



Influenza delle tamponature sul comportamento dinamico di strutture a telaio in acciaio: sperimentazione su un caso studio

Vanni Nicoletti^a, Davide Arezzo^a, Sandro Carbonari^a, Fabrizio Gara^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Via Breccie Bianche, 60131 Ancona, Italia

Keywords: Tamponature; rigidità di tamponature; telai tamponati; caratterizzazione dinamica; prove di rilascio; prove di impatto; prove di vibrazione ambientale

ABSTRACT

L'articolo riguarda un'estesa campagna sperimentale finalizzata all'analisi dell'influenza delle tamponature sul comportamento dinamico di strutture intelaiate in acciaio. La sperimentazione è stata condotta in laboratorio su un telaio in acciaio con soletta composta in c.a. e lamiera grecata, sul quale sono state eseguite prove di impatto, di vibrazione ambientale e di spinta e rilascio, per le quali vengono descritte le procedure seguite, la strumentazione adottata e i principali risultati ottenuti. Le prove sono state eseguite prima e dopo la realizzazione di tamponature leggere in laterizio forato e intonaco al fine di valutare il contributo fornito, in termini di rigidità, sul comportamento dinamico globale del telaio soggetto ad azioni tali da mantenere la struttura e le pareti in campo elastico. Per concludere, viene presentato un confronto tra i risultati ottenuti con le diverse prove che, nonostante lascino tutte la struttura in campo elastico, sono caratterizzate da un diverso livello di eccitazione e forniscono risultati in alcuni casi piuttosto differenti.

1 INTRODUZIONE

I frequenti eventi sismici registrati in Italia negli ultimi anni hanno ribadito l'importanza di una attenta progettazione sismica delle strutture sull'intero territorio nazionale, sebbene la consapevolezza del problema legato agli eventi sismici nel nostro paese ha radici ben più lontane: si ricordano il terremoto di Messina nel 1908, Friuli nel 1976, Irpinia nel 1980, Umbria e Marche nel 1997, quelli più recenti dell'Aquila nel 2009 ed Emilia nel 2012, fino ai recentissimi eventi che hanno interessato il Centro Italia tra il 2016 e il 2017 (Braga et al. 2011, Penna et al. 2014, De Luca et al. 2018).

Tuttavia, rispetto al passato, l'attuale normativa tecnica italiana (D.M. 17/01/2018 2018 e Circolare 21/01/2019 2019), oltre ad imporre che le nuove costruzioni “siano dotate di sistemi strutturali che garantiscano rigidità, resistenza e duttilità nei confronti delle due componenti orizzontali delle azioni sismiche, tra loro ortogonali”, riconosce l'importante ruolo che possono assumere gli elementi non strutturali, classificati come “elementi aventi rigidità, resistenza e massa tali

da influenzare in maniera significativa la risposta strutturale o che, pur non influenzando la risposta strutturale, sono ugualmente significativi ai fini della sicurezza e/o dell'incolumità delle persone”.

Con riferimento agli edifici intelaiati, i principali elementi non strutturali sono costituiti dalle tamponature esterne e interne (tramezzi), in funzione della loro tipologia. Il nuovo codice sembra sottolineare che, in fase di progettazione delle costruzioni, risulta importante adottare, ai fini di una attendibile previsione della risposta sismica, modelli strutturali che includano anche il contributo delle tamponature non solo in termini di massa ma anche di rigidità e resistenza (Fardis et al. 1999, Asteris et al. 2011, Perrone et al. 2017, Choudhury e Kaushik 2018). Questi modelli raffinati sono indispensabili, ad esempio, per la progettazione di sistemi di protezione sismica che debbano preservare la costruzione o il suo contenuto evitando la rottura dei tamponamenti stessi, così come per una corretta interpretazione dei dati derivanti da sistemi di monitoraggio della costruzione in esercizio. La modellazione delle tamponature esterne ed interne, non essendo abituale, risulta meno semplice rispetto a quella della struttura, comportando un certo incremento

delle incertezze in fase di analisi (Mehrabi e Shing 1997, Vicente et al. 2016, Mazza 2018, Di Trapani et al. 2018).

Una strategia per la riduzione di tali incertezze può risiedere nella verifica o calibrazione dei modelli strutturali sulla base delle proprietà dinamiche modali della struttura valutate sperimentalmente. Una delle metodologie maggiormente utilizzate è costituita dalle prove di vibrazioni ambientali e procedure di identificazione output-only. Tale metodologia si è largamente diffusa negli ultimi decenni grazie alla sua economicità e facilità esecutiva nei confronti di altre tipologie di prove dinamiche (ad esempio prove di vibrazioni forzate tramite vibrodine) per la caratterizzazione dinamica non solo di grandi strutture quali dighe e ponti (e.g. Gara et al. 2019, Minnucci et al. 2019) ma anche di edifici storici e strategici (e.g. Arezzo et al. 2019, Regni et al. 2018).

