

Indagini di caratterizzazione dinamica nell'ambito del collaudo statico di edifici

G. Di Marco¹, G. Fidotta², E. Lo Giudice², G. Navarra², G. Messina³

¹Studio Lo Giudice-Di Marco, 92024 Canicattì (AG),

²DISMAT s.r.l., C.da Andolina, S.S. 122 – km 28 – 92024 Canicattì (AG),
tel. 0922 859406, fax 0922 853877,

³Consulente del Tribunale di Palermo, Palermo (PA).

info@dismat.it pfidotta@gmail.com giuseppenavarra@dismat.it

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro mostra come un'indagine sperimentale dinamica eseguita su tre edifici a cinque piani fuori terra, abbia permesso l'individuazione dei parametri dinamici fondamentali delle strutture e come questi valori siano stati sfruttati per la validazione di tre modelli FEM; successivamente, i modelli, sono utilizzati nelle fasi di verifica necessarie per la formulazione di un giudizio sulla sicurezza e stabilità delle opere a seguito di una accertata non conformità in fase di collaudo.

2. DESCRIZIONE DELLE OPERE

Il complesso immobiliare oggetto di studio è costituito da tre edifici per civile abitazione in calcestruzzo armato, indipendenti fra loro, e denominati: Palazzina A, Palazzina A' e Palazzina B.

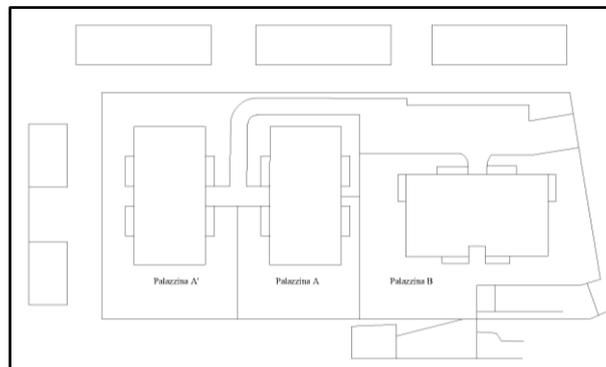


Figura 1 – Disposizione in pianta delle strutture.

La struttura della Palazzina A presenta uno sviluppo in pianta rettangolare con lati di lunghezze pari a 21.45 metri e 11.45 metri. La struttura è di tipo a telaio in c.a.; sono presenti in posizione pressoché centrale il vano scala e il vano ascensore.

In altezza l'edificio si sviluppa in cinque elevazioni aventi interpiani di 3,00 metri; la copertura è a falde inclinate in c.a..

La Palazzina A', possiede una pianta geometricamente speculare a quella della Palazzina A, a quest'ultima si può quindi fare riferimento per la caratterizzazione generale.

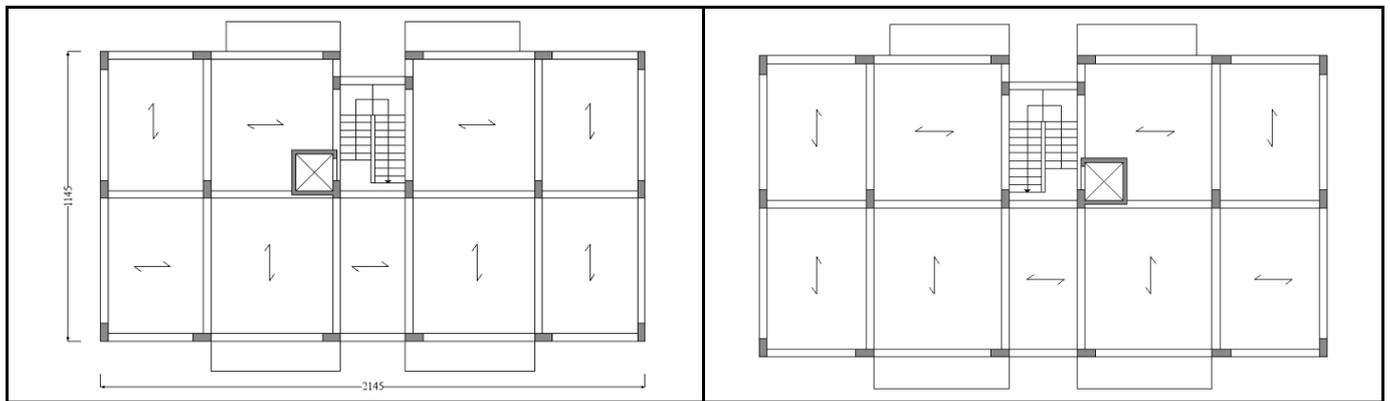


Figura 2 – A sinistra la palazzina A, a destra la palazzina A’.

