



CONTRATTO CON LA DITTA

Ruregold s.r.l.

Report attività sperimentali su
Utilizzo di malte FCC per il rinforzo di paramenti murari
sottoposti ad azioni sismiche

RAPPORTO TECNICO SCIENTIFICO

Perugia, luglio 2020



INDICE

PREMESSA.....	1
1. Introduzione	2
2. Descrizione del modello costruttivo e applicazione del rinforzo strutturale	3
2.1 Descrizione del modello costruttivo	3
2.2 Intervento di rinforzo.....	5
3. Setup sperimentale	12
4. Risultati sperimentali dinamici	13
4.1 Analisi dei segnali accelerometrici e indici energetici	13
4.2 Analisi delle accelerazioni in input al modello	15
4.3 Analisi delle accelerazioni in output al modello.....	30
4.4 Confronto della risposta dinamica strutturale pre- e post- rinforzo.....	44
5. CONCLUSIONI.....	52



PREMESSA

La presente relazione illustra le attività tecnico-scientifiche svolte dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Perugia per la ditta Ruregold s.r.l. nell'ambito della convenzione *“Utilizzo di malte FCC per il rinforzo di paramenti murari sottoposti ad azioni sismiche”*.

In particolare, in questa relazione vengono descritti gli esiti delle prove dinamiche effettuate su tavola vibrante di un modello strutturale di edificio in muratura rinforzata con malta MX-PVA Fibrorinforzata.

GRUPPO DI RICERCA

Prof. Ing. Massimiliano Gioffrè (Responsabile Scientifico)

Dott. Ing. Nicola Cavalagli

Dott. Ing. Chiara Pepi



1. Introduzione

La sperimentazione in oggetto è stata effettuata presso il Laboratorio di Dinamica Strutturale e Controllo delle Vibrazioni del Centro Ricerche ENEA a Casaccia (Roma), dotato di una tavola vibrante di dimensioni 4×4 metri a 6 gradi di libertà, massima accelerazione di attuazione pari a 3g, in grado di applicare sollecitazioni sismiche ad elementi strutturali a medio-grande scala. L'attività di ricerca ha permesso di analizzare la risposta dinamica di una costruzione in laterizio, preventivamente danneggiata mediante prova sulla medesima tavola vibrante, rinforzata mediante l'applicazione di un doppio strato di malta fibrorinforzata ad alta resistenza.

A tal fine il modello è stato sottoposto agli stessi input sismici che avevano causato il preventivo stato di danneggiamento e la risposta dinamica è stata analizzata mediante una serie di sistemi di acquisizione, sia di tipo standard a contatto (accelerometri MEMS e piezoelettrici), sia innovativi non a contatto (sistema ottico mediante telecamere a infrarosso).

L'analisi dei dati e l'osservazione dello stato di danno hanno permesso di valutare l'effetto del rinforzo dovuto all'applicazione della malta MX-PVA Fibroinforzata sia in termini quantitativi, ovvero di accelerazioni e capacità di assorbimento dell'energia sismica in input da parte della struttura, sia qualitativi in termini di analisi della tipologia di danno e innesco dei meccanismi di collasso.

2. Descrizione del modello costruttivo e applicazione del rinforzo strutturale

2.1 Descrizione del modello costruttivo

Il modello costruttivo di riferimento è costituito da un edificio disposto su due livelli, a pianta rettangolare e caratterizzato da un fattore di scala pari a circa 1.5, per quanto riguarda l'altezza di interpiano, lo spessore dei paramenti murari e le dimensioni delle aperture. Più nel dettaglio le dimensioni in pianta sono pari a 3.00×3.50 m e l'altezza di interpiano circa 2.20 m ciascuno. I quattro prospetti del modello sono costituiti da varie aperture aventi diverse dimensioni e posizioni in modo da conferire al baricentro delle rigidezze una eccentricità rispetto al baricentro delle masse. Con la stessa finalità, nel prospetto A sono stati realizzati due aggetti sia nel solaio di primo livello che in quello di copertura. In Figura 1 sono indicati i dettagli geometrici sui quattro prospetti del modello strutturale.

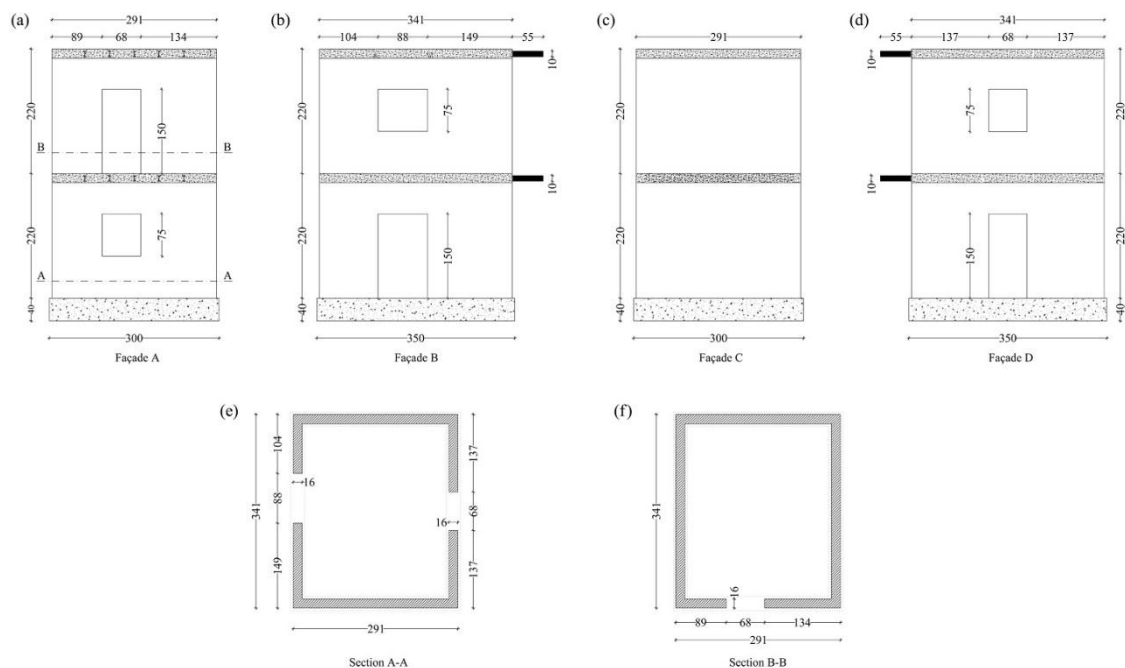


Figura 1. Dettagli geometrici del modello strutturale sottoposto a prove dinamiche su tavola vibrante.



Il modello è stato realizzato su cordoli di fondazione in calcestruzzo armato mediante i quali è stato possibile effettuare operazioni di spostamento e ancoraggio del modello su tavola vibrante. Le murature sono state costruite usando blocchi portanti in laterizio (percentuale di foratura 45%) di dimensioni 30×18×16 cm e malta M10 con giunti di spessore circa pari a 1 cm, mentre gli architravi delle aperture sono costituiti da elementi in latero-cemento prefabbricato con traliccio in acciaio. Il primo solaio è stato realizzato in latero-cemento con travetti portanti in calcestruzzo armato bidirezionali, in modo da ottenere un elevato grado di rigidità nel piano in entrambe le direzioni; il solaio di copertura è invece costituito da una struttura metallica a graticcio adeguatamente controventata per rendere soddisfatta l'ipotesi di piano rigido. Su entrambi i solai sono state fissate masse aggiuntive al fine di incrementare la massa sismica in fase dinamica. La realizzazione del secondo solaio tramite una struttura metallica si è resa necessaria per permettere il posizionamento delle masse aggiuntive al primo solaio calate tramite carroponte. Tali masse sono state fissate su entrambi i solai in fase successiva allo spostamento del modello su tavola vibrante a causa delle limitazioni di portata del sistema di sollevamento. Senza masse il modello ha un peso complessivo di circa 15 ton; al primo solaio sono state aggiunte 20 piastre in acciaio di circa 100 kg ciascuna, per un totale di 2 ton; al secondo solaio sono state fissate due piastre da 1.6 ton ciascuna, per un totale di circa 3.2 ton; sugli aggetti esterni al prospetto A sono stati fissati altri 300 kg sia al primo sia al secondo livello (Figura 2).

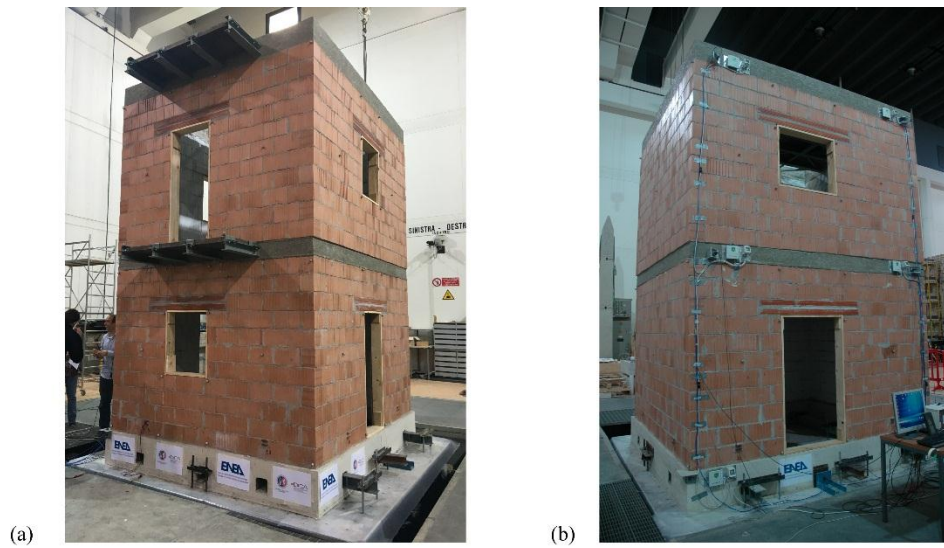


Figura 2. Modello strutturale con masse sisimche aggiuntive posizionato su tavola vibrante: (a) prospetti A-D; (b) prospetti B-C.

2.2 Intervento di rinforzo

Le prove oggetto di indagine sono state eseguite sul modello strutturale illustrato nella sezione precedente a partire da una configurazione danneggiata indotta da una precedente serie di prove dinamiche. Il quadro fessurativo ottenuto dopo il primo ciclo di prove dinamiche è illustrato in Figura 3. Come si può notare, il danneggiamento ha interessato esclusivamente il primo livello, in cui si evidenziano diffuse lesioni a taglio principalmente nei prospetti in cui sono presenti aperture. Dalle registrazioni video è stato inoltre possibile constatare l'insorgere di un moto di rocking del blocco posto superiormente alle lesioni, associato quindi ad un completo distacco della parte superiore da quella inferiore.

Il modello danneggiato è stato rinforzato mediante l'applicazione di un doppio strato di malta MX-PVA Fibrorinforzata, sia sul lato esterno sia su quello interno dei soli pannelli murari del primo piano per due motivi: il piano superiore è rimasto integro a seguito delle prove sismiche e si voleva limitare la quantità di massa da trasportare a seguito dell'intervento di rinforzo per il posizionamento del modello sulla tavola vibrante.

Nello specifico è stata applicata la malta MX-PVA per uno spessore di circa 3 cm sia sul lato esterno sia su quello interno. L'esecuzione dei lavori è stata condotta in due giornate

lavorative (8 e 9 luglio 2019) in modo da assicurare la corretta posa in opera del prodotto. Dalla Figura 4 alla Figura 8 vengono mostrate alcune fasi di posa in opera del prodotto nelle due diverse stesure, comprensive di alcuni particolari di dettaglio.

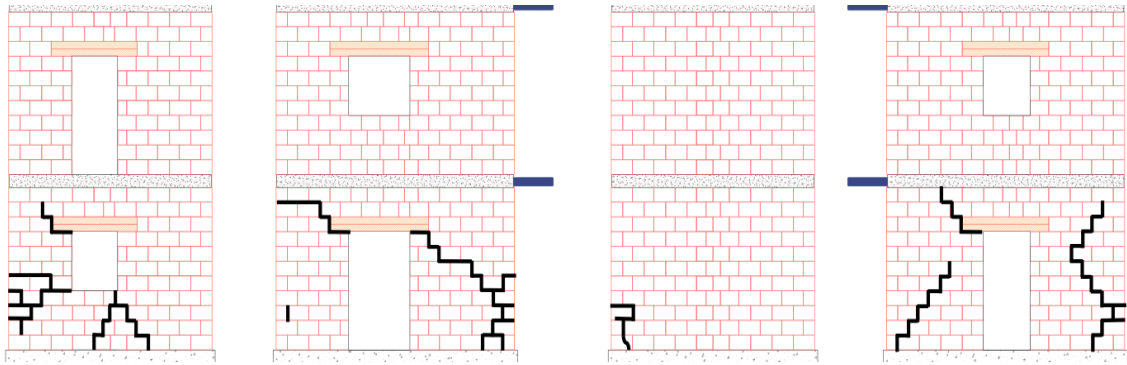


Figura 3. Configurazione danneggiata del modello strutturale sulla quale è stato eseguito l'intervento di rinforzo mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata.



(a)



(b)

Figura 4. Posa in opera del sistema di rinforzo strutturale mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata: dettagli di porzioni interne al modello.



(a)



(b)

Figura 5. Posa in opera del sistema di rinforzo strutturale mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata: immagini di dettaglio in merito alla prima stesura.



(a)



(b)

Figura 6. Posa in opera del sistema di rinforzo strutturale mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata: immagini del prosetto C dopo la prima stesura.



(a)



(b)

Figura 7. Posa in opera del sistema di rinforzo strutturale mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata: immagini dei prospetti A-D (a) e C (b) dopo la seconda stesura.



Figura 8. Posa in opera del sistema di rinforzo strutturale mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata: immagini dei prospetti A (a) e B (b) dopo la seconda stesura.

L'intervento di rinforzo è stato realizzato fuori dalla tavola vibrante. L'applicazione della malta fibrorinforzata ha determinato un incremento di peso di circa 3 ton, conferendo quindi un peso totale al modello pari a 18 ton. Successivamente al trasporto e all'ancoraggio del modello sulla tavola vibrante, sono state nuovamente fissate le masse aggiuntive sui due solai, al fine di poter confrontare la risposta dinamica della struttura rinforzata con quella ottenuta in assenza di rinforzo strutturale.



3. Setup sperimentale

Il setup sperimentale utilizzato per misurare e analizzare la dinamica del sistema di attuazione e della risposta del modello strutturale è costituito da diversi sensori, sia di tipo a contatto, sia non a contatto.

- Sistema accelerometrico MEMS#1: costituito da una terna di accelerometri uniassiali MEMS (sensibilità 1 V/g) fissati direttamente alla tavola vibrante in grado di misurare le accelerazioni nelle due direzioni orizzontali e in direzione verticale.
- Sistema accelerometrico MEMS#2: costituito da 12 accelerometri uniassiali MEMS (sensibilità 1 V/g) fissati sulla struttura come indicato in Figura 9(a), ovvero tre per ogni livello (cordolo, primo solaio e copertura) e tre fissati ad una basetta di acciaio ancorata direttamente alla tavola vibrante in grado di fornire storie temporali di accelerazione nelle due direzioni orizzontali e in direzione verticale.
- Sistema accelerometrico MEMS#3: costituito da sei stazioni triassiali di misura Quakebots, prodotto da Wise Robotics, installati sulla struttura nei nodi indicati in Figura 9(a); tale sistema innovativo prevede l'acquisizione dati in ogni singola stazione di misura e lo storage direttamente in cloud tramite connessione web.
- Sistema accelerometrico PIEZO: costituito da 9 accelerometri uniassiali piezoelettrici ad alta sensibilità (sensibilità 10 V/g) fissati sulla struttura come indicato in Figura 9(a), nelle prime 9 postazioni.
- Sistema ottico 3D Vision: sistema di misura dinamica degli spostamenti non a contatto basato sul rilevamento ottico di markers riflettenti posizionati sulla struttura attraverso 9 telecamere operanti nel vicino all'infrarosso sincronizzate.

La ridondanza dei sistemi di misura ha permesso un maggior controllo e confronto dei dati acquisiti, considerando possibili collassi strutturali, anche parziali, in grado di inficiare l'acquisizione di alcuni sensori. Nel report si riportano i dati acquisiti dai sistemi accelerometrici MEMS#1 e MEMS#2, avendo constatato che gli altri sistemi forniscono dati coerenti.

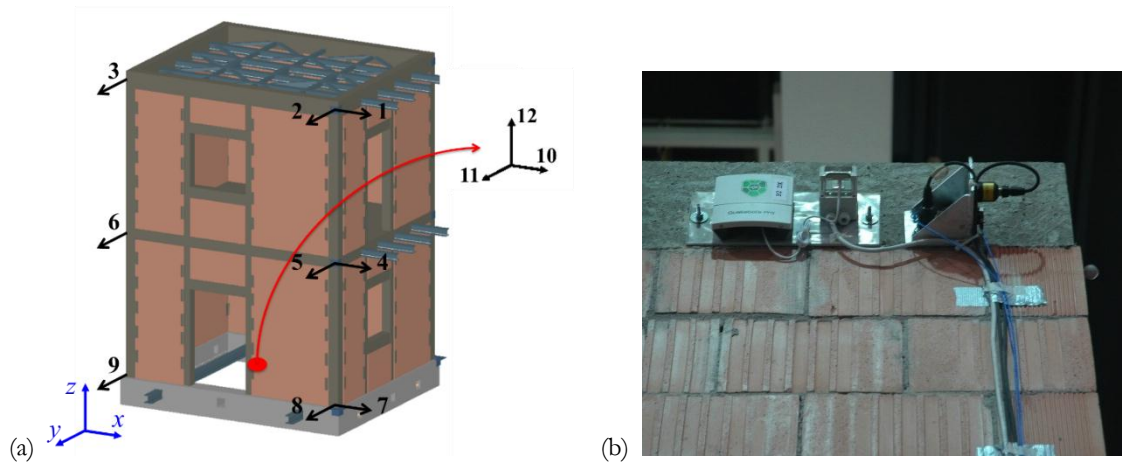


Figura 9. (a) Layout sperimentale del sistema accelerometrico MEMS#2. (b) Particolare dei canali di misura 1 e 2.

