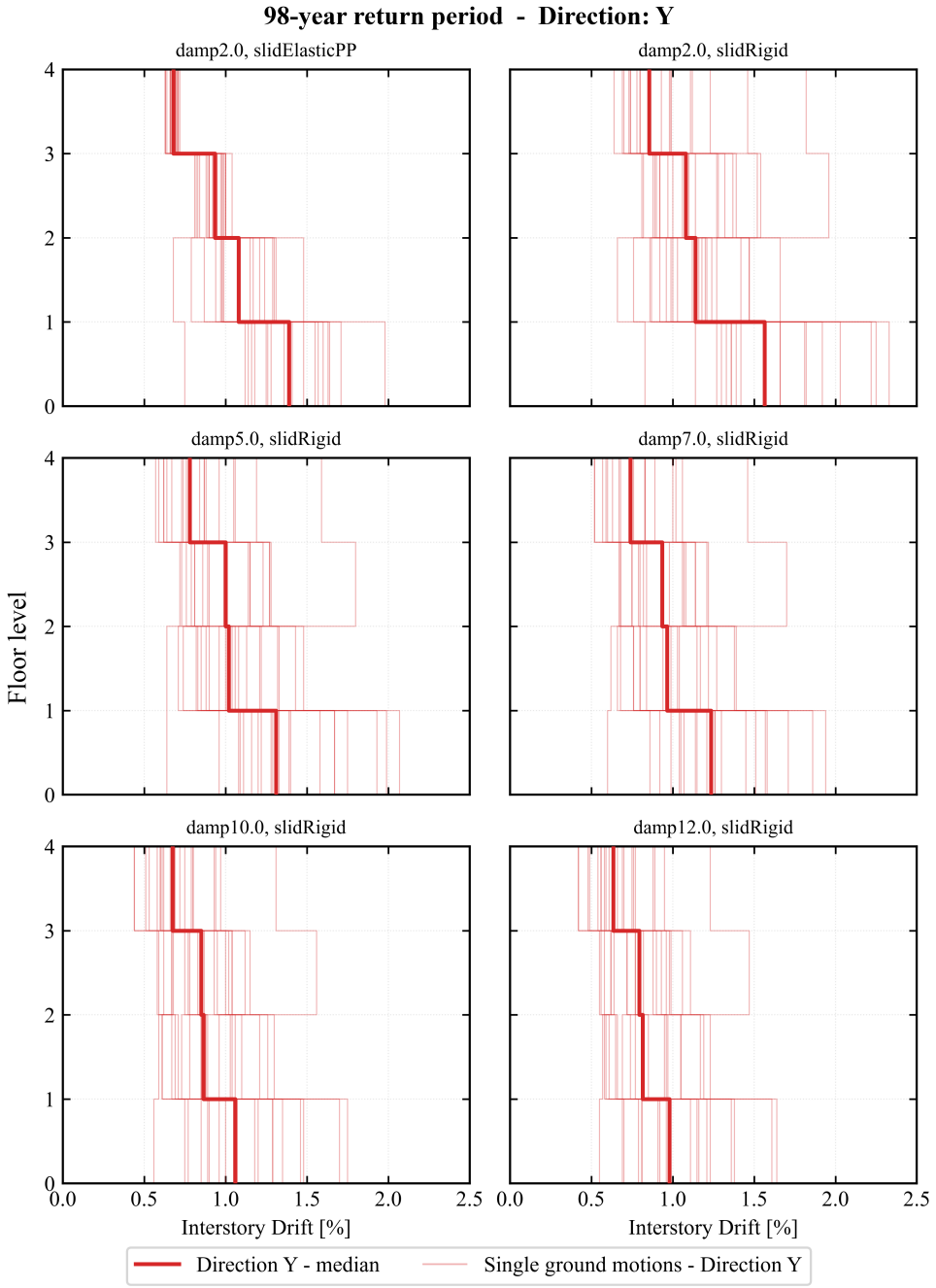


Figura 4.33: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

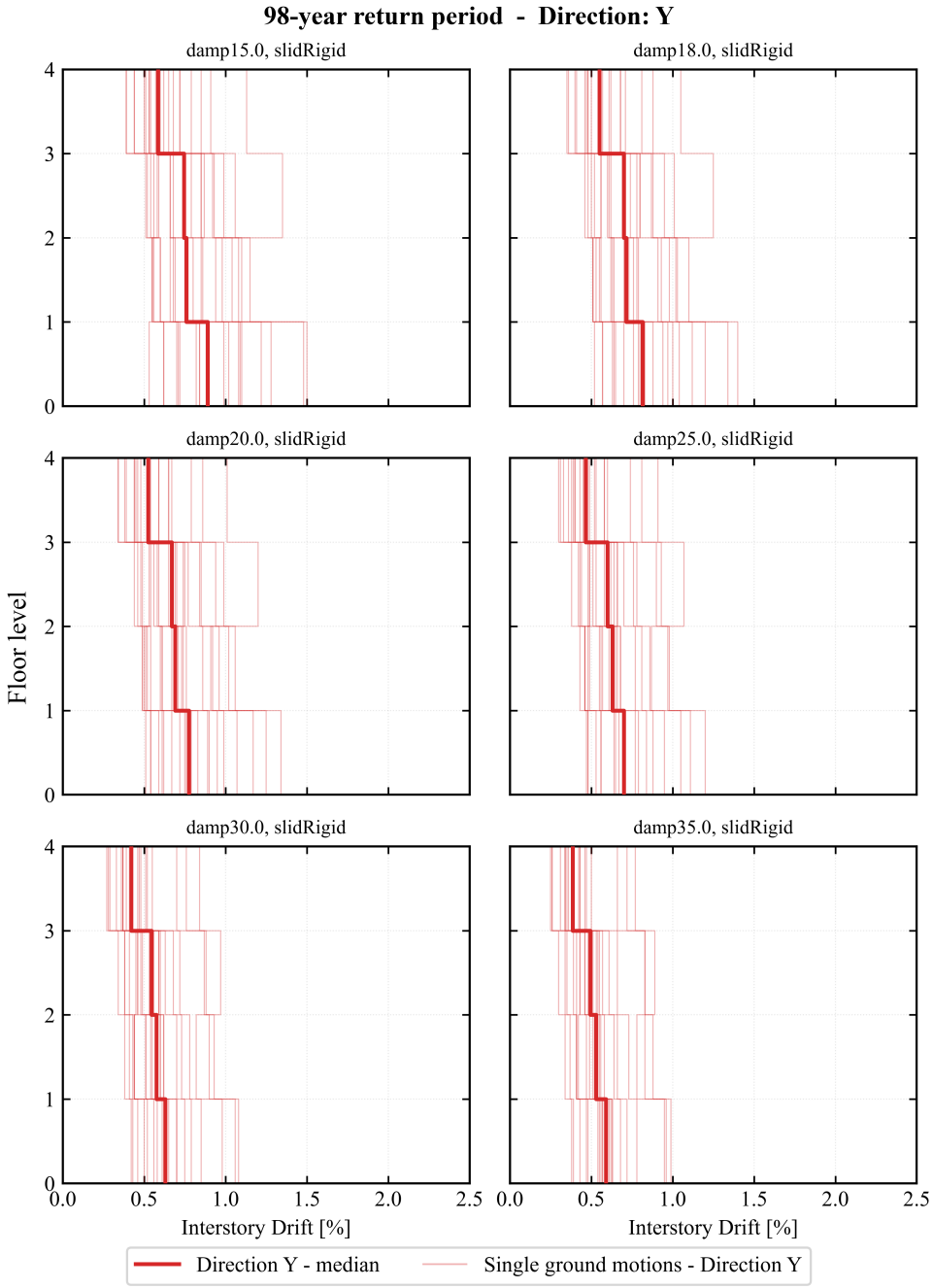


Figura 4.34: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 98 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è pari

a circa 1,55%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 0,85%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 1,3% con il 5%, a circa 1,05% con il 10% e a circa 0,6% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 2,3%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano sotto circa 1%.

Il modello esplicito dà drift più bassi del modello implicito al 2%, e la differenza cresce salendo. Al primo interpiano il drift è di circa 1,4%, contro circa 1,55%, mentre all'ultimo interpiano è di circa 0,67%, contro circa 0,85%, un valore simile a quello del modello implicito al 10%. Anche la dispersione è più bassa: al primo interpiano i valori massimi sono di circa 2%, contro circa 2,3%. All'ultimo interpiano i singoli accelerogrammi danno valori quasi uguali tra loro, compresi tra circa 0,63% e circa 0,68%. A 98 anni compare quindi per la prima volta in direzione Y la riduzione del drift agli ultimi interpiani dovuta allo scorrimento dei pallet, che diventa più marcata ai tempi di ritorno successivi.

4.5.5 Confronto dei risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i profili mediani dell'accelerazione di piano e del drift interpiano nelle direzioni X e Y per il periodo di ritorno di 98 anni. Le curve blu si riferiscono ai modelli con modellazione implicita dello scorrimento, in cui tale effetto è rappresentato da uno smorzamento equivalente compreso tra il 2% e il 35%, mentre la curva arancione si riferisce al modello con modellazione esplicita, con un elemento di scorrimento bilineare e uno smorzamento viscoso pari al 2%. A questo tempo di ritorno nessuna scaffalatura collassa, quindi tutti i modelli sono confrontati sugli stessi 20 accelerogrammi.

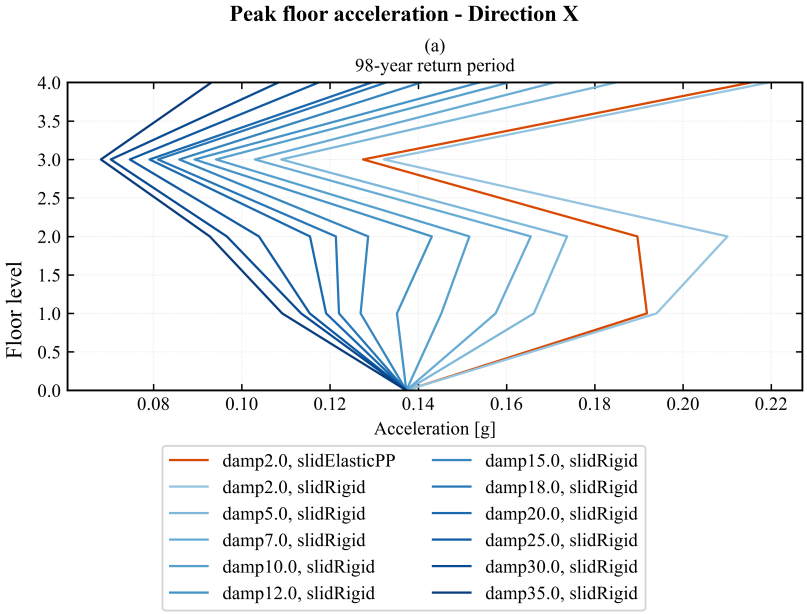


Figura 4.35: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 98 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

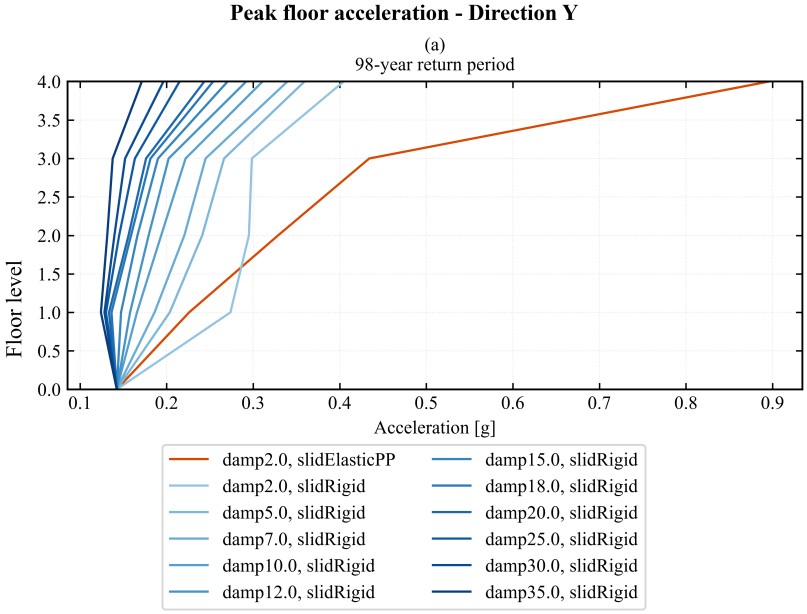


Figura 4.36: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 98 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

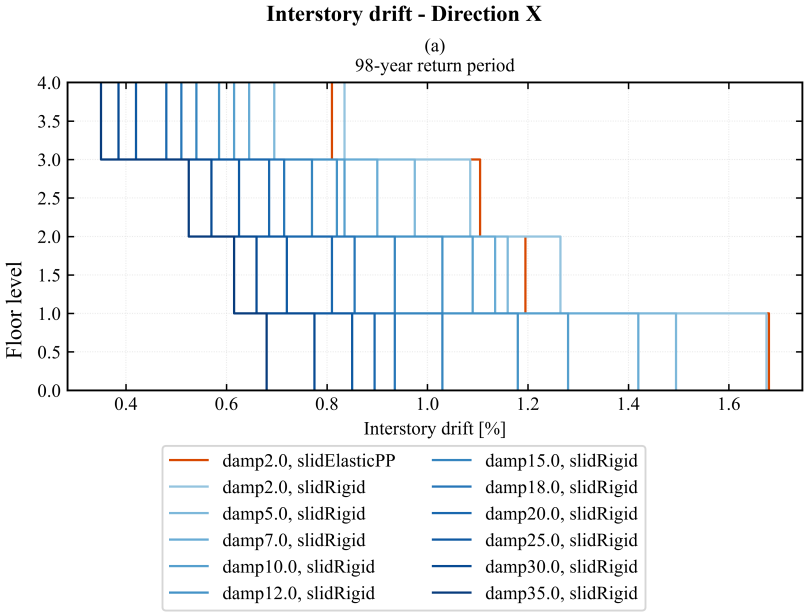


Figura 4.37: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 98 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

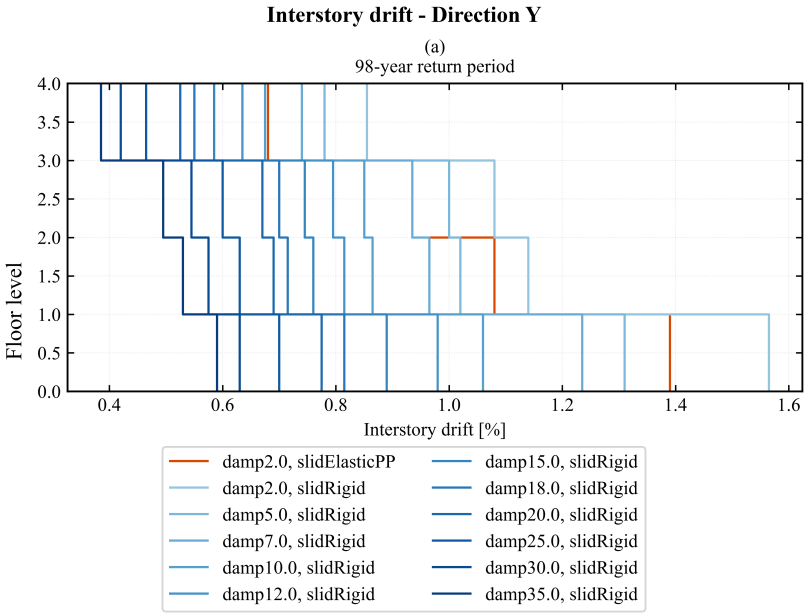


Figura 4.38: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 98 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,14 g in entrambe le direzioni. Nei modelli impliciti la risposta diminuisce all'aumentare dello smorzamento. In

sommità l'accelerazione passa da circa 0,22 g con smorzamento al 2% a circa 0,09 g con smorzamento al 35% in direzione X, e da circa 0,4 g a circa 0,17 g in direzione Y. Il drift al primo interpiano passa da circa 1,7% a circa 0,7% in direzione X e da circa 1,55% a circa 0,6% in direzione Y.

In direzione X il modello esplicito è quasi coincidente con il modello implicito al 2%, sia per le accelerazioni sia per il drift. In sommità l'accelerazione è di circa 0,22 g in entrambi i modelli, e il drift al primo interpiano è di circa 1,7% in entrambi i modelli. Lo scorrimento dei pallet si attiva solo per alcuni accelerogrammi, e si vede nei picchi dei singoli accelerogrammi ma non nelle mediane.

In direzione Y le differenze sono più marcate. Le accelerazioni del modello esplicito sono più alte agli ultimi livelli: circa 0,43 g contro circa 0,3 g al terzo livello, e circa 0,9 g contro circa 0,4 g in sommità. Il drift invece è più basso a tutti gli interpiani: circa 1,4% contro circa 1,55% al primo interpiano, e circa 0,68% contro circa 0,85% all'ultimo.

A 98 anni compaiono quindi per la prima volta in direzione Y entrambi gli effetti dello scorrimento dei pallet: l'aumento delle accelerazioni in sommità e la riduzione del drift agli ultimi interpiani. Questi effetti diventano sempre più forti ai tempi di ritorno successivi. Il modello implicito non riesce a rappresentarli insieme. Per il drift all'ultimo interpiano in direzione Y il modello esplicito corrisponde a uno smorzamento di circa il 10%, ma con questo smorzamento le accelerazioni in sommità sono di circa 0,3 g, molto più basse dei circa 0,9 g del modello esplicito.

4.6 Tempo di ritorno 224 anni

4.6.1 Profili di accelerazione in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 224 anni. Le mediane sono calcolate solo sulle analisi in cui la scaffalatura non collassa.