Il terzo edificio, la Palazzina B, presenta uno sviluppo in pianta rettangolare con lati di lunghezze pari a 22.65 metri e 13.05 metri. La struttura è di tipo a telaio in c.a.; anche in questo caso sono presenti, in posizione centrale, il vano scala e, leggermente decentrato, il vano ascensore costituito da setti in c.a..

In altezza l’edificio si sviluppa in cinque elevazioni, con interpiano di 3,00 metri, più un piano interrato il cui sviluppo in pianta è ben più ampio di quello in elevazione (si veda Figura 3); la copertura è a falde.

I tre edifici possiedono orizzontamenti realizzati con solai latero-cementizi con spessore di 25 cm e tamponamenti esterni in muratura costituiti da mattoni Poraton 600 (tipologia leggera non portante).

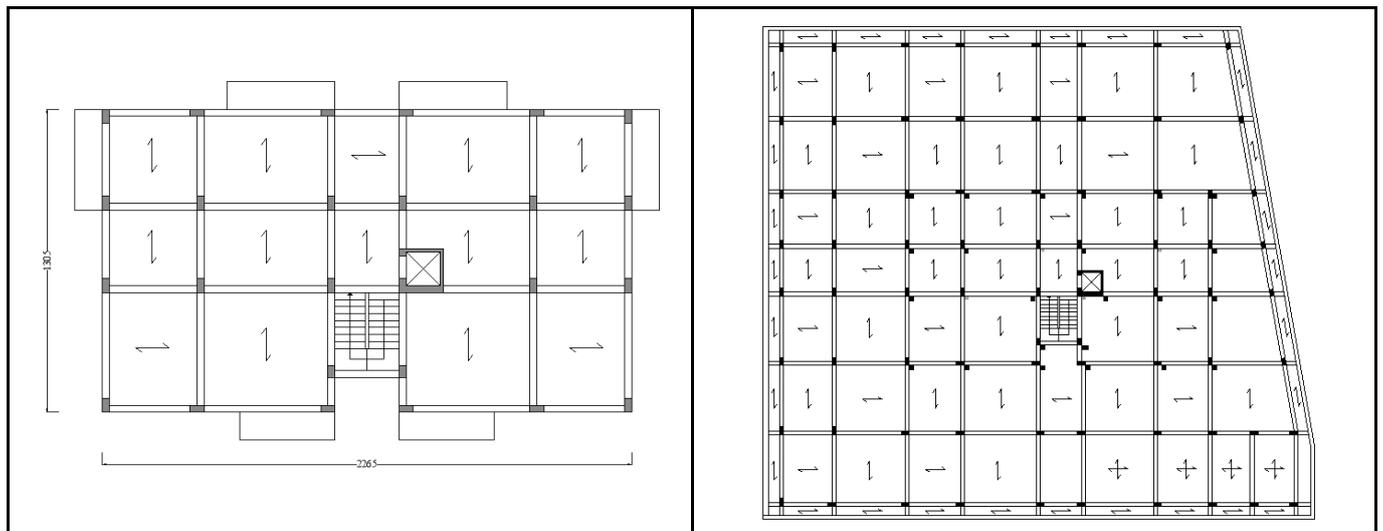


Figura 3 – Pianta piano tipo e piano interrato palazzina B.

3. PIANO DI INDAGINI

In fase di esecuzione delle opere strutturali e in particolare durante i getti di calcestruzzo, sono stati prelevati n. 122 provini di conglomerato e n. 45 campioni di barre d’armatura.

I campioni di calcestruzzo sono stati sottoposti a prova di compressione dal Laboratorio dell’Università di Palermo, mentre nello stesso laboratorio i campioni delle barre d’armatura sono stati sottoposti a prova di trazione.

Dall’esame dei certificati di laboratorio relativi le prove di compressione dei provini su indicati, è emerso che queste sono state eseguite dopo 19 mesi dalla data di prelievo; ciò è palesemente in contrasto con quanto consigliato dalla Circolare n. 617/C.S.LL.PP. al § 11.2.5.3 e cioè entro un termine ragionevole non superiore “a qualche settimana” dal prelievo; mentre, per quanto riguarda l’acciaio in barre per c.a., la documentazione di

accompagnamento prescritta al § 11.3.1.5 del DM 14.01.2008 e al § C11.3.1.5 della Circolare n°617/C.S.LL.PP risulta assente.

È stato quindi necessario redigere un protocollo tendente ad accertare la resistenza del calcestruzzo in opera, nonché le caratteristiche meccaniche dell'acciaio in barre utilizzato per la realizzazione degli edifici.

