

Risposta strutturale sotto azioni statiche e dinamiche della copertura metallica del Mercato Coperto di Livorno

Prof. Ing. Maurizio Froli*, Dr. Ing. Gerardo Masiello**, Dr. Ing. Francesco Gianola***.

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Pisa

** Libero professionista in Pisa.

***von Karman Institute, Belgium..

Keywords: identificazione strutturale, sperimentazione, prove di carico,

ABSTRACT:

L'analisi del comportamento statico e dinamico di una struttura mediante modellazioni agli elementi finiti è fortemente influenzata dalle ipotesi di base sulle condizioni di vincolo, le proprietà meccaniche dei materiali ecc.. Non sempre è possibile verificare a priori la validità delle ipotesi assunte alla base del calcolo con i reali parametri che caratterizzano il comportamento statico e dinamico della struttura. Se però si dispone di informazioni sul reale comportamento della struttura allora il modello teorico può essere corretto e tarato con tecniche di *Model Updating* (Ewins, 2000). In questa nota viene presentato un esempio di identificazione dinamica nel dominio delle frequenze applicata alla copertura metallica di fine ottocento del salone centrale del Mercato coperto delle Vettovaglie di Livorno, costituita principalmente da capriate trasversali con schema statico di arco a tre cerniere e catena, poste ad un interasse costante di 5 metri.

La struttura è stata sottoposta a cicli di prove di carico statiche e dinamiche con forzante di tipo impulsivo indotta da una massa battente in caduta libera da diverse altezze. Attraverso le prove statiche sono state ricavate direttamente informazioni sul comportamento deformativi della struttura attraverso le quali è stata eseguita una prima correzione del modello FEM.

Successivamente il processo di identificazione dinamica è stato condotto con il *Peak Picking Method* (Ewins, 2000), caratterizzato dalla estrazione dei picchi che individuano le frequenze naturali dei modi propri di vibrare della struttura mediante diretta osservazione degli spettri in frequenza ricavati sperimentalmente.

Seguiranno ulteriori elaborazioni dei dati sperimentali eseguite con il metodo *MDOF Circle Fit Method* (Ewins, 2000), attraverso una preliminare valutazione della funzione complessa inerzia (FRF) che nella rappresentazione in un piano di Nyquist descrive un cerchio nell'intorno di una frequenza naturale del sistema.

1 INTRODUZIONE

L'applicazione delle tecniche di identificazione a sistemi strutturali ha conosciuto negli ultimi decenni un notevole sviluppo: l'apporto dell'identificazione strutturale risulta particolarmente importante nel monitoraggio e nell'intervento su strutture esistenti o nel collaudo di nuove costruzioni.

I risultati della sperimentazione ed il successivo processo di identificazione costituiscono la base di riferimento per costruire modelli numerici in grado di riprodurre le risposte sperimentali misurate. Generalmente, infatti, l'output del modello teorico preliminare non rispecchia il reale comportamento della struttura: le risposte che si possono ottenere con la modellazione agli elementi finiti dipendono fortemente dalle ipotesi di base assunte in termini di condizioni di vincolo, proprietà meccaniche dei

materiali costruttivi ecc. E' dunque fondamentale verificare queste ipotesi sulla scorta di informazioni disponibili sul reale comportamento della struttura, correggendo il modello in modo da minimizzare le differenze tra il comportamento teorico e quello reale. Queste correzioni vengono eseguite con tecniche dette di *Model Updating* (Ewins, 2000).

Il modello teorico, che si ottiene dopo il processo di identificazione, validato e calibrato sulla base dei dati sperimentali, può essere impiegato come realistico mezzo di analisi dello stato di sollecitazione attuale e di verifica del grado di sicurezza, nonché quale strumento di progettazione, qualora si voglia analizzare l'effetto di modifiche strutturali o variazioni delle azioni sollecitanti.