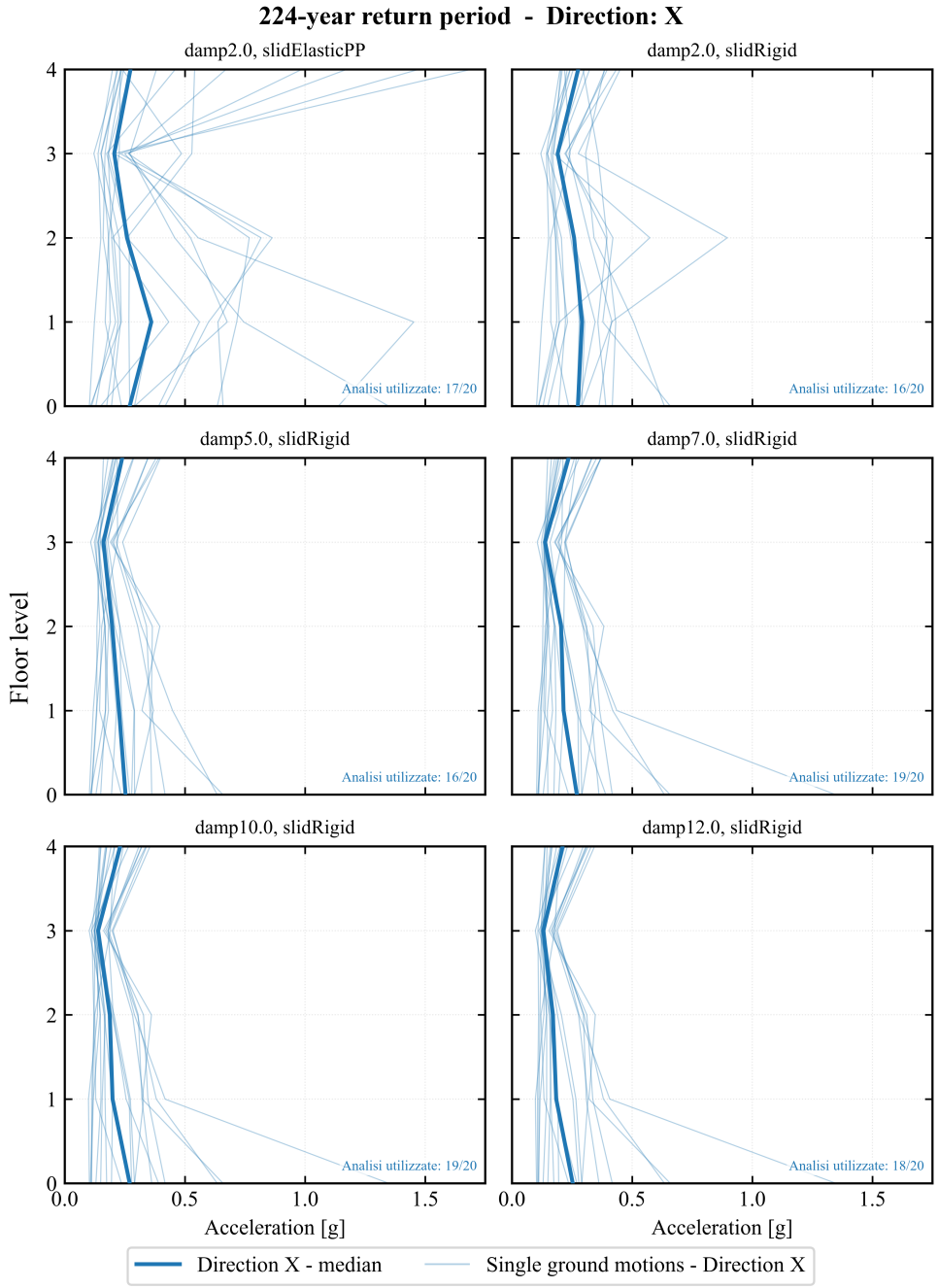


Figura 4.39: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

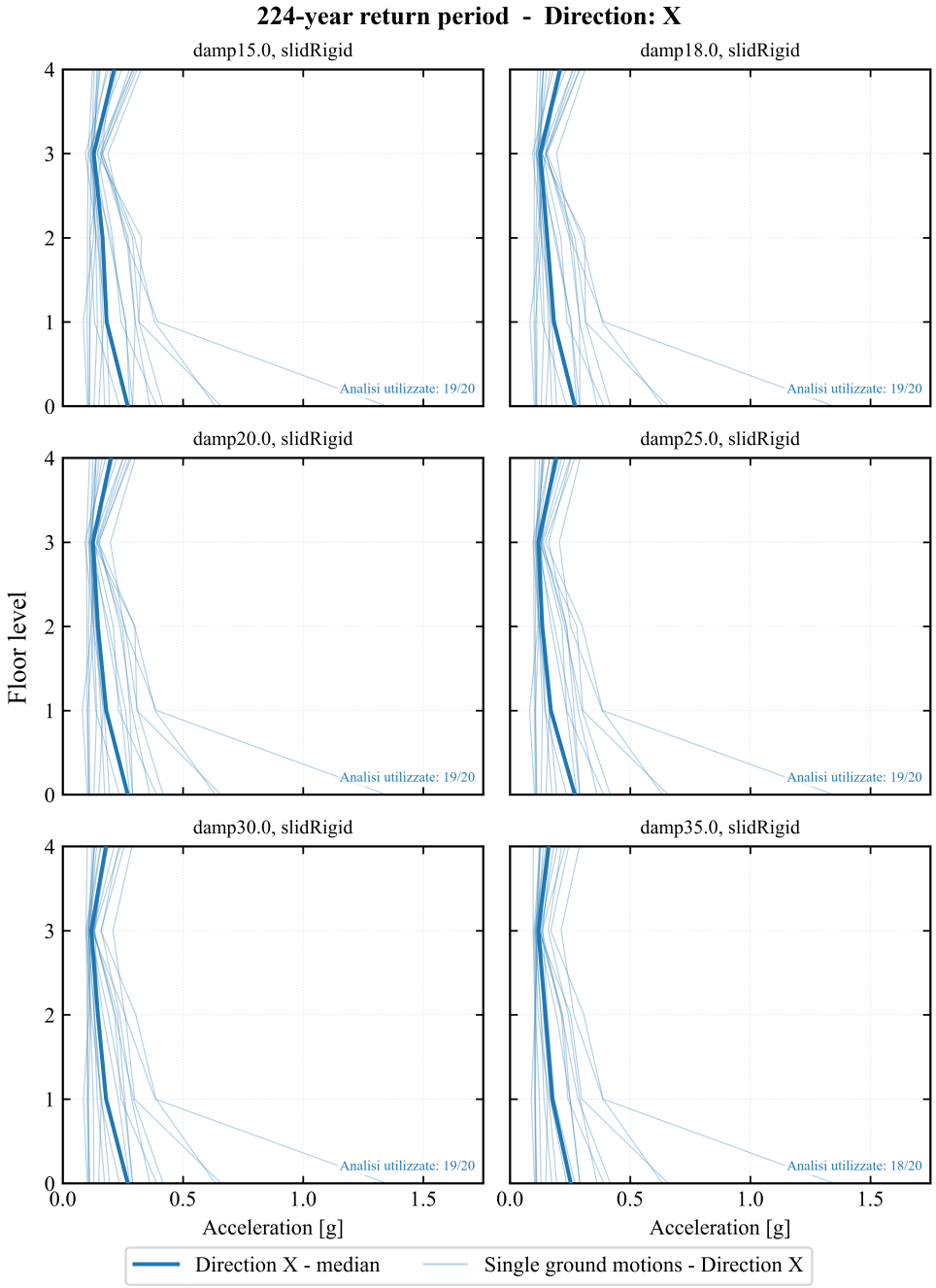


Figura 4.40: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,27 g. Rispetto ai tempi di ritorno più bassi l'andamento lungo l'altezza cambia: le accelerazioni ai piani sono simili o

inferiori a quella al suolo, con il valore minimo al terzo livello e una leggera risalita in sommità. La struttura quindi non amplifica più l'accelerazione del terreno, ma questo andamento, può essere dovuto al contributo del secondo modo di vibrare della struttura in direzione X.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,27 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce, ma meno che ai tempi di ritorno più bassi: si scende a circa 0,24 g con il 5%, a circa 0,23 g con il 10% e a circa 0,17 g con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata. Al suolo alcuni accelerogrammi arrivano a circa 0,65 g e uno a circa 1,35 g, mentre ai piani i valori restano in generale sotto circa 0,5 g.

Il modello esplicito ha una mediana simile a quella del modello implicito al 2%: in sommità circa 0,27 g in entrambi i modelli, al primo livello circa 0,36 g contro circa 0,29 g. La differenza principale è nei singoli accelerogrammi. Nel modello esplicito alcuni arrivano a circa 1,45 g al primo livello e fino a circa 1,7 g in sommità, mentre nel modello implicito al 2% restano sotto circa 0,9 g. Come già osservato in direzione Y a 50 anni, questi picchi sono dovuti allo scorrimento dei pallet, che a 224 anni si attiva anche in direzione X.

4.6.2 Profili di accelerazione in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano nella direzione Y per il periodo di ritorno di 224 anni. Le mediane sono calcolate solo sulle analisi in cui la scaffalatura non collassa.

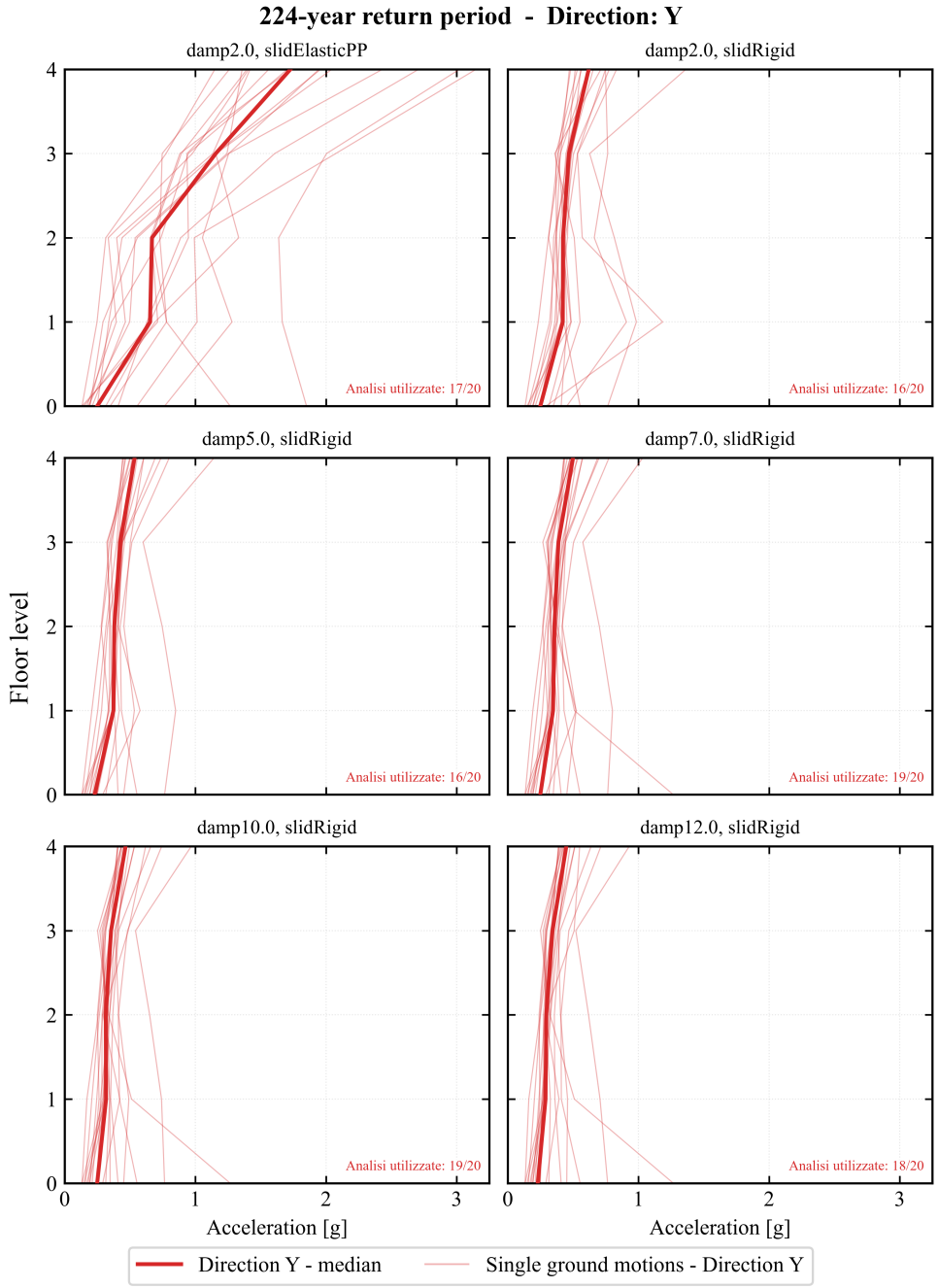


Figura 4.41: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

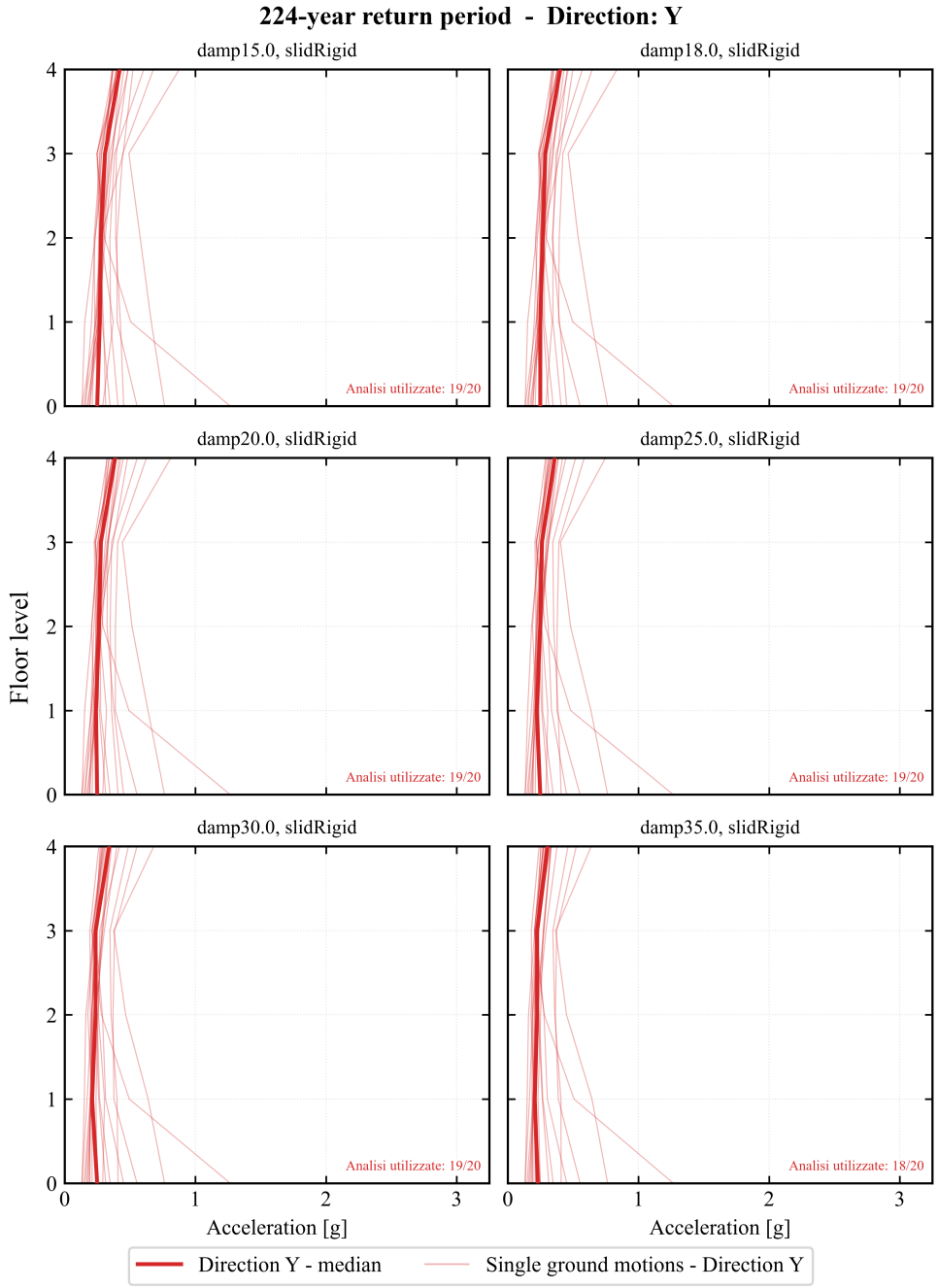


Figura 4.42: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,25 g. A differenza della direzione X, in direzione Y l'accelerazione cresce ancora con l'altezza e raggiunge il valore massimo

in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,6 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,53 g con il 5%, a circa 0,46 g con il 10% e a circa 0,3 g con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata. Nel modello implicito al 2% alcuni arrivano a circa 1,2 g al primo livello e a circa 1,35 g in sommità. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori in sommità restano sotto circa 0,65 g.

Il modello esplicito si discosta molto dal modello implicito al 2%. La mediana è più alta già dal primo livello, circa 0,65 g contro circa 0,43 g, e la differenza cresce con l'altezza: in sommità si arriva a circa 1,7 g, contro circa 0,6 g. Anche la dispersione è molto più alta, con singoli accelerogrammi che in sommità arrivano a circa 3 g. Rispetto ai 50 anni lo scorrimento dei pallet interessa quindi più accelerogrammi e più livelli. I picchi di accelerazione dovuti allo scorrimento spostano verso l'alto anche la mediana, e non solo i singoli casi. Come ai tempi di ritorno precedenti, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet.

4.6.3 Profili di drift in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione X per il periodo di ritorno di 224 anni. Le mediane sono calcolate solo sulle analisi in cui la scaffalatura non collassa.