In questo articolo viene illustrata una parte dell'estesa campagna sperimentale di laboratorio realizzata su un telaio in acciaio con soletta composta in lamiera grecata e in c.a., considerato come caso studio, con l'obiettivo di studiare l'effetto delle tamponature sul comportamento globale della struttura e, in particolare, analizzare l'incremento di rigidità della struttura fornito dalla presenza di tali elementi non strutturali. In dettaglio, vengono presentate diverse tipologie di prove eseguite per caratterizzare dinamicamente la struttura in campo elastico e ne vengono presentati i principali risultati. Le prove eseguite sono quelle di impatto, di vibrazione ambientale e di spinta e rilascio (snap-back); tutte le prove vengono eseguite sia prima della costruzione delle tamponature (telaio nudo) che dopo (telaio tamponato) la loro realizzazione.

Le prove permettono di stimare i parametri modali della struttura e di ottenere, attraverso semplici formule della dinamica, una stima della rigidità complessiva del telaio nudo e del telaio tamponato, da cui si deduce facilmente il contributo in rigidità fornito dalle pareti. Nello specifico, in questo articolo l'attenzione viene posta sulla rigidità nel piano delle tamponature analizzando la dinamica della struttura nella direzione longitudinale, ovvero parallela ai piani delle pareti. Infine, viene analizzata la variabilità delle caratteristiche dinamiche della struttura al variare delle prove dinamiche eseguite. Infatti, nonostante tutte le prove siano tali da lasciare il sistema in campo elastico, ciascuna tipologia è caratterizzata da un livello di eccitazione ben diverso ed i valori dei parametri modali identificati, in special modo le frequenze, ne risultano influenzati.

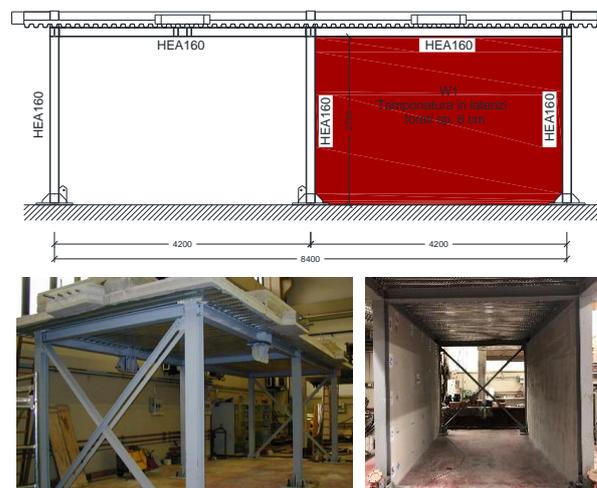


Figura 1. Prospetto laterale e foto del telaio di laboratorio.

2 IL CASO STUDIO DI LABORATORIO

Il caso studio oggetto del presente lavoro è costituito da un telaio in acciaio con soletta composta acciaio-calcestruzzo situato presso il Laboratorio di Materiali e Strutture dell'Università Politecnica delle Marche (Figura 1). La struttura è ad una elevazione con altezza di circa 3.00 m e si compone di due campate di 4.20 m in direzione longitudinale (direzione Y) e di una con pari luce in direzione trasversale (direzione X). I nodi trave-pilastro sono semirigidi e tali da generare un comportamento a telaio in direzione longitudinale e pendolare in direzione trasversale; controventi a croce di Sant'Andrea sono pertanto presenti solo nelle campate terminali nella direzione trasversale.

Pilastri e travi sono realizzati con profili in acciaio HE160A, mentre la soletta di spessore totale pari a 12 cm è composta da una lamiera grecata in acciaio ed una soletta in c.a. dotata di rete elettrosaldata.

Al di sopra della soletta sono posizionati 9 blocchi in calcestruzzo per simulare la presenza dei sovraccarichi. Le pareti di tamponamento sono state realizzate su una sola delle due campate longitudinali, da entrambi i lati del telaio, utilizzando blocchi forati in laterizio di 6 cm di spessore e giunti di malta orizzontali e verticali. Infine, le pareti sono completate con uno strato di intonaco in gesso dello spessore di circa 0.7 cm. La massa complessiva del telaio senza tamponature (telaio nudo) è stimata in 28.3 t, mentre quella del telaio tamponato è stimata in 29.3 t.

3 PROVE DI IMPATTO

Le prove di impatto vengono svolte fornendo alla struttura un input di tipo impulsivo (colpi di

martello) e misurando le accelerazioni da esso prodotte sulla struttura. Per fornire l'input è stato utilizzato un martello strumentato PCB modello 086D20 dotato di cella di carico ed equipaggiato con punta medio-morbida, mentre le accelerazioni sono state misurate mediante 6 accelerometri piezoelettrici mono-assiali PCB modello 393B31.