Dovendo effettuare un prelievo di almeno di tre campioni per ogni area omogenea, al fine di ottenere una stima attendibile della resistenza, secondo quanto prescritto nella circolare n°617/C.S.LL.PP § C11.2.6, si sono prelevate 15 carote nella palazzina A, 15 carote nella palazzina A' e 18 nella palazzina B'.

Per quanto concerne il prelievo delle barre di armatura, si è deciso di effettuare l'estrazione di una barra di armatura per ogni piano.

Dai i risultati conseguiti dai controlli in opera del calcestruzzo secondo le modalità indicate § C11.2.6 della Circolare n° 617/C.S.LL.PP, emerge che: il calcestruzzo utilizzato per la realizzazione delle palazzine A e A' ha una resistenza lievemente superiore a quella prevista in progetto, ed attribuibile alla classe Rck 25 N/mm²; il calcestruzzo utilizzato per la palazzina B ha una resistenza lievemente inferiore a quella prevista in progetto, ed attribuibile ad una classe Rck 22 N/mm².

Per quanto riguarda le barre d'armatura, visti i risultati conseguiti sui campioni di barre prelevati in opera, si evince che l'acciaio è annoverabile al tipo B450C.

Effettuando la comparazione delle misurazioni mediante scoperture con i disegni del progetto esecutivo è stato rilevato che:

- il diametro delle staffe misurato in situ è sempre pari a 8 mm, mentre nelle tavole del progetto esecutivo delle palazzine A e A' è indicato pari a 10 mm;
- il diametro delle barre longitudinali misurato è uguale a quello indicato per nel progetto.

Un piano di indagine di tipo pacometrico ha permesso di accertare se il numero dei ferri longitudinali e il passo delle staffe con cui sono armati gli elementi strutturali fosse rispettoso dei disegni progettuali esecutivi. Si è ritenuto opportuno sottoporre ad indagine quattro elementi (due travi e due pilastri) per ciascun piano.

Sono state eseguite tre prove di carico su solaio, una per ciascun edificio. Le modalità di prova adotta è quella a contrasto con martinetto a spinta. Come si evince dai grafici sottostanti, le curve carico-spostamento, hanno andamento praticamente lineare, il che indica un comportamento praticamente elastico della struttura nel suo complesso. A confermare tale caratteristica si aggiunge l'assenza, in tutti i campi di solaio sottoposti a prova di una freccia residua a valle dello scarico.

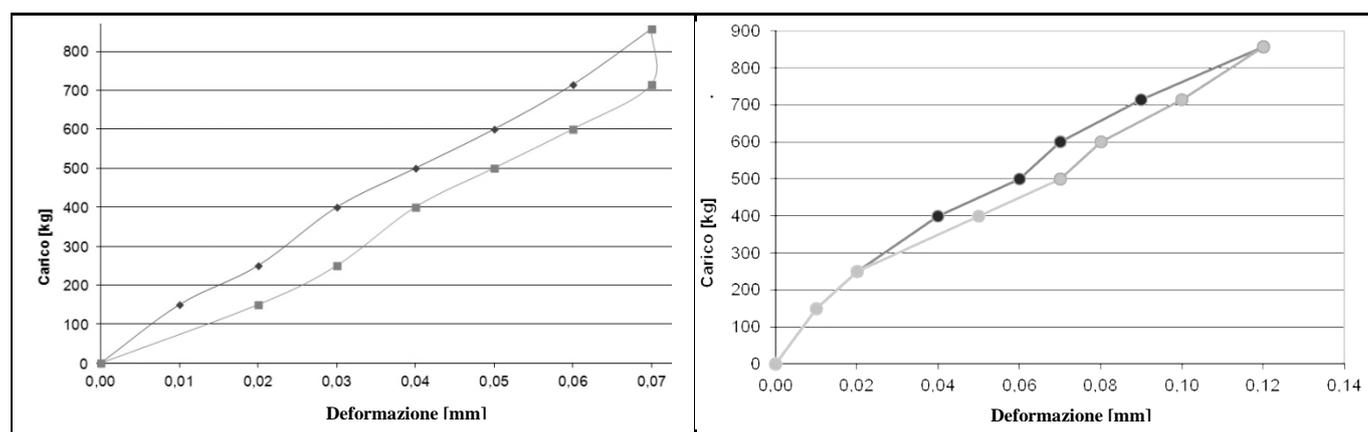


Figura 4 – Curva carico-spostamento solai.