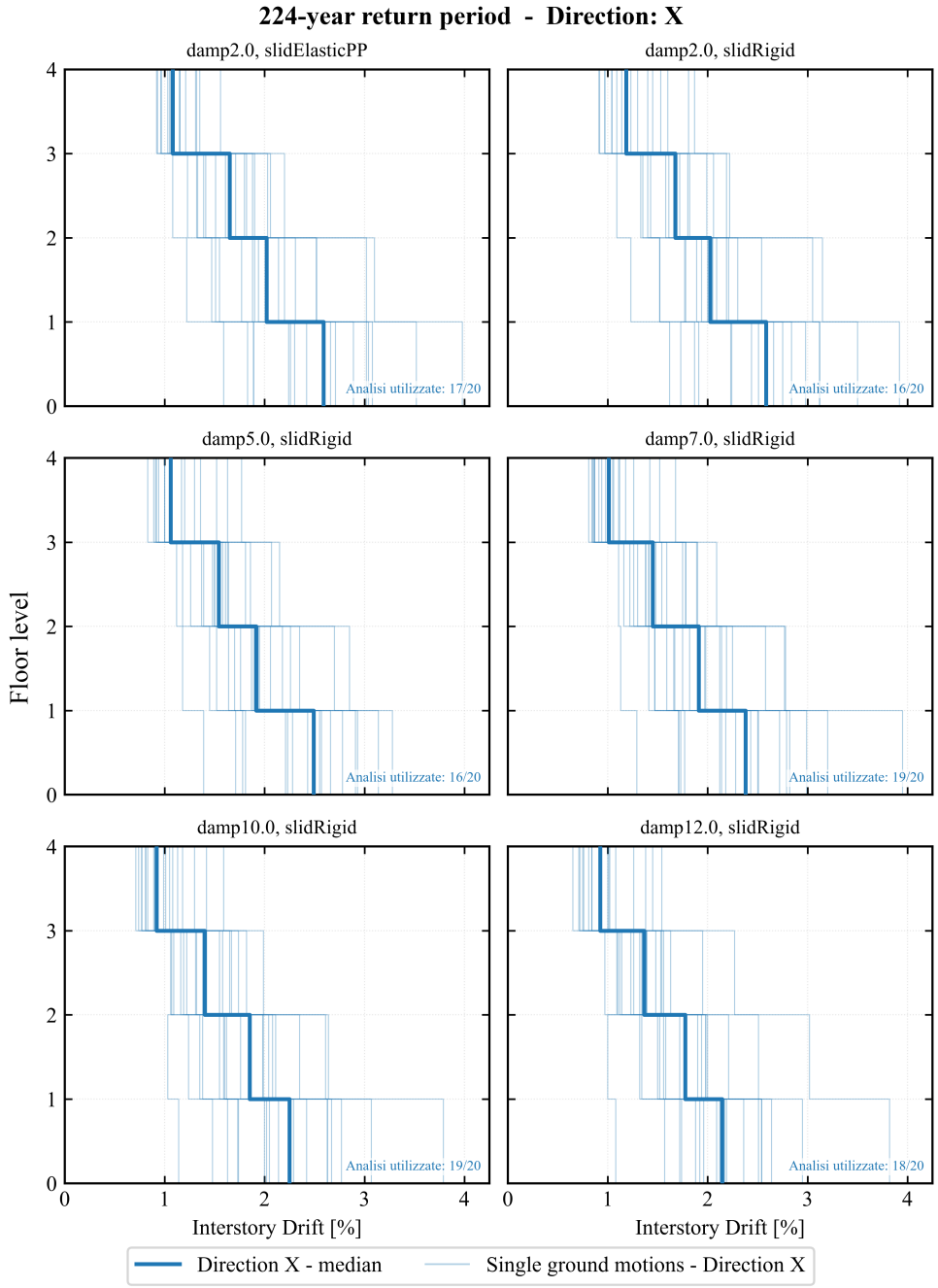


Figura 4.43: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

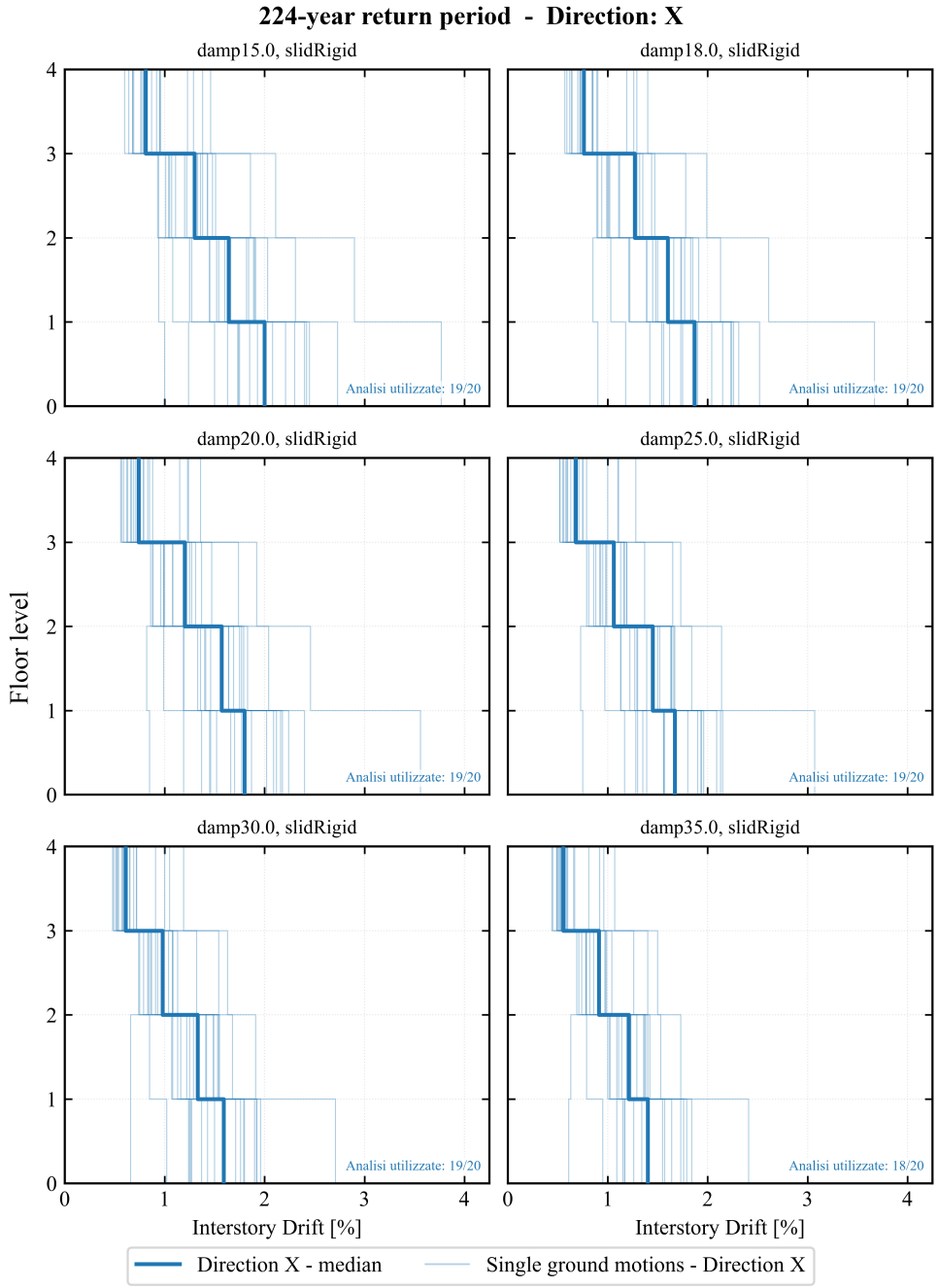


Figura 4.44: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità, con lo stesso andamento dei tempi di ritorno più bassi. I valori però sono molto

più alti.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è pari a circa 2,6%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 1,2%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 2,5% con il 5%, a circa 2,25% con il 10% e a circa 1,4% con il 35%. La riduzione è più contenuta che ai tempi di ritorno più bassi: con il 35% il drift si riduce di circa la metà, mentre a 50 anni si riduceva di circa due terzi.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 3,9%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano sotto circa 2,4%.

Il modello esplicito è quasi coincidente con il modello implicito al 2%: al primo interpiano il drift mediano è di circa 2,6% in entrambi i modelli, e anche la dispersione è simile, con valori massimi di circa 4%. Anche se a questo tempo di ritorno i pallet scorrono, lo scorrimento non modifica il drift: il suo effetto si vede solo sulle accelerazioni.

4.6.4 Profili di drift in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione Y per il periodo di ritorno di 224 anni. Le mediane sono calcolate solo sulle analisi in cui la scaffalatura non collassa.

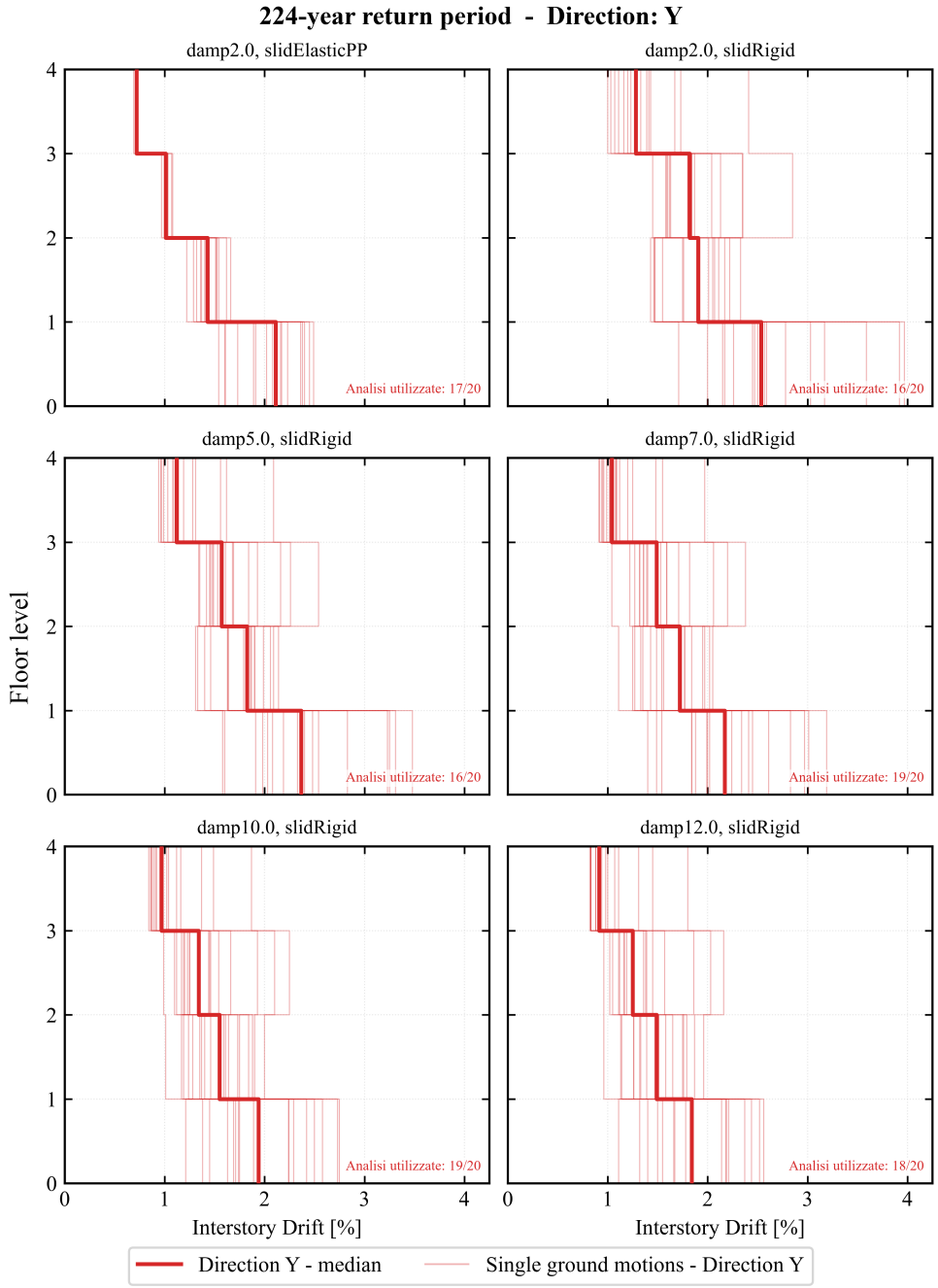


Figura 4.45: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12%.

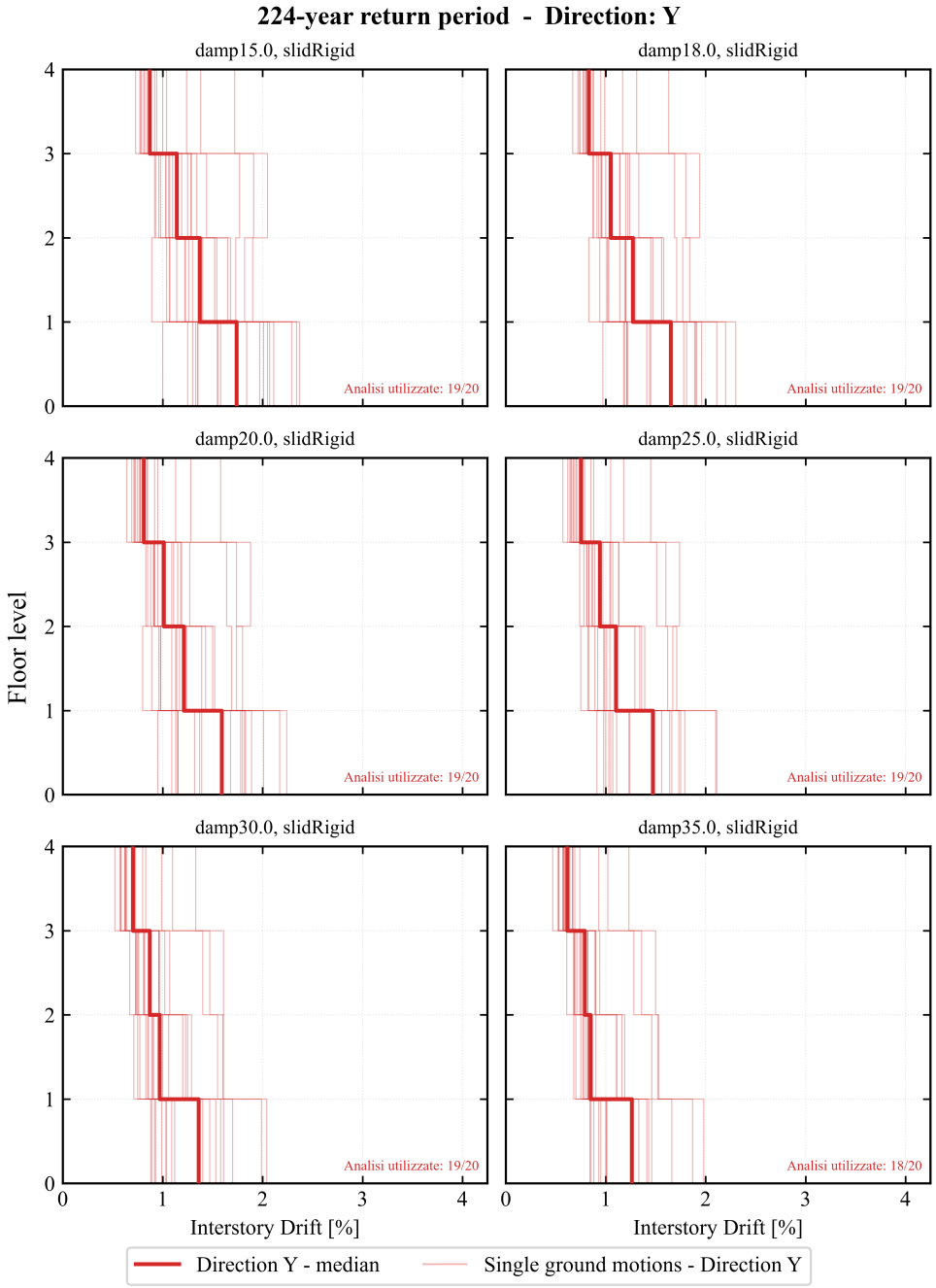


Figura 4.46: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 224 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 2% il drift al primo interpiano è

pari a circa 2,55%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 1,3%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 2,35% con il 5%, a circa 1,95% con il 10% e a circa 1,25% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che per lo smorzamento al 2% arrivano a circa 4%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano sotto circa 2%.

Il modello esplicito, a differenza dei casi precedenti, dà drift più bassi del modello implicito al 2%. Al primo interpiano il drift è di circa 2,1%, contro circa 2,55%, e la differenza cresce salendo: all'ultimo interpiano si ha circa 0,7% contro circa 1,3%, un valore vicino a quello del modello implicito al 35%. Anche la dispersione è più bassa: al primo interpiano i valori massimi sono di circa 2,5%, contro circa 4%. Agli ultimi due interpiani i singoli accelerogrammi danno valori quasi uguali tra loro. Questo è dovuto allo smorzamento introdotto dallo scorrimento dei pallet, che limita il drift agli ultimi interpiani indipendentemente dall'intensità dell'accelerogramma.

Questo è il primo caso in cui lo scorrimento dei pallet riduce il drift, come si assume nel modello implicito. La riduzione però non è uniforme lungo l'altezza: è piccola al primo interpiano ed è massima agli ultimi interpiani, dove i pallet scorrono di più. Con un unico valore di smorzamento il modello implicito non riesce a rappresentare questa distribuzione.

4.6.5 Confronto dei risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i profili mediani dell'accelerazione di piano e del drift interpiano nelle direzioni X e Y per il periodo di ritorno di 224 anni. Le curve blu si riferiscono ai modelli con modellazione implicita dello scorrimento, in cui tale effetto è rappresentato da uno smorzamento equivalente compreso tra il 2% e il 35%, mentre la curva arancione si riferisce al modello con modellazione esplicita, con un elemento di scorrimento bilineare e uno smorzamento viscoso pari al 2%. Le mediane sono calcolate solo sulle scaffalature che non collassano e questo comporta un discostamento del valore di accelerazione al suolo per alcuni modelli.

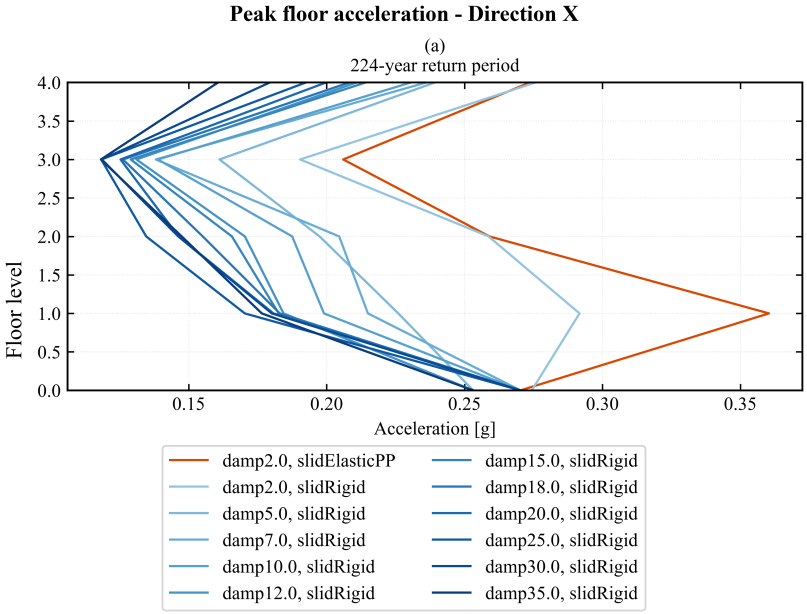


Figura 4.47: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 224 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

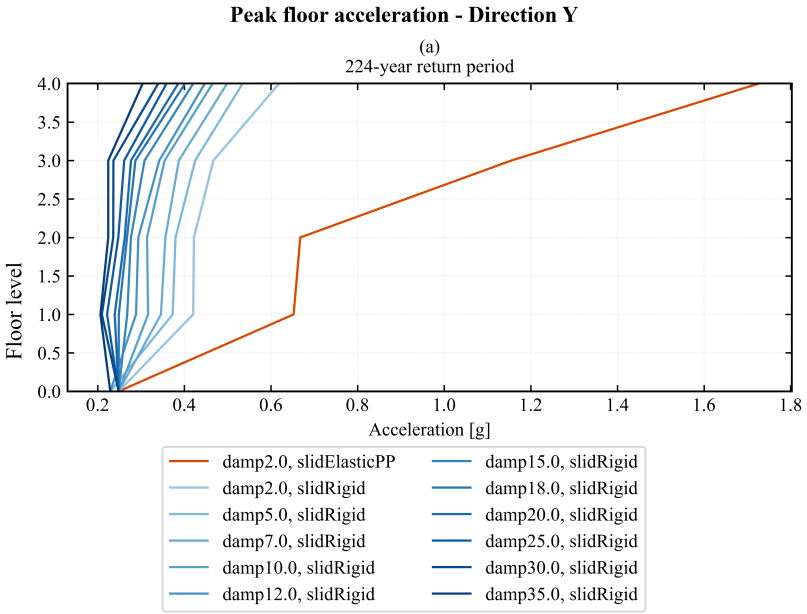


Figura 4.48: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 224 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