Le informazioni necessarie possono ricavarsi da prove sperimentali di tipo statico o dinamico: le prove statiche presentano l'indubbio vantaggio di ricavare informazioni sulla struttura in modo

diretto (deformata statica), con le quali è immediato correggere il modello; per contro le prove dinamiche sono in grado di fornire un numero di informazioni più elevato, ma richiedono un impegnativo lavoro di analisi a posteriori e l'impiego di tecniche avanzate di identificazione strutturale. Nella nota presente si riferisce sui risultati ottenuti a seguito dell'esecuzione di prove di carico statiche e dinamiche sulla struttura metallica di copertura del salone centrale del Mercato Coperto di Livorno e sul successivo processo di identificazione strutturale.

2 DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA: IL MERCATO COPERTO DI LIVORNO

Il Mercato Coperto delle Vettovaglie, di forma pressoché rettangolare, ha superficie complessiva di 4800 metri quadrati; l'edificio risulta suddiviso in tre grandi sezioni o padiglioni, il salone centrale, largo 25 metri e lungo 83, si eleva in altezza fino a 35 metri.

La struttura di copertura del salone centrale è realizzata con travature reticolari in acciaio. In essa si individuano tre ordini di travature: un ordine costituito da capriate trasversali principali poste ad un interasse costante pari a 5 metri dotate di catena reggisplinta (fig.6), e due ordini di travature longitudinali poste a livelli sfalsati che corrono lungo tutto il perimetro della copertura.

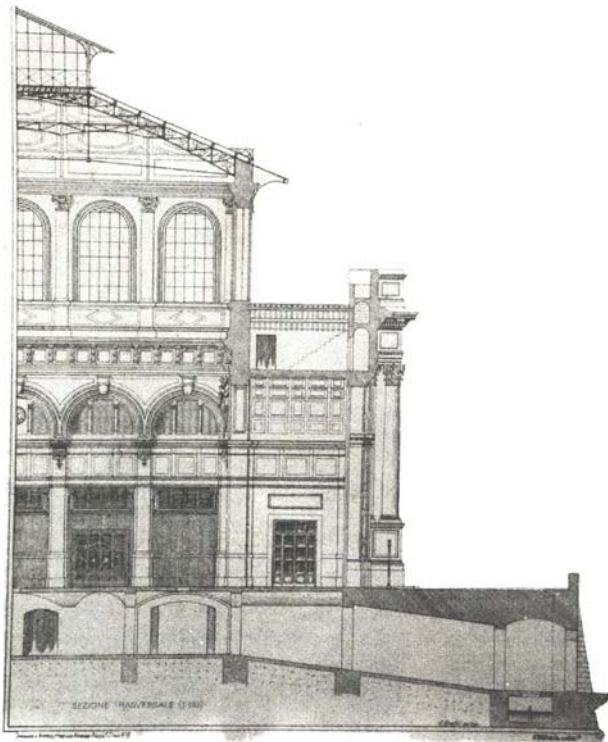


Figura 1. Sezione trasversale del Mercato Centrale di Livorno (Ricordi di Architettura, serie II, vol. VI)

La travatura trasversale principale, realizzata con profili angolari accoppiati collegati tra loro con piastre nodali di testa mediante chiodatura, presenta

schema statico è di arco con cerniere agli appoggi ed in chiave dotato di catena.

Sovrasta la capriata un portale in acciaio a tre cerniere in soluzione mista reticolare Vierendeel con colonne e travi di sezione composta a doppio T.

Il vincolo di appoggio della capriata ai muri perimetrali è costituito da un appoggio fisso realizzato con un perno centrale cilindrico abbracciato da due semicuscini in ghisa e dotato di un alloggiamento coassiale per il passaggio della catena che viene fissata a questo tramite dadi di registrazione posti sull'esterno.

Il sistema di controventamento di falda dell'intera copertura è affidato ai due ordini di travature longitudinali reticolari che corrono lungo tutto il perimetro della copertura mantenendo la continuità agli estremi con due coppie di travate di displuvio; completano il sistema gli arcarecci lignei e il doppio tavolato irrigiditi da crociere di controvento in piatte di acciaio.