Quindi, sintetizzando, dalle indagini è emerso che una delle palazzine ha caratteristiche di resistenza del calcestruzzo inferiori alle indicazioni progettuali, alcuni elementi presentano, secondo quanto rivelato dall'indagine pacometrica e dalle scoperture, un numero di ferri inferiori a quello previsto in progetto, diametro e passo delle staffe medio delle zone critiche sono inferiori a quanto previsto in progetto.

Le NTC2008 al §11.2.5.3 indicano che qualora l'opera sia non conforme ai controlli di accettazione e gli ulteriori controlli confermino difformità dal progetto "si dovrà procedere ad un controllo teorico e/o sperimentale della sicurezza della struttura". Al fine di fugare ogni dubbio sull'adeguatezza strutturale degli edifici e secondo quanto prescritto dal § 11.2.5.3 delle NTC 2008 è stato disposto un controllo teorico e sperimentale della sicurezza della struttura che ha comportato un nuovo calcolo di verifica tenendo in debito conto delle difformità sopra elencate.

Per una maggiore affidabilità nel calcolo si è ritenuto di validare il modello tramite una sperimentazione volta alla caratterizzazione dinamica.

Secondo un approccio teorico-sperimentale: un modello numerico viene dapprima creato e caricato con le forze di progetto, l'analisi delle caratteristiche modali, sia della struttura reale che del modello, permette poi di stabilire se quest'ultimo restituisce un comportamento dinamico soddisfacente. I parametri modali trovati da entrambi i metodi, analitico e sperimentale, sono infatti direttamente comparabili. Se i risultati non sono d'accordo, il modello analitico viene tarato e affinato fino al raggiungimento di un risultato accettabile. Infine, compiuta la validazione del modello, i calcoli numerici possono essere ripetuti per ottenere la risposta alle forze di progetto previste.

Le caratteristiche dinamiche degli edifici sono state determinate dall'analisi di acquisizioni accelerometriche elaborate nel dominio delle frequenze.

Lo studio nel dominio delle frequenze ha previsto l'acquisizione di accelerazioni da prove sperimentali fornendo alla struttura un'eccitazione forzata per mezzo di una vibrodina. Il passaggio al dominio delle frequenze avviene mediante la Fast Fourier Transform (FFT). La serie di Fourier permette, per ogni istante di tempo, di scrivere segnali periodici come somma di funzioni armoniche; la trasformata di Fourier è una generalizzazione dello sviluppo in serie di Fourier al caso in cui la funzione non sia periodica (ovvero sia di periodo infinito).

Il metodo utilizzato per la determinazione delle caratteristiche modali delle strutture nel dominio delle frequenze è il Basic Frequency Domain, noto anche come metodo Peak-Picking poiché la determinazione delle frequenze è ottenuta dalla frequenza corrispondente ai picchi nei grafici degli spettri.

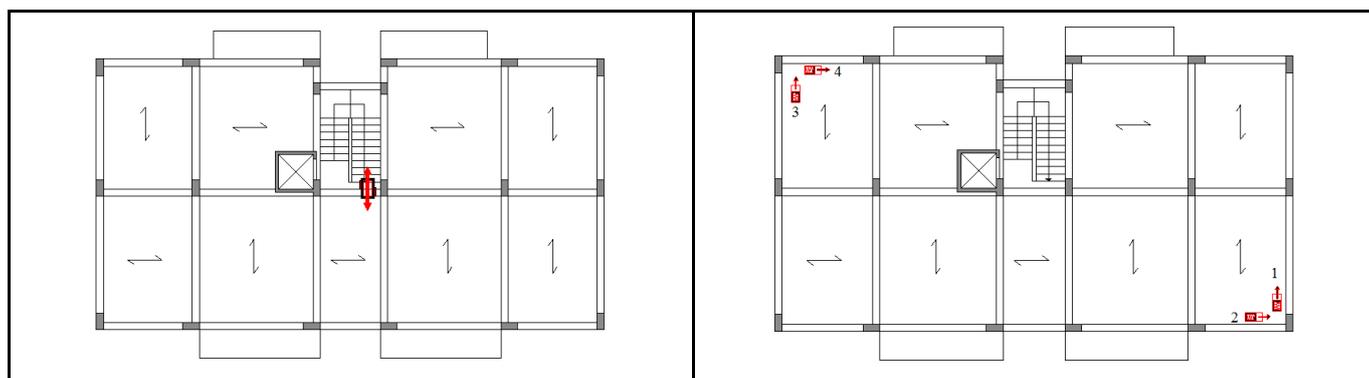


Figura 5 – Configurazione prova dinamica palazzina A.