Il martello strumentato, che ha massa all'incirca di 1.1 kg, è caratterizzato da un range di misura di 22240 N pk, sensibilità di 0.23 mV/N e range di frequenze indagabili da 1 a 300 Hz; gli accelerometri sono, invece, caratterizzati da una sensibilità di 10 V/g, range di misura di 0.5 g pk e range di frequenze indagabili da 0.1 a 200 Hz. Sia i sensori che il martello sono collegati mediante cavi coassiali a schede di acquisizione NI-9234 a 4 canali montate su una chassis a 8 canali NI cDAQ 9178. Infine, per acquisire i segnali e per immagazzinare i dati è stato utilizzato un computer portatile dotato di un software dedicato sviluppato in Labview. Gli accelerometri sono montati su piastrine metalliche conformate ad "L" e posizionate al di sopra della soletta in calcestruzzo; per il fissaggio delle piastrine alla soletta è stata utilizzata la pasta di butano ottenendo un ottimo accoppiamento dei sensori alla struttura. I 6 sensori sono posizionati secondo lo schema riportato in Figura 2: 3 accelerometri con direzione di misura lungo la direzione trasversale del telaio (direzione X) e 3 con direzione di misura lungo la direzione longitudinale del telaio (direzione Y). L'elevato numero di sensori e la loro disposizione consentono di cogliere un elevato numero di modi della soletta nel suo piano, compresi quelli rotazionali e flessionali nel piano, oltre a quelli traslazionali.

Le battute vengono applicate su due punti distinti della soletta (IY in direzione Y e IX in direzione X) allo scopo di ottenere una ridondanza dei dati e una maggiore affidabilità dei risultati. Per lo stesso motivo, vengono applicati ad ogni punto di battuta e per ogni test effettuato almeno 3 colpi di martello.

Considerando le caratteristiche delle schede di acquisizione a disposizione, è stata adottata una frequenza di campionamento di 2048 Hz, mentre è stato adottato un tempo di acquisizione di 50 s per ogni battuta al fine di registrare l'intera durata dell'oscillazione della struttura e ottenere una buona risoluzione nel dominio delle frequenze. Come precedentemente introdotto, le prove sono state eseguite prima e dopo la costruzione delle tamponature.

In Figura 3 vengono mostrate per il telaio nudo e tamponato le Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF) di ciascun accelerometro, per una singola

battuta; le FRF sono ottenute dal rapporto tra le accelerazioni misurate (output) e la forza impulsiva misurata (input). I picchi di questi grafici identificano le frequenze di risonanza della struttura che, come si può osservare (Figura 3), sono sensibilmente differenti nei due casi. Per una identificazione modale completa viene utilizzato il metodo N4SID (Van Overschee e De Moor 1996), metodo Multi Degree of Freedom nel dominio del tempo grazie al quale sono stati identificati diversi modi della struttura. In Figura 4 sono mostrati sia per il telaio nudo che per quello tamponato i modi che comportano un'oscillazione che si sviluppa prevalentemente nella direzione longitudinale, ovvero quelli che maggiormente mettono in gioco la rigidità delle tamponature nel proprio piano.

Dal confronto tra le forme modali è possibile notare che nel caso del telaio nudo, il modo è quasi puramente traslazionale mentre, per quello tamponato, l'accoppiamento con la rotazione diventa leggermente più marcato. Questo accoppiamento è innescato da una mancata simmetria strutturale, ragionevolmente imputabile alla non perfetta uguaglianza delle due pareti, soprattutto in termini di rigidità. Si osserva che la frequenza del telaio tamponato (17.58 Hz) è molto superiore (di circa 6 volte) della frequenza del telaio non tamponato (2.95 Hz).

Per ottenere una stima della rigidità dinamica del telaio in direzione longitudinale si è fatta l'ipotesi che esso possa essere schematizzato come un oscillatore semplice. Sono state pertanto utilizzate le formule classiche della dinamica di un oscillatore ad 1 g.d.l., considerando la massa della struttura concentrata a livello del solaio; nel dettaglio, nel caso del telaio nudo viene considerata la massa totale mentre nel caso del telaio tamponato si aggiunge al precedente valore la metà della massa delle pareti.

La Tabella 1 mostra i valori stimati della rigidità dinamica per il telaio nudo e quello tamponato; si osserva che la rigidità incrementa decisamente passando da 9.7 kN/mm per il telaio nudo a 351.4 kN/mm per quello tamponato.

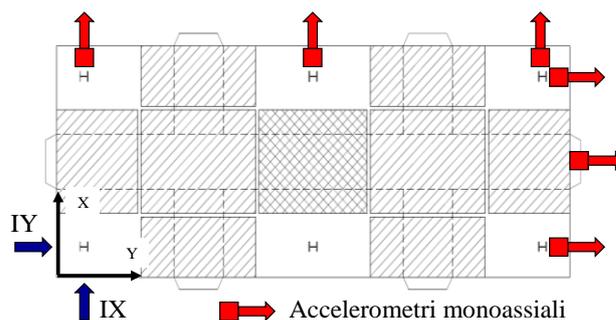


Figura 2. Configurazione per le prove di impatto.