3 DESCRIZIONE DELLE PROVE DI CARICO

Le prove di carico statiche sono state eseguite applicando alla capriata centrale due condizioni di carico (simmetrico bilaterale *SB* e asimmetrico monolaterale *AM*) progettate mediante un'analisi statica preventiva finalizzata alla valutazione del massimo carico di prova ammissibile. Per ciascuna condizione di carico prevista (*SB* e *AM*), è stata applicata alla struttura una storia di carico crescente in modo ciclico da zero fino a 40 kN con stazionamento temporaneo ad ogni incremento di carico di 10 kN. Durante lo svolgimento della prova il comportamento della struttura è stato controllato grazie al monitoraggio continuo della curva carico-spostamento relativa ai diversi punti di controllo prescelti.

I dispositivi di attuazione del carico consistono in una coppia di elementi di contrasto ed una coppia di invertitori di forza grazie ai quali l'azione di spinta esercitata da due martinetti oleodinamici da 100 kN tipo Lukas si trasforma in uno sforzo di trazione verso il basso. La trasmissione del carico avviene per mezzo di barre Dywidag da 16 mm di diametro e traverse per lo sdoppiamento e l'ormeggio: la traversa superiore è stata collocata sul blocco in fusione al piede del lucernario in modo da fornire un solido punto di appoggio ed evitare fenomeni di imbozzamento locale dei correnti della capriata. La traversa è stata dotata di un particolare dispositivo in grado di afferrare meccanicamente il blocco di fusione al piede del lucernario così da impedire qualsiasi spostamento, in vista anche dell'utilizzazione del sistema per la prova di carico dinamica. La seconda traversa è collocata appena al di sotto della catena ed ha la funzione di collegare la coppia di barre provenienti dall'alto alla sequenza di

barre Dywidag che prosegue fino al dispositivo di attuazione del carico

I dispositivi di contrasto del carico costituiti da un treppiede in tubi circolari sono stati collocati nello scantinato del mercato e ancorati alla muratura.



Figura 2. Foto del dispositivo di contrasto ed invertitore del carico.

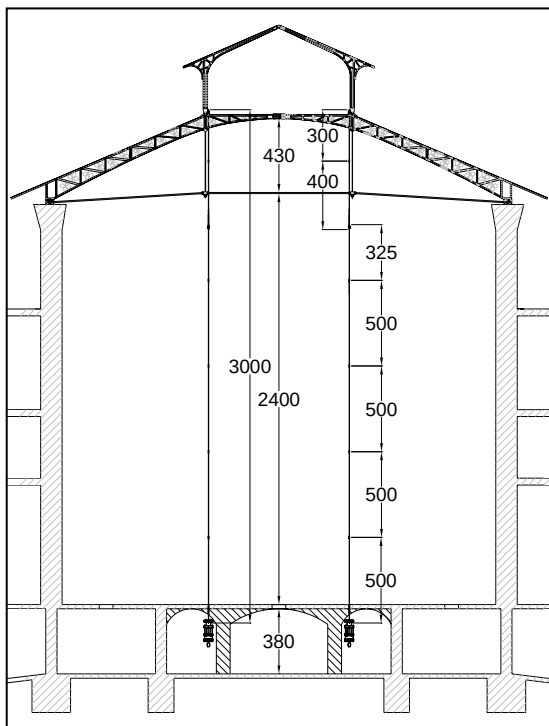


Figura 3. Schema del dispositivo di attuazione del carico.

Spostamenti verticali ed orizzontali della struttura sono stati misurati mediante trasduttori induttivi di spostamento LVDT HBM/W20 (fig.6): alcuni trasduttori sono stati collocati nella capriata immediatamente adiacente quella sottoposta al

carico di prova per valutare l'entità della ripartizione longitudinale dei carichi. L'intensità dei carichi applicati è stata monitorata attraverso celle di carico in precedenza opportunamente tarate disposte all'innesto delle barre Dywidag con la traversa inferiore. Gli spostamenti verticali nel piano della capriata sono stati misurati da trasduttori induttivi di spostamento collocati all'intradosso dei correnti inferiori in corrispondenza dei punti in cui tutte le travature longitudinali intersecano la capriata (posizioni 6,7,8,9) (fig. 4) e all'intradosso del perno della cerniera centrale (posizione 10) (fig.5).