4. Risultati sperimentali dinamici

4.1 Analisi dei segnali accelerometrici e indici energetici

Il modello strutturale è stato sottoposto a input sismici con accelerazioni di picco crescenti, scalando opportunamente le storie temporali della storia accelerometrica di riferimento. In particolare, sono stati utilizzati i record di accelerazione registrati dalla stazione sismica NRC di Norcia durante l'evento sismico del 30 Ottobre 2016 (M 6.5), ovvero l'evento di maggiore intensità della sequenza sismica di Amatrice-Visso-Norcia, e archiviati nel database della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) del Dipartimento di Protezione Civile.

Sono state eseguite prove dinamiche a differenti valori di scala della terna accelerometrica di riferimento: 0.25, 1.00, 1.50. Indicando con N l'ampiezza nominale delle storie temporali di accelerazione di riferimento, in Tabella 1 è riportato uno schema riassuntivo della procedura di prova.



Tabella 1. Sequenza dei test sismici eseguiti sul provino in muratura rinforzata

Test	Codice	Descrizione
1	E1 - MR	Input sismico 0.25 N
2	E2- MR	Input sismico 1.00 N
3	E3 - MR	Input sismico 1.20 N
4	E4 - MR	Input sismico 1.50 N

Al fine di investigare l'efficacia dell'intervento di consolidamento nei confronti dell'azione sismica, anche in presenza di azioni verticali particolarmente significative, sono state utilizzate misure di intensità delle storie temporali di accelerazione registrate dagli accelerometri alla base e quindi al piano del solaio e della copertura. Poiché la risposta dinamica di un sistema strutturale dipende sia dalle ampiezze che dalle frequenze delle forzanti applicate in relazione alle proprie frequenze naturali, le informazioni utili ai fini ingegneristici per rappresentare il moto sismico al sito sono l'ampiezza, il contenuto in frequenza e la durata: l'ampiezza del moto sismico può essere descritta attraverso le storie temporali di accelerazione; il contenuto in frequenza descrive come varia l'ampiezza del moto sismico in relazione alle frequenze contenute nel segnale; la durata del moto sismico è legata al tempo richiesto per liberare l'energia accumulata lungo la superficie di rottura e dipende dall'entità di tale energia, e quindi, dal moto sismico.

Queste informazioni possono essere ricavate dalle registrazioni di storie temporali di accelerazioni e sintetizzate in una serie di parametri detti *misure di intensità* dell'azione sismica. Fra le numerose misure di intensità proposte in letteratura, nell'analisi dei dati si è fatto riferimento alle seguenti.

- Massima accelerazione al suolo (*Peak Ground Acceleration* - PGA), utilizzata per identificare il grado di severità di un evento sismico, $a(t)$:

$$PGA = \max |a(t)|$$



e, in maniera analoga, l'accelerazione di picco della risposta strutturale (*Peak Response Acceleration* - PRA), definita come l'accelerazione massima misurata dai sensori installati in diverse posizioni sul sistema strutturale. Entrambe queste grandezze danno informazioni esclusivamente sull'ampiezza del terremoto.

- *Intensità di Arias* - I_A , che da informazioni sia sul contenuto in frequenza sia sull'ampiezza del moto sismico, ed è definita come:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a(\tau)^2 dt$$

dove $a(\tau)^2$ è il valore dell'accelerazione misurata al tempo τ e g è l'accelerazione di gravità. I_A rappresenta una misura dell'intensità sismica in funzione dell'energia dissipata dalle costruzioni per effetto di un evento sismico.

- *Intensità di Housner* (o intensità dello spettro di risposta) I_H , che da informazioni sulla durata, il contenuto in frequenza e l'ampiezza del moto sismico, ed è definita come l'integrale dello spettro di risposta in termini di pseudovelocità PS_v calcolato con un rapporto di smorzamento $\xi=5\%$ nell'intervallo di periodo T fra 0.1 e 2.5 s.

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} PS_v(\xi = 5\%, T) dT$$

I_H rappresenta una misura dell'intensità sismica da un punto di vista energetico, poiché lo spettro di pseudovelocità PS da informazioni sulla domanda energetica in un sistema elastico ad un grado di libertà.

4.2 Analisi delle accelerazioni in input al modello

Le prove dinamiche sono state effettuate in accordo alla Tabella 1, utilizzando differenti valori di scala della terna accelerometrica di riferimento. Le storie temporali di accelerazione così ottenute sono state utilizzate come input per eseguire ciascun test



sismico. Tuttavia, quando si ha a che fare con prove dinamiche su tavola vibrante, l'interazione fra il sistema strutturale costituito da tavola vibrante-attuatori-massa di reazione e il prototipo in muratura deve essere opportunamente tenuta in conto per una corretta interpretazione dei risultati.

Per questo motivo, si è scelto di studiare attraverso le misure di intensità in termini di PGA , I_A e I_H le storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza della tavola vibrante dai due sistemi di misura MEMS#1 e MEMS#2 nelle tre direzioni x , y , z , in Figura 9(a), e di confrontarle con le storie temporali di accelerazione utilizzate come input per la tavola vibrante.

Il sistema di misura MEMS#1 e il sistema di misura MEMS#2 contengono entrambi una terna di accelerometri posti sulla tavola vibrante con differente frequenza di campionamento, rispettivamente pari a 200 Hz e 1000 Hz. Sia le storie temporali di accelerazione utilizzate come input sia quelle misurate alla base sono state ricampionate a 200 Hz e, inoltre, le misure registrate in corrispondenza della tavola sono state elaborate attraverso un filtro passa banda tra 0.1 e 50 Hz. La scelta di utilizzare due sistemi di misura è stata dettata dalla necessità di avere una terna connessa al sistema di attuazione della tavola, per il funzionamento dei parametri di controllo dinamico, e una in acquisizione sincrona con i sensori installati sulla struttura.

Dalla Figura 10 alla Figura 13 sono riportate le storie temporali dell'accelerazione di riferimento N in direzione x , y e z , utilizzate come input, e quelle misurate dai sistemi MEMS#1 e MEMS#2, in corrispondenza della tavola vibrante per i quattro casi ad ampiezza sismica crescente della Tabella 1.

Da una osservazione qualitativa di quanto riportato dalla Figura 10 alla Figura 13 si può notare che le storie delle accelerazioni registrate sulla tavola vibrante sono sempre maggiori rispetto a quelle generate dal sistema di attuazione come segnale di input. Inoltre, è importante osservare come le storie temporali di accelerazione registrate da entrambi i sistemi di misura siano caratterizzate da spikes e segnali spuri, probabilmente legati all'interazione fra la tavola e la struttura.

Le Figure 14-16 e le Tabelle 2-4 confermano quantitativamente che il sistema complesso costituito da tavola vibrante-attuatori-massa di reazione e il prototipo in muratura è



caratterizzato da una amplificazione delle accelerazioni di input già a livello della tavola vibrante. Questo indica che la costruzione in muratura è stata sottoposta a un sisma di intensità maggiore rispetto a quello di input. Infatti, è possibile osservare come le PGA ottenute dalle storie temporali di accelerazione misurate dai due sistemi MEMS#1 e MEMS#2 siano, in generale, significativamente maggiori rispetto a quelle ottenute dalle storie temporali di accelerazione utilizzate come input, con un valore massimo di differenza raggiunto in corrispondenza del fattore di scala 1.50. Proprio in questo caso, infatti, la PGA ottenuta in direzione z dalle storie temporali di accelerazione utilizzate come input e quelle misurate alla base dal sistema MEMS#2 sono pari rispettivamente a 0.534 g e 1.008 g, con un incremento di circa 1.9 volte.

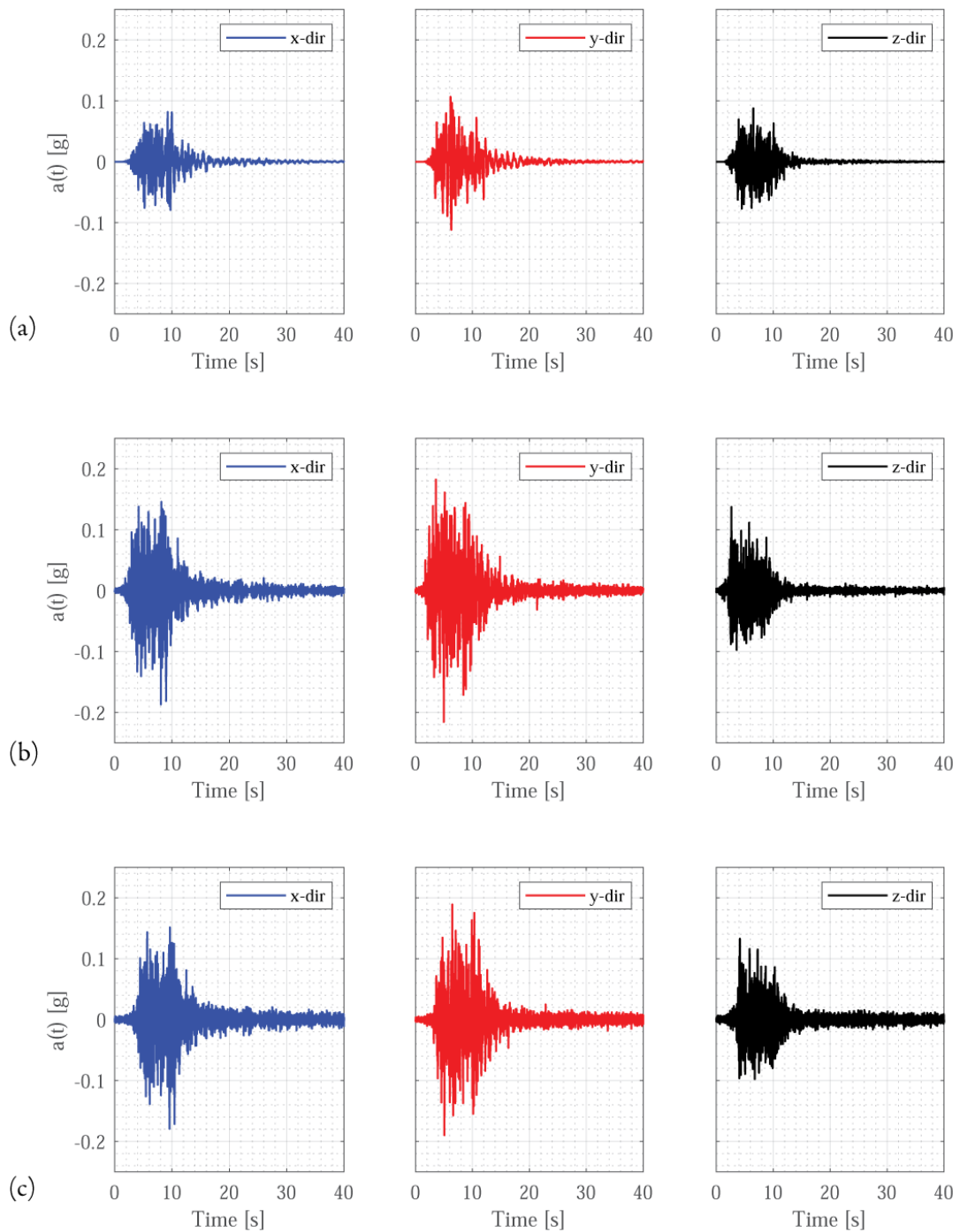
Tuttavia, analizzando i parametri di intensità energetica I_A e I_H dei segnali misurati e di quelli in input (Figure 15-16), la disparità evidenziata dai picchi di accelerazione diminuisce.

Questo comportamento è reso ancora più evidente dalle Figure 17-19 nelle quali, per ogni direzione x,y,z, sono riportati i rapporti fra le intensità di misura determinate dai segnali misurati per i quattro sismi della Tabella 1 e le corrispondenti intensità stimate all'intensità di riferimento N (fattore di scala 1.00), sia per le storie temporali di accelerazione utilizzate come input, sia per quelle misurate dai due sistemi di misura MEMS#1 e MEMS #2. I fattori di scala "teorici attesi" sono indicati da una linea tratteggiata verde.

Come era atteso dall'analisi dei valori numerici di PGA, i rapporti di scala teorici risultano essere perfettamente rispettati soltanto quando si considerano i segnali utilizzati come input mentre differenze minime si osservano quando si considerano i segnali misurati con il sistema MEMS #1. Differenze massime sono invece osservabili quando si considerano i segnali misurati con il sistema MEMS #2 in direzione y e z durante le prove sismiche E3-RM ed E4-RM.

L'analisi dei fattori di scala in termini di I_A riportati in Figura 18 mostra che i valori si discostano tutti dalla curva teorica attesa verde per le prove sismiche E3-RM ed E4-RM con lo stesso andamento.

Infine, per quel che riguarda i fattori di scala in termini di I_H riportati in Figura 19 è possibile osservare una perfetta coincidenza con la curva teorica attesa verde, ad eccezione



del segnale utilizzato in input e quello misurato dal sistema MEMS#2 in direzione z in corrispondenza del fattore di scala 1.50.

Figura 10. Storie temporali di accelerazione misurate durante l'applicazione del sisma di riferimento scalato al 25% (a); in corrispondenza della tavola dal sistema di acquisizione MEMS#1 (b); e MEMS#2 (c).

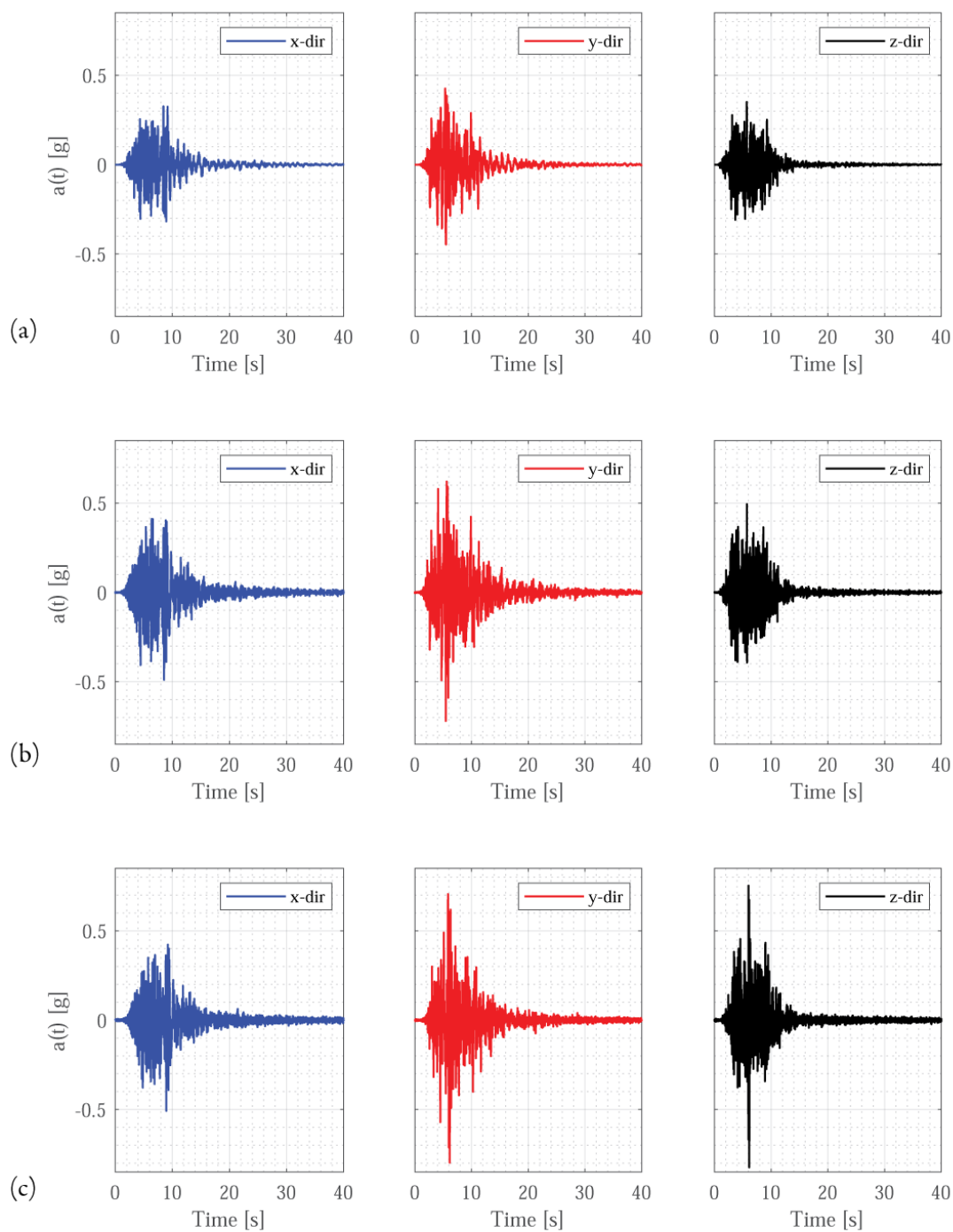


Figura 11. Storie temporali di accelerazione misurate durante l'applicazione del sisma di riferimento al valore nominale N (a); in corrispondenza della tavola dal sistema di acquisizione MEMS#1 (b); e MEMS#2 (c).