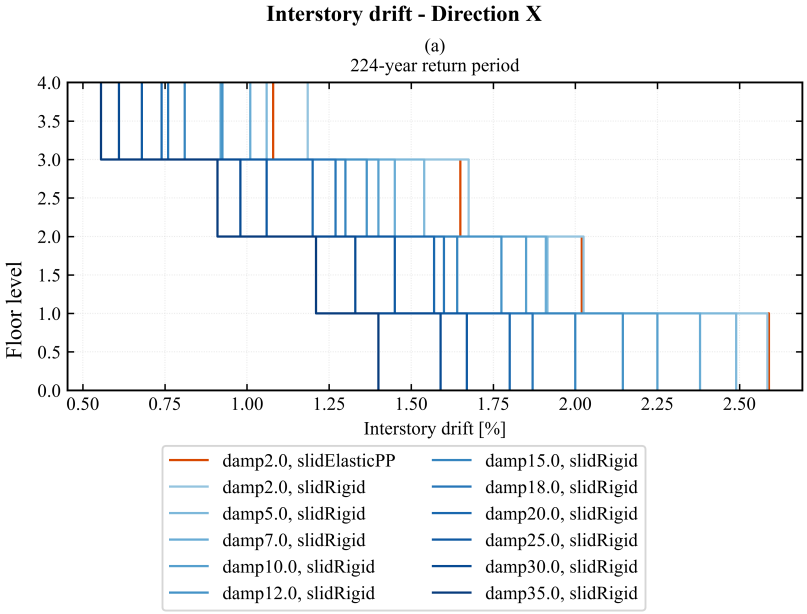


Figura 4.49: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 224 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

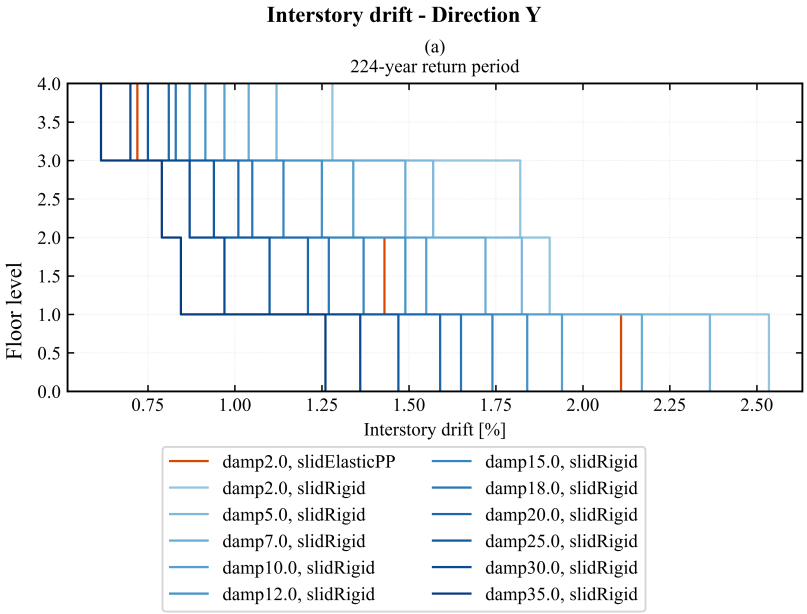


Figura 4.50: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 224 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

Per il tempo di ritorno di 224 anni i valori sono molto più alti rispetto ai 50 anni. L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,27 g in direzione X e circa 0,25 g in

direzione Y.

Nei modelli impliciti la risposta diminuisce ancora all'aumentare dello smorzamento. In sommità l'accelerazione passa da circa 0,27 g con smorzamento al 2% a circa 0,16 g con smorzamento al 35% in direzione X, e da circa 0,62 g a circa 0,30 g in direzione Y. Il drift al primo interpiano passa da circa 2,6% a circa 1,4% in direzione X e da circa 2,5% a circa 1,25% in direzione Y. La riduzione è più contenuta che ai tempi di ritorno più bassi: con il 35% la risposta si riduce di circa la metà.

In direzione X il modello esplicito dà drift quasi coincidenti con quelli del modello implicito al 2%: circa 2,6% al primo interpiano in entrambi i modelli. Le accelerazioni sono simili, tranne al primo livello, dove il modello esplicito arriva a circa 0,36 g contro circa 0,29 g.

In direzione Y le differenze sono molto più marcate. Le accelerazioni del modello esplicito sono più alte a tutti i livelli e la differenza cresce con l'altezza: circa 0,65 g contro circa 0,42 g al primo livello, circa 1,7 g contro circa 0,62 g in sommità. Il drift invece è più basso: circa 2,1% contro circa 2,5% al primo interpiano, e circa 0,7% contro circa 1,3% all'ultimo interpiano.

A 224 anni lo scorrimento dei pallet si attiva in entrambe le direzioni, in modo più evidente in direzione Y. Lo scorrimento ha due effetti opposti: aumenta le accelerazioni, a causa dei picchi provocati dall'inversione del moto dei pallet, e in direzione Y riduce il drift, soprattutto agli ultimi interpiani.

Il modello implicito non riesce a rappresentare insieme questi due effetti, perché aumentando lo smorzamento si riducono sia le accelerazioni sia il drift. Per il drift in direzione Y il modello esplicito corrisponde a uno smorzamento di circa il 10% al primo interpiano e di circa il 30% all'ultimo, quindi nessun valore unico riproduce l'intero profilo. Per le accelerazioni, invece, nessuno dei modelli impliciti si avvicina al modello esplicito, perché tutti danno valori più bassi.

4.7 Tempo di ritorno 475 anni

4.7.1 Profili di accelerazione in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 475 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa. Per questo non compare il modello implicito con smorzamento al 2%, che ha solo 3 analisi completate.

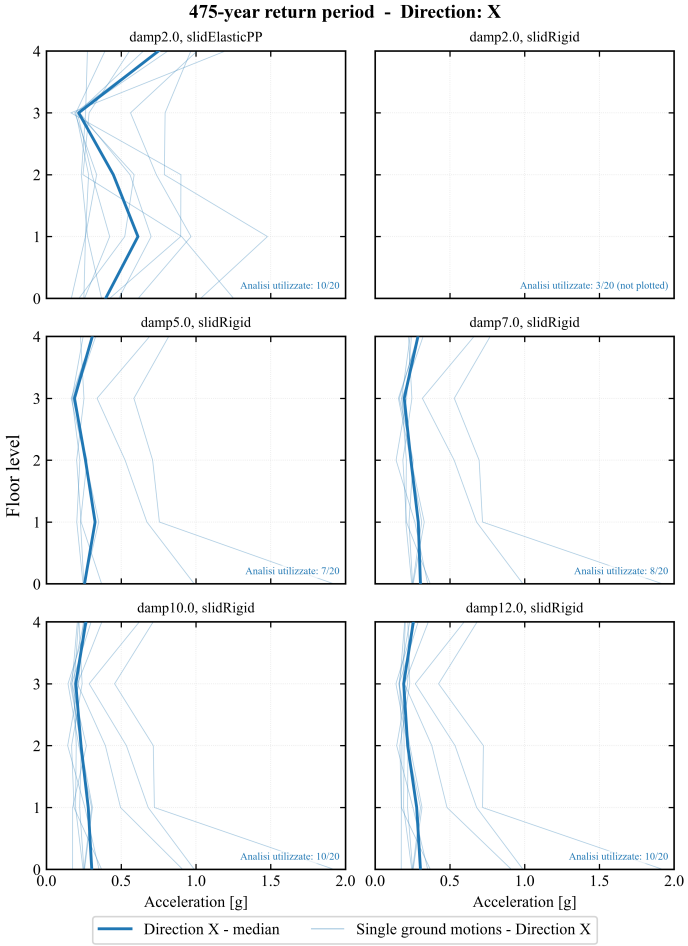


Figura 4.51: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12% (il modello implicito al 2% non è rappresentato perché ha meno di 5 analisi completate).

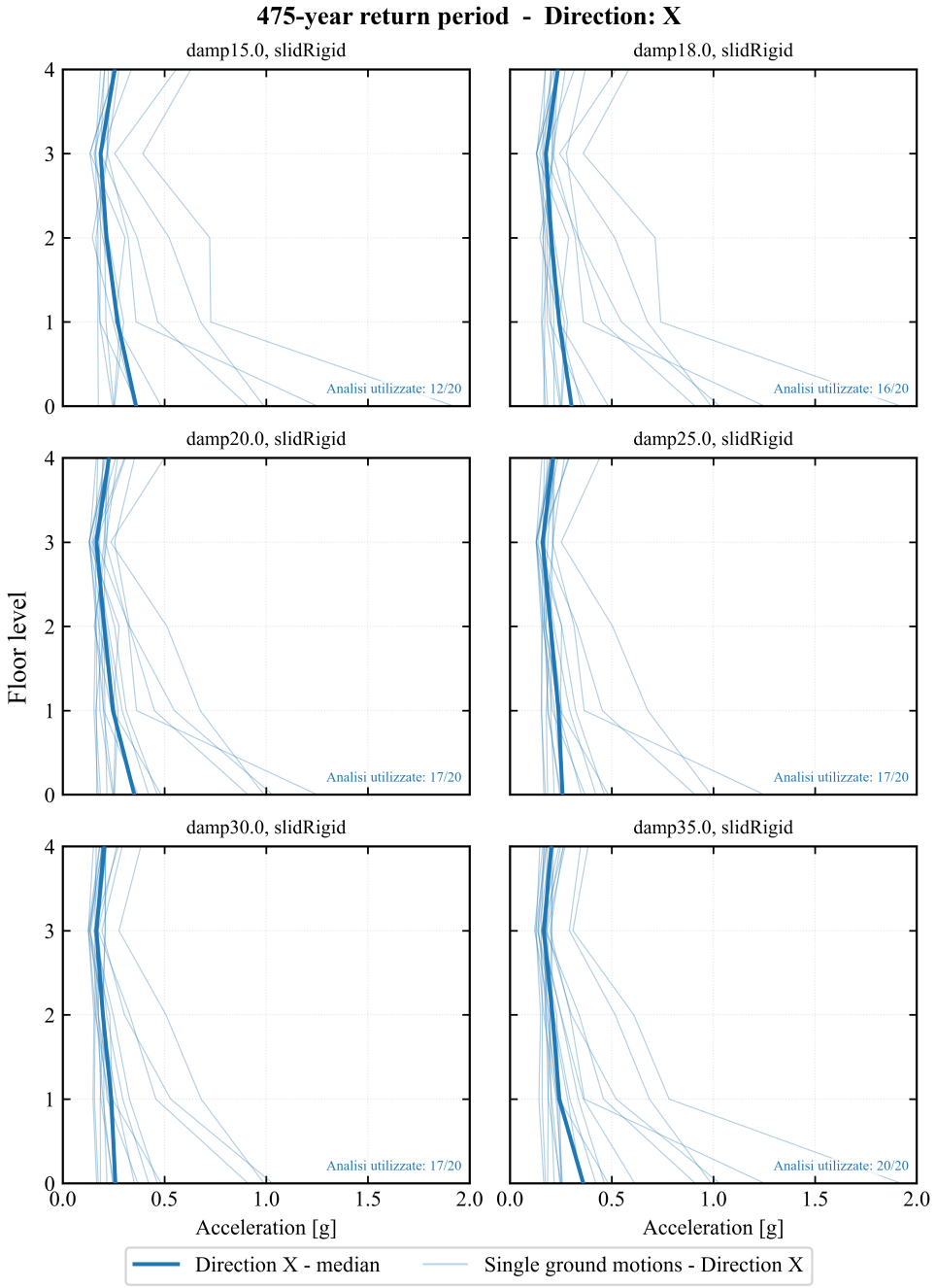


Figura 4.52: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

A questo tempo di ritorno il numero di collassi aumenta molto, soprattutto nei modelli meno smorzati, perché la struttura dissipa meno energia sismica. Nel

modello implicito con smorzamento al 2% collassano 17 scaffalature su 20, quindi la curva mediana non è riportata. I collassi scendono a 13 con il 5%, a 10 con il 10% e a nessuno con il 35%. Il modello esplicito ha 10 collassi su 20, un valore simile a quello dei modelli impliciti con smorzamento tra il 10% e il 12%.

L'accelerazione al suolo varia tra circa 0,25 g e circa 0,4 g a seconda del modello, perché ogni modello conserva un insieme diverso di accelerogrammi. Nei modelli impliciti l'andamento lungo l'altezza è simile a quello dei 224 anni: le accelerazioni ai piani sono simili o inferiori a quella al suolo, con il valore minimo al terzo livello. Come a 224 anni, il minimo al terzo livello può essere dovuto al contributo del secondo modo di vibrare in direzione X.

Nel modello implicito con smorzamento al 5% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,31 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce: si scende a circa 0,26 g con il 10% e a circa 0,21 g con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata. Al suolo si arriva fino a circa 1,9 g, mentre ai piani i valori restano in generale sotto circa 0,8 g.

Il modello esplicito dà accelerazioni molto più alte rispetto a tutti i modelli impliciti: la mediana arriva a circa 0,6 g al primo livello e a circa 0,73 g in sommità. Anche la dispersione è più alta, con singoli accelerogrammi fino a circa 1,5 g al primo livello e circa 1,2 g in sommità. Come a 224 anni, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet.

4.7.2 Profili di accelerazione in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 475 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa. Per questo non compare il modello implicito con smorzamento al 2%, che ha solo 3 analisi completate.

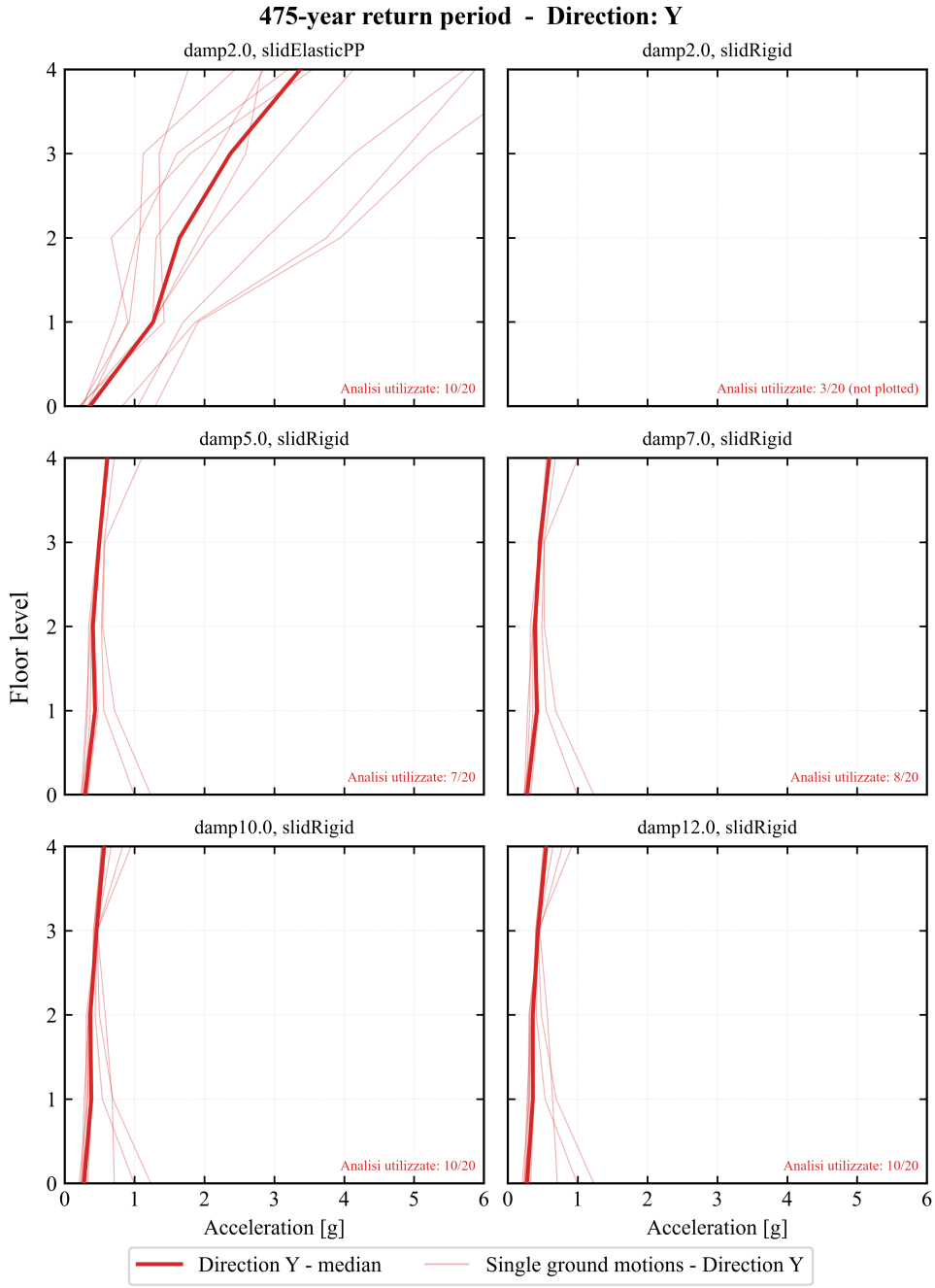


Figura 4.53: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12% (il modello implicito al 2% non è rappresentato perché ha meno di 5 analisi completate).