Figura 4. Foto induttivo verticale pos.8.

Ulteriori induttivi sono stati installati orizzontalmente in senso longitudinale in corrispondenza dei presidi laterali dei correnti inferiori della capriata (pos. 4 e 5) e della cerniera centrale (pos.11) (fig.5) allo scopo di monitorare l'insorgere di eventuali fenomeni di instabilità dei correnti compressi.



Figura 5. Foto induttivi pos. 10 e 11.

Eventuali inflessioni delle murature esterne sono misurate fissando tra i muri stessi un cavo Invar tesato da un contrappeso scorrevole su una carrucola debitamente posizionata e collegando ad esso un trasduttore induttivo di spostamento (pos. 1). Un induttivo è stato posizionato fra ciascuno dei due blocchi di appoggio della capriata e la muratura di modo da evidenziare eventuali scorrimenti relativi (pos. 2 e 3).

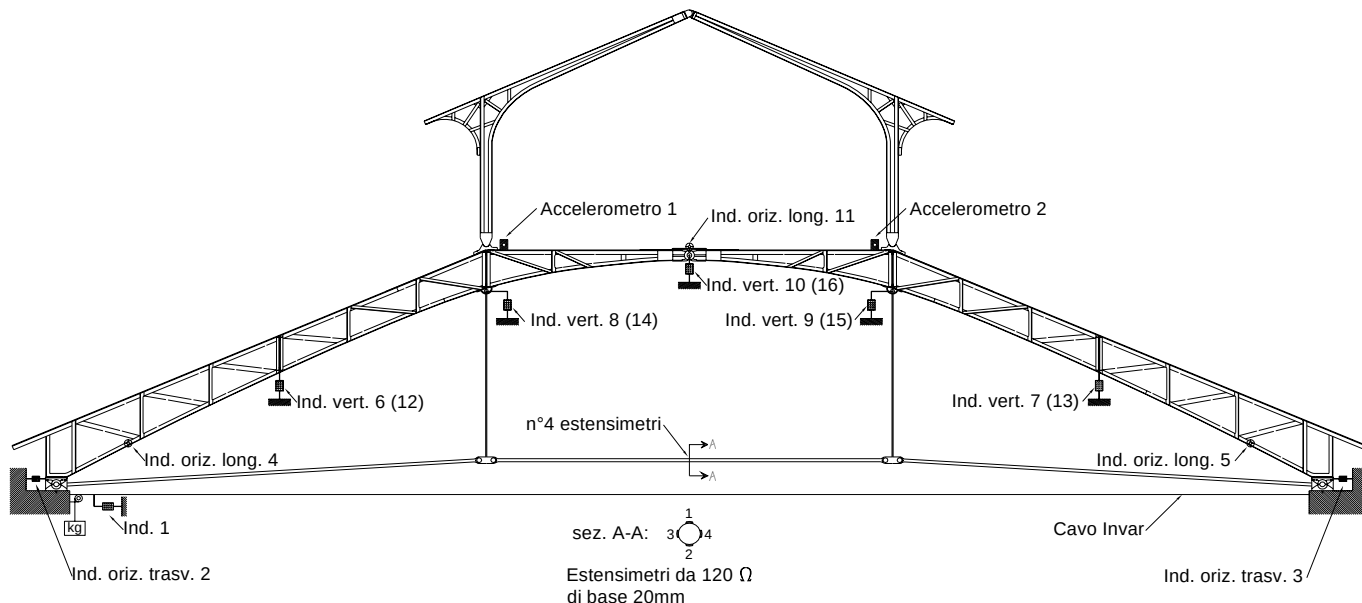


Figura 6. Dislocazione e numerazione della strumentazione di misura (in parentesi sono indicati gli induttivi posizionati nella capriata adiacente a quella sottoposta a prova).

Per misurare la deformazione assiale della catena sono stati applicati nel tratto centrale 4 estensimetri elettrici a variazione di resistenza da 120 Ω e base 20 mm, posizionati in corrispondenza dei punti diametralmente opposti appartenenti all'asse verticale e a quello orizzontale.