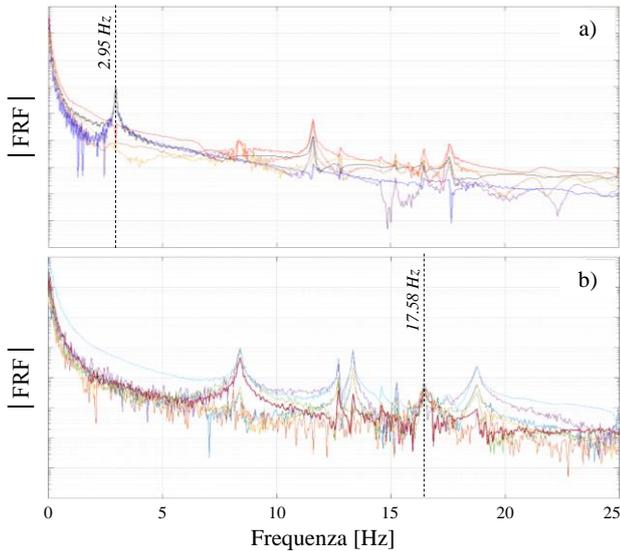


Figura 3. FRF ottenute da una prova di impatto: a) telaio nudo, b) telaio tamponato.

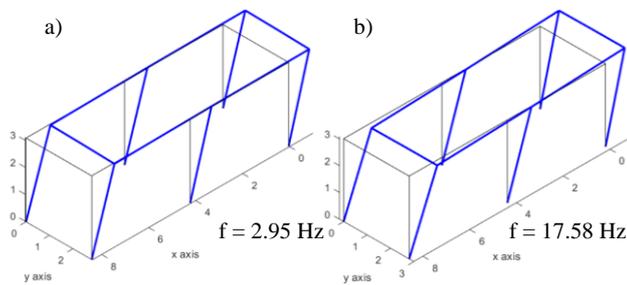


Figura 4. Modi in direzione longitudinale ottenuti dalle prove di impatto: a) telaio nudo, b) telaio tamponato.

Tabella 1. Frequenze e rigidezze dinamiche del telaio senza e con le tamponature ottenute dalle prove di impatto.

Telaio nudo		Telaio tamponato	
f [Hz]	K_{DIN} [kN/mm]	f [Hz]	K_{DIN} [kN/mm]
2.95	9.7	17.58	351.4

4 PROVE DI VIBRAZIONE AMBIENTALE

Le prove di vibrazione ambientale consistono nel misurare le accelerazioni sulla struttura prodotte dall'ambiente circostante, ossia da fattori ambientali quali ad esempio il vento o i micro-tremori terrestri, nonché da fattori antropici (traffico, macchinari, ecc...). La prova viene definita anche output-only, in quanto viene misurata solo la risposta della struttura mentre l'eccitazione rimane non misurabile. Questa viene assimilata ad un rumore bianco caratterizzato da uno spettro piatto e quindi in grado di eccitare allo stesso modo tutte le frequenze di interesse. Nel caso in questione, essendo la struttura posta in un ambiente chiuso, le fonti di eccitazione dovute agli agenti atmosferici sono pressoché nulle e anche gli effetti termici risultano trascurabili.

I sensori accelerometrici e la relativa catena di misura adottati sono gli stessi utilizzati per le

prove di impatto, inclusa la configurazione dei sensori al di sopra della soletta (Figura 2). Le prove sono state eseguite sia prima che dopo la costruzione delle tamponature adottando una frequenza di campionamento di 2048 Hz e una durata delle acquisizioni pari a 1200 s. Per identificare i parametri modali della struttura è stato utilizzato il metodo SSI-Cov (Van Overschee e De Moor 1996), una tecnica di identificazione output-only che lavora nel dominio del tempo e che si basa sulla costruzione di un diagramma di stabilizzazione per l'individuazione dei modi propri di vibrare.

In Figura 5 sono mostrati i diagrammi di stabilizzazione relativi alle due prove effettuate. I picchi dei diagrammi, contraddistinti anche dalla presenza di colonne con allineati diversi simboli che ne caratterizzano la stabilità ad ordini crescenti del modello (Van Overschee e De Moor 1996), identificano le frequenze di risonanza della struttura; è possibile osservare come, tra le due prove (i.e. sul telaio nudo e tamponato), questi picchi si spostino sensibilmente.

In Figura 6 viene mostrato il modo di vibrare nella direzione longitudinale del telaio prima e dopo la costruzione delle tamponature, accompagnato dal relativo valore di frequenza. Come già visto nel caso delle prove di impatto, il modo in direzione longitudinale riferito al telaio nudo è puramente traslazionale e caratterizzato, anche in questo caso, da una prima frequenza di risonanza a 2.95 Hz; il primo modo del telaio tamponato, invece, presenta un leggero accoppiamento rotazionale e una frequenza di 17.69 Hz, con un aumento di circa 6 volte rispetto al telaio nudo.

