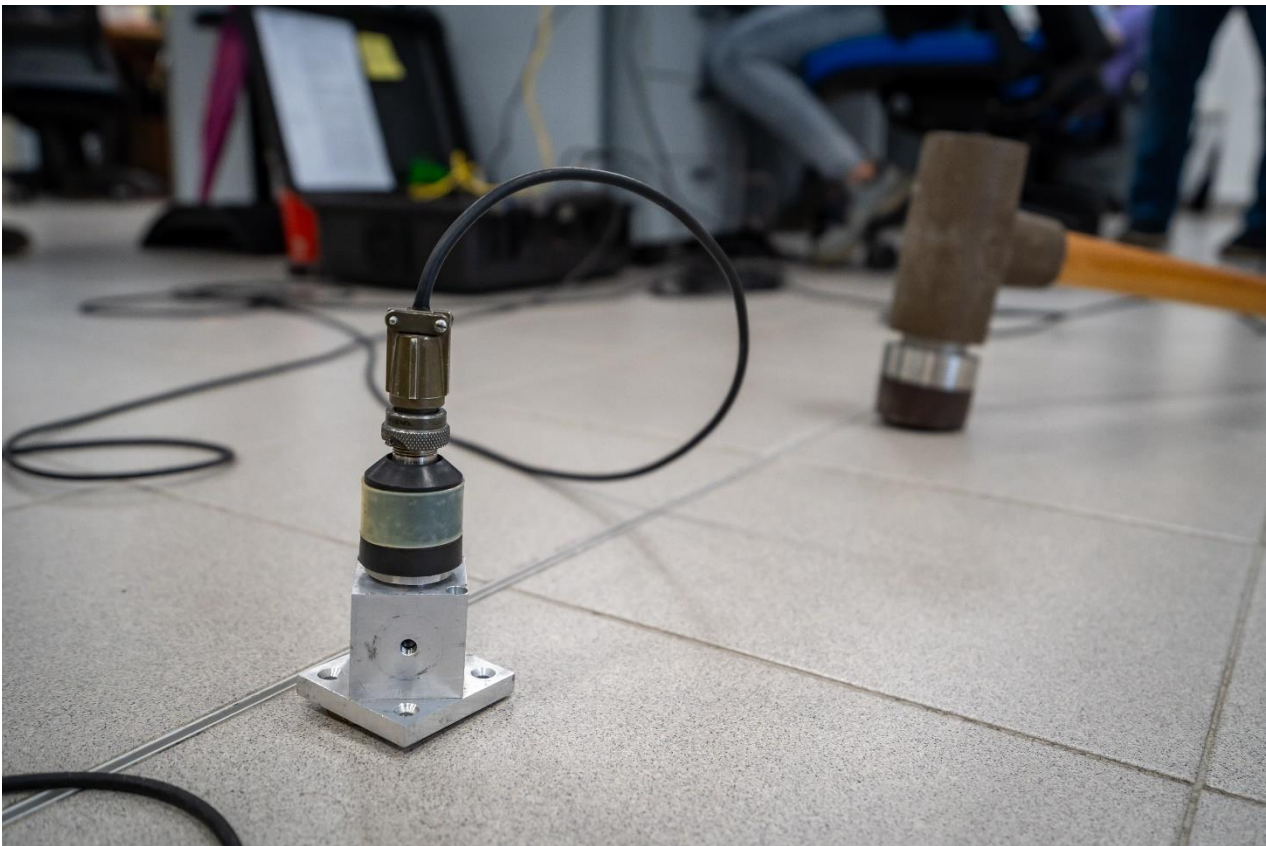


PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DINAMICA SU SOLAI A SBALZO

LA CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI SOLAI A SBALZO PRIMA E DOPO L'ESECUZIONE DI UN INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO

Vincenzo Giannetto – Ingegnere - Legale Rappresentante IndaginiStrutturalisrl

Marika Volpe – Ingegnere – IndaginiStrutturalisrl



PREMESSA

Il presente articolo ha l'obiettivo di illustrare lo studio eseguito da **IndaginiStrutturalisrl** per la caratterizzazione dinamica di quattro solai a sbalzo, distinti in due tipologie in base alla condizione di vincolo e alla configurazione geometrica, sui quali è stato previsto un consolidamento strutturale.

Lo studio, infatti, ha previsto due fasi, una **ante-operam** e una **post-operam** al fine di valutare e quantificare l'efficacia dell'intervento di consolidamento eseguito.

Le indagini dinamiche sono state svolte per mezzo di prove EMA (Experimental Modal Analysis) utilizzando, quindi, la procedura Input-Output e misurando i valori accelerometrici generati dalle vibrazioni indotte da una mazza strumentata.

Dalle analisi in termini di frequenza sono state ottenute le frequenze proprie di vibrazione delle singole strutture e le forme modali associate; ciò ha permesso di costruire un raffinato modello FEM, tarato sui risultati sperimentali.



Fig1 – Esecuzione prova dinamica con martello strumentato

GENERALITÀ

L'analisi dinamica si pone come obiettivo fondamentale la possibilità di:

- valutare la risposta della struttura sottoposta a forzanti esterne;
- verificare un modello numerico di previsione del comportamento dinamico.

Con analisi di caratterizzazione dinamica s'intende quel processo sperimentale che consente di:

- ricavare i parametri dinamici propri della struttura (pulsazioni, coefficienti di smorzamento e deformate)
- mettere a punto un modello numerico della struttura.

La sperimentazione dinamica viene condotta in modo distinto a seconda degli obiettivi richiesti alla sperimentazione stessa.

Convalida del modello numerico: si ricerca una valutazione precisa delle frequenze fondamentali ed una descrizione delle deformate modali sufficiente a identificare il modo di vibrare. Per i coefficienti di smorzamento in generale non è possibile un confronto con i valori ottenuti da una previsione numerica, ma solo una verifica con delle stime di massima.

Ricerca delle differenze numerico/sperimentali: si vuole ottenere un'identificazione delle cause che hanno portato a differenze tra sperimentazione e valutazione numerica e si vuole arrivare ad un aggiornamento del modello numerico; si richiede in più, rispetto al caso precedente, una valutazione accurata delle deformate modali ed anche la valutazione di un numero più elevato di modi fondamentali.

Si farà in seguito riferimento alla tecnica d'analisi modale che riguarda la determinazione delle funzioni di risposta in frequenza (FRF) mediante l'eccitazione della struttura in un solo punto e la rilevazione dell'output in un altro punto di misura: la sperimentazione porta direttamente ad un modello di risposta in termini di funzioni di risposta in frequenza. Dalla misura di un numero opportuno di funzioni di risposta in frequenza si può passare ad un modello modale ed anche, entro certi limiti, ad un modello spaziale.