Per l'esecuzione delle prove si è provveduto al posizionamento della vibrodina e degli accelerometri in modo tale da ottimizzare il funzionamento dell'intero sistema. La direzione di applicazione del carico ciclico è stata scelta in funzione della rigidità della struttura, in particolare si è scelto di applicare la forzante nella direzione per la quale si presume minore la rigidità flessionale. Dieci accelerometri sono stati collocati ai vari piani dell'edificio. La configurazione utilizzata per la Pal. A è riportata in Figura 5.

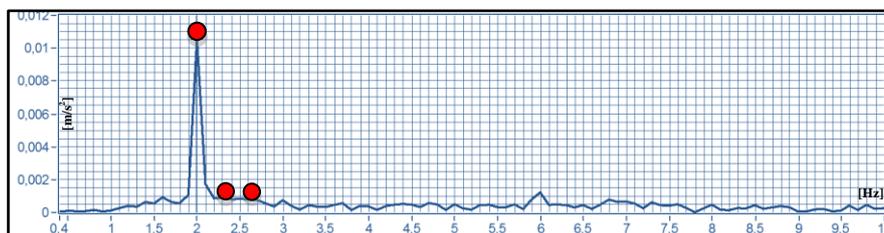


Figura 6 - Segnale n°1 Accelerometro 1.

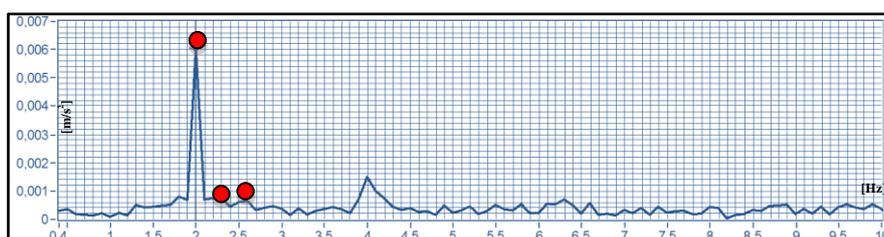


Figura 7 - Segnale n°1 Accelerometro 2.

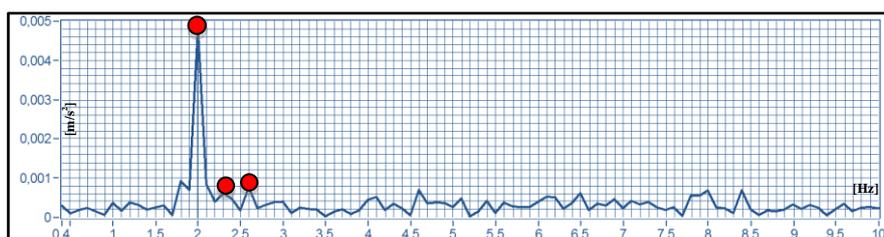


Figura 8 - Segnale n°1 Accelerometro 3.

Le figure 6,7 e 8 riportano gli spettri di alcuni dei segnali acquisiti. La Tabella 1 mostra i valori delle frequenze identificate per la Palazzina A, mentre la Tabella 2 quelle delle palazzine A' e B:

Tabella 1– Frequenze palazzina A.

	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
Frequenza Pal. A	2.00	2.25	2.55

Si nota che l'ampiezza del picco in corrispondenza di 2Hz rispetto a quella degli altri picchi è maggiore negli spettri concernenti gli accelerometri disposti nella direzione trasversale "y", ciò implica che la frequenza 2 Hz è probabilmente associata ad un modo di vibrare traslazionale in direzione "y".

Tabella 2– Frequenze palazzina A' e B.

	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
Frequenza Pal. A'	2.00	2.20	2.60
Frequenza Pal. B	1.80	2.20	2.50

4. TARATURA DEL MODELLO

L'acquisizione sperimentale e la successiva analisi in frequenza dei segnali hanno permesso l'individuazione delle caratteristiche dinamiche dell'edificio.

A valle del processo d'identificazione, sulla base di tali dati, si è realizzato un modello FEM capace di riprodurre la risposta sperimentale. La struttura è stata modellata nei minimi particolari geometrici e meccanici.

Giacché gli edifici oggetto dello studio risultano essere completi in ogni parte, sia strutturale sia non strutturale, assume importanza rilevante l'individuazione di tutti gli elementi che, per rigidezza e resistenza, possono essere in grado di collaborare con la struttura influenzandone il comportamento dinamico. Comportamenti di tal genere possono facilmente essere indotti dalla presenza di pannelli di muratura inseriti tra l'intelaiatura in cemento armato a formare telai tamponati.

È stato quindi valutato tal effetto utilizzando due modelli strutturali, con o senza pannelli, scegliendo poi fra le due condizioni il modello in grado di restituire il comportamento più vicino a quello individuato sperimentalmente.