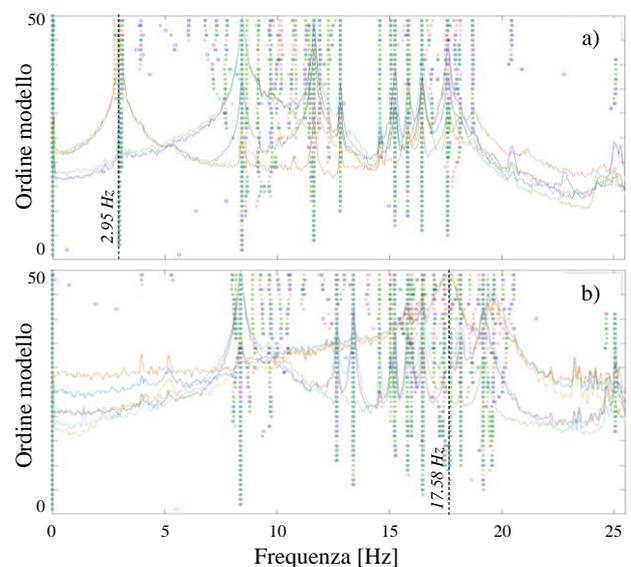


Figura 5. Diagrammi di stabilizzazione ottenuti dalle prove di vibrazione ambientale: a) telaio nudo, b) telaio tamponato.

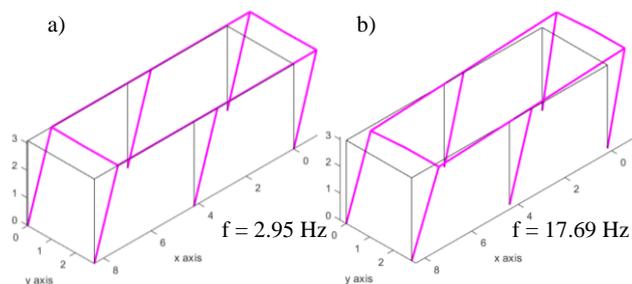


Figura 6. Modi in direzione longitudinale ottenuti dalle prove di vibrazione ambientale: a) telaio nudo, b) telaio tamponato.

Tabella 2. Frequenze e rigidezze dinamiche del telaio senza e con le tamponature ottenute dalle prove di vibrazione ambientale.

Telaio nudo		Telaio tamponato	
f [Hz]	K_{DIN} [kN/mm]	f [Hz]	K_{DIN} [kN/mm]
2.95	9.7	17.69	355.8

Come in precedenza, per ottenere una stima della rigidezza dinamica del telaio in direzione longitudinale sono state utilizzate le classiche formule della dinamica di un oscillatore semplice, essendo noti i valori delle frequenze di oscillazione in questa direzione e della massa. In Tabella 2 sono riportati i valori della rigidezza dinamica stimata per i casi di telaio con e senza tamponature.

Anche in questo caso la rigidezza si incrementa notevolmente passando da 9.7 kN/mm per il telaio nudo a 355.8 kN/mm per quello tamponato.

5 PROVE DI RILASCIO

La prova di spinta e rilascio (snap-back) consiste nel portare il telaio in una configurazione deformata diversa da quella di equilibrio per poi rilasciarlo istantaneamente, lasciandolo oscillare attorno alla sua posizione di equilibrio; la prova permette di ottenere oscillazioni libere smorzate con condizioni iniziali del moto corrispondenti a velocità iniziale nulla e spostamento iniziale imposto, diverso da zero.

La strumentazione adottata si compone di un martinetto idraulico (attuatore lineare servocontrollato Amsler), a doppio effetto, di 400 kN di portata; un sistema di controllo MTS Teststart IIs, che governa il martinetto attuatore in base ai segnali del trasduttore di spostamento e della cella di carico posizionati sul martinetto stesso; tre trasduttori di spostamento HBM modello W50k con corsa nominale pari a 50 mm e sensibilità nominale pari a 80mV/V; ed un sistema di acquisizione (per i tre trasduttori) MGC Plus a 16 canali. Il sistema di misura è completamente cablato.

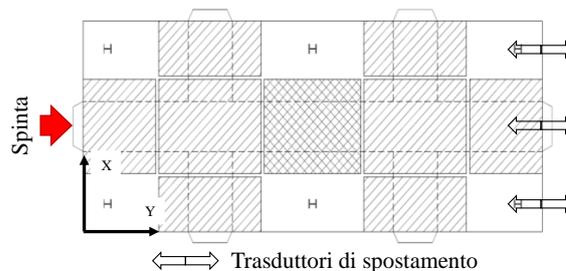


Figura 7. Configurazione per le prove di rilascio.

Il martinetto è posto nella mezzeria di un lato corto del telaio, alla quota della soletta, al fine di applicare una forza in direzione longitudinale (direzione Y) (Figura 7) sul piano di simmetria del telaio. I tre trasduttori di spostamento sono posizionati sul lato corto opposto della soletta, alla stessa quota, in modo da registrare gli spostamenti in direzione longitudinale (parallela alla direzione di spinta) in corrispondenza della mezzeria e alle due estremità della soletta, in corrispondenza dell'asse dei pilastri (Figura 7). Questa disposizione consente di cogliere la traslazione e l'eventuale rotazione nel piano della soletta; la ridondanza di sensori incrementa l'affidabilità dei risultati. Per quanto riguarda il telaio nudo, sono state effettuate 5 prove imponendo spostamenti iniziali al martinetto progressivamente crescenti pari a: 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 e 10.0 mm per i quali non sono attesi comportamenti non lineari del telaio. Dopo la realizzazione delle tamponature, sono state effettuate altre 5 prove imponendo spostamenti al martinetto crescenti pari a: 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 e 3.0 mm. Sono stati considerati spostamenti minori rispetto alle prove sul telaio nudo per garantire che le tamponature rimanessero in campo elastico evitando fessurazioni anche allo spostamento massimo imposto al martinetto pari a 3.0 mm.