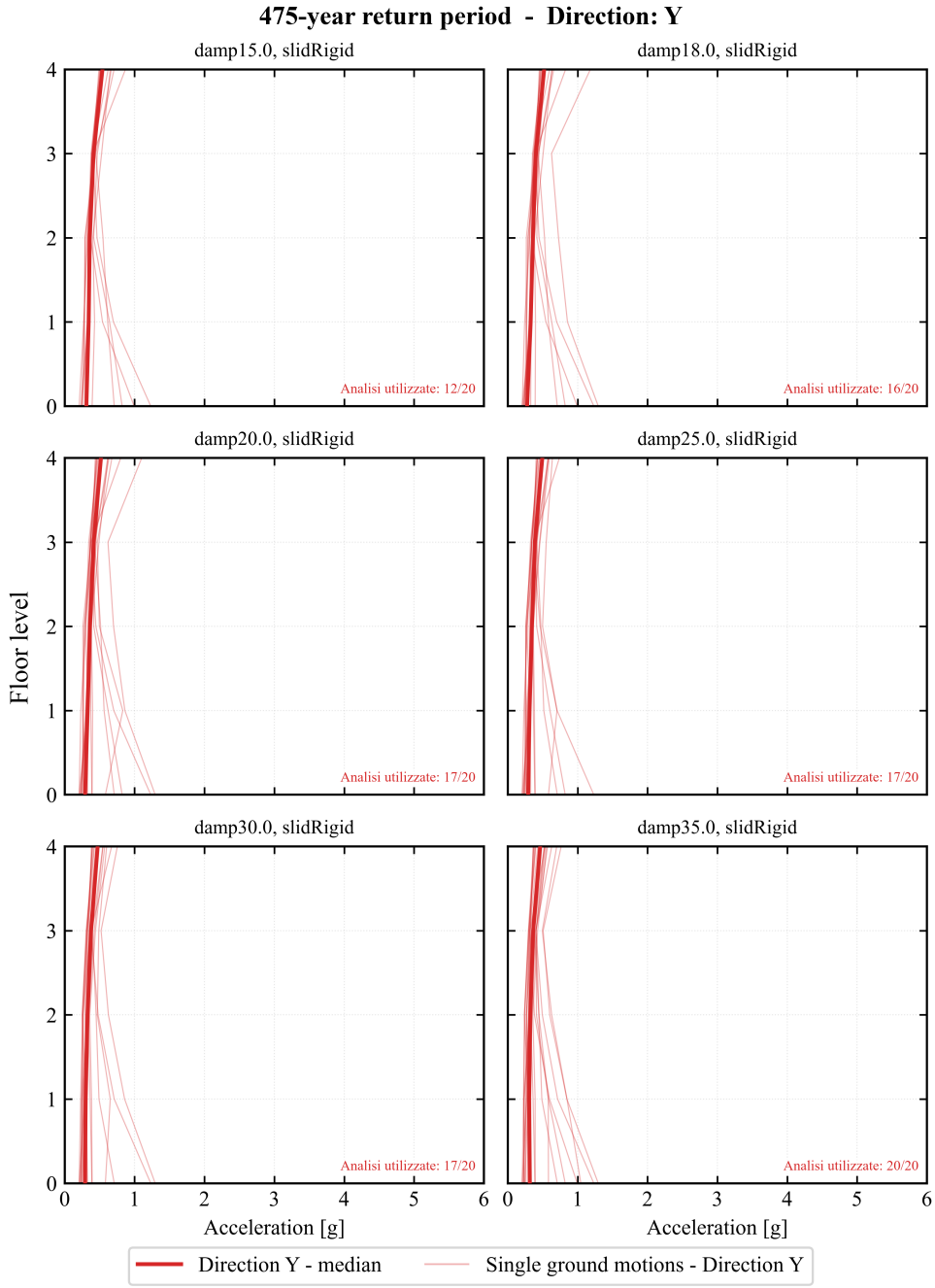


Figura 4.54: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

L'accelerazione al suolo varia tra circa 0,25 g e circa 0,35 g a seconda del modello. Nei modelli impliciti l'accelerazione cresce con l'altezza e raggiunge il

valore massimo in sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 5% l'accelerazione in sommità è pari a circa 0,6 g. All'aumentare dello smorzamento la risposta si riduce, ma in modo contenuto perché si scende a circa 0,57 g con il 10% e a circa 0,47 g con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione moderata. Al suolo si arriva fino a circa 1,3 g, mentre in sommità i valori restano sotto circa 1,1 g.

Il modello esplicito dà accelerazioni molto più alte di tutti i modelli impliciti, e la differenza cresce con l'altezza. La mediana è di circa 1,3 g al primo livello e arriva a circa 3,4 g in sommità, contro circa 0,6 g del modello implicito al 5%. Anche la dispersione è molto elevata, con singoli accelerogrammi che in sommità superano i 6 g. Come ai tempi di ritorno precedenti, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet, che in direzione Y è più marcato. Come ai tempi di ritorno precedenti, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet.

4.7.3 Profili di drift in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione X per il periodo di ritorno di 475 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa. Per questo non compare il modello implicito con smorzamento al 2%, che ha solo 3 analisi completate.

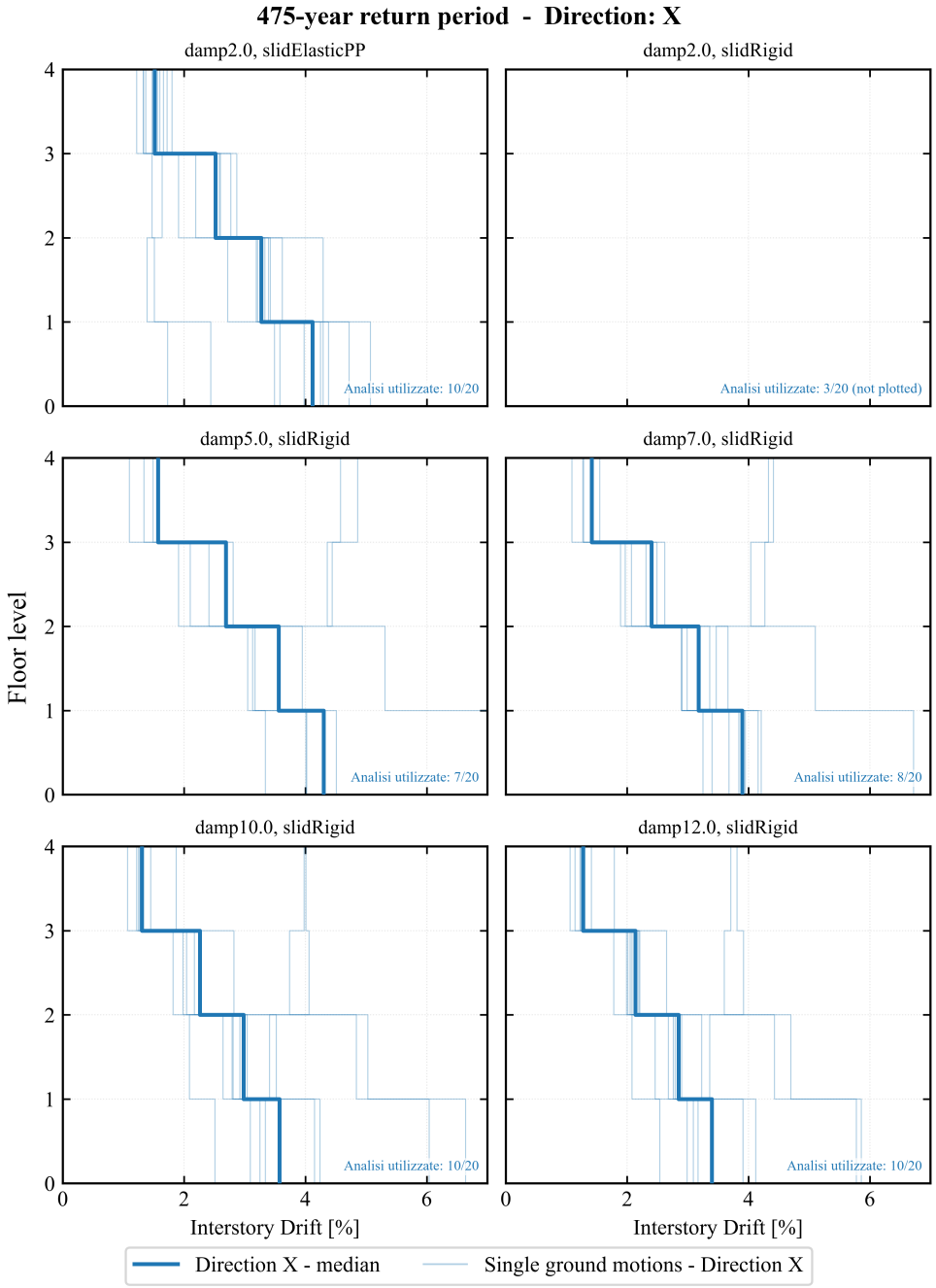


Figura 4.55: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12% (il modello implicito al 2% non è rappresentato perché ha meno di 5 analisi completate).

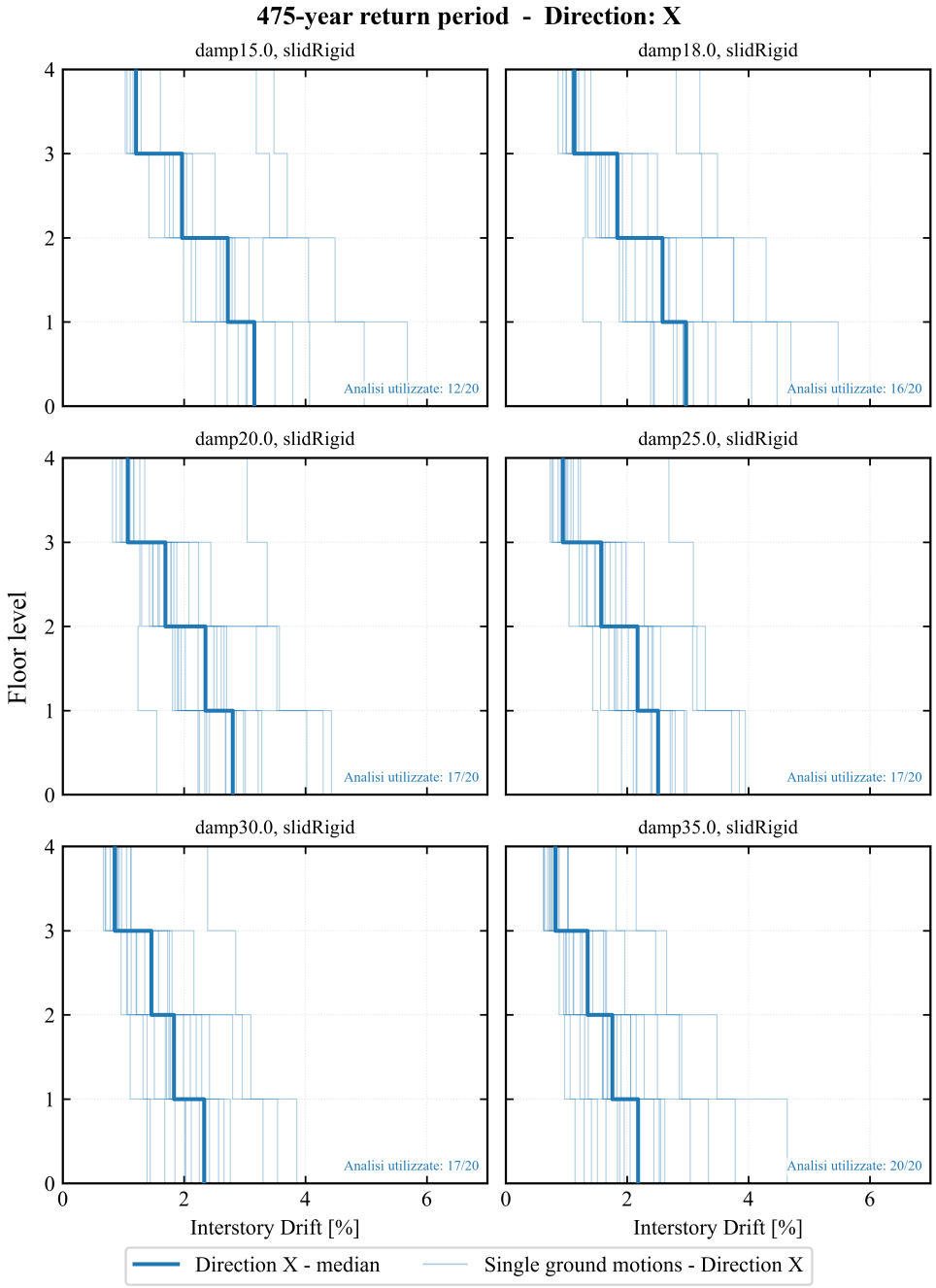


Figura 4.56: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità, con lo stesso andamento dei tempi di ritorno più bassi. I valori però sono molto

più alti.

Nel modello implicito con smorzamento al 5% il drift al primo interpiano è pari a circa 4,3%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 1,55%. All'aumentare dello smorzamento il drift si riduce: al primo interpiano si scende a circa 3,55% con il 10% e a circa 2,2% con il 35%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che per gli smorzamenti più bassi arrivano a circa 6,5–7%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano sotto circa 4,7%.

Il modello esplicito ha un drift al primo interpiano di circa 4,1%, simile a quello del modello implicito al 5% (circa 4,3%) e più alto di quello del modello implicito al 10% (circa 3,55%), che ha lo stesso numero di collassi. Agli altri interpiani il modello esplicito resta vicino al modello implicito al 5%, con circa 1,5% all'ultimo interpiano. La dispersione invece è più bassa, con valori massimi al primo interpiano di circa 5,1%.

4.7.4 Profili di drift in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift nella direzione Y per il periodo di ritorno di 475 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa. Per questo non compare il modello implicito con smorzamento al 2%, che ha solo 3 analisi completate.

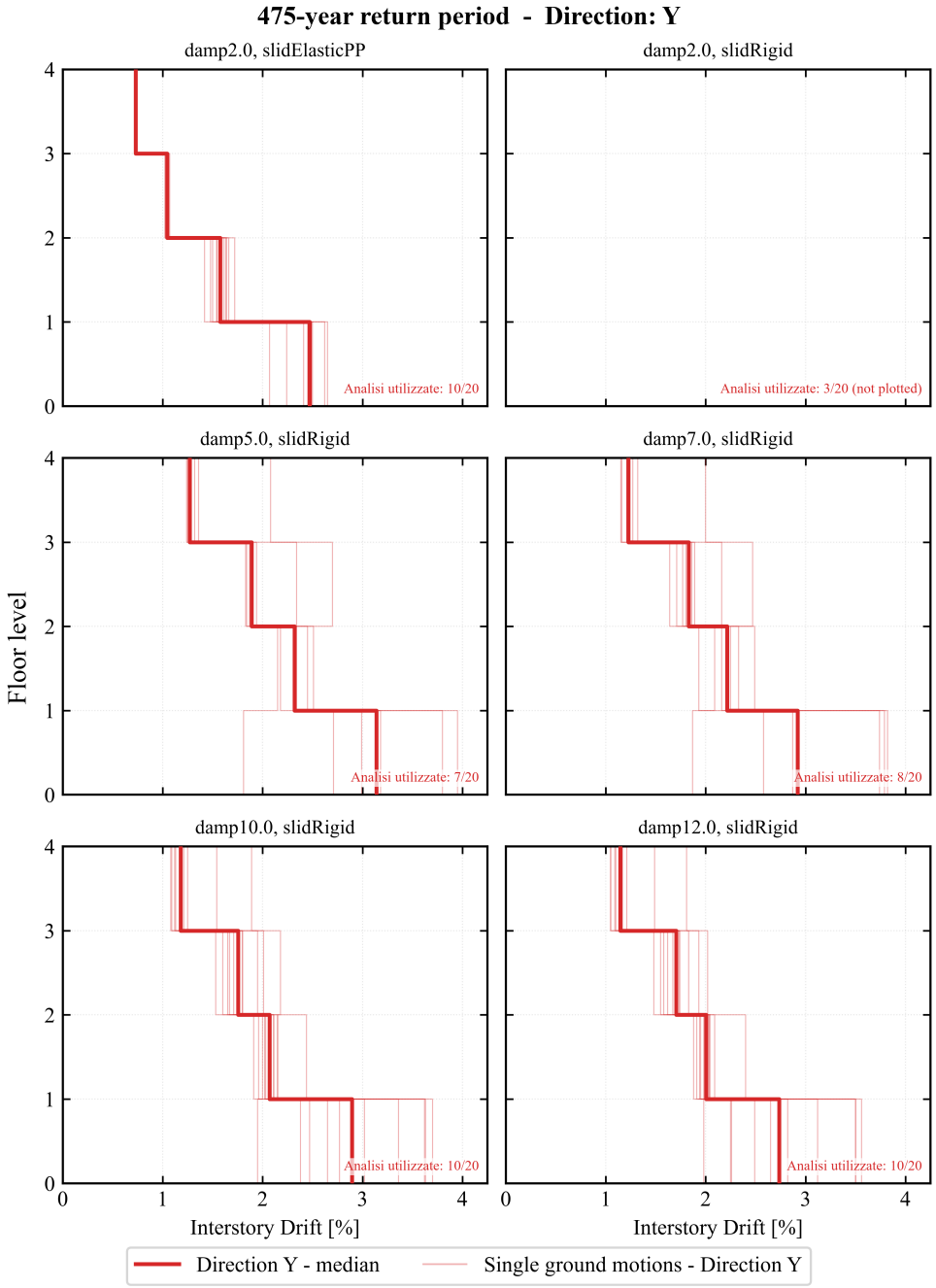


Figura 4.57: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 2% al 12% (il modello implicito al 2% non è rappresentato perché ha meno di 5 analisi completate).

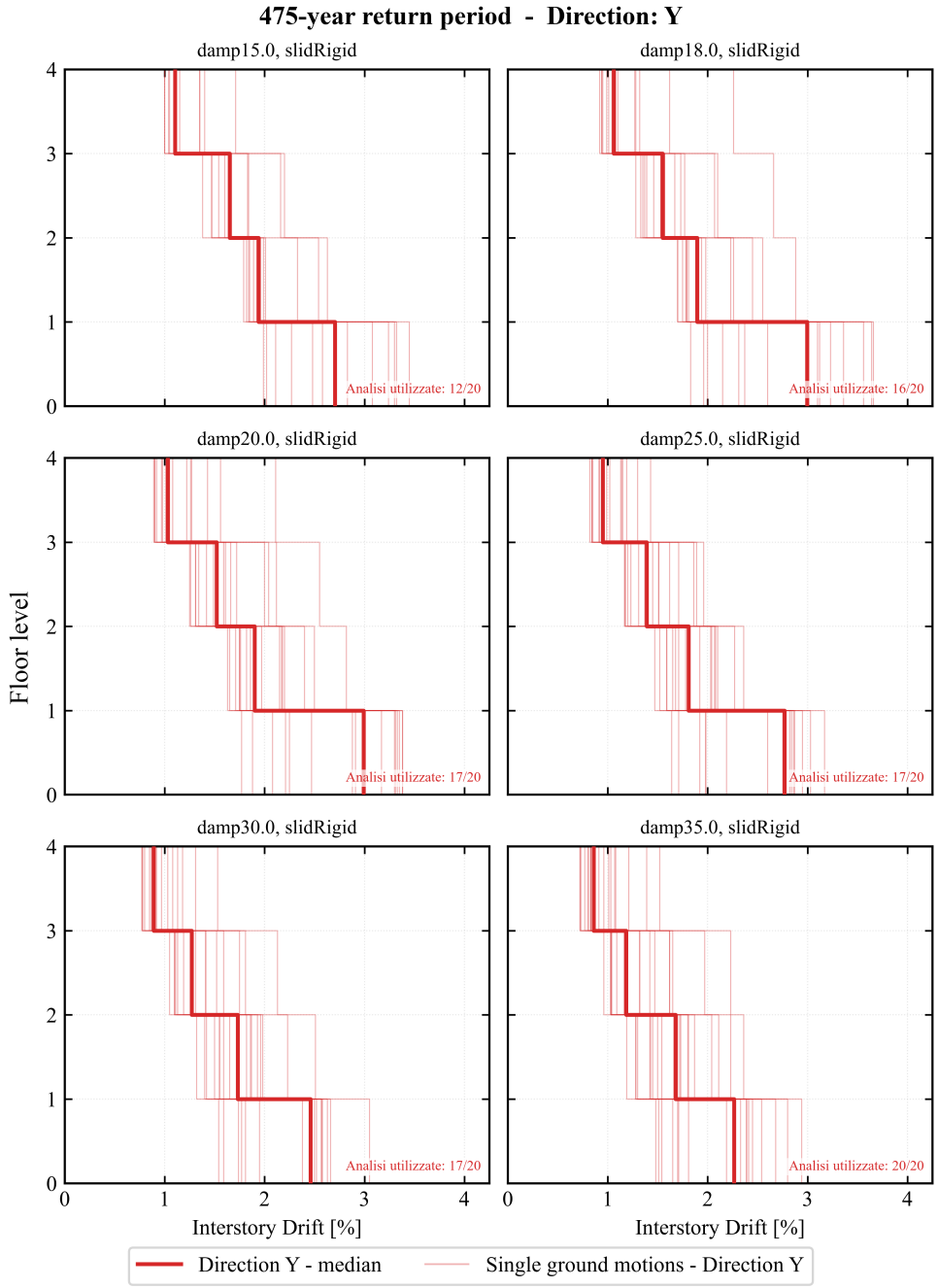


Figura 4.58: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 475 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) dei modelli impliciti con smorzamento dal 15% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità.