Sono state seguite le istruzioni contenute nell'Allegato 2 della Circolare 10 Aprile 1997, n. 65/AA.GG, la quale indica che si può tenere conto dell'effetto delle tamponature in maniera sufficientemente approssimata considerando il funzionamento di un puntone diagonale equivalente (Figura 9).

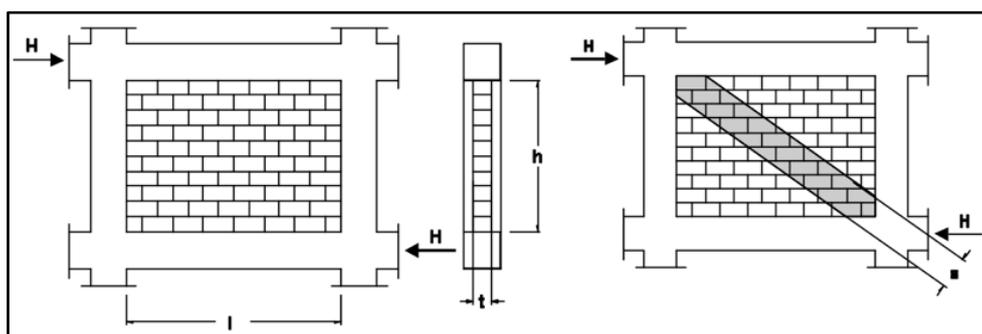


Figura 9 – Modello del puntone equivalente.

Tale puntone deve avere lo spessore t della muratura e larghezza s uguale ad $1/10$ della lunghezza della diagonale. Si può considerare allora un sistema equivalente formato dalle travi e dai pilastri del telaio, nonché dai suddetti puntoni diagonali considerati incernierati alle estremità.

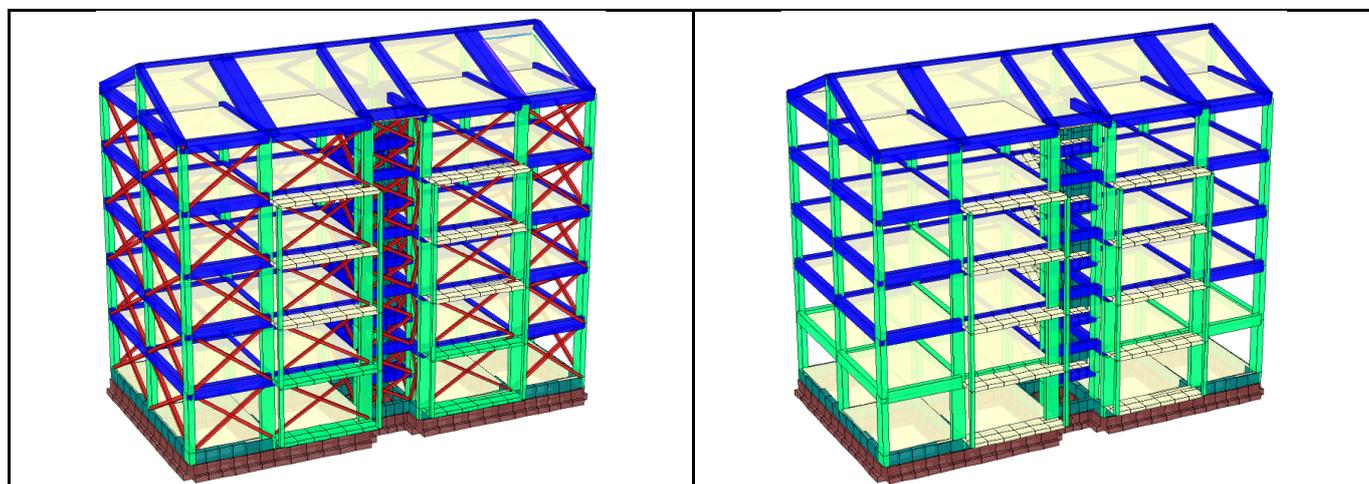


Figura 10 – Modello palazzina A, con tamponature (sinistra) e senza (a destra).

La Figura 10 mostra i modelli agli elementi finiti utilizzati per la Palazzina A nel caso in cui sono considerate le murature di tamponamento attraverso puntoni equivalenti e nel caso in cui la loro presenza è omessa.

I carichi sono stati modellati in maniera tale da rispecchiare l'effettiva condizione riscontrata sugli edifici. Per la definizione delle caratteristiche dei materiali si è fatto riferimento ai valori ottenuti dalle indagini sui materiali.