La Figura 8a,b mostra, a titolo di esempio, due tipici segnali tempo-spostamento registrati dallo stesso trasduttore durante le prove di rilascio (2.0 mm al martinetto) eseguita rispettivamente sul telaio nudo e sul telaio tamponato. I segnali mostrano tre tratti distinti: il primo tratto (rampa), dove viene imposto lo spostamento iniziale a velocità costante; il secondo tratto (pianerottolo) dove lo spostamento viene mantenuto costante per 10 s in maniera tale da permettere l'assestamento della struttura nella configurazione deformata; il terzo tratto in cui la struttura, una volta rilasciata, oscilla attorno alla sua posizione di equilibrio iniziale con moto oscillatorio smorzato. Da un rapido confronto tra i due segnali risulta evidente che il numero di oscillazioni libere del telaio nudo è molto maggiore di quelle del telaio tamponato, che, di conseguenza, risulta caratterizzato da uno smorzamento molto più elevato.

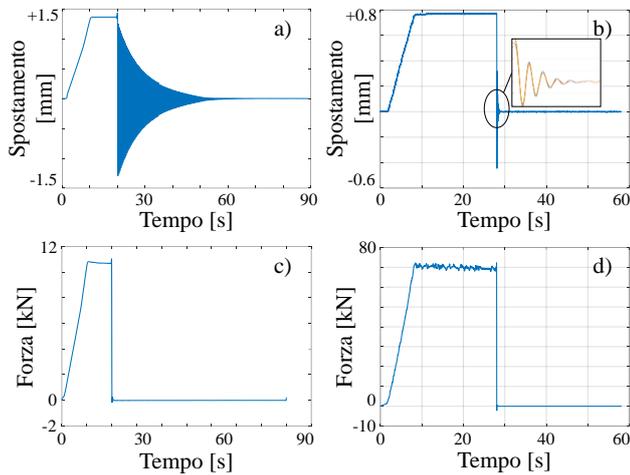


Figura 8. Segnali registrati durante le prove di rilascio a 2.0 mm: a) tempo-spostamento per il telaio nudo, b) tempo-spostamento per il telaio tamponato, c) tempo-forza per il telaio nudo, d) tempo-forza per il telaio tamponato.

Inoltre, si può osservare come gli spostamenti effettivi sperimentati dal telaio siano minori rispetto a quelli imposti al martinetto; ad esempio, per la prova a 2.0 mm il telaio nudo registra uno spostamento massimo di 1.4 mm, mentre quello tamponato uno spostamento di circa 0.8 mm. Ricordando che tali spostamenti sono misurati al livello della soletta sul lato opposto rispetto a quello dove agisce il martinetto, la differenza registrata può essere imputabile alla deformabilità del sistema dal punto di applicazione della spinta e quello di misura. In questo senso, lo scostamento tra il valore dello spostamento imposto e quello misurato cresce nel caso del telaio tamponato coerentemente con l'entità delle forze in gioco.

In Figura 8c,d sono riportati i segnali in termini di forza relativi alle medesime prove appena discusse (prova a 2.0 mm) e registrati dalla cella di carico del martinetto, relativamente al caso del telaio nudo e del telaio tamponato. Per raggiungere il massimo spostamento pari a circa 1.4 mm nel caso di telaio nudo e poco meno di 0.8 mm per quello tamponato, occorre una forza di circa 10 kN nel primo caso e di 70 kN nel secondo. Questa considerazione fornisce un'indicazione immediata sull'incremento della rigidezza del telaio tamponato rispetto al nudo.

Da questo tipo di prova è possibile ottenere una duplice stima della rigidezza della struttura in direzione longitudinale: una di tipo quasi statico, analizzando i due tratti della rampa iniziale e del pianerottolo; e una di tipo dinamico, analizzando il tratto dell'oscillazione libera. Per quanto riguarda la prima, a titolo di esempio, in Figura 9 vengono riportati i grafici forza-spostamento relativi alle rampe di carico della prova a 2.0 mm sul telaio nudo e su quello tamponato. Come atteso, nel caso di telaio nudo le leggi forza-

spostamento ottenute dalle diverse prove sono risultate lineari e quasi perfettamente sovrapponibili, con pendenza che identifica la rigidezza della struttura. Nel caso del telaio tamponato, invece, il grafico presenta un andamento da subito non lineare con un apparente incremento di rigidezza al crescere dello spostamento. Tale comportamento è dovuto allo svilupparsi di fenomeni non lineari all'interfaccia tra pareti e telaio, anche per livelli di drift contenuti, e alla storia di carico del telaio che subisce progressivamente spostamenti di ordine crescente. Per i livelli di spostamento imposti, non linearità dovute a fessurazioni delle tamponature possono essere escluse (i) perché non osservate durante queste prime prove e (ii) per la natura della non linearità che mostra un leggero incremento della rigidezza con lo spostamento, legato al progredire dei meccanismi resistenti sviluppati dalle pareti durante le diverse storie di spostamento crescente. Con riferimento al telaio tamponato, nel seguito si farà riferimento alla rigidezza secante, ottenuta dalla pendenza della retta che congiunge l'origine con l'ultimo punto della curva forza-spostamento.