Nel modello implicito con smorzamento al 5% il drift al primo interpiano è

pari a circa 3,15%, mentre all'ultimo interpiano è pari a circa 1,3%. All'aumentare dello smorzamento il drift tende a ridursi: al primo interpiano si scende a circa 2,9% con il 10% e a circa 2,25% con il 35%. La riduzione non è regolare. Con il 18% e il 20% il drift al primo interpiano torna a circa 3%, perché in questi modelli le analisi completate sono di più e comprendono anche accelerogrammi più forti.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione moderata, con valori al primo interpiano che per il 5% arrivano a circa 3,95%. All'aumentare dello smorzamento la dispersione si riduce e con il 35% i valori restano sotto circa 2,95%.

Il modello esplicito dà drift più bassi di tutti i modelli impliciti meno smorzati. Al primo interpiano il drift è di circa 2,5%, contro circa 3,15% del modello implicito al 5% e circa 2,9% del modello implicito al 10%, che ha lo stesso numero di collassi. La differenza cresce salendo: all'ultimo interpiano il modello esplicito dà circa 0,73%, un valore più basso anche di quello del modello implicito al 35% (circa 0,85%). Anche la dispersione è molto più bassa, con valori al primo interpiano compresi tra circa 2% e circa 2,65%. Come a 224 anni, la riduzione del drift dovuta allo scorrimento dei pallet è massima agli ultimi interpiani. Questo è dovuto allo smorzamento introdotto dallo scorrimento dei pallet, che limita il drift agli ultimi interpiani indipendentemente dall'intensità dell'accelerogramma.

4.7.5 Confronto dei risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i profili mediani dell'accelerazione di piano e del drift interpiano nelle direzioni X e Y per il periodo di ritorno di 475 anni. Le curve blu si riferiscono ai modelli con modellazione implicita dello scorrimento, in cui tale effetto è rappresentato da uno smorzamento equivalente compreso tra il 2% e il 35%, mentre la curva arancione si riferisce al modello con modellazione esplicita, con un elemento di scorrimento bilineare e uno smorzamento viscoso pari al 2%.

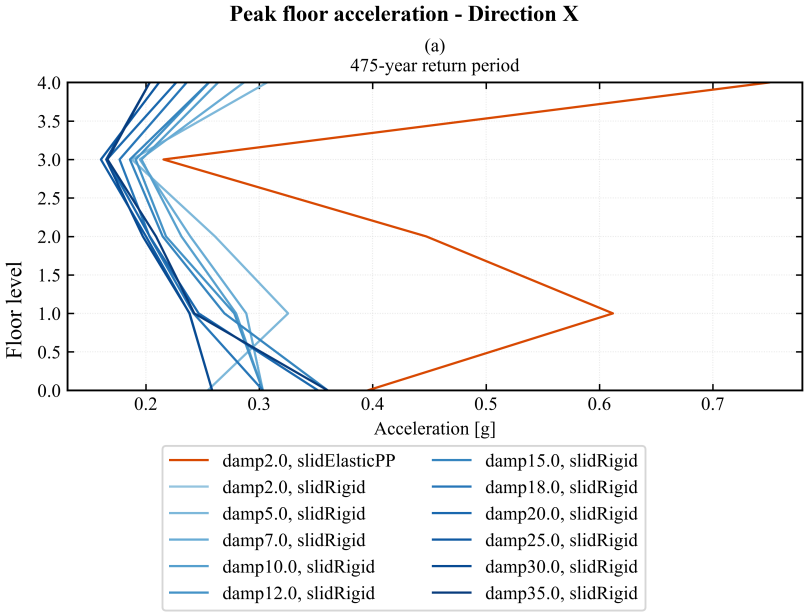


Figura 4.59: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 475 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

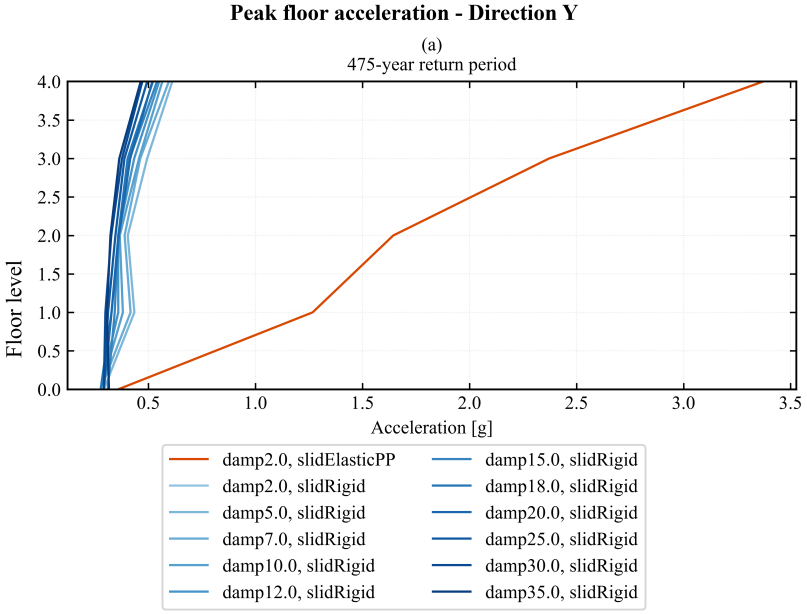


Figura 4.60: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 475 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

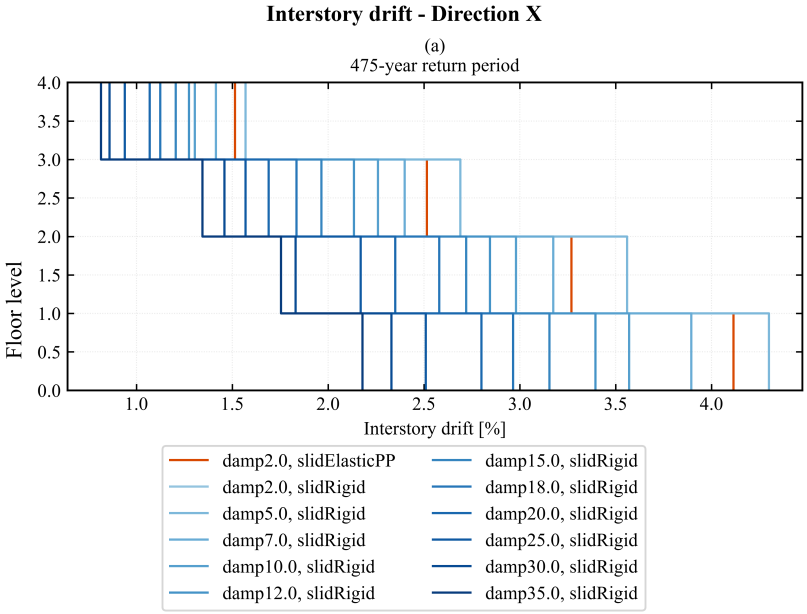


Figura 4.61: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 475 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

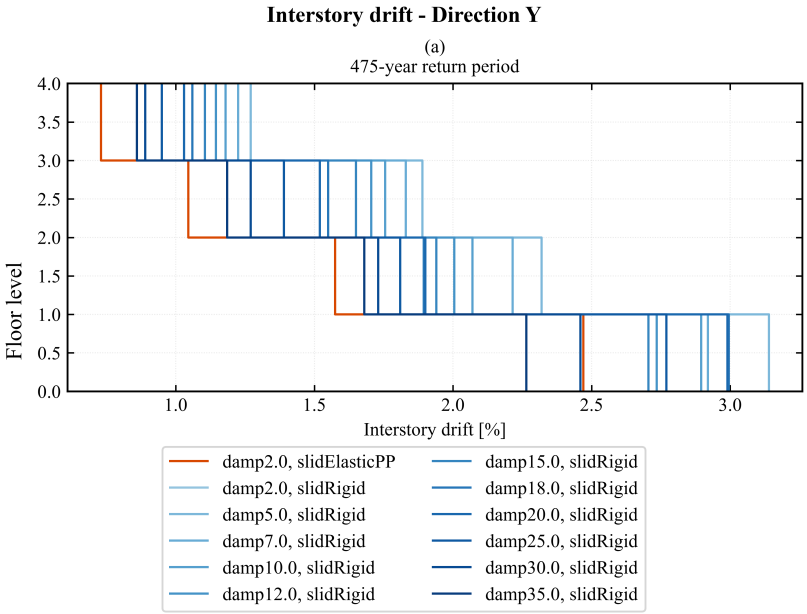


Figura 4.62: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 475 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

Per il tempo di ritorno di 475 anni il numero di collassi diventa importante. Nei modelli impliciti i collassi diminuiscono all'aumentare dello smorzamento: 17

su 20 con il 2%, 13 con il 5%, 10 con il 10% e nessuno con il 35%. Il modello esplicito ha 10 collassi su 20, come i modelli impliciti con smorzamento tra il 10% e il 12%.

Nei modelli impliciti la risposta diminuisce all'aumentare dello smorzamento. In sommità l'accelerazione passa da circa 0,3 g con smorzamento al 5% a circa 0,2 g con smorzamento al 35% in direzione X, e da circa 0,6 g a circa 0,47 g in direzione Y. Il drift al primo interpiano passa da circa 4,3% a circa 2,2% in direzione X e da circa 3,15% a circa 2,25% in direzione Y.

In direzione X il modello esplicito dà drift simili a quelli del modello implicito al 5%: circa 4,1% contro circa 4,3% al primo interpiano, e circa 1,5% contro circa 1,55% all'ultimo. Le accelerazioni invece sono molto più alte: circa 0,6 g contro circa 0,33 g al primo livello, e circa 0,75 g contro circa 0,3 g in sommità.

In direzione Y le differenze sono ancora più marcate perché le accelerazioni del modello esplicito sono molto più alte a tutti i livelli: circa 1,3 g contro circa 0,43 g al primo livello, e circa 3,4 g contro circa 0,6 g in sommità. Il drift invece è più basso: circa 2,5% contro circa 3,15% al primo interpiano, e circa 0,73% contro circa 1,3% all'ultimo, un valore più basso anche di quello del modello implicito al 35% (circa 0,85%).

Come a 224 anni, lo scorrimento dei pallet ha due effetti opposti: aumenta molto le accelerazioni e in direzione Y riduce il drift, soprattutto agli ultimi interpiani. A 475 anni questi effetti sono amplificati.

Il confronto mostra che nessun valore di smorzamento equivalente riesce a rappresentare il modello esplicito. In termini di drift in direzione X corrisponde a circa il 5%, mentre per il drift in direzione Y corrisponde a oltre il 30%. Per le accelerazioni nessun modello implicito si avvicina ai valori del modello esplicito.

4.8 Tempo di ritorno 975 anni

4.8.1 Profili di accelerazione in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 975 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa.

Per questo non compaiono i modelli impliciti con smorzamento del 2%, 5%, 7%, 10%, 12%, 15% e 18%.

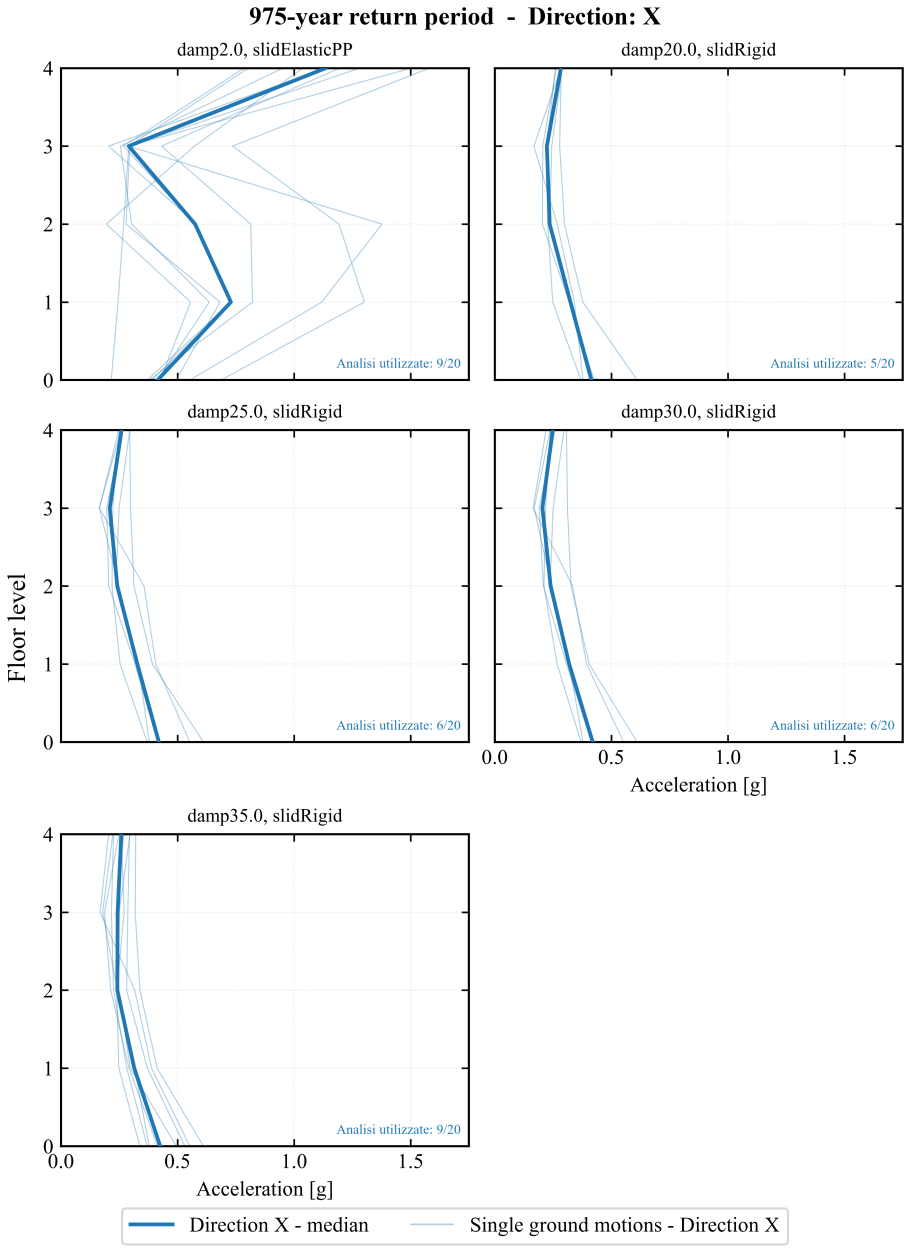


Figura 4.63: Profili di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 975 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 20% al 35%.

A questo tempo di ritorno i collassi diventano la maggior parte. Nei modelli impliciti con smorzamento fino al 10% collassano tutte le 20 scaffalature. Con il

12%, il 15% e il 18% le analisi completate sono solo 3 o 4, quindi le curve non sono riportate. Le analisi completate salgono a 5 con il 20%, a 6 con il 25% e il 30% e a 9 con il 35%. Il modello esplicito completa 9 analisi su 20, come il modello implicito al 35%, pur avendo uno smorzamento del 2%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,42 g. Nei modelli impliciti le accelerazioni ai piani sono inferiori a quelle al suolo e raggiungono il valore minimo tra il secondo e il terzo livello. Come a 224 anni, il minimo al terzo livello può essere dovuto al contributo del secondo modo di vibrare in direzione X. I modelli tra il 20% e il 35% danno valori molto simili tra loro di circa 0,32 g al primo livello e circa 0,26 g in sommità. I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione contenuta, con valori ai piani che restano sotto circa 0,4 g.

Il modello esplicito dà accelerazioni molto più alte dei modelli impliciti, ma mantiene lo stesso andamento lungo l'altezza dei tempi di ritorno precedenti. La mediana è di circa 0,73 g al primo livello, scende a circa 0,29 g al terzo livello e risale a circa 1,1 g in sommità, contro circa 0,26 g dei modelli impliciti. Anche la dispersione è molto più alta, con singoli accelerogrammi fino a circa 1,3 g al primo livello e circa 1,6 g in sommità. Come ai tempi di ritorno precedenti, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet.

4.8.2 Profili di accelerazione in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 975 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa. Per questo non compaiono i modelli impliciti con smorzamento del 2%, 5%, 7%, 10%, 12%, 15% e 18%.

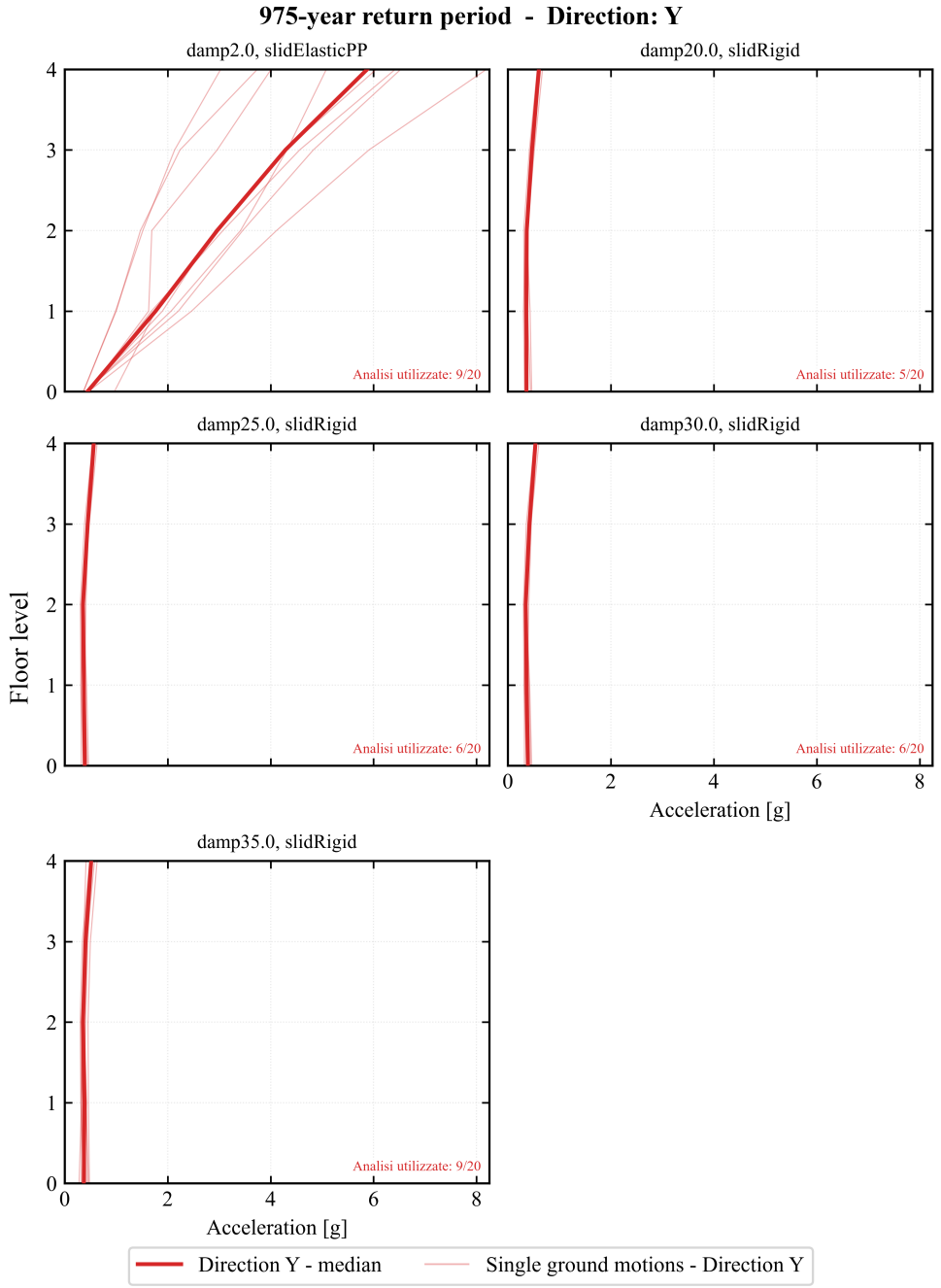


Figura 4.64: Profili di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 975 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 20% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,4 g. Nei modelli impliciti l'accelerazione resta circa costante fino al secondo livello e poi cresce leggermente verso la sommità.