Le FRF si possono misurare a partire da prove di analisi dinamica con eccitazione di tipo impulsivo; si tratta di calcolare le trasformate di Fourier dei segnali di ingresso ed uscita ed ottenere le FRF dal rapporto di queste funzioni. Nel caso di strutture a più ingressi e più uscite si ha:

$$H_{ij}(\omega) = X_i(\omega)/F_j(\omega)$$

Da un punto di vista numerico si procede al calcolo delle trasformate di Fourier dei segnali d'ingresso e di risposta con le trasformate discrete di Fourier, un procedimento numerico classico che viene indicato con FFT (Fast Fourier Transform): questo procedimento richiede che il segnale venga forzatamente trattato come un segnale periodico.

Il sistema di eccitazione può avere caratteristiche diverse ma in genere si tratta di uno **shaker** o di un **martello** con cella di carico; nel caso del martello con cella di carico la sperimentazione è più semplice e rapida, con minimi effetti di alterazione della misura. Tuttavia, nel caso di strutture di grandi dimensioni, può non essere possibile dare l'energia sufficiente per l'eccitazione di tutta la struttura il che può condurre alla necessità di:

- utilizzare grandi sistemi di eccitazione (vibroline a masse eccentriche o attuatori cilindrici oleodinamici) che possono risultare difficili da movimentare
- adottare altre tecniche d'analisi in cui non è richiesta la presenza della forzante (Output Only).

Le grandezze che si misurano all'uscita sono accelerazioni e a tale scopo si utilizzano sensori accelerometrici piezoelettrici ad elevata sensibilità e precisione. I dati vengono acquisiti mediante apposite centraline e trattati con un software dedicato di propria realizzazione.

Lo spettro relativo alla forzante del martello è pressoché piatto in quanto l'impulso generato dal martello è assimilabile ad un Delta di Dirac, pertanto il martello, oltre a svolgere un ruolo di forzante dell'eccitazione assolve, grazie alla presenza della cella di carico piezoelettrica in prossimità della punta, un ruolo di normalizzatore che consente di calcolare con facilità la funzione di trasferimento $H_{ij}(\omega)$ intesa come rapporto tra gli spettri di risposta e lo spettro della forzante.

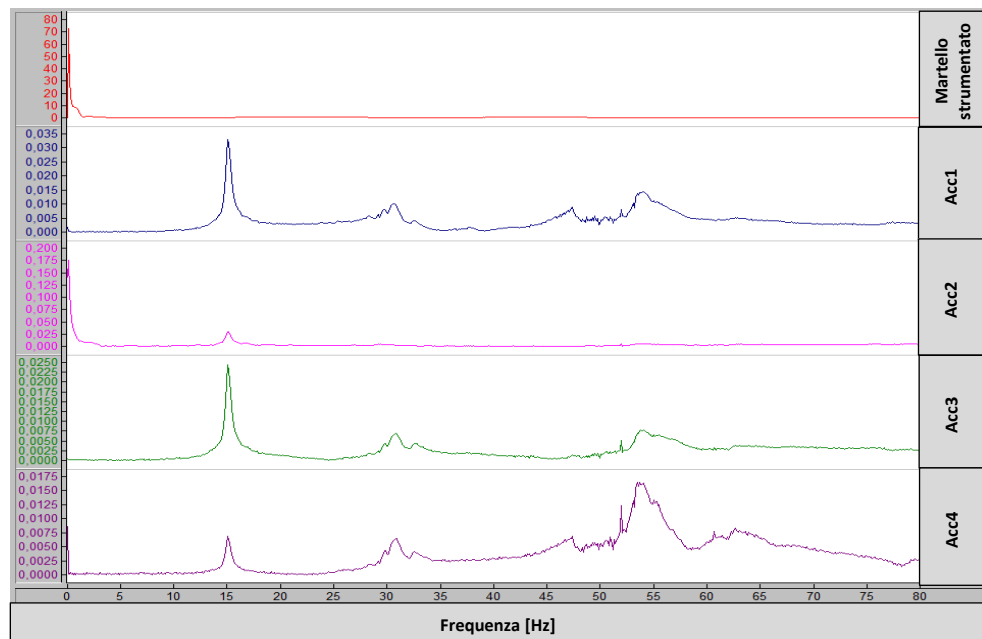


Fig4 – Esempio accelerazioni nel dominio delle frequenze

Il risultato di questo rapporto fornisce una risposta complessa costituita dal modulo e dalla fase: una componente vettoriale reale ed una immaginaria. Dal modulo della FRF si ricavano, con il metodo dei picchi, le frequenze modali così come riportato nel seguito.

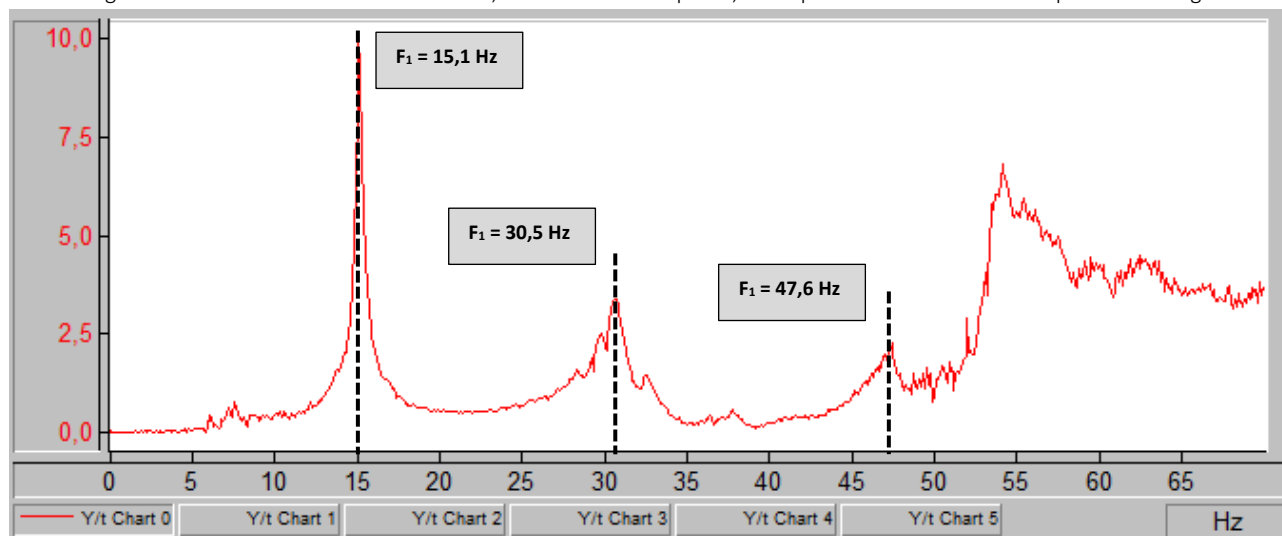


Fig5 – Real part e Imaginary part della FRF

In tabella si riportano le frequenze modali ricavate per ogni balcone esaminato:

Struttura	Modo I [Hz]	Modo II [Hz]	Modo III [Hz]
Balcone Tipologia I, Piano secondo	15,1	30,5	47,6
Balcone Tipologia I, Piano terzo	14,4	27,5	46,5
Balcone Tipologia II, Piano secondo	11,3	18,1	31,2
Balcone Tipologia II, Piano terzo	10,3	16,9	29,7

Dallo studio delle componenti reali ed immaginarie sono state dedotte le forme modali per ogni singola struttura esaminata. Le deformate modali misurate nella sperimentazione sono in generale delle deformate modali complesse e per un confronto con le deformate modali numeriche che, se ottenute da un modello senza smorzamento o con smorzamento proporzionale, sono reali si devono riportare in termini di deformate modali reali. Un procedimento molto semplice consiste nel moltiplicare il modulo di ogni componente per il seno dell'angolo di fase; questo porta a risultati accettabili se il modo misurato sperimentalmente è solo debolmente complesso. Nel caso in cui la sperimentazione individui delle deformate modali fortemente complesse si può utilizzare la seguente relazione:

$$\Phi_R = Re(\Phi_C) + Im(\Phi_C)[Re(\Phi_C)]^{-1}Im(\Phi_C) \quad Eq1$$

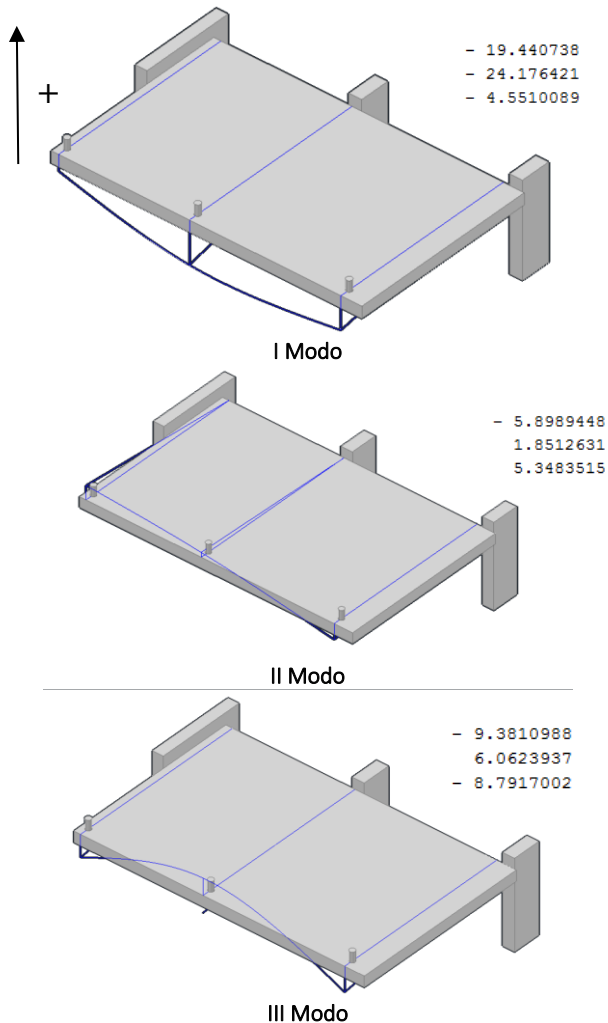
In sintesi, la matrice dei modi reali, da utilizzare per il confronto con i modi numerici, si può esprimere in termini della parte reale e della parte immaginaria dei modi complessi ottenuti in via sperimentale.

In particolare, sono state ottenute per ciascuno dei balconi tre matrici contenenti i valori scalati per la realizzazione delle forme modali sperimentali per ogni singolo modo. (I valori presenti sono stati generati dalla relazione Eq1 a meno di un fattore di scala scelto in fase di calcolo; essi rappresentano dei parametri che hanno consentito di definire la forma modale e sono differenti dagli spostamenti modali ottenuti dal modello FEM a meno di una costante di moltiplicazione)

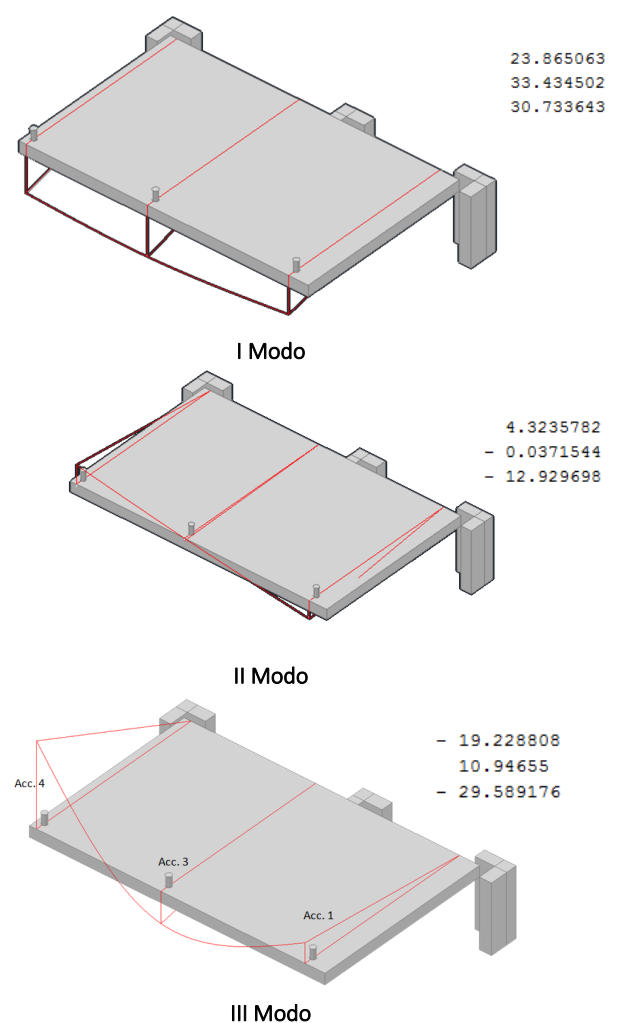
I tipologia piano terzo			I tipologia piano secondo		
- 19.440738	- 5.8989448	- 9.3810988	- 14.29417	- 16.03758	- 26.476074
- 24.176421	1.8512631	6.0623937	- 27.784366	4.256799	25.33491
- 4.5510089	5.3483515	- 8.7917002	- 11.010745	22.054553	- 24.3361723
II tipologia piano terzo			II tipologia piano secondo		
25.465384	58.221669	- 14.216786	23.865063	4.3235782	- 19.228808
130.51073	61.729379	31.666335	33.434502	- 0.0371544	10.94655
115.48145	- 12.635793	- 99.917691	30.733643	- 12.929698	- 29.589176

Di seguito si riportano le forme modali per le due tipologie di balcone.