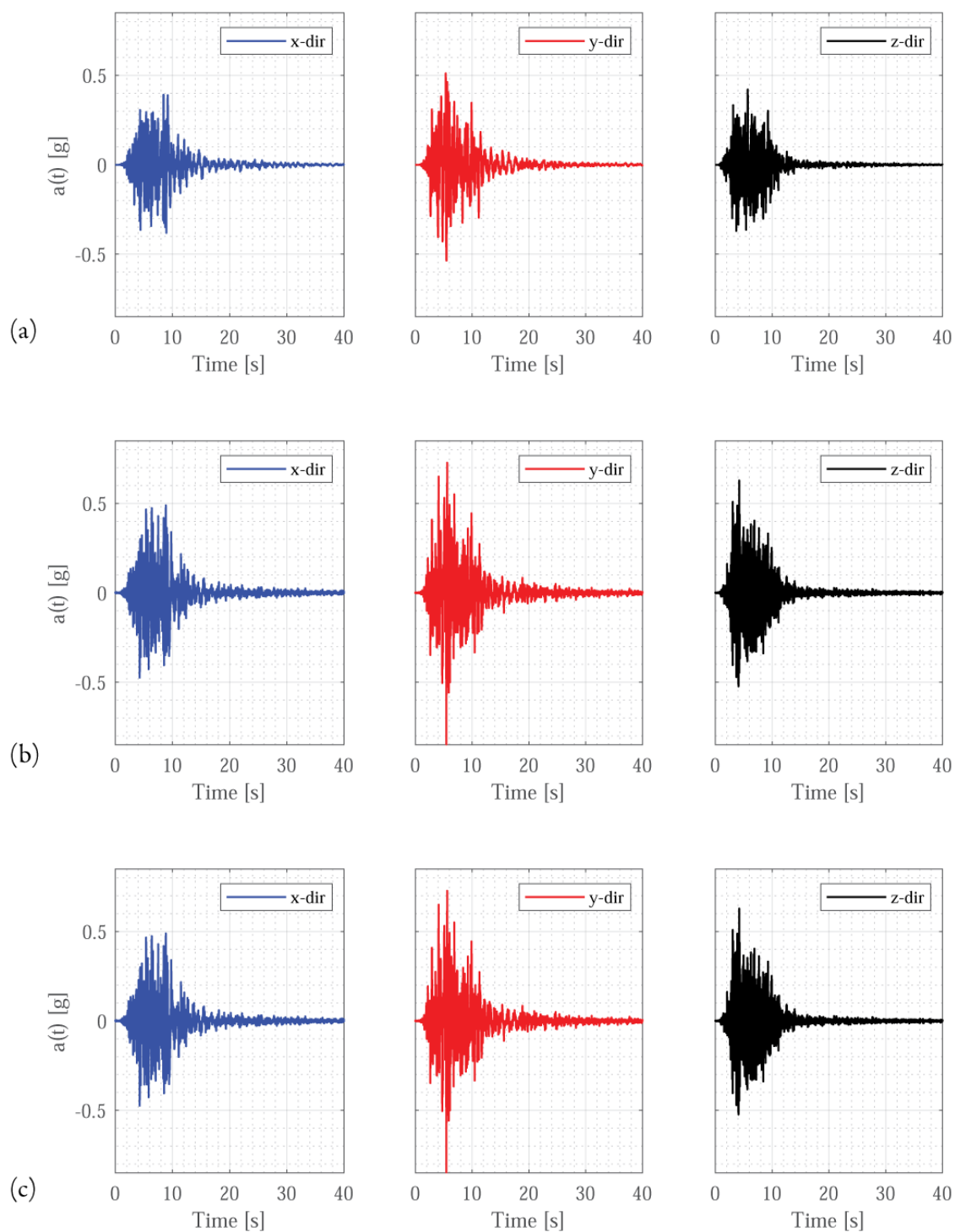


Figura 12. Storie temporali di accelerazione misurate durante l'applicazione del sisma di riferimento scalato al 120% (a); in corrispondenza della tavola dal sistema di acquisizione MEMS#1 (b); e MEMS#2 (c).

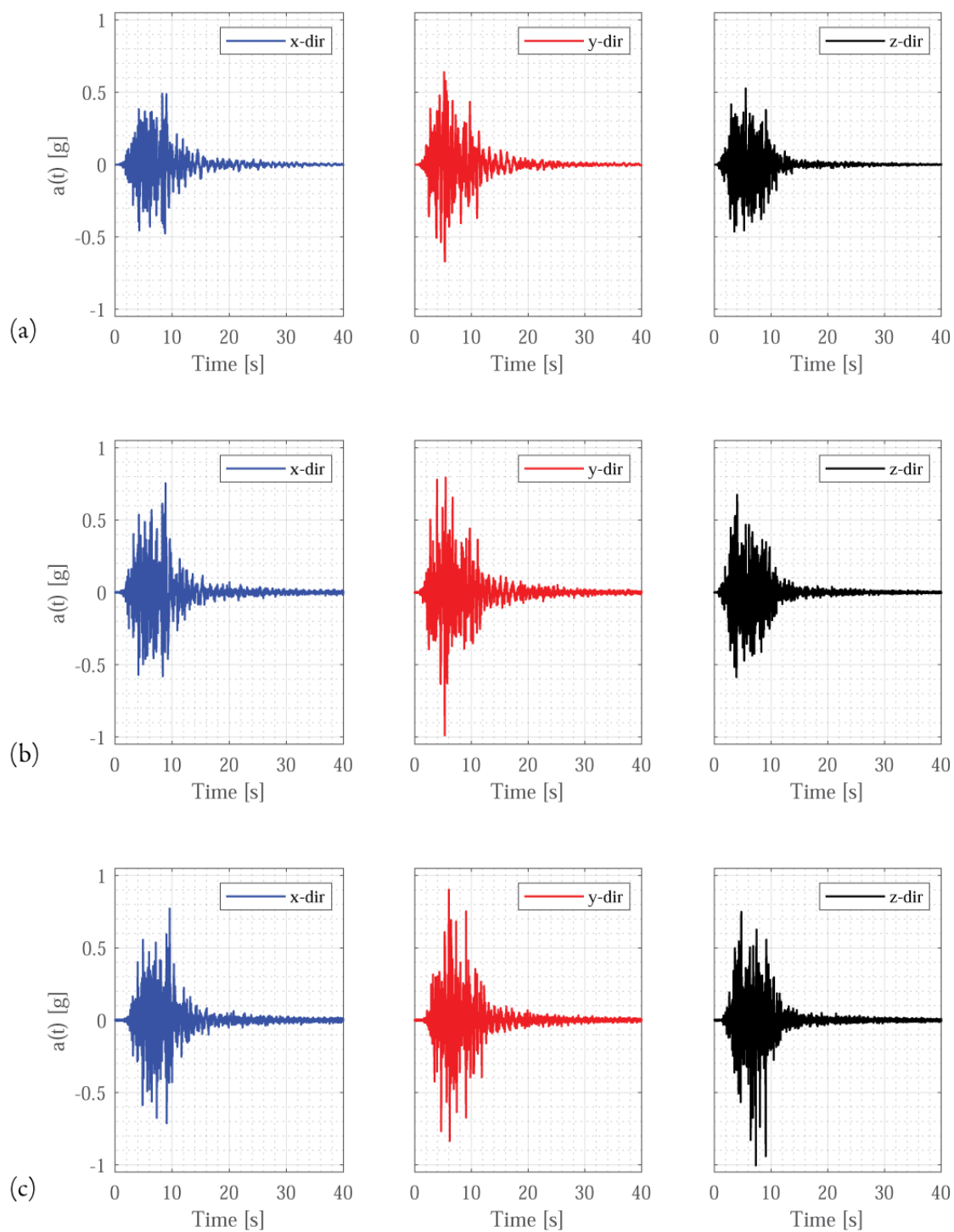


Figura 13. Storie temporali di accelerazione misurate durante l'applicazione del sisma di riferimento scalato al 150% (a); in corrispondenza della tavola dal sistema di acquisizione MEMS#1 (b); e MEMS#2 (c).

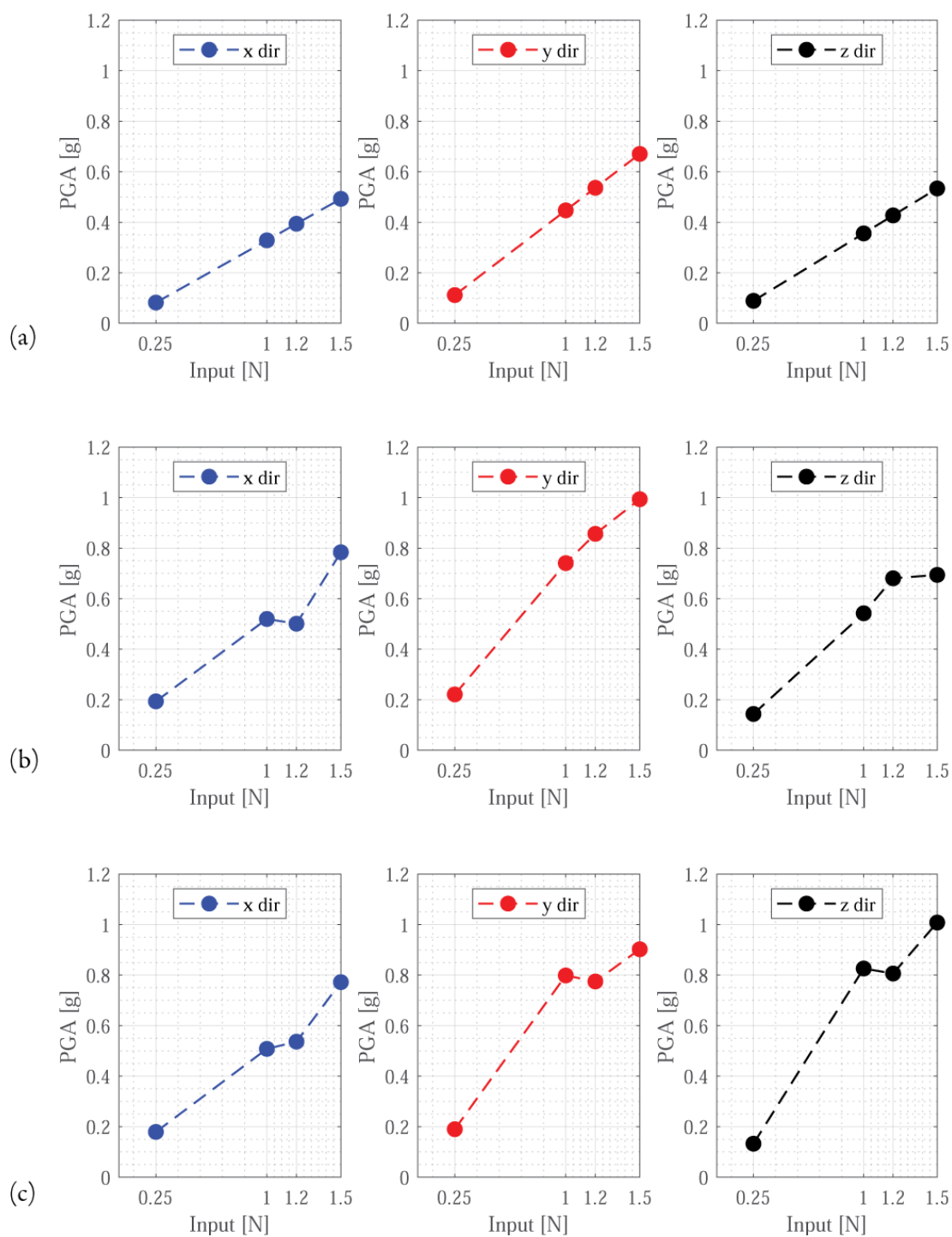


Figura 14. PGA ottenute dalle storie temporali di accelerazione di riferimento (a); misurate in corrispondenza della tavola dal sistema di acquisizione MEMS#1 (b); e MEMS#2 (c) in direzione x,y e z per i quattro casi della Tabella 1.

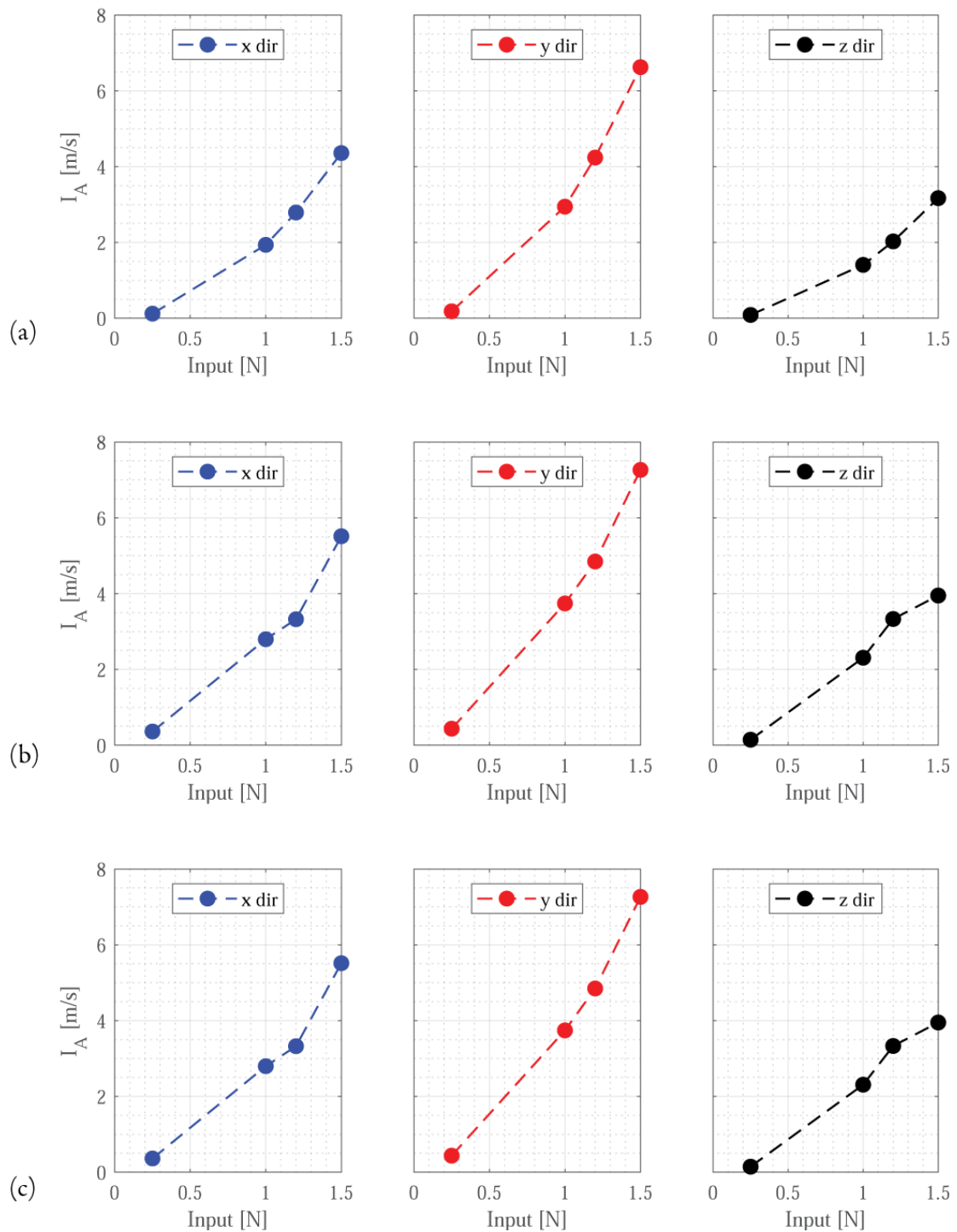


Figura 15. I_A ottenute dalle storie temporali di accelerazione di riferimento (a); misurate in corrispondenza della tavola dal sistema di acquisizione MEMS#1 (b); e MEMS#2 (c) in direzione x,y e z per i quattro casi della Tabella 1.