I modelli tra il 20% e il 35% danno valori molto simili tra loro: in sommità circa 0,6 g con il 20% e circa 0,5 g con il 35%. I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione molto bassa, con valori in sommità che restano sotto circa 0,7 g.

Il modello esplicito dà accelerazioni molto più elevate dei modelli impliciti, e la differenza cresce con l'altezza. La mediana è di circa 1,8 g al primo livello e arriva a circa 5,9 g in sommità, contro circa 0,6 g dei modelli impliciti. Anche la dispersione è molto elevata, con singoli accelerogrammi che in sommità vanno da circa 3 g a circa 8 g. Come ai tempi di ritorno precedenti, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet, che in direzione Y è più marcato. Come ai tempi di ritorno precedenti, questi valori sono dovuti ai picchi provocati dallo scorrimento dei pallet.

4.8.3 Profili di drift in direzione X

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 975 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa. Per questo non compaiono i modelli impliciti con smorzamento del 2%, 5%, 7%, 10%, 12%, 15% e 18%.

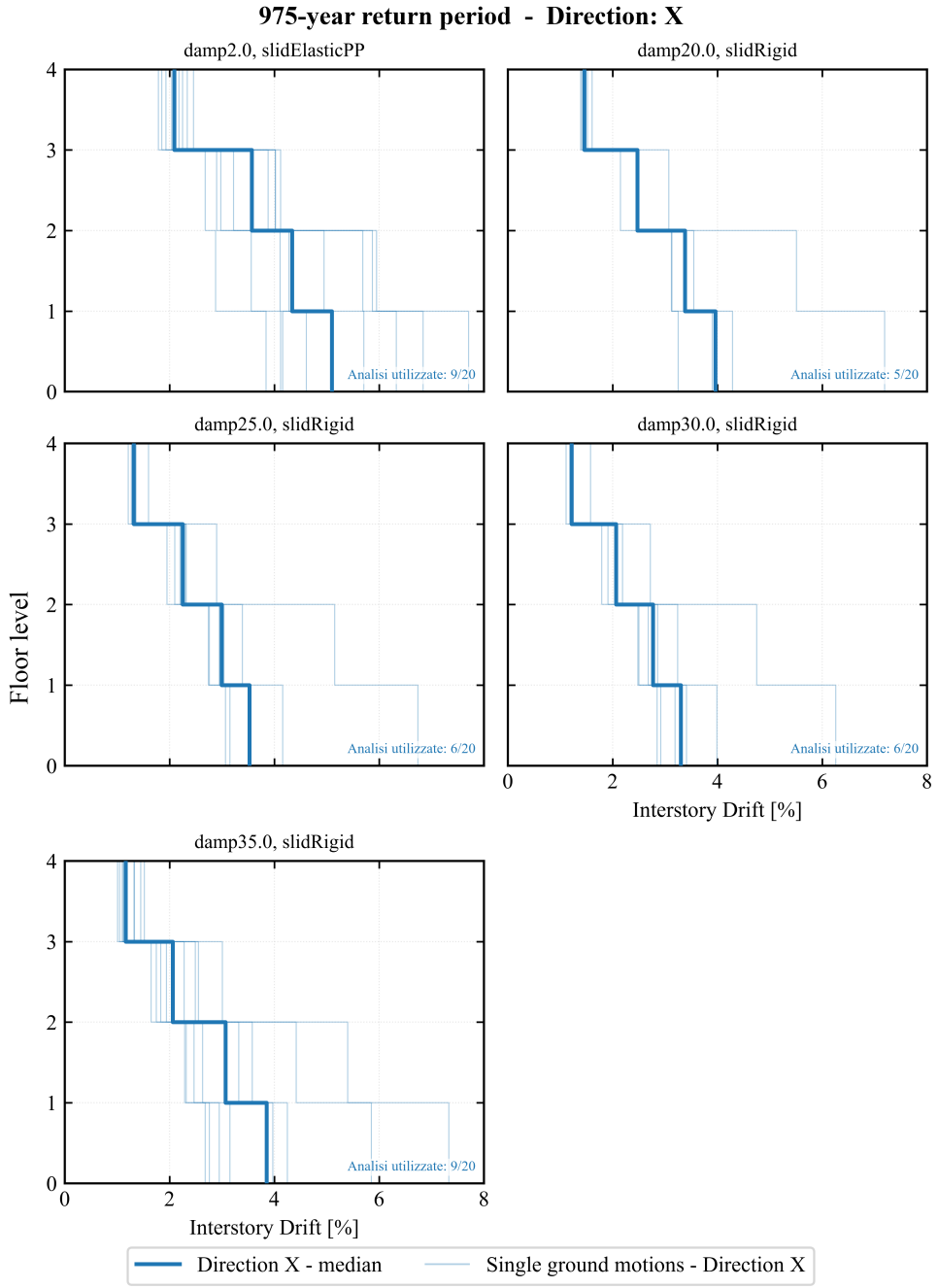


Figura 4.65: Profili di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 975 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 20% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità, con lo stesso andamento dei tempi di ritorno più bassi. I valori però sono i più alti

di tutti i tempi di ritorno.

Nei modelli impliciti il drift al primo interpiano è pari a circa 3,95% con il 20%, a circa 3,55% con il 25% e a circa 3,3% con il 30%. Con il 35% il drift torna a circa 3,85%, perché in questo modello le analisi completate sono di più e comprendono anche accelerogrammi più forti. All'ultimo interpiano i valori sono compresi tra circa 1,15% e circa 1,45%.

I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione elevata, con valori al primo interpiano che arrivano a circa 6,3–7,3%.

Il modello esplicito dà drift più alti di tutti i modelli impliciti riportati. Al primo interpiano il drift è di circa 5,1%, contro circa 3,85% del modello implicito al 35%, che ha lo stesso numero di analisi completate. All'ultimo interpiano si ha circa 2,1%, contro circa 1,15%. Anche la dispersione è elevata, con valori al primo interpiano compresi tra circa 3,8% e circa 7,75%. Il confronto però è fatto con modelli impliciti molto smorzati, dal 20% al 35%, perché quelli meno smorzati collassano tutti o quasi.

4.8.4 Profili di drift in direzione Y

Nelle figure seguenti sono riportati i profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 975 anni. Sono riportati solo i modelli con almeno 5 analisi completate, perché con meno analisi la mediana non è significativa. Per questo non compaiono i modelli impliciti con smorzamento del 2%, 5%, 7%, 10%, 12%, 15% e 18%.

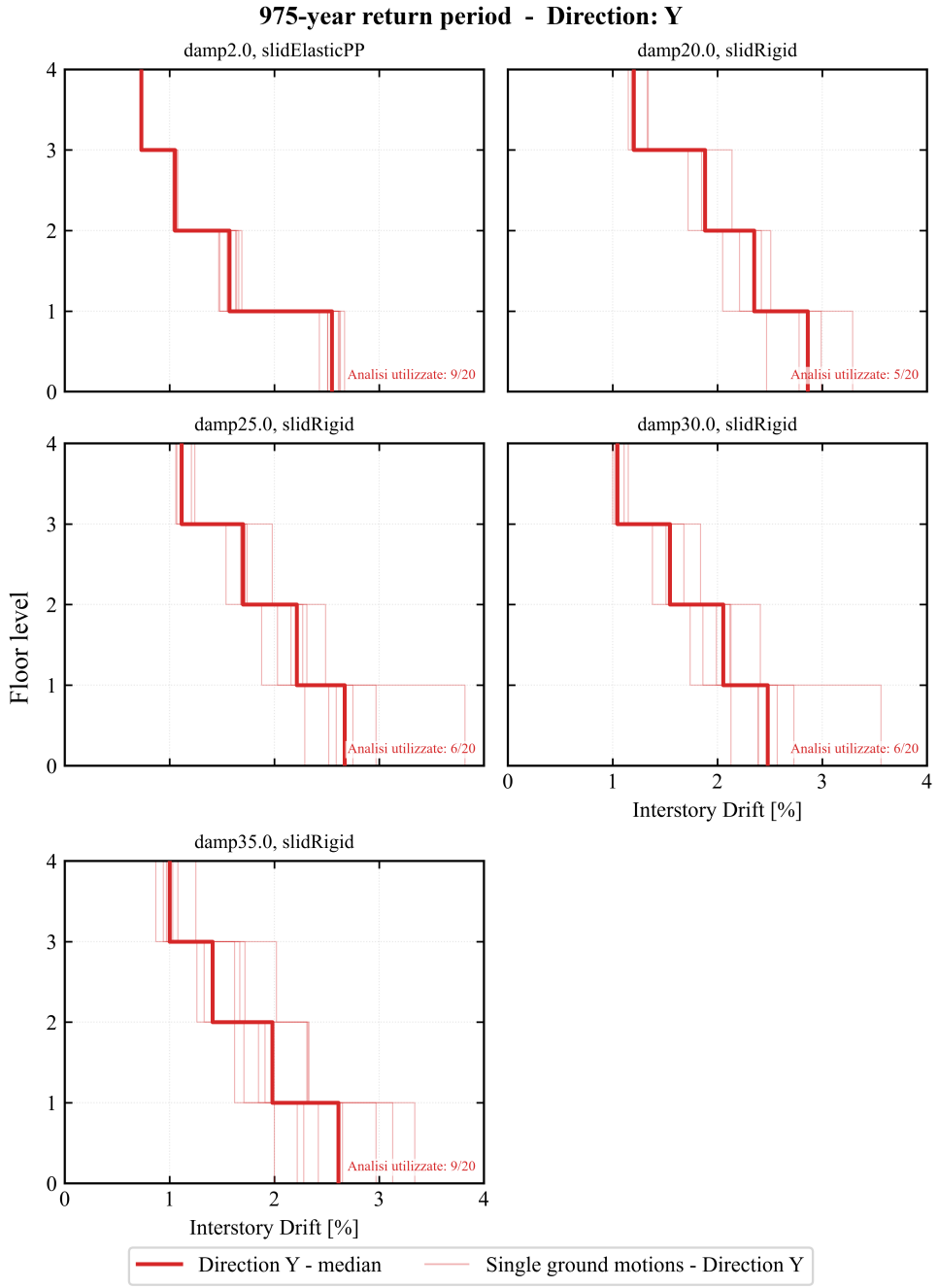


Figura 4.66: Profili di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 975 anni: singole analisi (linee sottili) e mediana (linea spessa) del modello esplicito e dei modelli impliciti con smorzamento dal 20% al 35%.

Il drift è massimo al primo interpiano e diminuisce salendo verso la sommità. Nei modelli impliciti il drift al primo interpiano è pari a circa 2,85% con il 20%,

a circa 2,65% con il 25%, a circa 2,5% con il 30% e a circa 2,6% con il 35%. All'ultimo interpiano i valori sono compresi tra circa 1,0% e circa 1,2%. I singoli accelerogrammi mostrano una dispersione moderata, con valori al primo interpiano che arrivano a circa 3,3–3,8%.

Il modello esplicito dà drift più bassi dei modelli impliciti, soprattutto agli ultimi interpiani. Al primo interpiano il drift è di circa 2,55%, simile a quello del modello implicito al 35% (circa 2,6%), che ha lo stesso numero di analisi completate. Salendo la differenza cresce: all'ultimo interpiano il modello esplicito dà circa 0,73%, contro circa 1,0% del modello implicito al 35%. Anche la dispersione è molto più bassa, con valori al primo interpiano compresi tra circa 2,45% e circa 2,65%. Agli ultimi interpiani i singoli accelerogrammi danno praticamente tutti lo stesso valore. Questo è dovuto allo smorzamento introdotto dallo scorrimento dei pallet, che limita il drift agli ultimi interpiani indipendentemente dall'intensità dell'accelerogramma.

4.8.5 Confronto dei risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i profili mediani dell'accelerazione di piano e del drift interpiano nelle direzioni X e Y per il periodo di ritorno di 975 anni. Le curve blu si riferiscono ai modelli con modellazione implicita dello scorrimento, in cui tale effetto è rappresentato da uno smorzamento equivalente compreso tra il 2% e il 35%, mentre la curva arancione si riferisce al modello con modellazione esplicita, con un elemento di scorrimento bilineare e uno smorzamento viscoso pari al 2%.

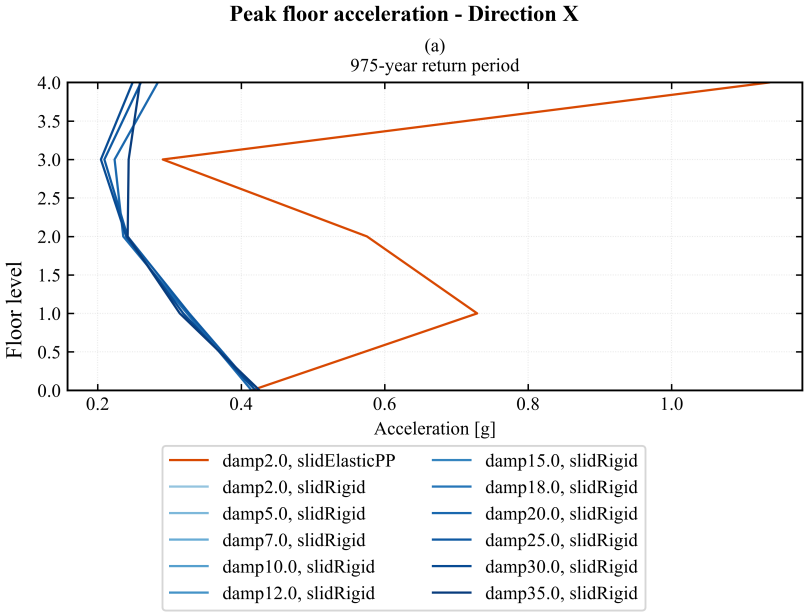


Figura 4.67: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione X per il tempo di ritorno di 975 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

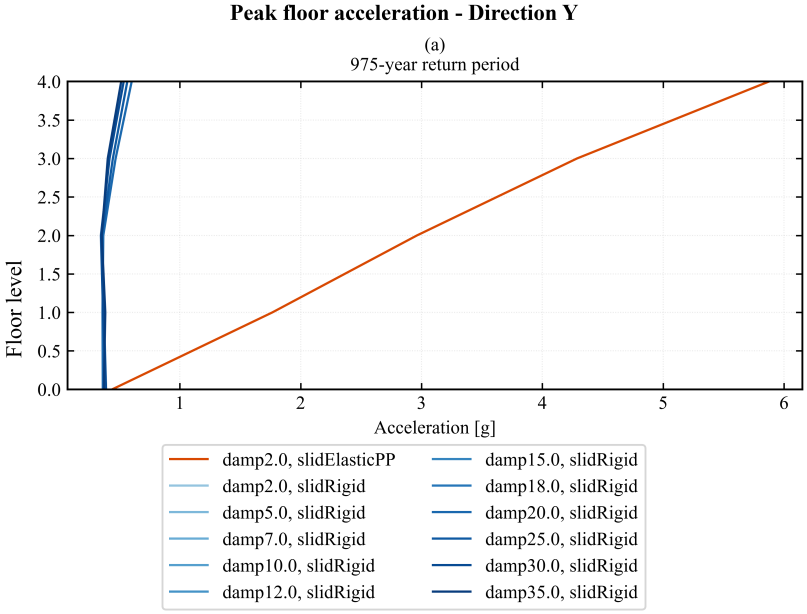


Figura 4.68: Confronto tra i profili mediani di massima accelerazione di piano in direzione Y per il tempo di ritorno di 975 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

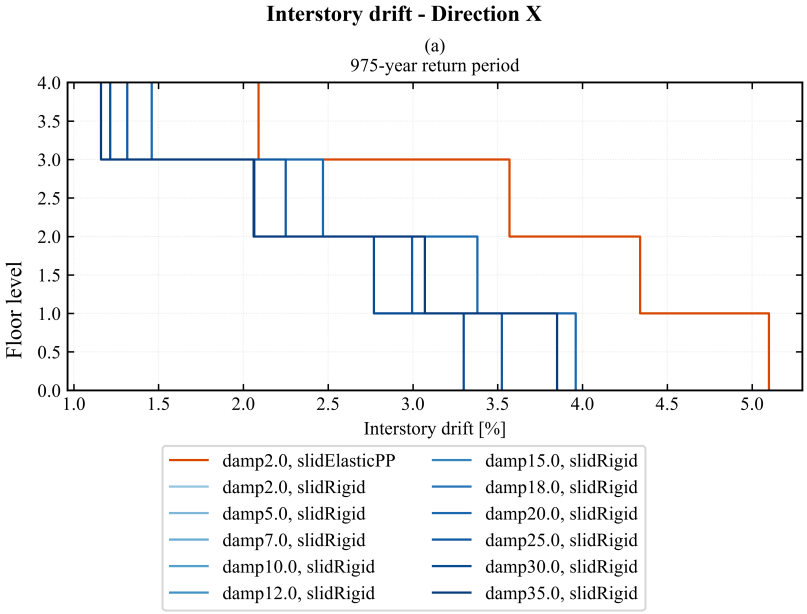


Figura 4.69: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione X per il tempo di ritorno di 975 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

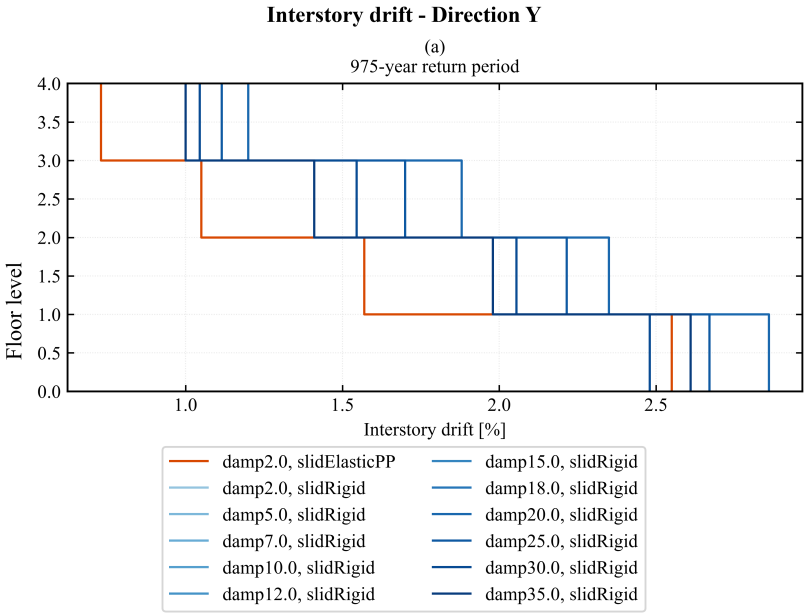


Figura 4.70: Confronto tra i profili mediani di drift interpiano in direzione Y per il tempo di ritorno di 975 anni: modelli impliciti (in blu) e modello esplicito (in arancione).