MODI DI VIBRARE I TIPOLOGIA



MODI DI VIBRARE II TIPOLOGIA



Calibrazioni del modello FEM

La realizzazione del modello FEM è stata necessaria al fine di valutare che gli spostamenti indotti dal carico distribuito in condizioni d'esercizio fossero compatibili con quelli previsti dalla normativa e che le sollecitazioni riscontrate in prossimità degli incastri risultassero minori rispetto a quelle previste da progetto; a tale scopo è stato necessario produrre due modelli, uno per ciascuna tipologia di balcone.

La realizzazione del modello FEM ha comportato delle semplificazioni geometriche; infatti, l'intero solaio è stato modellato mediante elementi Shell a piastra. Il vincolo è stato modellato attribuendo incastri perfetti in corrispondenza delle strutture portanti verticali (pilastri e setti), semincastri ad elasticità nota ai nodi in prossimità di ogni singolo travetto, cerniere nei nodi rimanenti.

La taratura del modello è stata basata sia sulle frequenze che sulle forme modali; una volta definiti i vincoli, e le rispettive costanti elastiche, sono stati effettuati dei piccoli aggiustamenti variando di poco la densità del materiale. La semplificazione della struttura del solaio in soletta piena in cls ha necessitato della valutazione dello spessore equivalente e della densità media equivalente; il primo è stato calcolato imponendo l'uguaglianza tra il momento d'inerzia della sezione reale e il momento d'inerzia di una porzione unitaria della piastra; la seconda è stata valutata effettuando prima una media ponderata delle densità in una porzione di solaio reale unitario e successivamente una proporzione tra lo spessore del solaio reale e lo spessore equivalente della piastra. La sezione del solaio è a doppia soletta: una intradossale e l'altra estradossale così come è mostrato nella figura a destra; i parametri geometrici sono stati calcolati in riferimento ad una larghezza pari all'interasse tra i travetti.

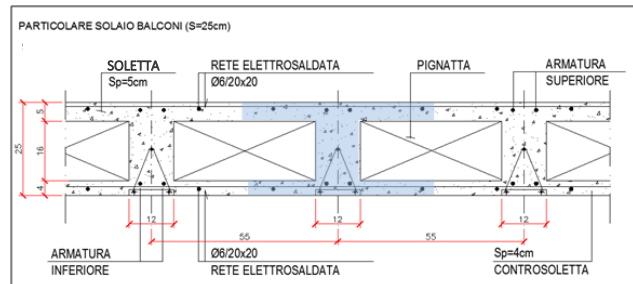


Fig6 – Sezione solaio balconi

Grandezza	Simbolo	Quantità	U.M.
Larghezza di riferimento	b	0,55	m
Altezza complessiva solaio	h	0,25	m
Luce a sbalzo	L	3,3	m
Modulo Elastico	E	35000	N/mm ²
Momento d'inerzia	I	56593	cm ⁴
Densità equivalente	$\rho_{equivalente}$	1449	kg/m ³
Densità lineare	$\rho_{lineare}$	199,2375	Kg/m
Spessore piastra equivalente	$S_{equivalente}$	21,65	cm