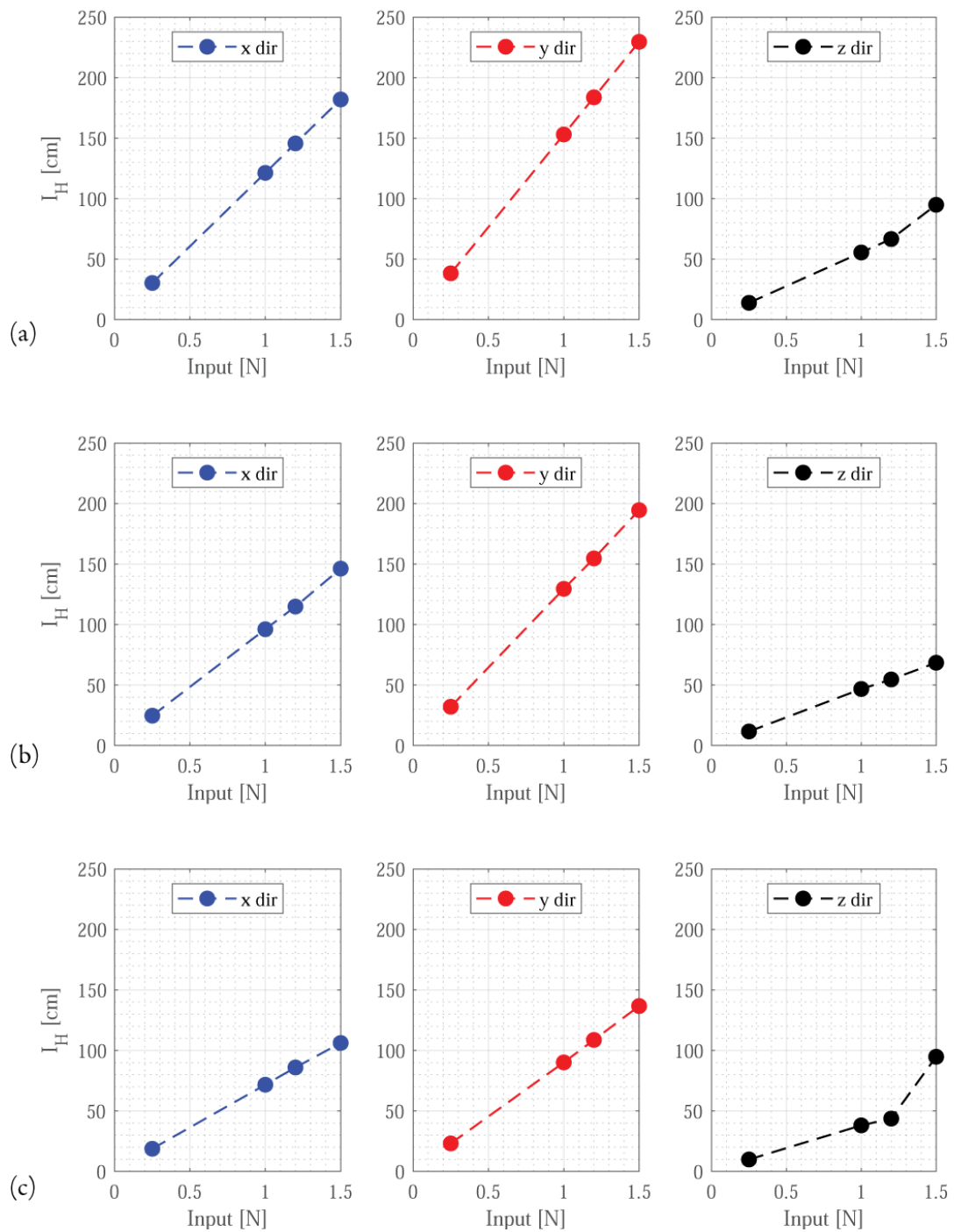


Figura 16. I_H ottenute dalle storie temporali di accelerazione di riferimento (a); misurate in corrispondenza della tavola dal sistema di acquisizione MEMS#1 (b); e MEMS#2 (c) in direzione x,y e z per i quattro casi della Tabella 1.



Tabella 2. Valori numerici di PGA, I_A , I_H ottenuti dalle storie temporali di accelerazione utilizzate come input della tavola vibrante per i quattro casi della Tabella 1.

INPUT	PGA [g]			I_A [m/s]			I_H [cm]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0.25 N	0.082	0.112	0.089	0.121	0.184	0.088	30.3	38.3	13.9
1.00 N	0.328	0.447	0.356	1.938	2.945	1.409	121.3	153.1	55.5
1.25 N	0.394	0.536	0.427	2.790	4.241	2.028	145.7	183.7	66.7
1.50 N	0.493	0.670	0.534	4.359	6.626	3.169	182.0	229.7	94.9

Tabella 3. Valori numerici di PGA, I_A , I_H ottenuti dalle storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza della tavola vibrante dal sistema di misura MEMS#1, per i quattro casi della Tabella 1.

TAVOLA MEMS_1	PGA [g]			I_A [m/s]			I_H [cm]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0.25 N	0.194	0.221	0.144	0.362	0.436	0.146	24.7	32.1	11.6
1.00 N	0.520	0.741	0.542	2.797	3.743	2.309	96.2	129.5	46.8
1.25 N	0.501	0.857	0.681	3.325	4.847	3.331	114.9	154.7	54.6
1.50 N	0.784	0.994	0.694	5.514	7.265	3.949	146.2	194.6	68.4



Tabella 4. Valori numerici di PGA, I_A , I_H ottenuti dalle storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza della tavola vibrante dal sistema di misura MEMS#2, per i quattro casi della Tabella 1.

INPUT	PGA [g]			I_A [m/s]			I_H [cm]		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0.25 N	0.179	0.190	0.133	0.288	0.321	0.137	18.7	23.1	9.9
1.00 N	0.508	0.798	0.826	2.213	2.852	2.267	71.7	90.1	38.1
1.25 N	0.536	0.775	0.806	2.612	3.636	3.151	85.9	108.7	43.7
1.50 N	0.772	0.902	1.008	4.305	5.249	4.381	106.2	136.7	94.8

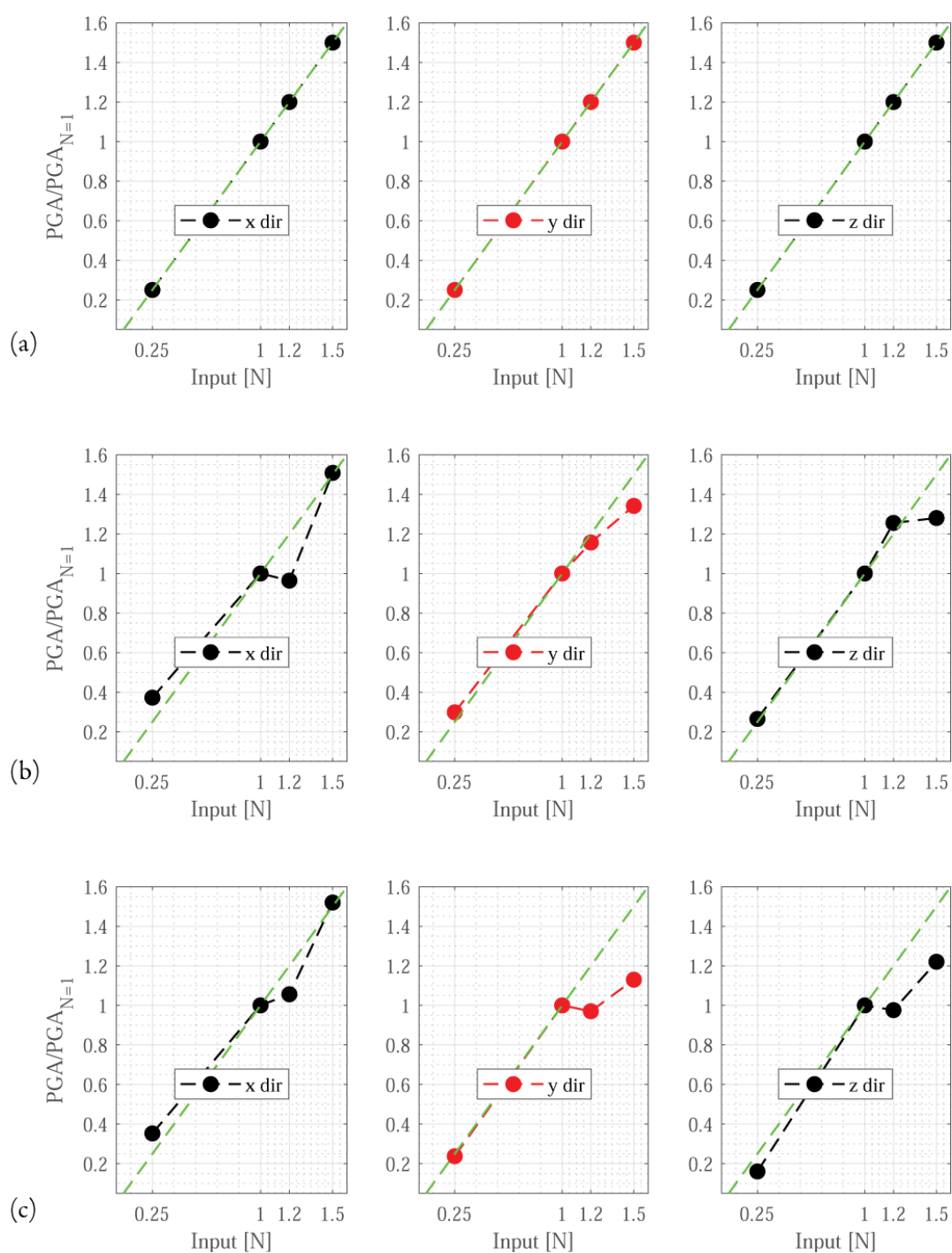


Figura 17. Analisi dei rapporti fra la PGA del segnale ottenuta a diversi livelli di intensità di input sismico e il valore stesso ottenuto ad intensità nominale N in direzione x , y e z per i quattro casi della Tabella 1. (a) Segnale accelerometrico di riferimento. (b) Terna accelerometrica del sistema MEMS#1. (c) Terna accelerometrica del sistema MEMS#2.

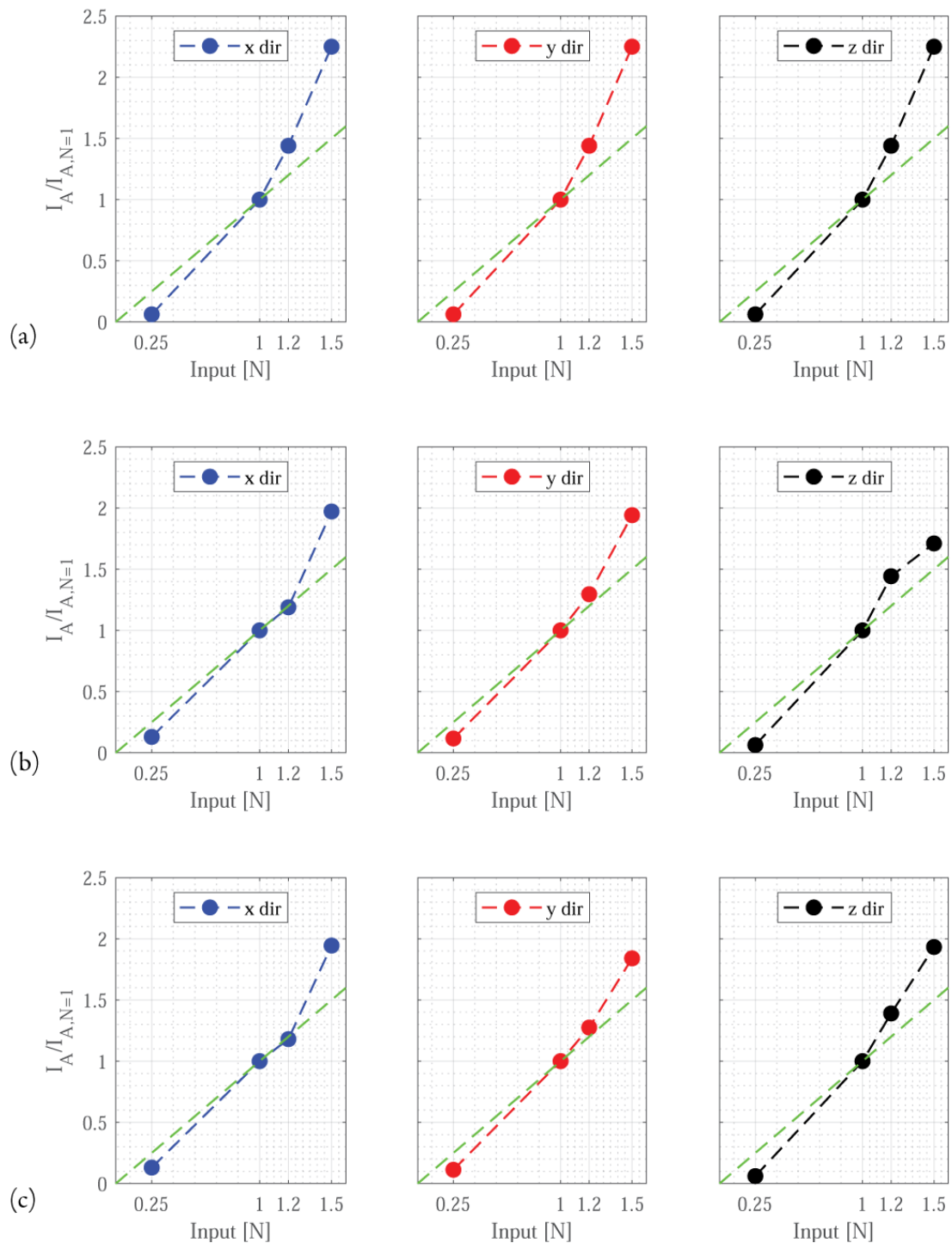


Figura 18. Analisi dei rapporti fra la I_A del segnale ottenuta a diversi livelli di intensità di input sismico e il valore stesso ottenuto ad intensità nominale N in direzione x , y e z per i quattro casi della Tabella 1. (a) Segnale accelerometrico di riferimento. (b) Terna accelerometrica del sistema MEMS#1. (c) Terna accelerometrica del sistema MEMS#2.

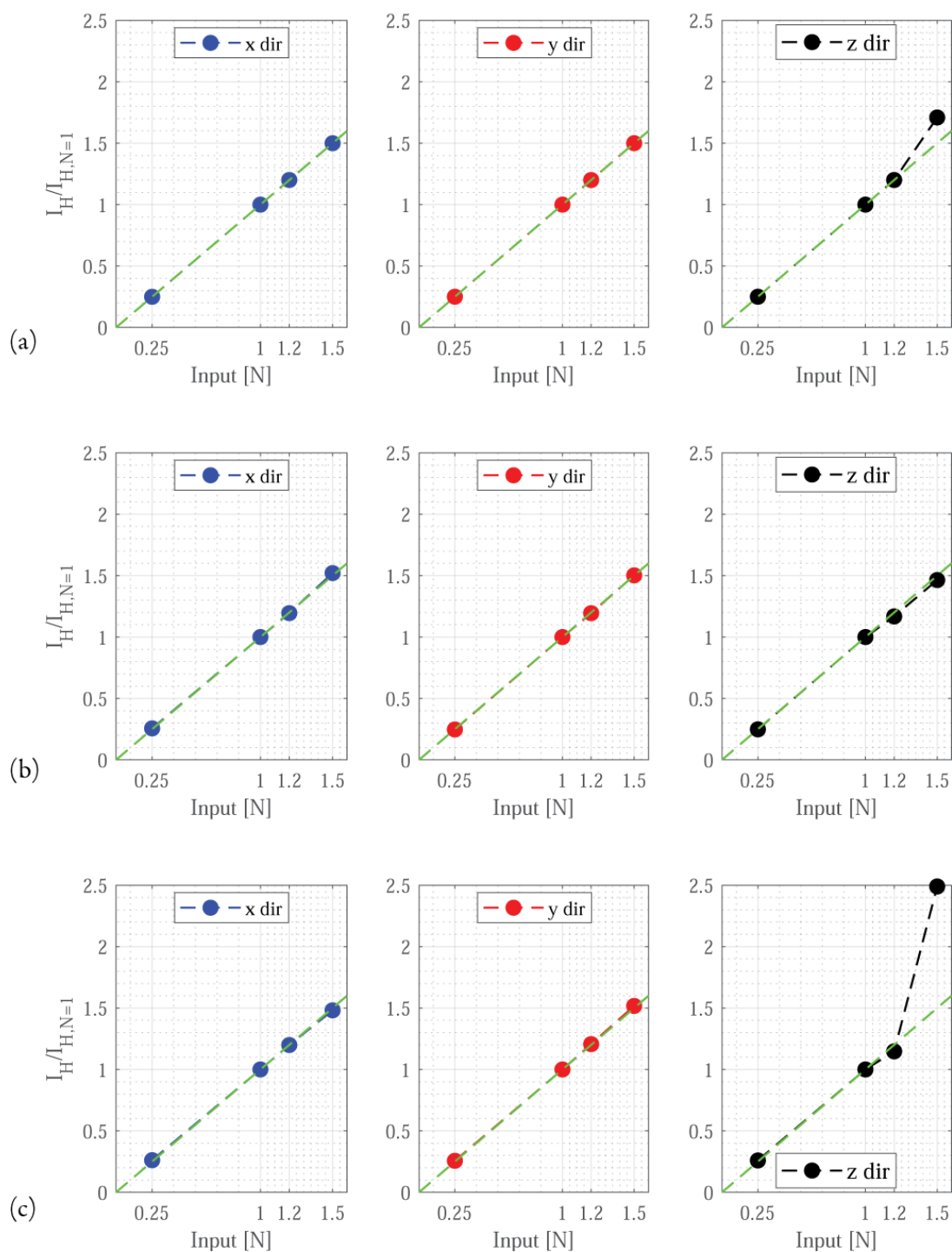


Figura 19. Analisi dei rapporti fra la I_H del segnale ottenuta a diversi livelli di intensità di input sismico e il valore stesso ottenuto ad intensità nominale N in direzione x , y e z per i quattro casi della Tabella 1. (a) Segnale accelerometrico di riferimento. (b) Terna accelerometrica del sistema MEMS#1. (c) Terna accelerometrica del sistema MEMS#2.



4.3 Analisi delle accelerazioni in output al modello

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti dall'analisi dei dati della risposta del prototipo in muratura, ovvero registrati dai sensori posizionati sulla struttura nelle posizioni indicate in Figura 9(a). Anche questi dati sono stati elaborati mediante un ricampionamento a 200 Hz e filtro passa banda tra 0.1 e 50 Hz. Per ogni storia accelerometrica sono state stimate le intensità di misura già descritte nel Paragrafo 4.1. Le analisi degli indici energetici stimati a partire dalle storie di accelerazione registrate in output può consentire di individuare le zone della struttura in cui l'energia è stata assorbita dal danneggiamento strutturale.