La procedura d'identificazione strutturale consiste nell'attribuire ad una serie di parametri liberi (Caratteristiche dei materiali, carichi, condizioni di vincolo) valori tali da far sì che il modello riproduca con sufficiente accuratezza alcuni parametri di controllo (frequenze, forme modali) misurati sperimentalmente.

La Figura 11 mostra le configurazioni deformate dei due diversi modelli per i primi tre modi di vibrare. La Tabella 3 riporta le frequenze rilevate sperimentalmente e quelle dei due differenti modelli agli elementi finiti.

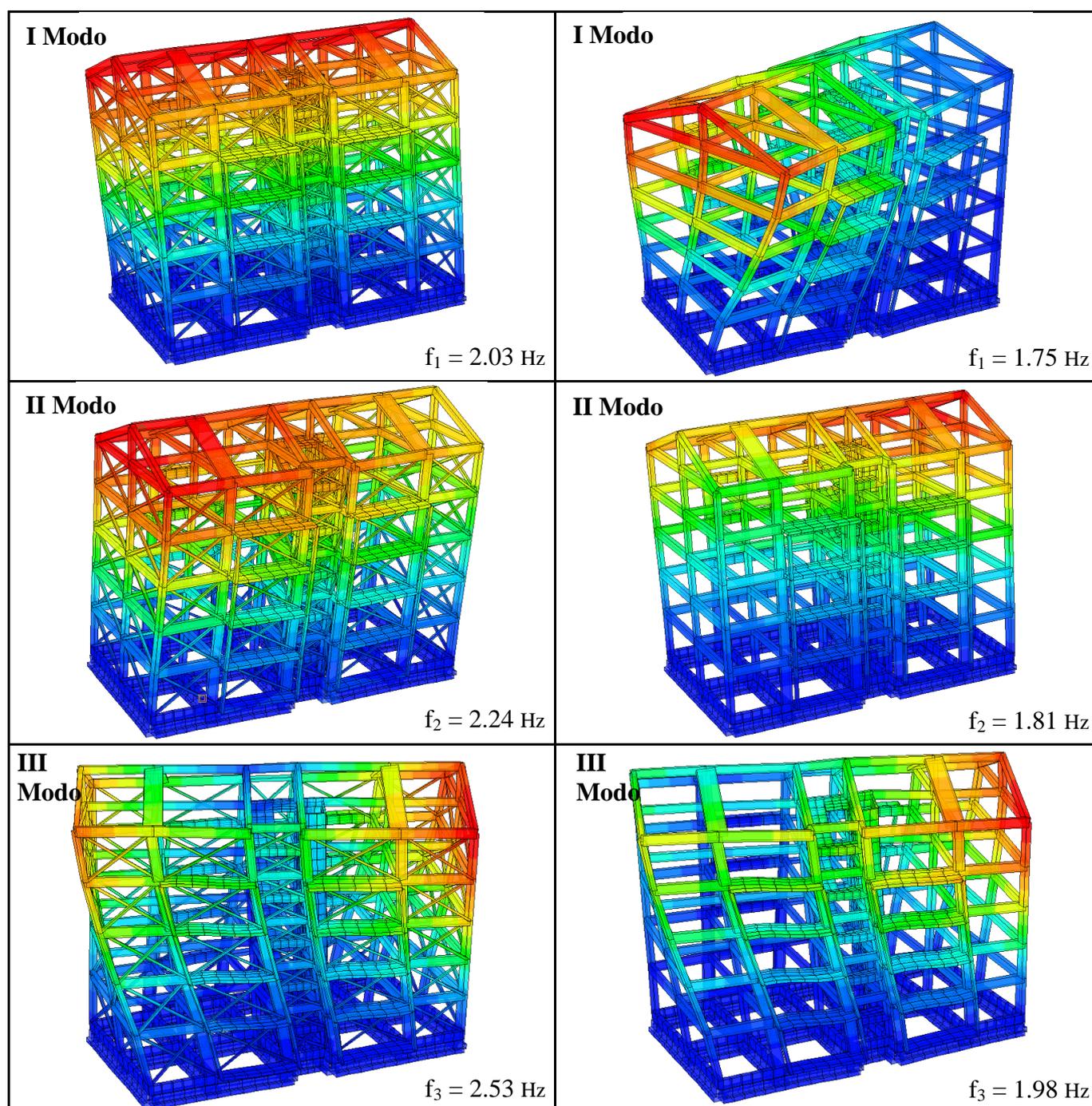
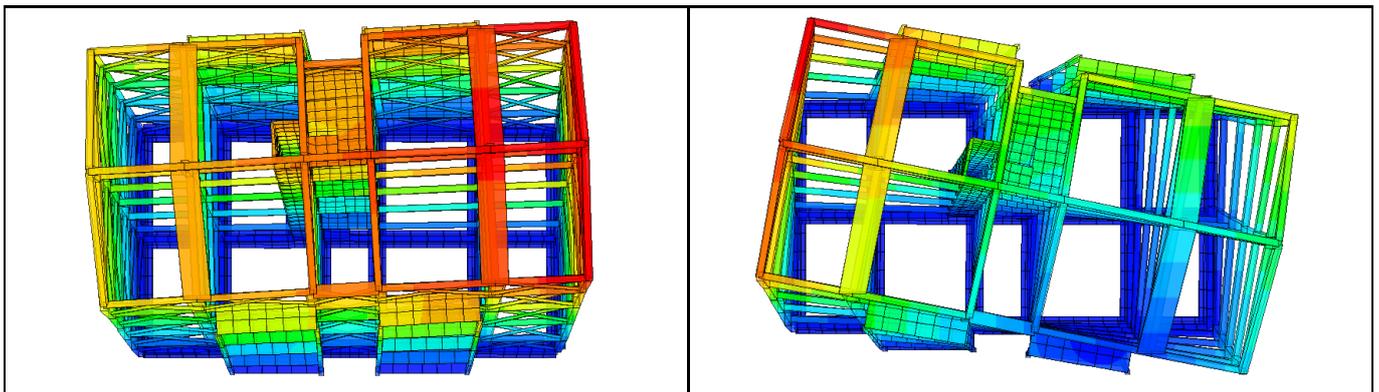