A seguire, i due modelli FEM con indicazione delle tipologie di vincolo

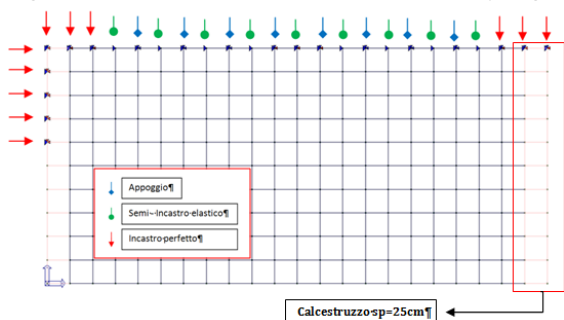


Fig7 – Modello FEM – Tipologia 1

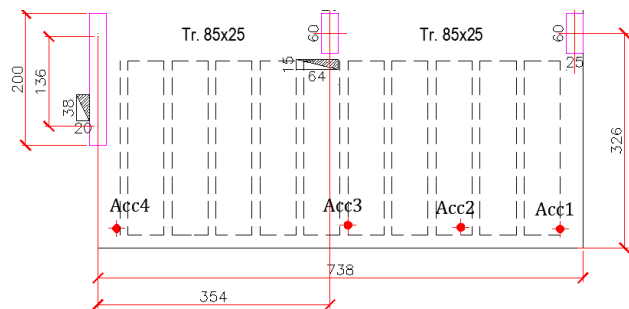


Fig8 – Pianta Tipologia 1

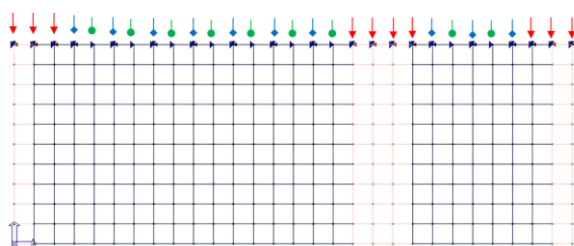


Fig9 – Modello FEM – Tipologia 2

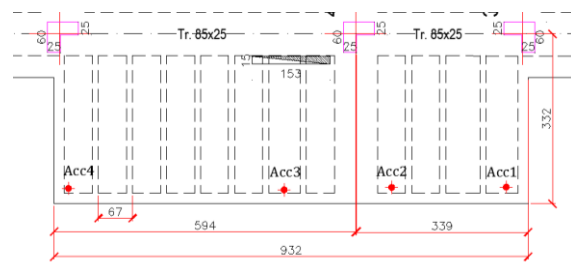


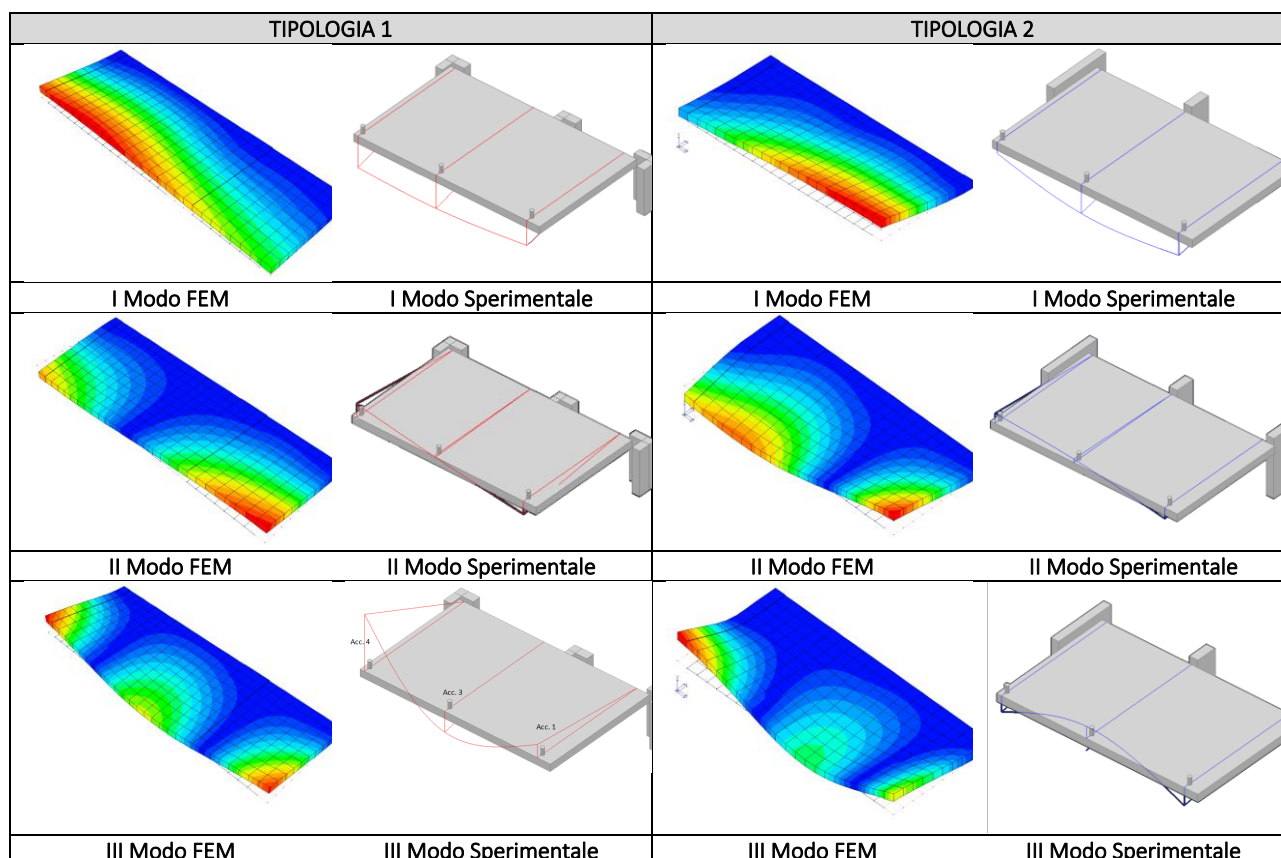
Fig10 – Pianta Tipologia 2

Si riassumono per ogni modello le condizioni di vincolo e il peso equivalente adottati nel calcolo

Struttura	Costante elastica k [KN/mm] (in funzione della tg dell'angolo di rotazione)	Peso specifico equivalente γ [kg/m ³]
Tipologia 1 piano terzo	4*10 ⁵	14
Tipologia 1 piano secondo	4*10 ⁵	16
Tipologia 2 piano terzo	1*10 ⁶	14
Tipologia 2 piano secondo	1*10 ⁶	16

Struttura	Frequenze sperimentali			Frequenze modellazione FEM			Correlazione (%)		
	f1	f2	f3	f1	f2	f3	f1	f2	f3
Tipologia 1 piano terzo	15,1	29,5	30,3	15,2	27,23	46,25	0,7	8,0	2,9
Tipologia 1 piano secondo	14,4	27,5	29,8	14,34	25,86	44,23	0,4	6,1	5,0
Tipologia 2 piano terzo	11,3	18,1	31,2	11,08	17,51	28,67	2,0	3,3	8,5
Tipologia 2 piano secondo	10,3	16,5	29,9	10,42	16,43	27,08	1,2	0,4	9,9

Nelle pagine successive si riportano i modi di vibrare ricavati dal modello tridimensionale agli elementi finiti affiancato al modello tridimensionale ricavato sperimentalmente.



Calcolo frecce da modello FEM

Tipologia 1 - Secondo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.17 R =6.980e-04 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.17 rx=6.851e-04 ry=1.333e-04 rz=0.0
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4500 daN
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.46 R =1.940e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.46 rx=1.893e-03 ry=4.245e-04 rz=0.0
Spostamento relativo del punto di controllo pari a 4,60 – 1,70=2,9 mm
Tipologia 1 – Terzo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.20 R =7.871e-04 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.20 rx=7.730e-04 ry=1.484e-04 rz=0.0
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4500 daN
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.49 R =2.051e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.49 rx=2.051e-03 ry=2.185e-05 rz=0.0
Spostamento relativo del punto di controllo pari a 4,90 – 2,00=2,90 mm
Tipologia 2 – Secondo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.21 R =8.458e-04 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.21 rx=8.456e-04 ry=1.728e-05 rz=0.0
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4000 daN
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.51 R =2.213e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.51 rx=2.150e-03 ry=5.230e-04 rz=0.0
Spostamento relativo del punto di controllo pari a 5,10 – 2,10=3,00 mm
Tipologia 2 – Terzo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.35 R =1.314e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.35 rx=1.291e-03 ry=-2.400e-04 rz=0.0
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4500 daN
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni D =0.69 R =2.660e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.69 rx=2.656e-03 ry=-1.311e-04 rz=0.0
Spostamento relativo del punto di controllo pari a 6,90 – 3,50=3,40 mm

In tabella si riportano i risultati della prova di carico simulata con il modello FEM tarato attraverso i parametri dinamici.

Struttura	Spostamento teorico a struttura scarica [mm]	Carico di prova [daN]	Spostamento teorico a struttura caricata [mm]	Spostamento relativo [mm]
Balcone Tipologia 1, Piano secondo	4,60	4500	1,70	2,90
Balcone Tipologia 1, Piano terzo	4,90	4500	2,00	2,90
Balcone Tipologia 2, Piano secondo	5,10	4000	2,10	3,00
Balcone Tipologia 2, Piano terzo	6,90	4500	3,50	3,40

INTERVENTO DI RINFORZO

I balconi sono stati sottoposti ad un intervento di rinforzo strutturale durante il quale sono state ricavate delle travi in calcestruzzo armato rimuovendo alcune file di pignatte in direzione longitudinale rispetto all'orditura del solaio; la nuova struttura è stata realizzata assicurandone la collaborazione con la struttura preesistente mediante l'impiego di barre in acciaio "inghisate" con resine bi-componenti e grazie all'ausilio di resine speciali per l'adesione calcestruzzo-calcestruzzo.