Nelle Figure 20-23 sono riportate le storie temporali di accelerazione misurate in direzione x , y_1 e y_2 per i quattro sismi della Tabella 1, avendo indicato con y_1 la direzione delle accelerazioni misurate dagli accelerometri 2,5,8 e con y_2 la direzione delle accelerazioni misurate dagli accelerometri 3,6 e 9 in Figura 9(a). Come atteso, le storie delle accelerazioni registrate in corrispondenza del solaio di copertura sono significativamente maggiori rispetto a quelle registrate in corrispondenza del solaio del primo piano e del cordolo. Anche in questo caso si nota che le storie temporali di accelerazione sono caratterizzate da spikes e segnali spuri, probabilmente dovuti all'interazione fra la tavola e la struttura, nonché al progressivo danneggiamento della stessa, che determina localmente urti e scorrimenti che si riflettono sui segnali registrati come impulsi anomali di poco interesse ai fini dell'analisi della risposta globale. Tali singolarità hanno una significativa influenza sui valori ottenuti in termini di PRA.

I valori di PRA, I_A e I_H , stimati dai dati in corrispondenza del cordolo, del solaio del primo piano e del piano di copertura sono riportati rispettivamente nelle Figure 24-26 e nelle Tabelle 5-7.

Mentre i valori di PRA risultano essere fortemente influenzati dagli spikes presenti nei diversi segnali considerati, i valori di I_A e I_H danno informazioni globali sui segnali che risentono di meno delle singolarità locali delle storie temporali.

E' interessante notare che l'intensità I_A presenta valori crescenti al crescere dell'intensità dell'input sismico al livello del cordolo di fondazione mentre ha un comportamento diverso



in corrispondenza del solaio di copertura. A questo livello infatti I_A assume un valore massimo durante il sisma E2-RM (sisma nominale N con fattore di scala 1.00) per poi decrescere con i sismi E3-RM e E4-RM.

L'intensità I_H , invece, cresce con l'intensità dell'input sismico per ognuna delle tre direzioni considerate e per ognuno dei livelli misurati (cordolo, solaio del primo piano e solaio di copertura). Inoltre, i valori di I_H calcolati in corrispondenza del piano di copertura sono significativamente maggiori rispetto a quelli calcolati a partire dai segnali accelerometrici misurati in corrispondenza del solaio del primo piano e del cordolo per tutti i quattro sismi della Tabella 1.

Questo comportamento è ancora più evidente nelle Figure 27-29 nelle quali, per ogni direzione x, y, y_2 sono riportati i rapporti fra le intensità di misura determinate dai segnali misurati per i quattro sismi della Tabella 1 e le corrispondenti intensità stimate all'intensità di riferimento N (fattore di scala 1.00), per le storie temporali di accelerazione misurate per ognuno dei livelli misurati (cordolo, solaio del primo piano e solaio di copertura). In analogia con quanto visto nel Paragrafo 4.2, i fattori di scala "teorici attesi" sono indicati da una linea tratteggiata verde.

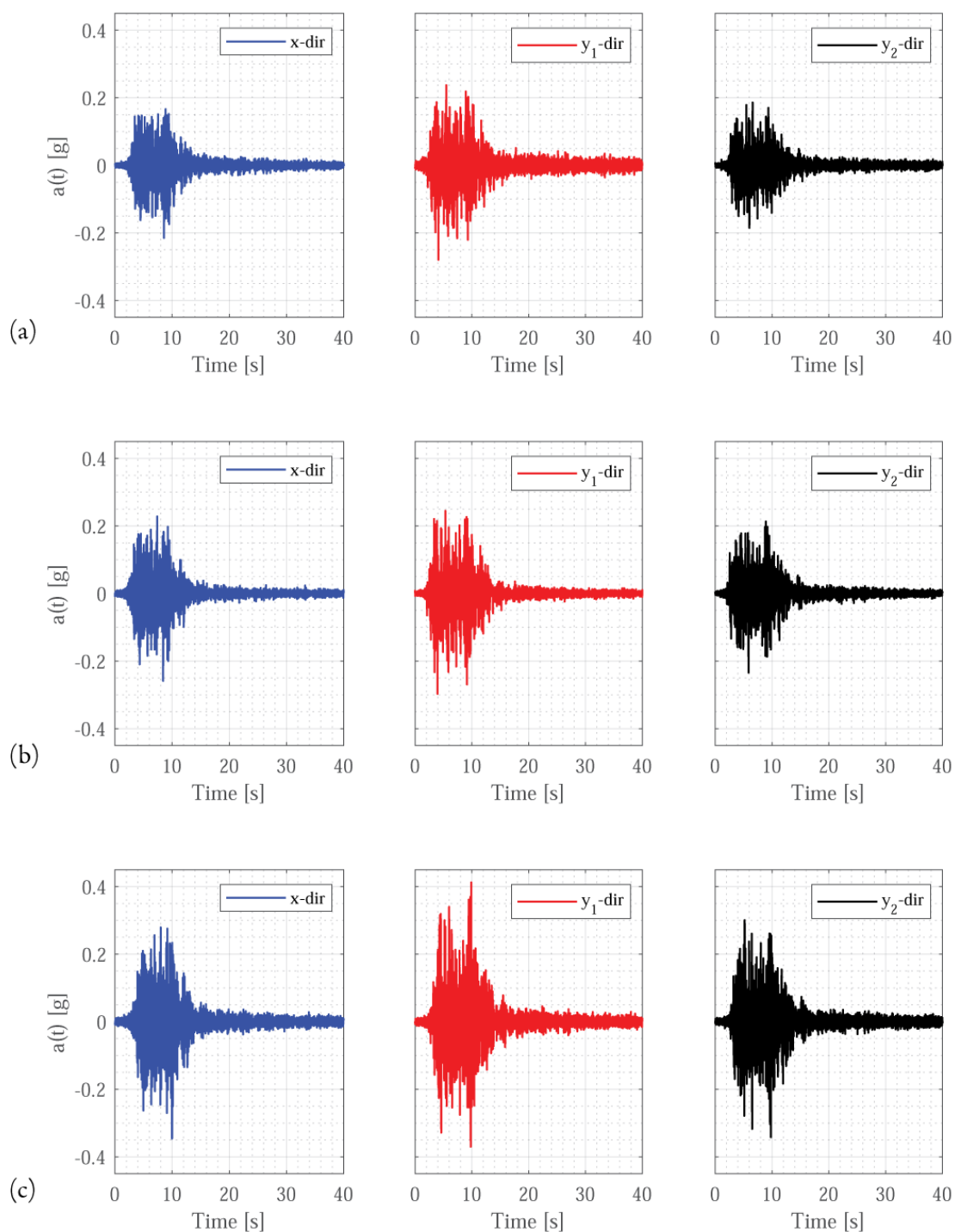


Figura 20. Storie temporali di accelerazione misurate sulla struttura durante l'applicazione del sisma di riferimento scalato al 25%. (a) Accelerometri 7, 8 e 9. (b) Accelerometri 4, 5 e 6. (c) Accelerometri 1, 2 e 3.

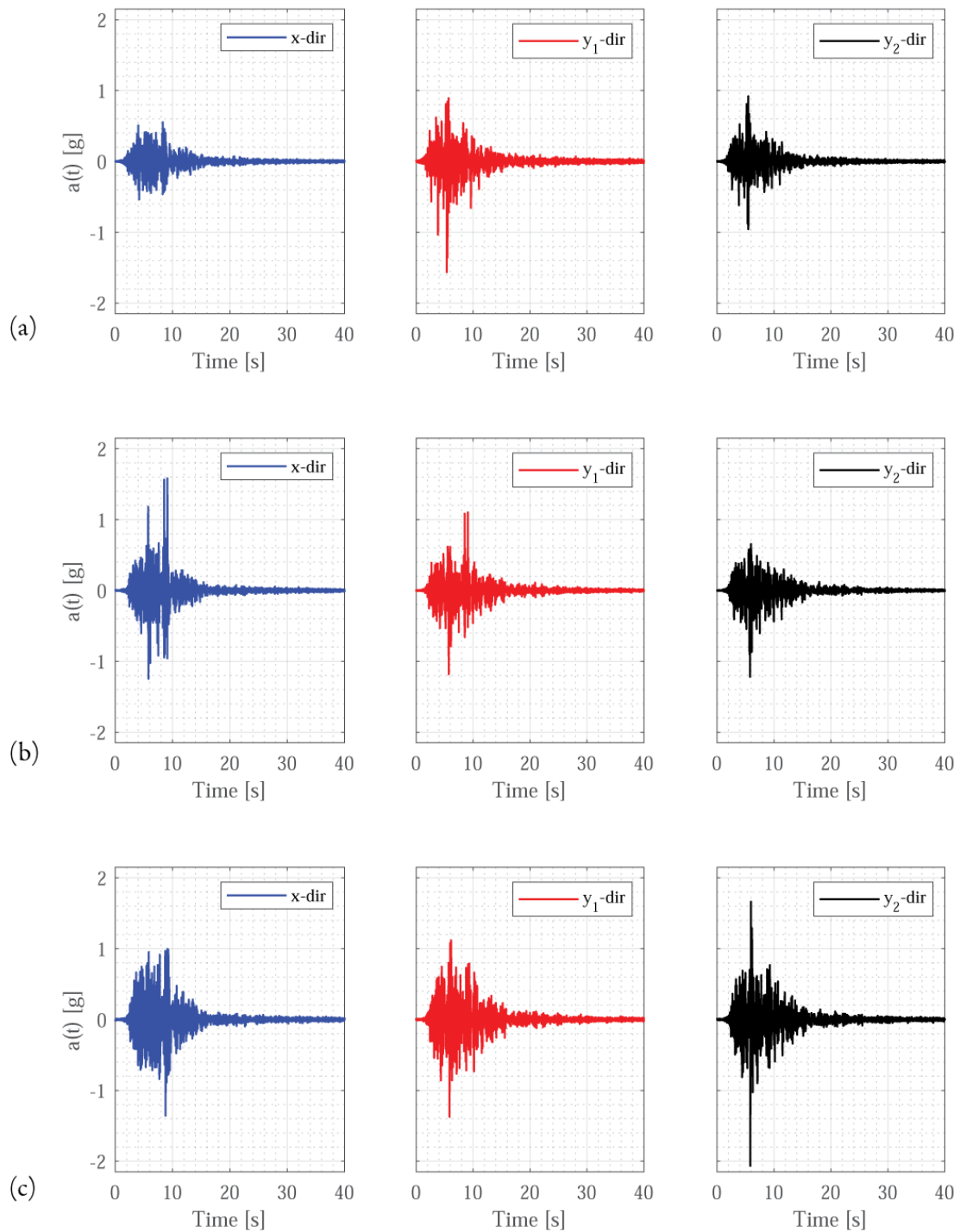


Figura 21. Storie temporali di accelerazione misurate sulla struttura durante l'applicazione del sisma di riferimento scalato al 100%. (a) Accelerometri 7, 8 e 9. (b) Accelerometri 4, 5 e 6. (c) Accelerometri 1, 2 e 3.

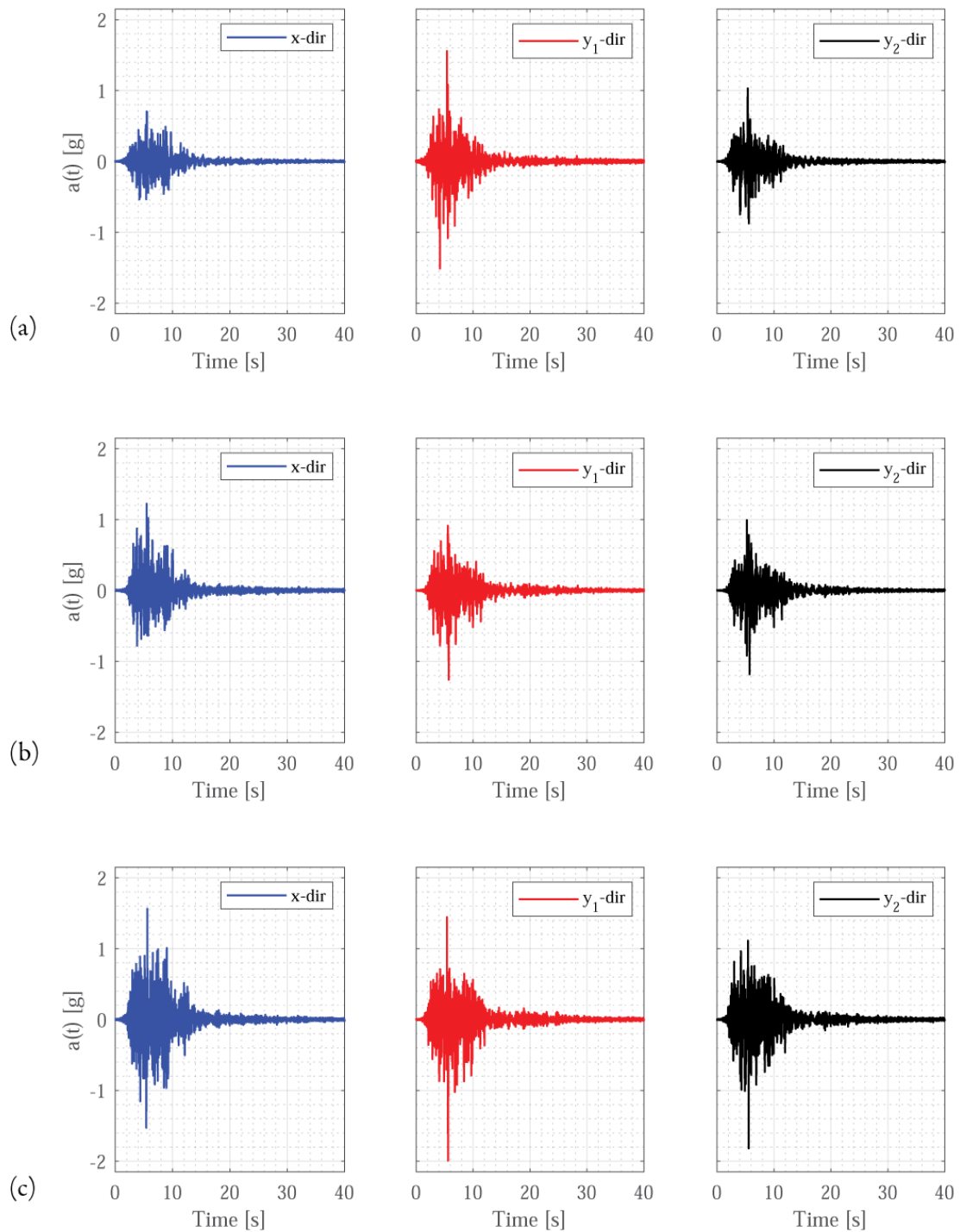


Figura 22. Storie temporali di accelerazione misurate sulla struttura durante l'applicazione del sisma di riferimento scalato al 125%. (a) Accelerometri 7, 8 e 9. (b) Accelerometri 4, 5 e 6. (c) Accelerometri 1, 2 e 3.

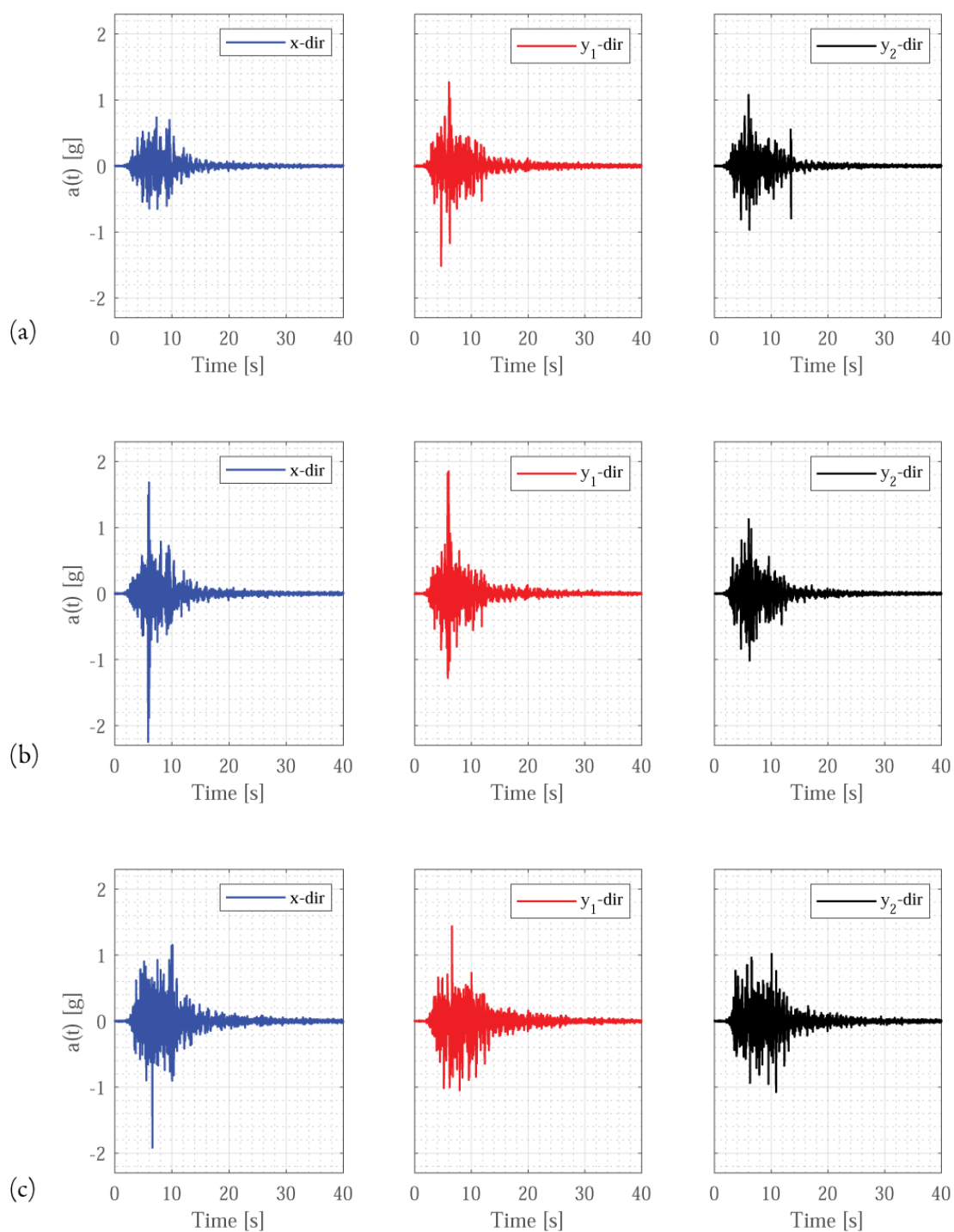


Figura 23. Storie temporali di accelerazione misurate sulla struttura durante l'applicazione del sisma di riferimento scalato al 150%. (a) Accelerometri 7, 8 e 9. (b) Accelerometri 4, 5 e 6. (c) Accelerometri 1, 2 e 3.