Figura 11 – Modo di vibrare, modello con tamponature (sinistra) e senza (a destra).

Tabella 3 – Frequenze palazzina A.

	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
Sperimentali	2.00	2.25	2.55
Modello con puntoni	2.03	2.24	2.53
Modello senza puntoni	1.75	1.81	1.98

Come si evince dai risultati dell'analisi modale, tenendo conto della presenza delle tamponature esterne e tarando opportunamente le caratteristiche di rigidità dei puntoni equivalenti si riesce a far sì che le prime tre frequenze del sistema siano molto vicine a quelle misurate sperimentalmente. Aumentando il modulo elastico del calcestruzzo rispetto a quello ricavato sperimentalmente per il modello privo del contributo delle tamponature, si riesce facilmente a far combaciare la prima frequenza con quella sperimentale ma altrettanto non succede per quelle superiori. Inoltre, per il modello con i puntoni equivalenti il primo modo di vibrare è caratterizzato da prevalente spostamento traslazionale in direzione “y” (lato corto), il che sembrerebbe essere confermato dal dato sperimentale; invece, il modello privo di tamponamenti possiede come primo modo quello torsionale. Questo tipo di comportamento è giustificato dalla distribuzione in pianta delle rigidità strutturali; infatti, il nucleo scala e il vano ascensore tendono a far assumere alla struttura un comportamento a nucleo e quindi soggetto a moti di tipo torsionale; la presenza delle tamponature, soprattutto di quelle più esterne, regolarizza la risposta strutturale facendone prediligere il modo traslazionale a quello torsionale.

**Figura 12 – Modo 1 vista Z, modello con tamponature (sinistra) e senza (a destra).**

Analoga procedura e le stesse considerazioni sono state fatte per la palazzina B, per la quale, dalla taratura del modello FEM, si sono ottenute le seguenti frequenze.

Tabella 4 – Frequenze palazzina B.

	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]
Sperimentali	1.80	2.20	2.50
Modello FEM	1.91	2.09	2.63

5. CONCLUSIONI

Il lavoro esemplifica, con riferimento ad edifici per civile abitazione in c.a., la metodologia per la validazione di un modello di calcolo necessario al fine della formulazione di un giudizio sulla sicurezza e stabilità di opere a seguito di un'accertata non conformità in fase di collaudo. Considerazioni legate alla caratterizzazione del

comportamento strutturale, statico e dinamico, evidenziano l'importanza delle indagini dinamiche.

BIBLIOGRAFIA

[1] D.J. Ewins, **Modal Testing: Theory and Practice**. John Wiley & Sons Inc, USA, 1984.

[2] Anil K. Chopra, **Dynamics of Structures**. Prentice-Hall, _New Jersey, 2001.

[3] DM 14 gennaio 2008, **Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni**. (GU 4 febbraio 2008, n.29, SO n.30).

[4] Circolare 2 febbraio 2009 n.617, **Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M 14 gennaio 2008**. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

[5] Circolare 10 aprile 1997 n.65/AA.GG., **Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni in zona sismica" di cui al D.M 16 gennaio 1996**. Ministero dei Lavori Pubblici (GU 28 aprile 1997, SO n.97).