Fig11 – Intervento di rinforzo solai

POST-OPERAM: REGISTRAZIONE DEI DATI DI PROVA

Analogamente a quanto effettuato durante la prima fase di indagine, sono state ripetute le stesse operazioni di acquisizione dati mediante analisi dinamica di tipo EMA. Sono state quindi ricavate, dal modulo della FRF, con il metodo dei picchi, le frequenze modali. Di seguito, si riportano in tabella le frequenze modali ricavate per ogni balcone esaminato e i risultati uscenti dallo studio delle componenti reali ed immaginarie si deducono le forme modali per ogni singola struttura:

Struttura	Modo I [Hz]	Modo II [Hz]	Modo III [Hz]
Balcone Tipologia 1, Piano secondo	18,6	34,1	52,1
Balcone Tipologia 1, Piano terzo	16,2	32,0	49,0
Balcone Tipologia 2, Piano secondo	14,9	20,4	35,3
Balcone Tipologia 2, Piano terzo	12,7	19,1	32,5

I tipologia piano secondo

- 32.334534 24.044149 - 17.529132
 - 37.380406 - 7.4098987 13.850694
 - 51.465553 - 53.769755 - 85.809448
 - 103.10915 - 66.265407 - 41.134343

II tipologia piano secondo

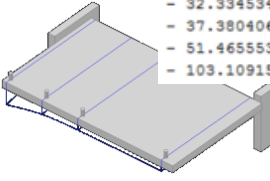
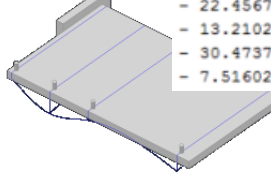
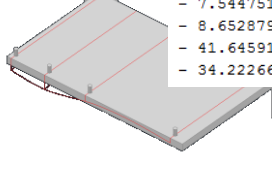
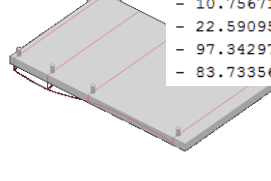
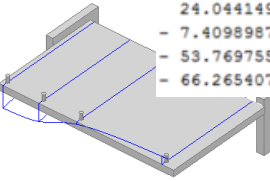
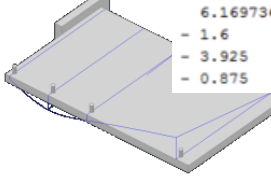
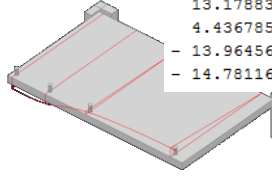
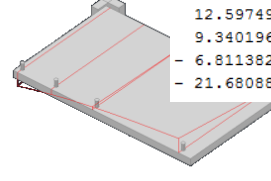
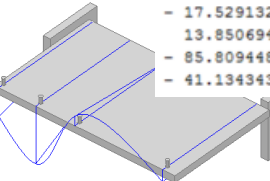
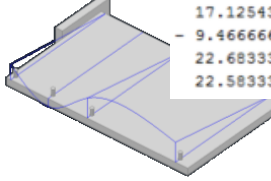
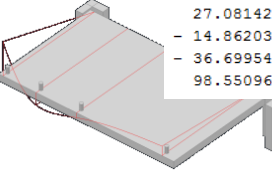
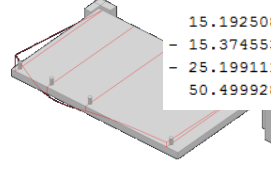
- 7.5447513 13.178835 27.081427
 - 8.6528791 4.4367859 - 14.862033
 - 41.645916 - 13.964561 - 36.699541
 - 34.22266 - 14.781169 98.550961

I tipologia piano terzo

- 22.456714 6.1697368 17.125439
 - 13.210256 - 1.6 - 9.4666667
 - 30.473718 - 3.925 22.683333
 - 7.5160256 - 0.875 22.583333

II tipologia piano terzo

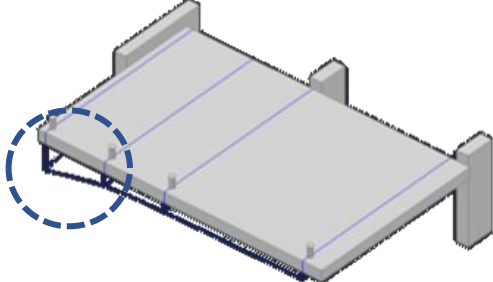
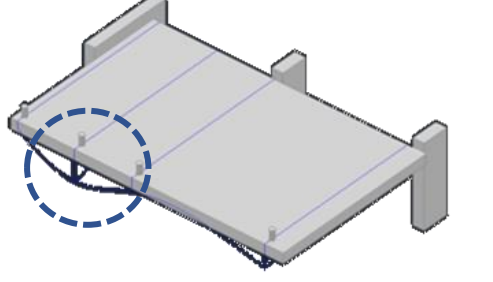
- 10.756719 12.597495 15.192508
 - 22.590953 9.3401966 - 15.374553
 - 97.342977 - 6.8113829 - 25.199111
 - 83.733569 - 21.680885 50.499928

TIPOLOGIA 1		TIPOLOGIA	
Secondo piano	Terzo piano	Secondo piano	Terzo piano
 <ul style="list-style-type: none"> - 32.334534 - 37.380406 - 51.465553 - 103.10915 	 <ul style="list-style-type: none"> - 22.456714 - 13.210256 - 30.473718 - 7.5160256 	 <ul style="list-style-type: none"> - 7.5447513 - 8.6528791 - 41.645916 - 34.22266 	 <ul style="list-style-type: none"> - 10.756719 - 22.590953 - 97.342977 - 83.733569
I Modo			
 <ul style="list-style-type: none"> 24.044149 - 7.4098987 - 53.769755 - 66.265407 	 <ul style="list-style-type: none"> 6.1697368 - 1.6 - 3.925 - 0.875 	 <ul style="list-style-type: none"> 13.178835 4.4367859 - 13.964561 - 14.781169 	 <ul style="list-style-type: none"> 12.597495 9.3401966 - 6.8113829 - 21.680885
II Modo			
 <ul style="list-style-type: none"> - 17.529132 13.850694 - 85.809448 - 41.134343 	 <ul style="list-style-type: none"> 17.125439 - 9.4666667 22.683333 22.583333 	 <ul style="list-style-type: none"> 27.081427 - 14.862033 - 36.699541 98.550961 	 <ul style="list-style-type: none"> 15.192508 - 15.374553 - 25.199111 50.499928
III Modo			

Ricalibrazione modello FEM

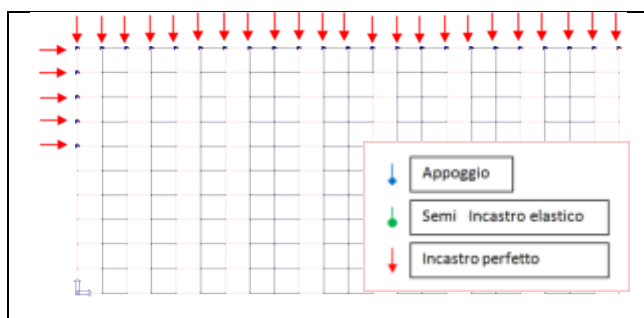
Dai dati sperimentali registrati durante il secondo intervento è stato possibile ricostruire le deformate modali delle strutture associate alle frequenze di vibrazione ricavate dalle funzioni di risposta.