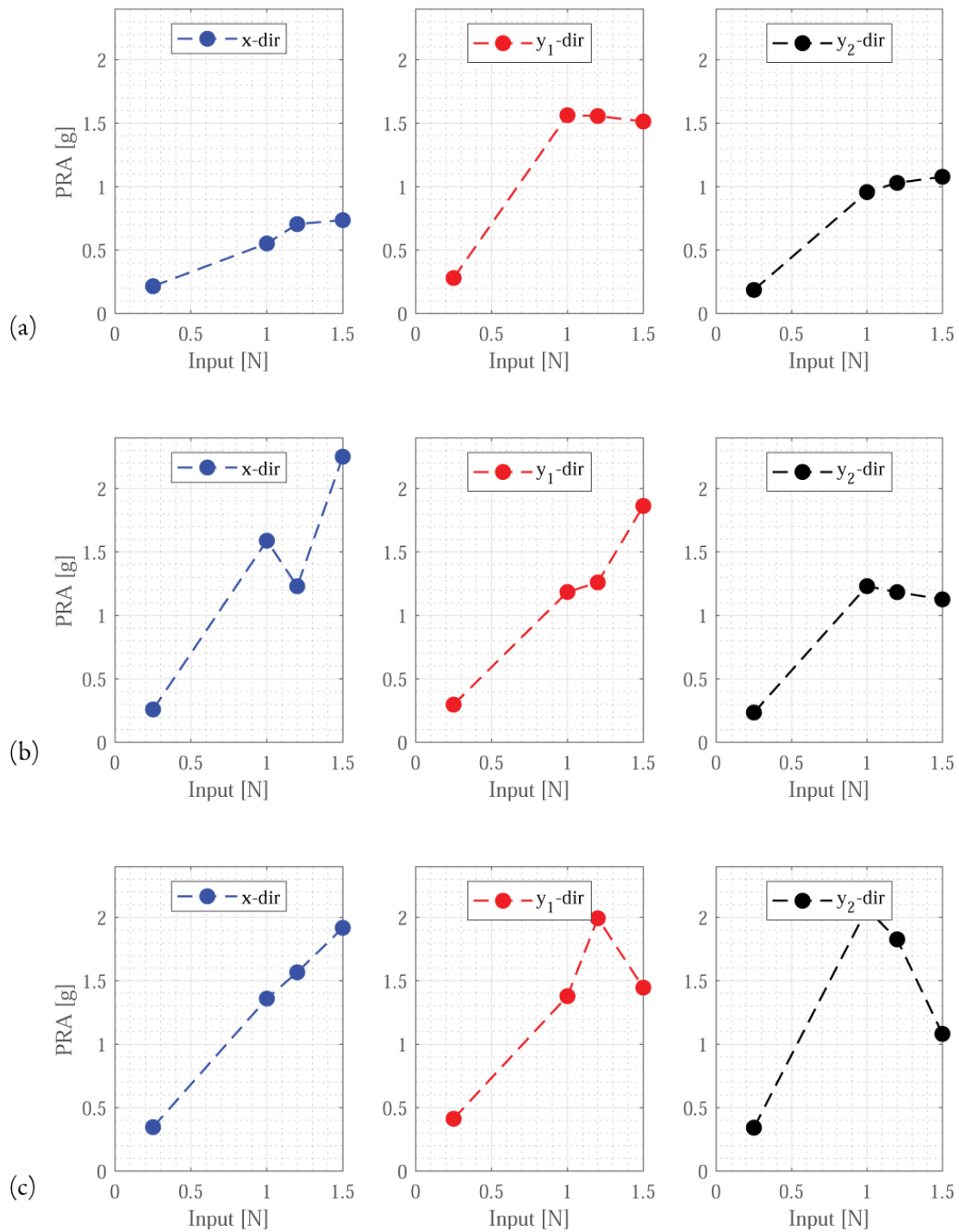


Figura 24. PRA ottenute dalle storie temporali misurate dagli accelerometri 7-8-9 (a), 4-5-6 (b) e 1-2-3 (c).

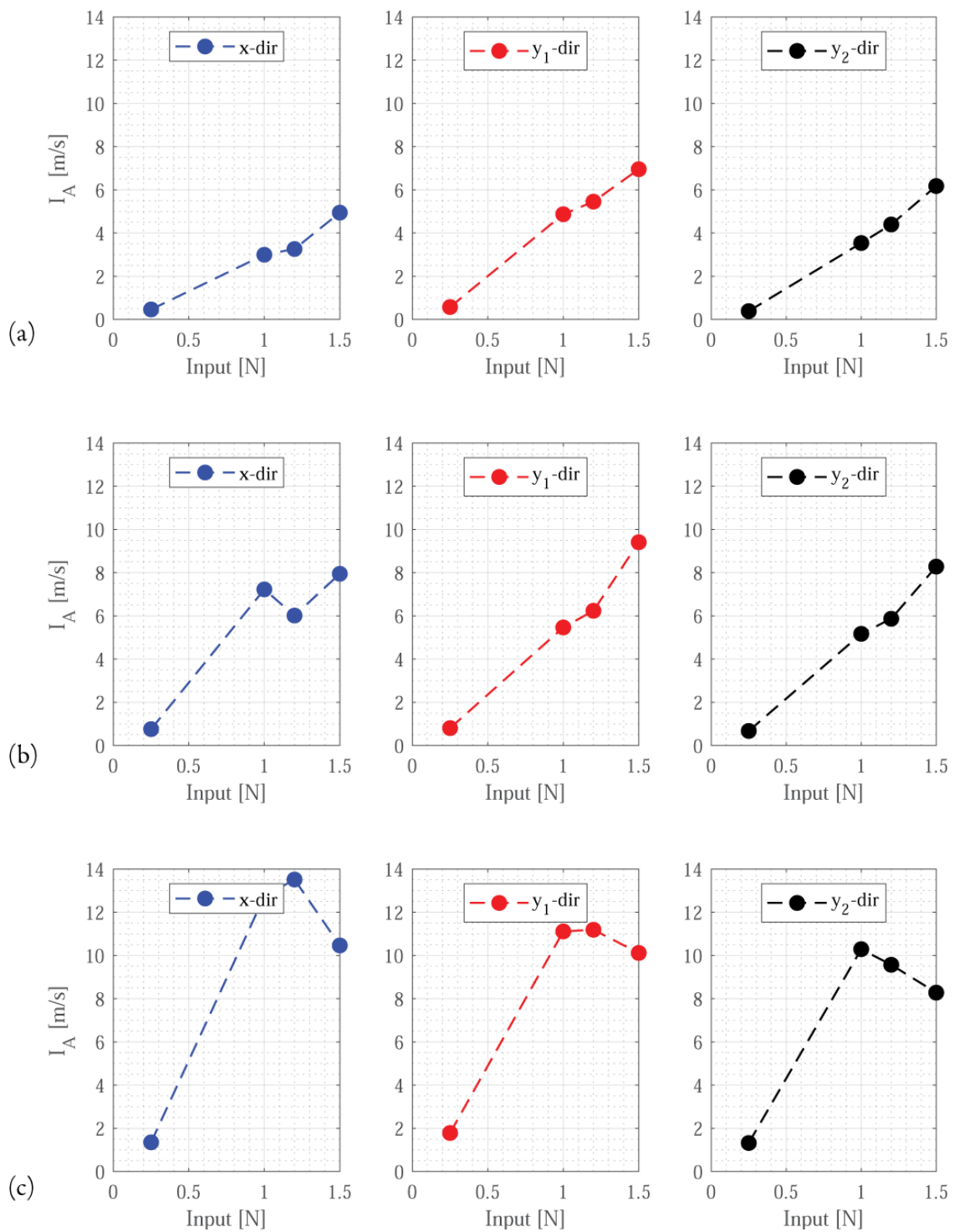


Figura 25. I_A ottenute dalle storie temporali misurate dagli accelerometri 7-8-9 (a), 4-5-6 (b) e 1-2-3 (c).

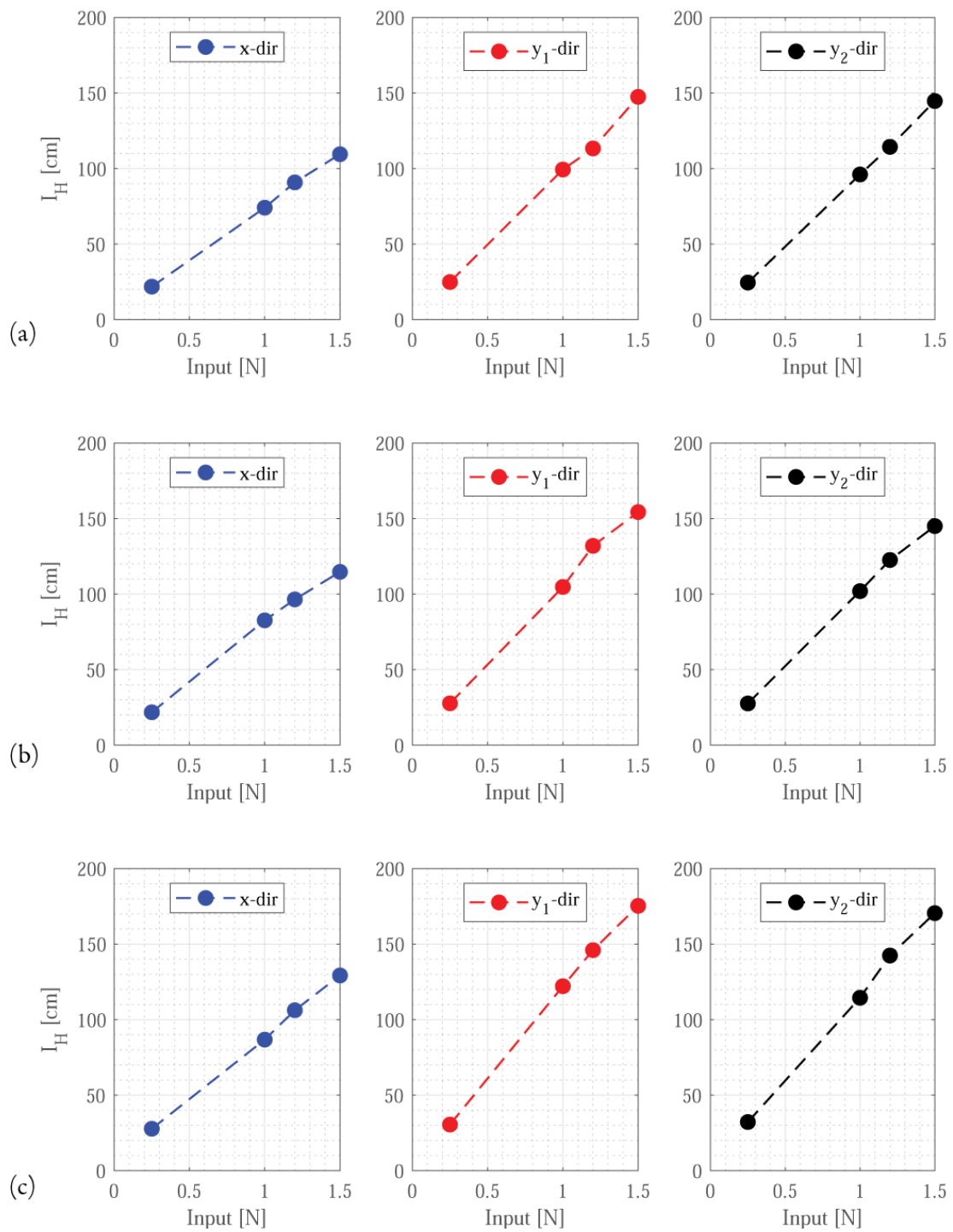


Figura 26. I_H ottenute dalle storie temporali misurate dagli accelerometri 7-8-9 (a), 4-5-6 (b) e 1-2-3 (c).



Tabella 5. Valori numerici di PRA, I_A , I_H ottenuti dalle storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza del cordolo (Accelerometri 7, 8 e 9) per i quattro casi della Tabella 1.

CORDOLO	PRA [g]			I_A [m/s]			I_H [cm]		
	x	y_1	y_2	x	y_1	y_2	x	y_1	y_2
0.25 N	0,215	0,280	0,186	0,465	0,575	0,386	21,9	24,9	24,5
1.00 N	0,552	1,563	0,957	2,996	4,873	3,539	74,1	99,4	96,1
1.25 N	0,705	1,556	1,030	3,262	5,454	4,397	90,9	113,3	114,4
1.50 N	0,736	1,513	1,078	4,945	6,955	6,176	109,5	147,5	144,7

Tabella 6. Valori numerici di PRA, I_A , I_H ottenuti dalle storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza del primo solaio (Accelerometri 4, 5 e 6) per i quattro casi della Tabella 1.

SOLAIO PIANO1	PRA [g]			I_A [m/s]			I_H [cm]		
	x	y_1	y_2	x	y_1	y_2	x	y_1	y_2
0.25 N	0,259	0,297	0,234	0,758	0,805	0,674	21,8	27,7	27,6
1.00 N	1,589	1,185	1,231	7,224	5,463	5,168	82,6	104,7	102,0
1.25 N	1,230	1,260	1,183	6,014	6,235	5,866	96,5	131,9	122,6
1.50 N	2,251	1,863	1,126	7,947	9,407	8,278	114,7	154,3	145,0



Tabella 7. Valori numerici di PRA, I_A , I_H ottenuti dalle storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza del secondo solaio (Accelerometri 1, 2 e 3) per i quattro casi della Tabella 1.

SOLAIO PIANO2	PRA [g]			I_A [m/s]			I_H [cm]		
	x	y ₁	y ₂	x	y ₁	y ₂	x	y ₁	y ₂
0.25 N	0,346	0,412	0,342	1,351	1,783	1,321	27,7	30,5	32,2
1.00 N	1,360	1,379	2,067	12,736	11,111	10,289	86,8	122,1	114,4
1.25 N	1,567	1,992	1,826	13,513	11,188	9,568	106,2	146,0	142,4
1.50 N	1,917	1,446	1,082	10,463	10,115	8,278	129,2	175,3	170,5

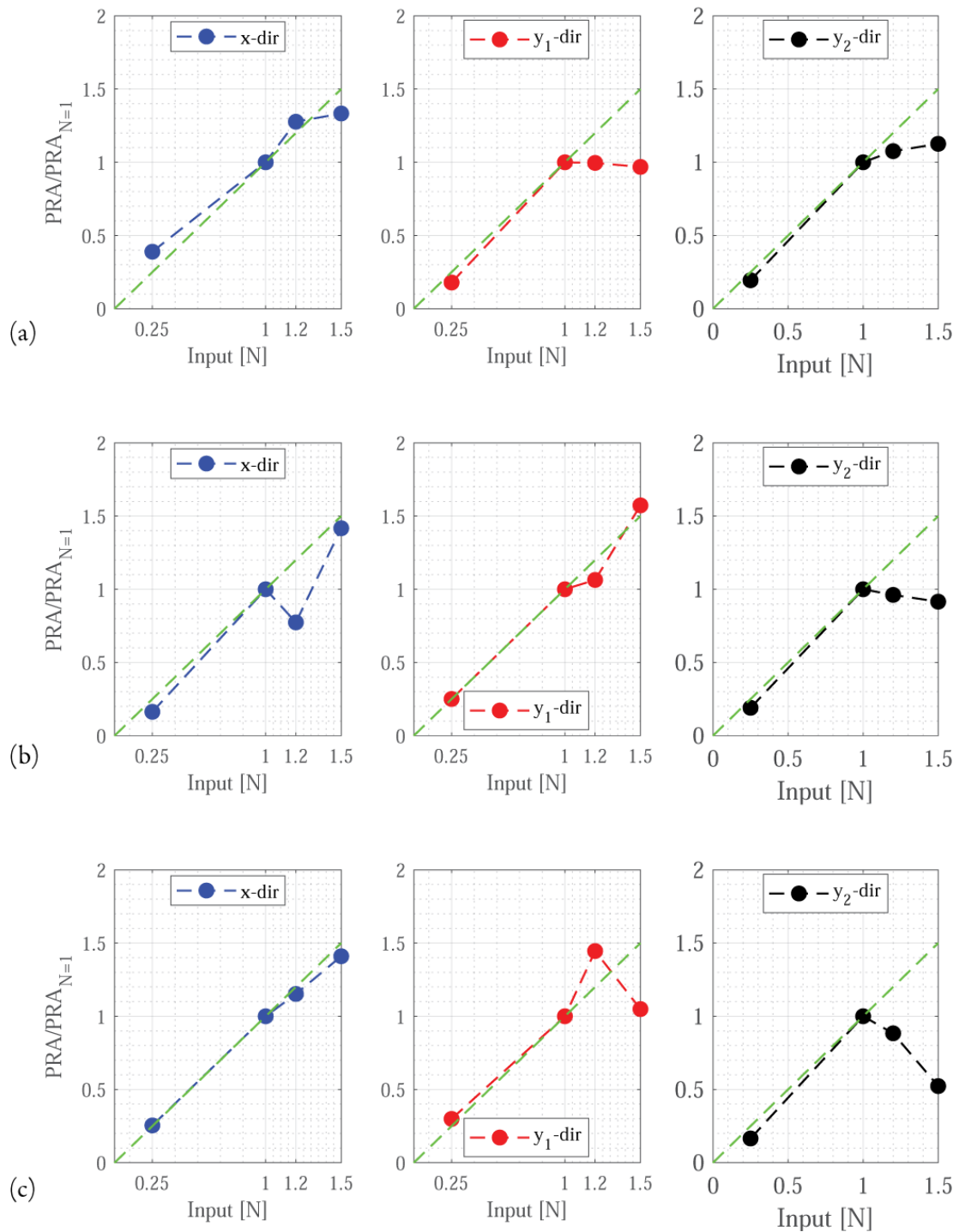


Figura 27. Analisi dei rapporti fra la PGA del segnale ottenuta a diversi livelli di intensità di input sismico e il corrispondente valore di PGA ottenuto ad intensità nominale N . (a) Accelerometri 7, 8 e 9. (b) Accelerometri 4, 5 e 6. (c) Accelerometri 1, 2 e 3.