Per il tempo di ritorno di 975 anni i collassi sono la maggior parte. Nei modelli impliciti con smorzamento fino al 10% collassano tutte le 20 scaffalature. Con il

12%, il 15% e il 18% le analisi completate sono solo 3 o 4, quindi le curve non sono riportate. Le analisi completate salgono a 5 con il 20%, a 6 con il 25% e il 30% e a 9 con il 35%. Il modello esplicito completa 9 analisi su 20: in termini di collassi si comporta come il modello implicito al 35%, pur avendo uno smorzamento del 2%. Il confronto è quindi fatto solo con i modelli impliciti molto smorzati, dal 20% al 35%.

L'accelerazione al suolo è pari a circa 0,42 g in direzione X e circa 0,4 g in direzione Y. I modelli impliciti riportati danno risultati molto simili tra loro. In direzione X le accelerazioni ai piani sono inferiori a quella al suolo, con circa 0,32 g al primo livello e circa 0,25–0,29 g in sommità. In direzione Y l'accelerazione resta circa costante fino al secondo livello e arriva a circa 0,5–0,6 g in sommità. Il drift al primo interpiano è compreso tra circa 3,3% e circa 3,95% in direzione X e tra circa 2,5% e circa 2,85% in direzione Y.

In direzione X il modello esplicito dà valori più alti di tutti i modelli impliciti, sia per le accelerazioni sia per il drift. L'accelerazione è di circa 0,73 g al primo livello e di circa 1,1 g in sommità, contro circa 0,32 g e circa 0,26 g del modello implicito al 35%. Il drift è di circa 5,1% al primo interpiano e di circa 2,1% all'ultimo, contro circa 3,85% e circa 1,15%.

In direzione Y le accelerazioni del modello esplicito sono molto più alte a tutti i livelli: circa 1,75 g al primo livello e circa 5,9 g in sommità, contro circa 0,35 g e circa 0,5 g del modello implicito al 35%. Il drift invece è più basso, soprattutto agli ultimi interpiani: circa 2,55% contro circa 2,6% al primo interpiano, e circa 0,73% contro circa 1,0% all'ultimo.

Come ai tempi di ritorno precedenti, lo scorrimento dei pallet aumenta molto le accelerazioni e in direzione Y riduce il drift agli ultimi interpiani. A 975 anni però lo scorrimento non riduce il drift in direzione X, che anzi risulta più alto di quello dei modelli impliciti. Anche a questo tempo di ritorno nessun valore di smorzamento equivalente riesce a rappresentare il modello esplicito. Lo smorzamento al 35% riproduce il numero di collassi e il drift al primo interpiano in direzione Y. Sottostima però il drift in direzione X e le accelerazioni in entrambe le direzioni, e sovrastima il drift agli ultimi interpiani in direzione Y.

Capitolo 5

Conclusioni

5.1 Sintesi dei risultati

L'obiettivo del presente lavoro di tesi era fornire una stima preliminare dello smorzamento aggiuntivo indotto dallo scorrimento dei pallet su una scaffalatura industriale di tipo IPA. Per farlo, si sono confrontate le risposte di un modello esplicito, in cui lo scorrimento è stato rappresentato tramite un link bilineare, con quelle fornite da 11 modelli impliciti con smorzamento compreso tra il 2% e il 35%, per tempi di ritorno da 30 a 975 anni.

Dal confronto si osserva che lo smorzamento dipende dall'intensità sismica e che, per tempi di ritorno bassi (fino a 50 anni) i pallet non scorrono o scorrono per pochi accelerogrammi e il comportamento del modello esplicito corrisponde a quello del modello implicito con smorzamento del 2%. Ciò significa che per, queste intensità, non essendoci scorrimento, non viene introdotto alcuno smorzamento aggiuntivo.

All'aumentare dell'intensità sismica, la risposta nelle due direzioni differisce in funzione sia delle caratteristiche strutturali della scaffalatura sia dell'entità dello scorrimento dei pallet. In direzione Y la struttura è più rigida a causa della presenza delle spalle; di conseguenza, le accelerazioni di piano sono maggiori, i pallet superano più facilmente la soglia d'attrito e lo scorrimento è maggiore.

In direzione X lo scorrimento è limitato e lo smorzamento aggiuntivo resta basso: il drift del modello esplicito rimane vicino a quello del modello implicito

con smorzamento del 2% fino a 224 anni, e del 5% circa a 475 anni. In direzione Y, invece, lo smorzamento equivalente cresce in funzione dell'intensità sismica: si passa da circa il 10% al primo interpiano per il tempo di ritorno di 224 anni a circa il 30-35% per i tempi di ritorno più alti. Inoltre, il valore di smorzamento cresce anche in funzione dell'altezza, poiché lo scorrimento è maggiore negli ultimi due piani.

In termini di accelerazione, al contrario, il modello esplicito si discosta dagli andamenti dei modelli impliciti. Lo scorrimento provoca infatti picchi di accelerazione dovuti all'inversione del moto dei pallet, soprattutto in sommità nella direzione Y, mentre nei modelli impliciti l'incremento dello smorzamento comporta una riduzione delle accelerazioni.

5.2 Limiti e sviluppi futuri

Come detto, questo lavoro rappresenta un primo passo verso l'obiettivo di fornire una stima dello smorzamento indotto dallo scorrimento, ma presenta alcuni limiti che offrono spunti per lo sviluppo futuro.

Il primo limite riguarda il modello con elemento isolatore citato nel Capitolo 3, escluso dal confronto nei risultati perché influenzato da instabilità numerica. Un primo sviluppo futuro è quindi quello di risolvere tale problema, così da valutare l'effetto di una diversa rappresentazione del contatto tra pallet e struttura.

Il secondo limite riguarda la definizione del link con comportamento bilineare, in cui le direzioni X e Y sono disaccoppiate. Nel modello esplicito, ogni direzione scorre in modo indipendente, mentre nella realtà le due direzioni interagiscono: le due direzioni interagiscono; quando il pallet inizia a scorrere in una direzione, il limite di scorrimento nell'altra si riduce. Questo è un aspetto importante da approfondire perché, dai risultati ottenuti, si osserva un comportamento molto diverso nelle due direzioni. Un secondo sviluppo futuro è quindi l'uso di un link con comportamento accoppiato nelle due direzioni, per valutare quando questa interazione modifica i risultati.

Il terzo limite riguarda la generalità dei risultati ottenuti per un unico caso di studio. Per arrivare a indicazioni utilizzabili in ambito normativo, servirebbe un numero molto più elevato di analisi, in cui si considerano diverse configurazioni

in cui possono variare aspetti come l'intensità sismica, il coefficiente d'attrito, la configurazione di carico, la tipologia di scaffalatura o il numero di piani. Un possibile sviluppo è un'analisi parametrica estesa, in cui questi parametri vengono fatti variare in modo sistematico, così da ricavare valori o espressioni dello smorzamento equivalente validi per un insieme più ampio di casi e utilizzabili come strumento di calcolo semplificato nella progettazione.

Elenco delle figure

1.1 Oscillatore a singolo grado di libertà e formula del periodo 9
1.2 Danni alle scaffalature del *Home Depot* di Santa Clarita durante il sisma [3]. 10
1.3 Esempi di danni alle scaffalature industriali [4]. 12
1.4 Esempi di danni alle scaffalature industriali [6, 7]. 14
1.5 Danni allo stabilimento della Coca Cola [8]. 16
1.6 Scaffalature portapallet [9]. 18
1.7 Scaffalatura Drive-In [9] 20
1.8 Scaffalatura Drive-Through[10] 20
1.9 Logica LIFO e FIFO [10] 21
1.10 Scaffalature cantilever [10] 22
1.11 Scaffalature a ripiani [10] 23
1.12 Scaffalature push-back [10] 24
1.13 Scaffalature autoportanti [10] 25
1.14 Schema di un magazzino con scaffalature a gravità [10]. 26
1.15 Rulliere per i sistemi a gravità [10] 26
1.16 Schema di un magazzino con scaffalature autoportanti [10] 28
1.17 Elementi strutturali di una scaffalatura industriale 30
1.18 Elementi non strutturali di una scaffalatura industriale 32
1.19 Tipico processo produttivo per una sezione formata a freddo 33

2.1 Spostamento dell'isolatore al variare del rapporto k/P, per i due pesi considerati. 47
2.2 Accelerazione della massa al variare del rapporto k/P, per i due pesi considerati. 48

2.3 Posizione degli accelerometri ACC3, ACC8 e ACC10 del progetto ERIES-RACKSLIDE (adattata da [**rackslide_report**]). 49
2.4 Confronto tra gli spostamenti ottenuti dal modello numerico e quelli misurati nelle prove del progetto ERIES-RACKSLIDE. 50

3.1 Geometria della scaffalatura oggetto del caso studio. 52
3.2 Legame bilineare simmetrico adottato per le cerniere dei montanti e valori dei parametri. 53
3.3 Posizione dei link negli elementi di controventamento della spalla, legame bilineare asimmetrico adottato e valori dei parametri. 54
3.4 Modello esplicito: elementi trasversali tra i correnti e link di contatto dei pallet. 55
3.5 Andamento del rapporto di smorzamento alla Rayleigh in funzione del periodo, con $\xi = 2\%$ imposto ai periodi $T_6 = 0.36\,\mathrm{s}$ e $T_1 = 1.56\,\mathrm{s}$. 62

4.1 Risposta in accelerazione del modello con elemento isolatore 66
4.2 Confronto tra modello con elemento isolatore e modello con elemento bilineare 66
4.3 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 30$ anni (1/2) 70
4.4 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 30$ anni (2/2) 71
4.5 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 30$ anni (1/2) 73
4.6 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 30$ anni (2/2) 74
4.7 Profili di drift in direzione X, $T_R = 30$ anni (1/2) 76
4.8 Profili di drift in direzione X, $T_R = 30$ anni (2/2) 77
4.9 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 30$ anni (1/2) 79
4.10 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 30$ anni (2/2) 80
4.11 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione X, $T_R = 30$ anni 82
4.12 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione Y, $T_R = 30$ anni 82
4.13 Confronto delle mediane: drift in direzione X, $T_R = 30$ anni 83
4.14 Confronto delle mediane: drift in direzione Y, $T_R = 30$ anni 83
4.15 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 50$ anni (1/2) 85
4.16 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 50$ anni (2/2) 86
4.17 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 50$ anni (1/2) 88
4.18 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 50$ anni (2/2) 89

4.19 Profili di drift in direzione X, $T_R = 50$ anni (1/2) 91
4.20 Profili di drift in direzione X, $T_R = 50$ anni (2/2) 92
4.21 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 50$ anni (1/2) 94
4.22 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 50$ anni (2/2) 95
4.23 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione X, $T_R = 50$ anni 97
4.24 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione Y, $T_R = 50$ anni 97
4.25 Confronto delle mediane: drift in direzione X, $T_R = 50$ anni 98
4.26 Confronto delle mediane: drift in direzione Y, $T_R = 50$ anni 98
4.27 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 98$ anni (1/2) 100
4.28 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 98$ anni (2/2) 101
4.29 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 98$ anni (1/2) 103
4.30 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 98$ anni (2/2) 104
4.31 Profili di drift in direzione X, $T_R = 98$ anni (1/2) 106
4.32 Profili di drift in direzione X, $T_R = 98$ anni (2/2) 107
4.33 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 98$ anni (1/2) 109
4.34 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 98$ anni (2/2) 110
4.35 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione X, $T_R = 98$ anni 112
4.36 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione Y, $T_R = 98$ anni 112
4.37 Confronto delle mediane: drift in direzione X, $T_R = 98$ anni 113
4.38 Confronto delle mediane: drift in direzione Y, $T_R = 98$ anni 113
4.39 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 224$ anni (1/2) 115
4.40 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 224$ anni (2/2) 116
4.41 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 224$ anni (1/2) 118
4.42 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 224$ anni (2/2) 119
4.43 Profili di drift in direzione X, $T_R = 224$ anni (1/2) 121
4.44 Profili di drift in direzione X, $T_R = 224$ anni (2/2) 122
4.45 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 224$ anni (1/2) 124
4.46 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 224$ anni (2/2) 125
4.47 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione X, $T_R = 224$ anni 127
4.48 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione Y, $T_R = 224$ anni 127
4.49 Confronto delle mediane: drift in direzione X, $T_R = 224$ anni 128
4.50 Confronto delle mediane: drift in direzione Y, $T_R = 224$ anni 128
4.51 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 475$ anni (1/2) 130

4.52 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 475$ anni (2/2) 131
4.53 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 475$ anni (1/2) 133
4.54 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 475$ anni (2/2) 134
4.55 Profili di drift in direzione X, $T_R = 475$ anni (1/2) 136
4.56 Profili di drift in direzione X, $T_R = 475$ anni (2/2) 137
4.57 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 475$ anni (1/2) 139
4.58 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 475$ anni (2/2) 140
4.59 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione X, $T_R = 475$ anni 142
4.60 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione Y, $T_R = 475$ anni 142
4.61 Confronto delle mediane: drift in direzione X, $T_R = 475$ anni 143
4.62 Confronto delle mediane: drift in direzione Y, $T_R = 475$ anni 143
4.63 Profili di accelerazione in direzione X, $T_R = 975$ anni 145
4.64 Profili di accelerazione in direzione Y, $T_R = 975$ anni 147
4.65 Profili di drift in direzione X, $T_R = 975$ anni 149
4.66 Profili di drift in direzione Y, $T_R = 975$ anni 151
4.67 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione X, $T_R = 975$ anni 153
4.68 Confronto delle mediane: accelerazione in direzione Y, $T_R = 975$ anni 153
4.69 Confronto delle mediane: drift in direzione X, $T_R = 975$ anni 154
4.70 Confronto delle mediane: drift in direzione Y, $T_R = 975$ anni 154

Elenco delle tabelle

1.1 Elementi accessori delle scaffalature e relativa funzione 31

2.1 Combinazioni di carico, rapporto k/P e rigidezza adottate nelle analisi di calibrazione. 47

3.1 Aspetti positivi, limiti e semplificazioni dei due modelli espliciti. . . 59
3.2 Tempi di ritorno considerati e corrispondenti valori di $AvgSa$. . . . 61

4.1 Denominazioni sintetiche dei modelli riportate nei grafici. 68

Bibliografia

[1] Carlo Andrea Castiglioni et al. *Seismic behaviour of steel storage pallet racking systems (SEISRACKS2) EUR 27583 EN*. Rapp. tecn. Europen Union, 2014. DOI: doi:10.2777/686466. URL: http://ec.europa.eu/research/rtdinfo.html.

[2] William J Petak e Shirin Elahi. «EuroConference on Global Change and Catastrophe Risk Management Earthquake Risks in Europe The NORTHRIDGE EARTHQUAKE, USA and its ECONOMIC AND SOCIAL IMPACTS». In: *IIASA* (2001). URL: http://www.fema.gov/NR/nr_0106.htm.

[3] Building Seismic Safety Council. «Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public». In: *FEMA* 460 (set. 2005).

[4] Charles Clifton et al. *STEEL STRUCTURES DAMAGE FROM THE CHRISTCHURCH EARTHQUAKE SERIES OF 2010 and 2011*. Rapp. tecn. 2011. DOI: https://doi.org/10.5459/bnzsee.44.4.297-318.

[5] Beatrice Faggiano et al. *Le costruzioni di acciaio nel contesto del terremoto dell'Emilia Steel buildings within the Emilia earthquake Progettazione Sismica*. Rapp. tecn. 2012. URL: www.agrimoto.it.

[6] Agrinotizie. «Terremoto in Emilia, Coldiretti: '200 milioni di danni'». In: (). URL: https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agricoltura-economia-politica/2012/05/21/terremoto-in-emilia-coldiretti-200-milioni-di-danni/20532.

[7] Stefano Sesana Ingenio - Barbara Orsatti. «La vulnerabilità sismica delle scaffalature industriali». In: (). URL: https://www.ingenio-web.it/articoli/la-vulnerabilita-sismica-delle-scaffalature-industriali/.

[8] Coca Cola - Bottlers Japan Inc. «Four years after the Kumamoto Earthquake, a new site for Coca-Cola Bottlers Japan is born in Kumamoto!» In: (). URL: https://en.ccbji.co.jp/event/information030/.

[9] Leoni scaffalature. In: (). URL: https://www.leoniscaffalature.com/storico.asp?s=prodotto&lang=IT.

[10] Mecalux. In: (). URL: https://www.mecalux.it/soluzioni-stoccaggio.

[11] Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica. «2020 REL LAMINATOI A FREDDO». In: (2020).

[12] «Seismic behaviour of steel storage pallet racking systems (SEISRACKS2) EUR 27583 EN». In: (). ISSN: 1018-5593. URL: http://ec.europa.eu/research/rtdinfo.html.

[13] Carlo Andrea Castiglioni et al. *Seismic behaviour of steel storage pallet racking systems (SEISRACKS2) EUR 27583 EN*. Rapp. tecn. Europen Union, 2014. DOI: doi:10.2777/686466. URL: http://ec.europa.eu/research/rtdinfo.html.

[14] Dimitrios Tsarpalis e Dimitrios Vamvatsikos. «A codifiable methodology for estimating pallet sliding displacements on steel racking systems». In: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 54 (1 gen. 2024), pp. 363–388. ISSN: 10969845. DOI: 10.1002/eqe.4261.

[15] Dimitrios Tsarpalis et al. «Experimental Investigation of Pallet Sliding in Steel Racking Systems via Shake Table Testing». In: *Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 718 LNCE. Springer Science e Business Media Deutschland GmbH, 2025, pp. 194–205. ISBN: 9783031988929. DOI: 10.1007/978-3-031-98893-6_19.

[16] Dimitrios Vamvatsikos et al. *ERIES-RACKSLIDE Test Report Content sliding investigations for pallet racking systems*. Rapp. tecn. URL: http://www.eucentre.it.

[17] Bryan Chalarca, Giammaria Gabbianelli e Aldo Rapone. *PARAMETRIC STUDY ON THE MODELLING ASSUMPTIONS OF WOOD PALLET SLIDING*. Rapp. tecn. 2025.