I lavori di rinforzo eseguiti hanno determinato una variazione dell'assetto strutturale pre-intervento e in particolar modo, sia una variazione in termini di frequenza che di deformate modali; mentre i balconi appartenenti alla Tipologia 2 hanno presentato un comportamento dinamico regolare diversamente, i balconi appartenenti alla Tipologia 1, seppur manifestando un miglioramento della rigidità strutturale in termini di frequenza, hanno denotato delle deformate non dinamicamente regolari; infatti, la presenza di un setto laterale avrebbe dovuto determinare un effetto irrigidente sull'intero impalcato che invece è sembrato non esserci (piano 2). Inoltre, è stato rilevato un comportamento non omogeneo tra una porzione e l'altra di solaio (piano 3). Lo studio delle deformate modali attraverso un modello FEM calibrato sulle nuove frequenze rilevate, ha consentito quindi di confermare quanto appena detto.

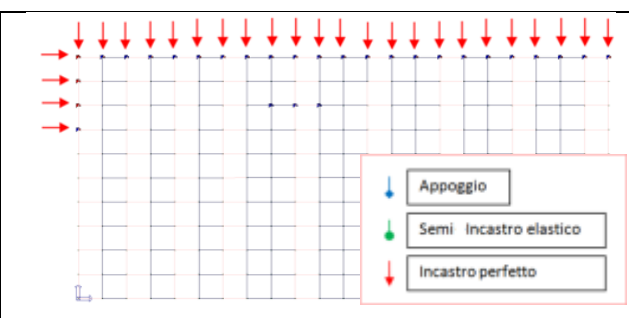
	
I Modo Balcone Tipologia I - Piano 2, Zona con comportamento dinamicamente non regolare	I Modo Balcone Tipologia I - Piano 3 Porzione di minore rigidità flessionale.

Il modello FEM è stato realizzato sulla base di quello precedente apportando alcune modifiche nell'assetto geometrico e nei vincoli. In particolare, sono state riprodotte schematicamente le travi in calcestruzzo e sono stati introdotti vincoli del tipo incastro. La taratura del modello è stata basata principalmente sulle frequenze tenendo comunque in considerazione che fossero rispettate le forme modali; una volta definiti i vincoli, e le rispettive costanti elastiche, sono stati effettuati dei piccoli aggiustamenti variando di poco la densità del materiale.

Struttura	Frequenze Sperimentali (Hz)			Frequenze modellazione FEM (Hz)			Scostamento percentuale (%)		
	f1	f2	f3	f1	f2	f3	f1	f2	f3
Tipologia 1 piano secondo	18,6	34,1	52,1	18,9	26,9	46,1	-1,6	23,6	12,2
Tipologia 1 piano terzo	16,2	32,0	49,0	16,5	26,1	45,1	-1,8	20,3	8,3
Tipologia 2 piano secondo	14,9	20,4	35,3	15,1	19,6	31,1	-1,3	4,0	12,7
Tipologia 2 piano terzo	12,7	19,1	32,5	12,8	17,5	28,4	-0,8	8,7	13,5

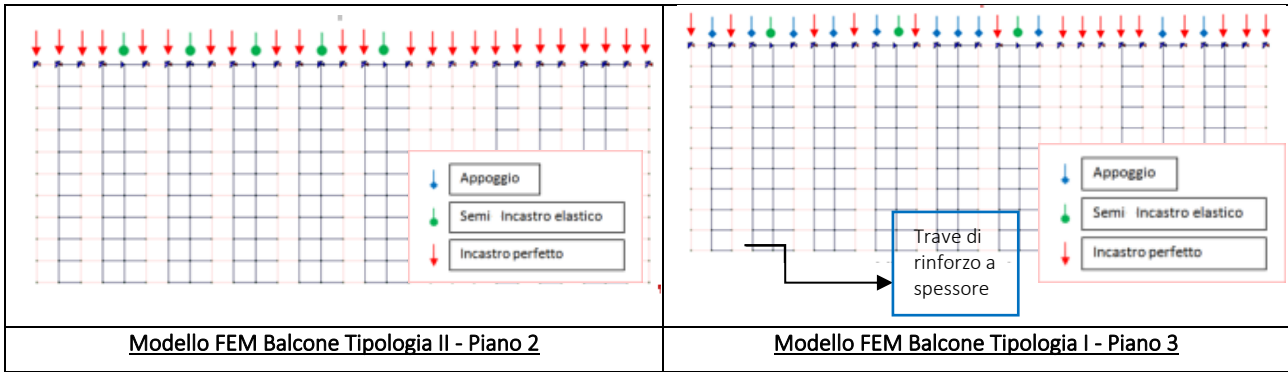


Modello FEM Balcone Tipologia I - Piano 2



Modello FEM Balcone Tipologia I - Piano 3

TIPOLOGIA 1			
Piano Secondo		Piano Terzo	
I Modulo FEM	I Modulo Sperimentale	I Modulo FEM	I Modulo Sperimentale
II Modulo FEM	II Modulo Sperimentale	II Modulo FEM	II Modulo Sperimentale
III Modulo FEM	III Modulo Sperimentale	III Modulo FEM	III Modulo Sperimentale



TIPOLOGIA 2			
Piano Secondo		Piano Terzo	
I Modo FEM	I Modo Sperimentale	I Modo FEM	I Modo Sperimentale
II Modo FEM	II Modo Sperimentale	II Modo FEM	II Modo Sperimentale
III Modo FEM	III Modo Sperimentale	III Modo FEM	III Modo Sperimentale

Calcolo frecce da modello FEM

Tipologia 1 - Secondo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni $D = 8.924e-02$ $R = 4.575e-04$ $dx=0.0$ $dy=0.0$ $dz=-8.924e-02$ $rx=4.528e-04$ $ry=6.569e-05$ $rz=0.0$
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4500 daN
<input checked="" type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni $D = 0.21$ $R = 1.141e-03$ $dx=0.0$ $dy=0.0$ $dz=-0.21$ $rx=1.117e-03$ $ry=2.371e-04$ $rz=0.0$
Spostamento relativo del punto di controllo pari a $2,1 - 0,90 = 1,2$ mm