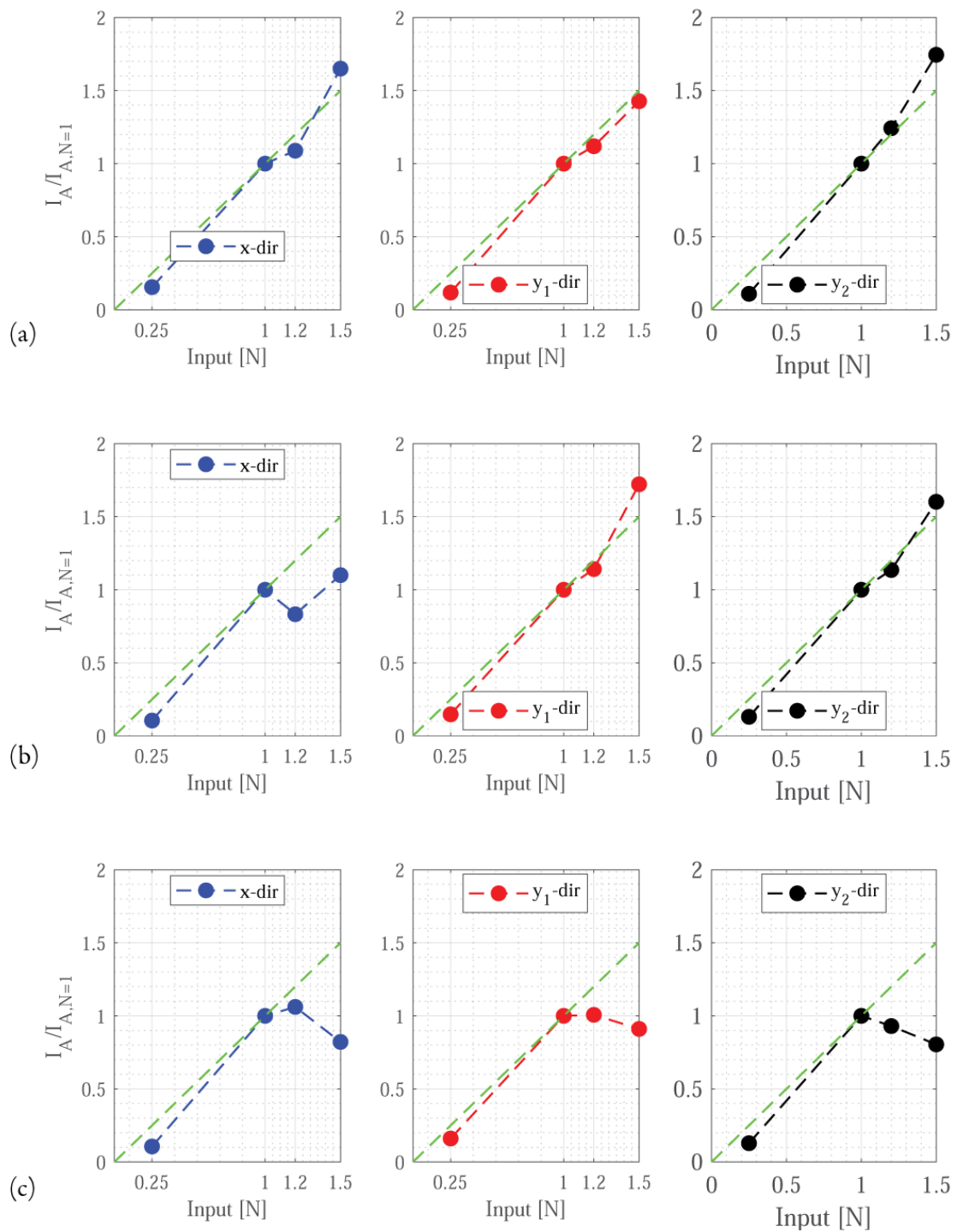


Figura 28. Analisi dei rapporti fra la I_A del segnale ottenuta a diversi livelli di intensità di input sismico e il corrispondente valore di I_A ottenuto ad intensità nominale N . (a) Accelerometri 7, 8 e 9. (b) Accelerometri 4, 5 e 6. (c) Accelerometri 1, 2 e 3.

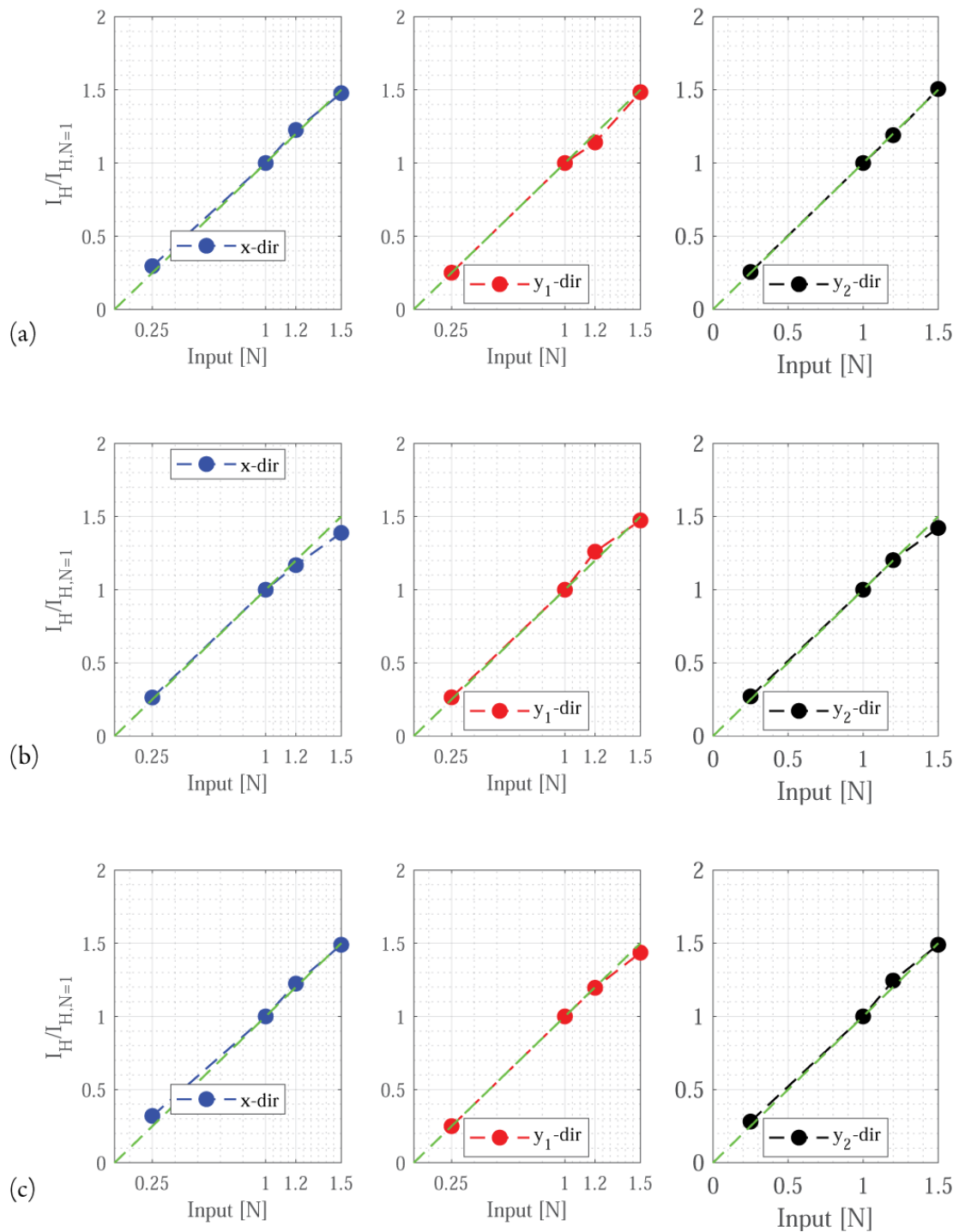


Figura 29. Analisi dei rapporti fra la I_H del segnale ottenuta a diversi livelli di intensità di input sismico e il corrispondente valore di I_H ottenuto ad intensità nominale N . (a) Accelerometri 7, 8 e 9. (b) Accelerometri 4, 5 e 6. (c) Accelerometri 1, 2 e 3.



4.4 Confronto della risposta dinamica strutturale pre- e post- rinforzo

In questa sezione vengono confrontate le risposte dinamiche della struttura senza e con rinforzo strutturale utilizzando gli indici delle intensità sismiche descritti nei paragrafi precedenti. Il confronto viene eseguito sulle misure degli accelerometri posti al livello del primo e del secondo solaio, ovvero sui canali di misura 4-5-6 e 1-2-3 rispettivamente.

I risultati hanno evidenziato chiaramente un diverso comportamento del prototipo in muratura dopo l'applicazione del rinforzo.

Il manufatto in muratura ordinaria ha manifestato un primo quadro fessurativo in corrispondenza del fattore di scala 1.00 localizzato esclusivamente al piano inferiore della struttura e dovuto all'effetto combinato dell'azione sismica verticale e orizzontale. Il quadro fessurativo è incrementato in corrispondenza del fattore di scala 1.20, caratterizzato da fessure diagonali a taglio (Figura 3).

Il manufatto in muratura consolidata con malta MX-PVA Fibrorinforzata ha manifestato un primo quadro fessurativo in corrispondenza del fattore di scala 1.20, localizzato esclusivamente al piano superiore della struttura. Il danneggiamento del livello superiore è ulteriormente incrementato in corrispondenza del fattore di scala 1.50, caratterizzato da fessure diagonali a taglio, scorrimento sui giunti e moto relativo (roto-traslazione) fra i macroblocchi strutturali identificabili dal primo e secondo piano (Figura 32(a)). Il prototipo rinforzato è stato soggetto anche a una azione sismica pari a 1.50 volte quella di riferimento (caso E4-MR in Tabella 1), 25% superiore al livello che aveva danneggiato significativamente il prototipo non rinforzato. Questa azione sismica ha notevolmente incrementato lo stato di danno del piano superiore causando espulsioni locali di laterizio e portandolo molto vicino al crollo totale (Figure 30-32).

Il piano inferiore del prototipo in laterizio consolidata con malta MX-PVA Fibrorinforzata, nonostante la muratura al di sotto dell'intonaco fosse severamente danneggiata con lesioni passanti (Figura 3) e che l'azione sismica fosse superiore a quella che aveva provocato il danno nel prototipo non rinforzato, ha manifestato solo microfessure localizzate specialmente in corrispondenza delle aperture, quindi non direttamente connesse al quadro fessurativo precedente.

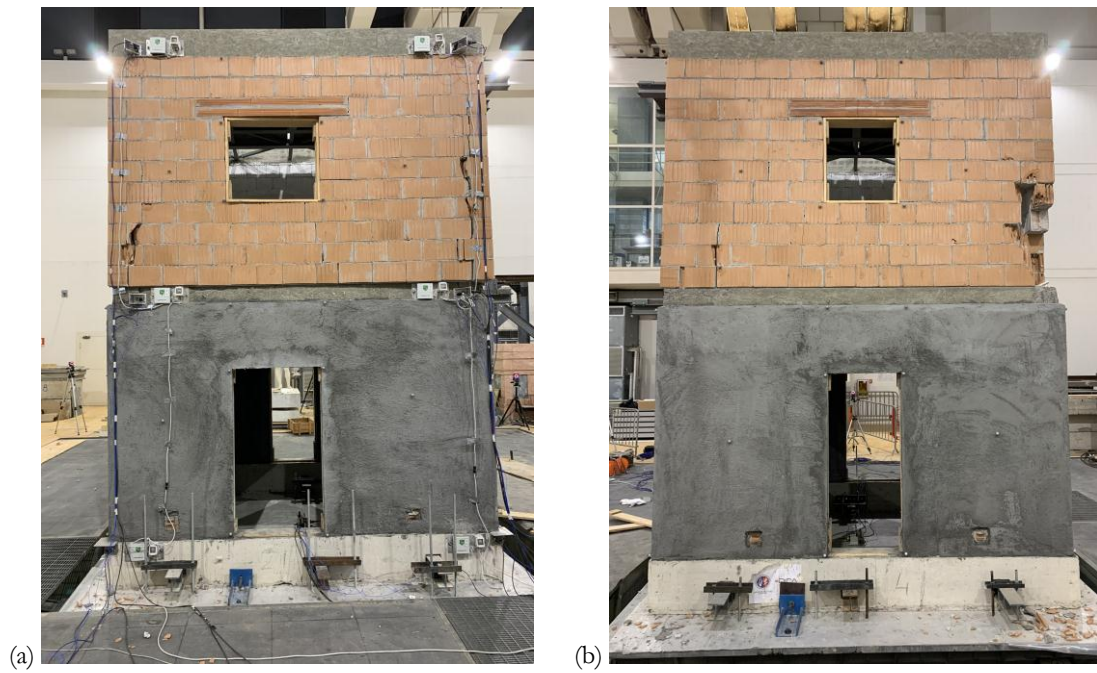


Figura 30. Danno causato dal sisma E4 – RM (fattore di scala 1.50): (a) prospetto B; (b) prospetto D.



Figura 31. Danno causato dal sisma E4 – RM (fattore di scala 1.50): (a) prospetto A; (b) prospetti C e D.

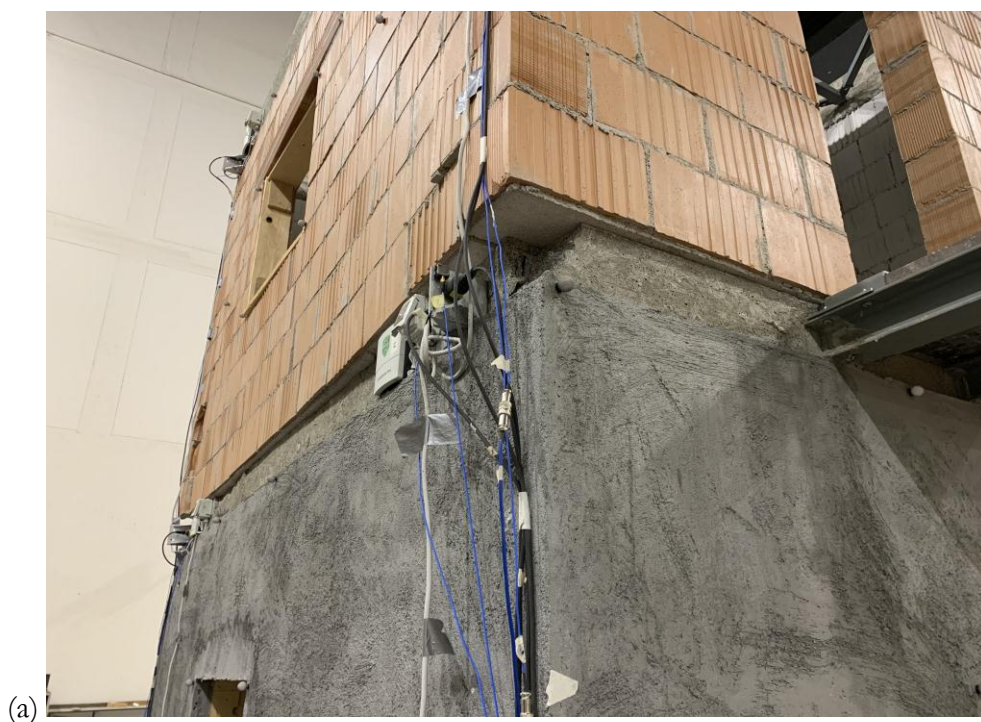


Figura 32 Danno causato dal sisma E4 – RM (fattore di scala 1,50): (a) moto relativo tra i macroblocchi del primo e secondo piano; (b) prospetto D piano secondo (interno).