In Tabella 3 sono riportati i valori di rigidezza quasi statica (k_{ST}) determinati a diversi livelli di spostamento (S), sia per il telaio nudo che per il telaio tamponato. La rigidezza riportata per ogni singolo step di spostamento è calcolata come media di quelle ottenute attraverso i tre trasduttori. Nel caso di telaio nudo, il valore della rigidezza media calcolata considerando tutte le prove è pari a 6.8 kN/mm, mentre per il telaio tamponato sale a 91.9 kN/mm, con un incremento di circa 13 volte.

La stima della rigidezza dinamica viene effettuata analizzando la parte oscillatoria delle registrazioni degli spostamenti nel tempo dalla quale è possibile ricavare la frequenza di oscillazione del telaio e, attraverso le formule classiche della dinamica dell'oscillatore semplice già citate in precedenza, una stima della rigidezza dinamica. In Tabella 4 sono riportati i valori di rigidezza dinamica (k_{DIN}) determinati per i diversi livelli di spostamento, sia per il telaio nudo che tamponato. La frequenza di oscillazione riportata per ogni singolo step di spostamento è calcolata come media di quelle ottenute attraverso i tre trasduttori. Nel caso del telaio nudo, la frequenza ha un valore medio di 2.73 Hz e, di conseguenza, la rigidezza dinamica un valore medio di 8.3 kN/mm; una volta tamponato, la frequenza aumenta di circa 3 volte e la rigidezza dinamica di circa 10 volte, arrivando a un valore medio di 83.3 kN/mm.

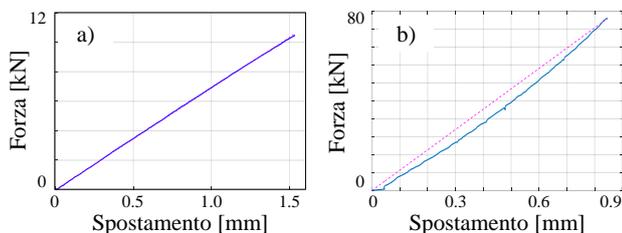


Figura 9. Grafici forza-spostamento ricavati dalle prove di rilascio a 2.0 mm: a) telaio nudo, b) telaio tamponato.

Tabella 3. Rigidezza quasi statica del telaio senza e con le tamponature ottenuta da prove di rilascio.

Telaio nudo		Telaio tamponato	
S [mm]	k_{ST} [kN/mm]	S [mm]	k_{ST} [kN/mm]
2.0	7.1	1.0	77.9
4.0	6.9	1.5	88.7
6.0	6.6	2.0	95.7
8.0	6.8	2.5	98.9
10.0	6.7	3.0	98.3
<i>MEDIA</i>	6.8	<i>MEDIA</i>	91.9

Tabella 4. Rigidezza dinamica del telaio senza e con le tamponature ottenuta da prove di rilascio.

Telaio nudo			Telaio tamponato		
S [mm]	f [Hz]	K_{DIN} [kN/mm]	S [mm]	f [Hz]	K_{DIN} [kN/mm]
2.0	2.76	8.5	1.0	8.50	82.2
4.0	2.75	8.4	1.5	8.68	85.7
6.0	2.73	8.3	2.0	8.74	86.9
8.0	2.71	8.2	2.5	8.77	87.5
10.0	2.70	8.1	3.0	8.10	74.6
<i>MED</i>	2.73	8.3	<i>MED</i>	8.56	83.3

6 CONCLUSIONI

In questo articolo sono stati mostrati alcuni risultati di un'estesa campagna sperimentale effettuata su un telaio di laboratorio, in acciaio e soletta composta, in due configurazioni: con e senza tamponature.

Il confronto tra i risultati ottenuti prima e dopo la costruzione delle pareti di tamponamento ha permesso di investigare come la presenza di quest'ultimi influenzi il comportamento dinamico globale, determinandone variazioni sostanziali. Inoltre, le prove hanno permesso di stimare il contributo fornito dalle tamponature alla struttura, in termini di rigidezza nel piano delle pareti stesse.

Sono state considerate tre tipologie di prove dinamiche: prove di impatto con martello strumentato, prove di vibrazione ambientale e prove di spinta e rilascio. Tali prove, nonostante siano state eseguite a livelli tali da mantenere la struttura in campo elastico, sono caratterizzate da un livello di eccitazione fornito alla struttura molto diverso. Dalle prove di impatto e di vibrazione ambientale si è potuto ottenere una stima della rigidezza dinamica del telaio e delle pareti mentre

la prova di rilascio ha consentito di stimare sia la rigidezza dinamica che quella quasi statica.