Tipologia 1 – Terzo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni ↳ D =0.13 R =5.904e-04 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.13 rx=5.866e-04 ry=6.719e-05 rz=0.0
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4500 daN
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni ↳ D =0.30 R =1.398e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.30 rx=1.394e-03 ry=1.103e-04 rz=0.0
Spostamento relativo del punto di controllo pari a 3,00 – 1,30=1,70 mm

Tipologia 2 – Secondo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni ↳ D =0.15 R =6.802e-04 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.15 rx=6.802e-04 ry=9.204e-06 rz=0.0
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4000 daN
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni ↳ D =0.40 R =1.868e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.40 rx=1.849e-03 ry=-2.669e-04 rz=0.0
Spostamento relativo del punto di controllo pari a 4,00 – 1,50=2,50 mm

Tipologia 2 – Terzo piano
Deformata struttura con solo peso proprio
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni ↳ D =0.26 R =1.035e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.26 rx=1.023e-03 ry=-1.551e-04 rz=0.0
Deformata struttura con applicazione del carico di prova simulato pari a 4500 daN
<input type="checkbox"/> Spostamenti e rotazioni ↳ D =0.50 R =2.056e-03 dx=0.0 dy=0.0 dz=-0.50 rx=2.052e-03 ry=-1.264e-04 rz=0.0
Spostamento relativo del punto di controllo pari a 5,00 – 2,60=2,40 mm

In tabella si riportano i risultati della prova di carico simulata con il modello FEM tarato attraverso i parametri dinamici, confrontati con quelli riscontrati nel corso della prova di carico reale effettuata.

Struttura	Spostamento teorico a struttura scarica [mm]	Carico di prova [daN]	Spostamento teorico a struttura caricata [mm]	Spostamento relativo [mm]
Balcone Tipologia 1, Piano secondo	0,90	4500	2,10	1,20
Balcone Tipologia 1, Piano terzo	1,30	4500	3,00	1,70
Balcone Tipologia 2, Piano secondo	1,50	4000	4,00	2,50
Balcone Tipologia 2, Piano terzo	2,60	4500	5,00	2,40

Da quanto riscontrabile dal confronto dei risultati tra il modello teorico e la realtà si nota come le differenze siano sensibilmente basse.

RISULTATI

Di seguito si riportano i risultati in termini di frequenza e di spostamento delle strutture esaminate pre e post-intervento di rinforzo evidenziando gli effetti di miglioramento che sono stati riscontrati.

Risultati di prova pre-intervento

Struttura	Modo I [Hz]	Modo II [Hz]	Modo III [Hz]
Balcone Tipologia I, Piano secondo	15,1	30,5	47,6
Balcone Tipologia I, Piano terzo	14,4	27,5	46,5
Balcone Tipologia II, Piano secondo	11,3	18,1	31,2
Balcone Tipologia II, Piano terzo	10,3	16,9	29,7

Risultati di prova post-intervento

Struttura	Modo I [Hz]	Modo II [Hz]	Modo III [Hz]
Balcone Tipologia 1, Piano secondo	18,6	34,1	52,1
Balcone Tipologia 1, Piano terzo	16,2	32,0	49,0
Balcone Tipologia 2, Piano secondo	14,9	20,4	35,3
Balcone Tipologia 2, Piano terzo	12,7	19,1	32,5

Incrementi percentuali in termini di frequenza

Struttura	Modo I [%]	Modo II [%]	Modo III [%]
Balcone Tipologia 1, Piano secondo	21	11	9
Balcone Tipologia 1, Piano terzo	12	15	5
Balcone Tipologia 2, Piano secondo	27	12	12
Balcone Tipologia 2, Piano terzo	21	12	9

Confronto tra i parametri statistici

Struttura	Carico di prova [daN]	Spostamento teorico PRIMA del rinforzo [mm]	Spostamento teorico DOPO il rinforzo [mm]	Riduzione in termini di spostamento [mm]
Balcone Tipologia 1, Piano secondo	4500	2,90	1,20	-1,7
Balcone Tipologia 1, Piano terzo	4500	2,90	1,70	-1,2
Balcone Tipologia 2, Piano secondo (prova nell'angolo)	4000	3,00	2,50	-0,5
Balcone Tipologia 2, Piano terzo	4500	3,40	2,40	-1,00

CONCLUSIONI

I dati rilevati nel corso della prima fase d'indagine, confrontati con quelli della seconda fase, hanno permesso di valutare l'efficacia del miglioramento atteso.

A tal fine sono stati confrontati i modelli ottenuti nelle 2 fasi di sperimentazione in termini di frequenza e di spostamenti, questi ultimi ottenuti simulando l'applicazione del carico previsto da progetto.

La realizzazione di un modello FEM calibrato grazie alla prova dinamica ha consentito di calcolare con una precisione accettabile gli spostamenti di ogni la struttura.

Le prove dinamiche, infatti, nella normale esecuzione di un progetto di miglioramento strutturale, vengono richieste preventivamente per utilizzarle come ausilio al tecnico che deve elaborare l'intervento; infatti, partendo da un modello FEM tarato è possibile progettare degli interventi mirati che, oltre a validare l'efficacia del sistema di rinforzo, consentono di ottimizzare i costi.

In questo caso la prova dinamica è stata utilizzata come strumento di controllo che ha permesso di:

- calcolare l'efficacia dell'intervento, valutando gli spostamenti teorici generati da prove di carico simulate sul modello, prima e dopo l'intervento di rinforzo;
- confrontare gli spostamenti derivanti da una prova di carico simulata con quelli reali ottenuti mediante una prova di carico reale.

Come si può notare dai risultati è stato registrato un netto miglioramento, in termini di spostamento, in tutte le strutture esaminate pertanto, la realizzazione dell'intervento di consolidamento dei balconi ha effettivamente apportato le migliorie auspiccate in fase di progettazione.

La risposta ricercata, in merito alla quantificazione di quanto l'intervento avesse irrigidito i balconi in esame si poteva ottenere anche con delle prove di carico a contrasto ma è chiaro che l'indagine dinamica effettuata ha garantito un risparmio notevole rispetto a queste in termini di tempi, costi e forza lavoro. In aggiunta a questo, inoltre le prove dinamiche non solo hanno quantificato i benefici ottenuti dall'intervento in termini di spostamento, ma hanno anche dato risposte a quanto e come si è modificato il comportamento dei solai stessi fornendo delle informazioni che sono fondamentali nel momento in cui si necessita di una "carta d'identità" di una struttura.

L'obiettivo principe e la politica che accoglie **IndaginiStrutturalisrl** è proprio quella di pensare, a fronte di una richiesta fatta da un Committente X, alla soluzione più efficace ed efficiente, sia dal punto di vista tecnico che economico, motivo per il quale ogni intervento eseguito ha alle spalle un team di persone esperte che progetta soluzioni in grado di garantire sempre livelli di qualità elevata.