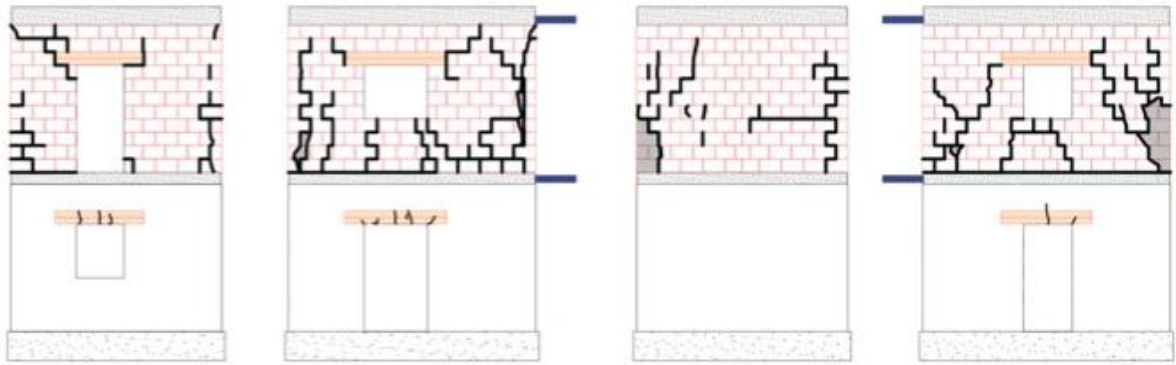


Figura 33 Configurazione danneggiata del modello strutturale in muratura rinforzata mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata.



Figura 34 Configurazione danneggiata delle pareti interne del modello strutturale in muratura rinforzata mediante malta MX-PVA Fibrorinforzata.

Le Figure 33-34 mostrano il quadro fessurativo rilevato dopo il sisma E4 – RM (fattore di scala 1.50) rispettivamente sui paramenti esterni e interni (solo primo piano).

La differente performance strutturale dei due prototipi con e senza rinforzo può essere analizzata confrontando le risposte dinamiche sulla base degli indici di intensità descritti nei paragrafi precedenti. Le Figure 36-37 mostrano il confronto della risposta del modello in muratura ordinaria (Figura 3) e quello in muratura rinforzata considerando le storie temporali di accelerazione misurate, rispettivamente, in corrispondenza del solaio del primo piano (Figura 36) e quello di copertura (Figura 37). In particolare, la risposta strutturale viene caratterizzata in termini di massima accelerazione PRA, I_A e I_H . Le curve blu si riferiscono alla muratura rinforzata, mentre le curve rosse si riferiscono alla muratura ordinaria. E' importante osservare, ancora una volta, che i valori di massima accelerazione PRA sono fortemente influenzati dagli spikes dovuti alle singolarità descritte.



Il confronto in termini di intensità di Housner, I_H , mostra valori pressochè coincidenti tra la muratura rinforzata e non rinforzata sia per il sisma di riferimento sia per il sisma E3–RM. Questo indicatore quindi non è in grado di cogliere quantitativamente il differente danneggiamento che è stato riscontrato nelle due strutture.

Il confronto in termini di intensità di Arias, I_A , evidenzia variazioni nell'andamento del parametro dopo l'applicazione del sisma di riferimento (fattore di scala 1.00) in entrambi i prototipi in muratura. Questo potrebbe suggerire che l'indicatore I_A può dare informazioni sul danneggiamento. In particolare, la netta diminuzione dell'indice di Arias al secondo livello del prototipo rinforzato sembra testimoniare la perdita di energia spesa nel significativo danneggiamento delle pareti del secondo piano.

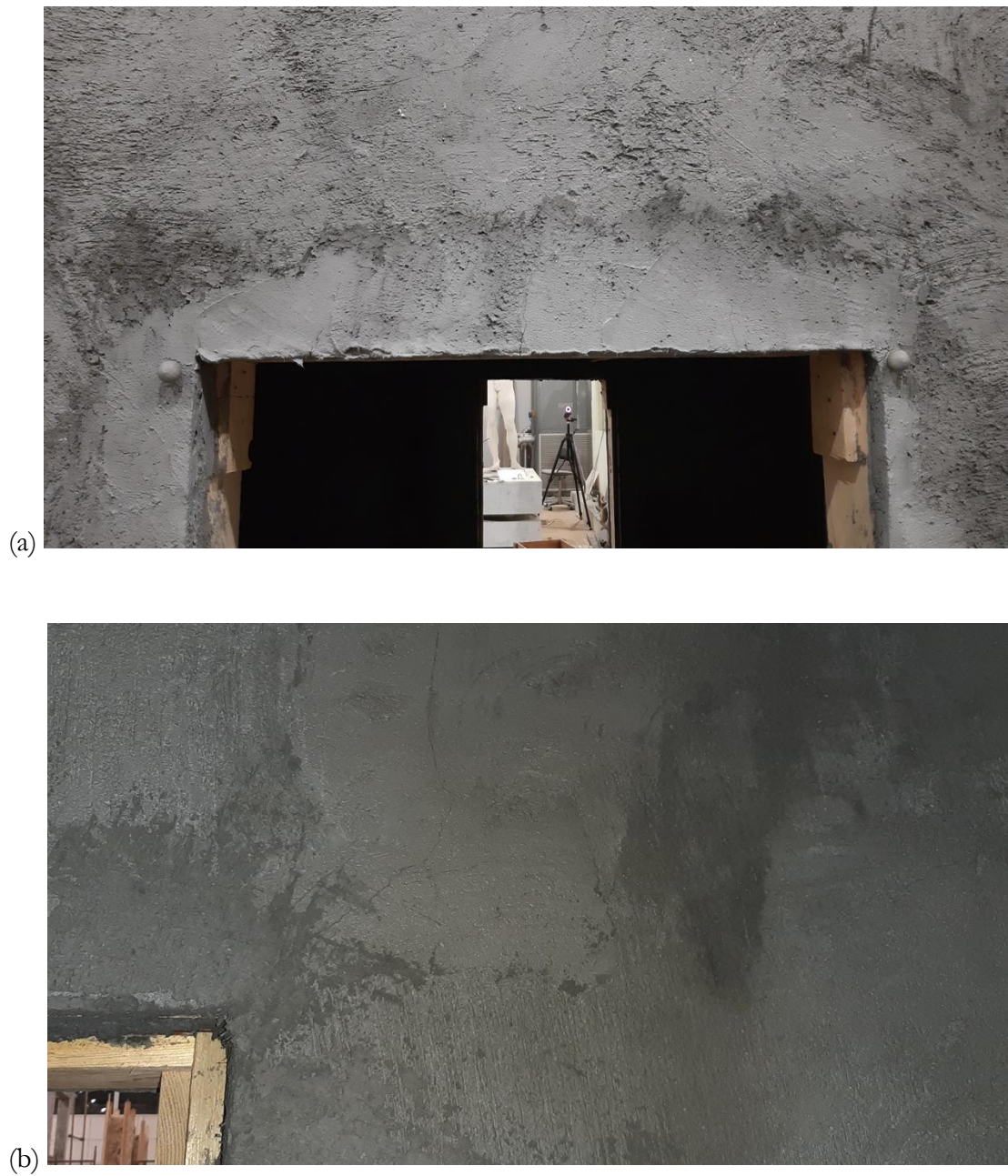


Figura 35 Microfessurazioni localizzate in corrispondenza degli spigoli di una apertura.

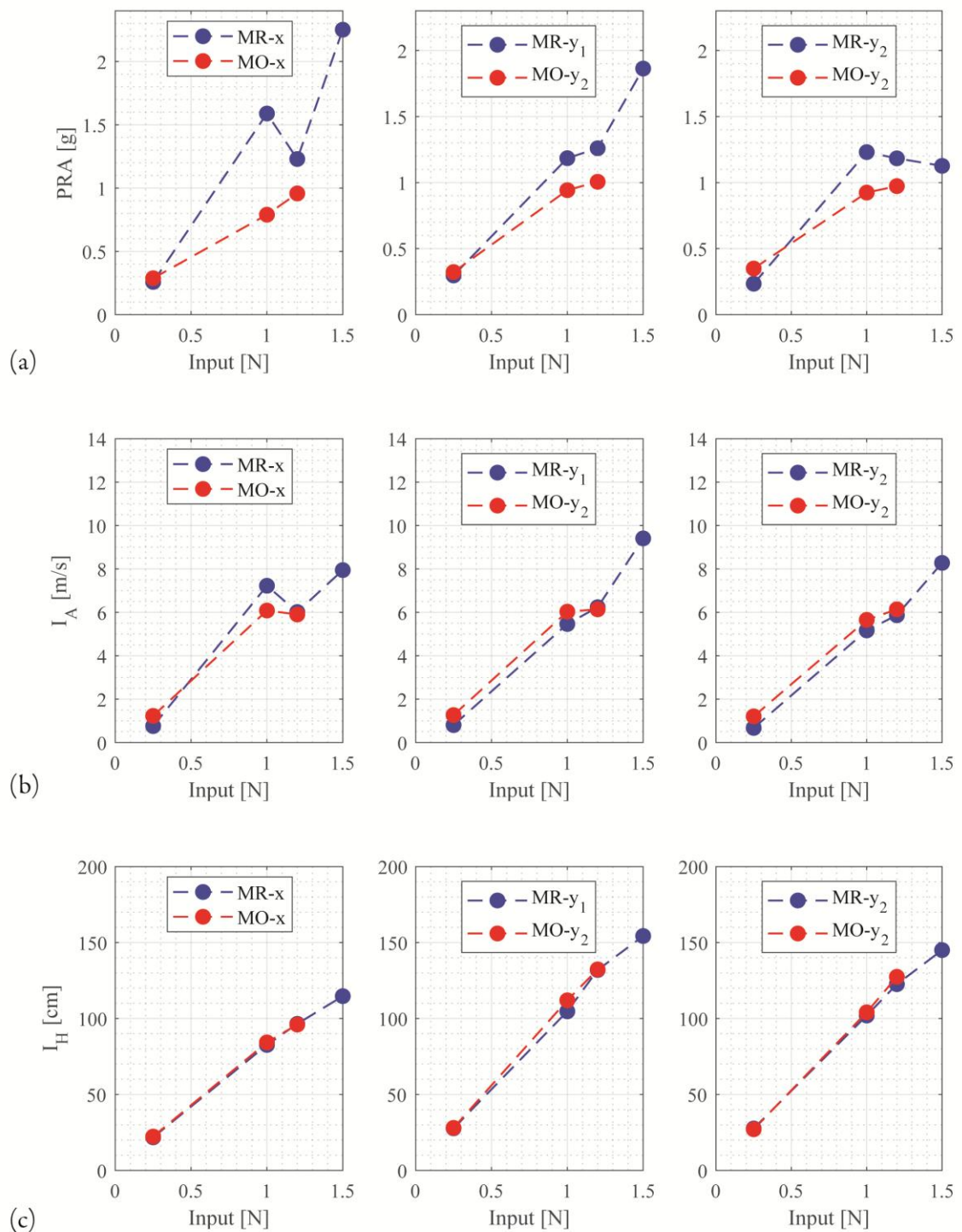


Figura 36 PRA (a), I_A (b), I_H (c) stimati dalle storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza del primo solaio della struttura in muratura rinforzata (linee blu) e ordinaria (linee rosse) per i quattro casi della Tabella 1.

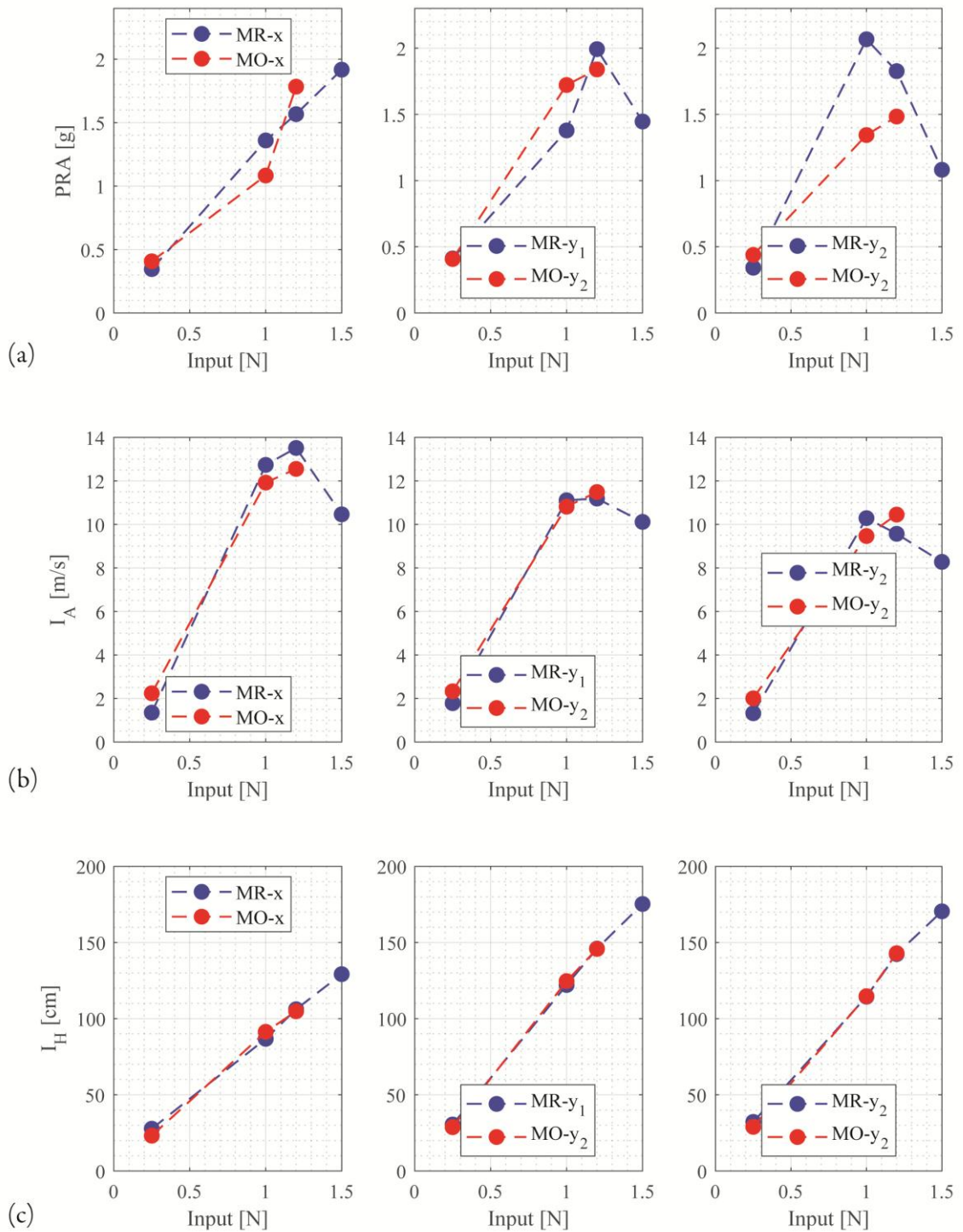


Figura 37 PRA (a), I_A (b), I_H (c) stimati dalle storie temporali di accelerazione misurate in corrispondenza del secondo solaio della struttura in muratura rinforzata (linee blu) e ordinaria (linee rosse) per i quattro casi della Tabella 1.



5. CONCLUSIONI

Le attività tecnico-scientifiche descritte nel presente report illustrano i risultati delle prove dinamiche su tavola vibrante effettuate su un modello strutturale in muratura consolidato con malta MX-PVA Fibrorinforzata dopo essere stato danneggiato da azioni sismiche ripetute con tavola vibrante.

Il quadro fessurativo di partenza era caratterizzato da significative lesioni passanti dovute a un moto di rocking di un macroelemento superiore rispetto ad uno inferiore. L'intervento di consolidamento è consistito nella stesura di un doppio strato (esternamente e internamente) di malta di spessore pari a circa 3 cm per strato, sulle pareti al livello inferiore del modello strutturale, sia per evitare sovraccarichi di massa sulla tavola vibrante, sia perché il danneggiamento pregresso interessava esclusivamente tale zona.

Il modello rinforzato è stato sottoposto a sismi di intensità crescente con le identiche caratteristiche di quelli che avevano danneggiato il modello iniziale. Dal confronto delle evidenze sperimentali è possibile sintetizzare quanto segue:

- i paramenti murari danneggiati in maniera significativa prima del rinforzo strutturale (primo piano) non hanno mostrato alcun danno. Sono state rilevate solo alcune microfessurazioni localizzate nelle zone generalmente più critiche per l'innescò di lesioni, ovvero spigoli di aperture e fasce murarie.
- il danneggiamento della struttura rinforzata si è localizzato esclusivamente al secondo piano che era rimasto privo di danneggiamento in seguito alle sequenze sismiche sul prototipo senza rinforzo.
- si è verificato un sollevamento con roto-traslazione del piano superiore rispetto a quello inferiore, dovuto alla presenza di un'azione sismica verticale significativa. Questo comportamento è stato riscontrato anche in molti edifici in muratura nella frazione di San Pellegrino di Norcia a seguito della sequenza sismica del 30 ottobre 2016.



- la struttura in muratura rinforzata è stata in grado di sopportare una sollecitazione sismica 25% superiore a quella non rinforzata senza provocare danni al piano consolidato con malta MX-PVA Fibrorinforzata.

Perugia, luglio 2020

Il coordinatore dell'attività scientifica e sperimentale
prof. ing. Massimiliano Gioffrè