Confrontando la rigidezza del telaio nudo con quella del telaio tamponato, si osserva un notevole incremento della stessa causato ovviamente dalla presenza delle tamponature.

Il confronto tra i valori della rigidezza dinamica stimata in base ai risultati delle diverse prove mette in evidenza che la prova di rilascio fornisce un valore molto inferiore rispetto a quelli ricavati dalle prove di impatto o di vibrazione ambientale, che sono quasi identici. Ciò può essere spiegato considerando che durante la prova di rilascio gli spostamenti della struttura sono molto maggiori rispetto a quelli sperimentati nelle altre due prove (all'incirca di 2 o 3 ordini di grandezza). I maggiori spostamenti possono essere responsabili di modeste non linearità, ad esempio legate a fenomeni attritivi a livello dei nodi semirigidi o all'interfaccia tra il telaio e la tamponatura che portano la struttura ad evidenziare una natura più deformabile. Per le prove di impatto e di vibrazione, in ragione dei più bassi valori di spostamento, potrebbe essere ragionevole l'ipotesi di perfetta aderenza tra pareti e telaio a cui corrisponde una più elevata rigidezza della struttura.

Infine, vale la pena notare come le prove di impatto e di vibrazione ambientale forniscano all'incirca gli stessi risultati in termini di frequenze e quindi di rigidezze stimate.

BIBLIOGRAFIA

- Arezzo D., Regni M., Carbonari S., Gara F., 2018. Effects of environmental conditions on the dynamic properties of a 10-storey r.c. square tower, *2018 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2018*. June 21-22, Salerno, Italy.
- Asteris P.G., Antoniou S.T., Sophianopoulos D.S., Chrysostomou C.Z., 2011. Mathematical macromodelling of infilled frames: state of the art, *J. of Structural Engineering*, **137**, 1508-1517.
- Braga F., Manfredi V., Masi A., Salvatori A., Vona M., 2011. Performance of non-structural elements in r.c. buildings during the L'Aquila, 2009 earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **9**(1), 307-324.
- Choudhury T., Kaushik H.B., 2018. Seismic response sensitivity to uncertain variables in r.c. frames with infill walls, *J. of Structural Engineering*, **144**(10), 1-16.
- Circolare 21/01/2019 n.7 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2019. Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni", *Gazzetta Ufficiale* n. 35 del 11/02/2019, Supplemento ordinario n.5.
- D.M. 17/01/2018, 2018. Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), *Gazzetta Ufficiale* n. 42 del 20/02/2018, Supplemento ordinario n.8.
- De Luca F., Woods G.E.D., Galasso C., D'Ayala D., 2018. RC infilled building performance against the evidence of

- the 2016 EEFIT Central Italy post-earthquake reconnaissance mission: empirical fragilities and comparison with the FAST method, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(7), 2943-2969.
- Di Trapani F., Shing P.B., Cavaleri L., 2018. Macroelement model for in-plane and out-of-plane responses of masonry infills in frame structures, *J. of Structural Engineering*, **144**(2), 1-13.
- Fardis M., Bousias S., Franchioni G., Panagiotakos T., 1999. Seismic response and design of RC structures with plan-eccentric masonry infills, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **28**(2), 173-191.
- Gara F., Regni M., Roia D., Carbonari S., Dezi F., 2019. Evidence of coupled soil-structure interaction and site response in continuous viaducts from ambient vibration tests, *Soil dynamics and earthquake engineering*, **120**, 408-422.
- Mazza F., 2018. In-plane-out-of-plane non-linear model of masonry infills in the seismic analysis of r.c. framed buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1-22.
- Mehrabi A.B., Shing P.B., 1997. Finite element modelling of masonry-infilled RC frames, *J. of Structural Engineering*, **123**(5), 604-613.
- Minnucci L., Regni M., Speranza E., Carbonari S., Gara F., 2019. Experimental assessment of the expected impact of a bridge seismic retrofit through ambient vibration tests, *8th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC 2019*. May 13-15, Copenhagen, Denmark.
- Penna A., Morandi P., Rota M., Manzini C., Porto F., Magenes G., 2014. Performance of masonry buildings during the Emilia 2012 earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **12**(5), 2255-2273.
- Perrone D., Leone M., Aiello M.A., 2017. Non-linear behaviour of masonry infilled rc frames: influence of masonry mechanical properties, *Engineering & Structures*, **150**, 875-891.
- Regni M., Arezzo D., Carbonari S., Gara F., Zonta D., 2018. Effect of Environmental Conditions on the Modal Response of a 10-Story Reinforced Concrete Tower, *Shock and Vibration*, **2018**, 9476146.
- Van Overschee P., De Moor B.L., 1996. Subspace identification for linear systems, Kluwer Academic Publisher, Leuven, Belgio.
- Vicente R., Rodrigues H., Arede A., Varum H., 2016. Simplified macro-model for infill masonry walls considering the out-of-plane behaviour, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **45**(4), 507-524.