La prove dinamiche sono state effettuate applicando un carico impulsivo ad una sola delle due barre Dywidag. Il carico è fornito da una massa battente di 40,6 kg lasciata cadere dalle altezze prestabilite di 20 cm e 40 cm. La risposta dinamica della struttura è stata registrata mediante due accelerometri posizionati sul corrente superiore della travatura in corrispondenza del piede del lucernario (fig.7).



Figura 7. Traversa per la trasmissione del carico collocata sul blocco in fusione al piede del lucernario ed accelerometro n°1 posizionato sull'estradosso del corrente superiore.

4 DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Il comportamento statico e dinamico della struttura è stato studiato mediante l'impiego di un modello di calcolo spaziale agli elementi finiti interpretativo del comportamento meccanico della struttura, con il quale sono state simulate le prove di

carico statiche e successivamente confrontati i risultati teorici con i dati sperimentali. I correnti e le aste di parete della capriata metallica sono modellati con elementi trave (*beam*) rettilinei adottando un legame costitutivo di tipo elastico-lineare. Il modello tridimensionale è costituito dalla capriata centrale soggetta al carico di prova e da 4 capriate laterali per ciascun lato, estendendo gli elementi longitudinali per un successivo campo. I vincoli di estremità, che sostituiscono i successivi elementi esterni della parte di copertura non modellata, sono costituiti da appoggi elastici la cui rigidità è determinata valutando lo spostamento indotto dal carico in corrispondenza della quinta capriata.

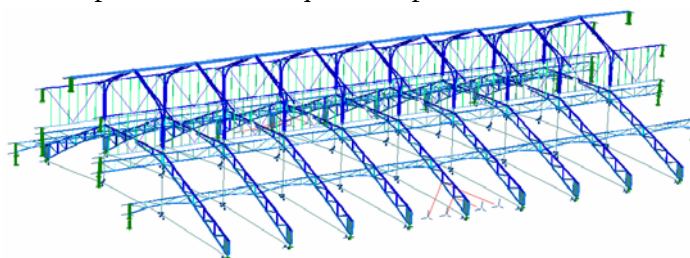


Figura 8. Modello di calcolo FEM spaziale.

Per simulare il contrasto offerto dalla parete muraria allo spostamento orizzontale dei punti di appoggio delle travature trasversali sono state inserite delle molle traslazionali elastiche in corrispondenza dei vincoli di appoggio della travatura che simulano la rigidità flessionale della muratura.

5 PROVE DI CARICO STATICHE

I risultati sperimentali delle prove di carico statiche vengono confrontati con l'output del modello di calcolo teorico. Per i diversi induttivi è tracciato l'andamento della risposta della struttura per i 4 cicli di carico (0-10kN, 0-20kN, 0-30kN, 0-

40kN) e la retta rappresentativa della risposta lineare del nodo corrispondente nel modello teorico.

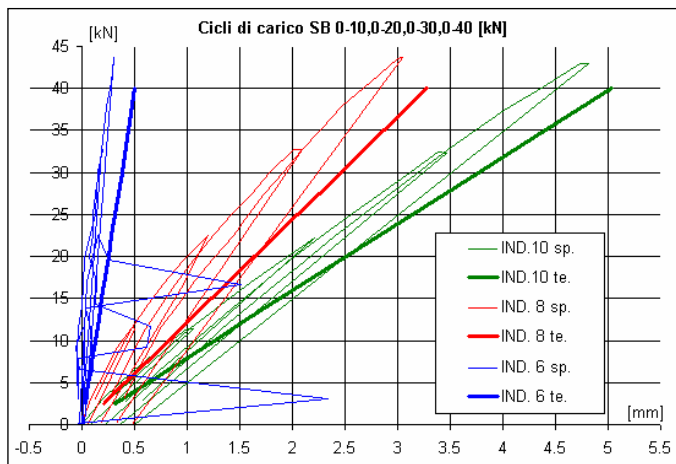


Figura 9. Induttivi verticali (pos. 6,8,10).

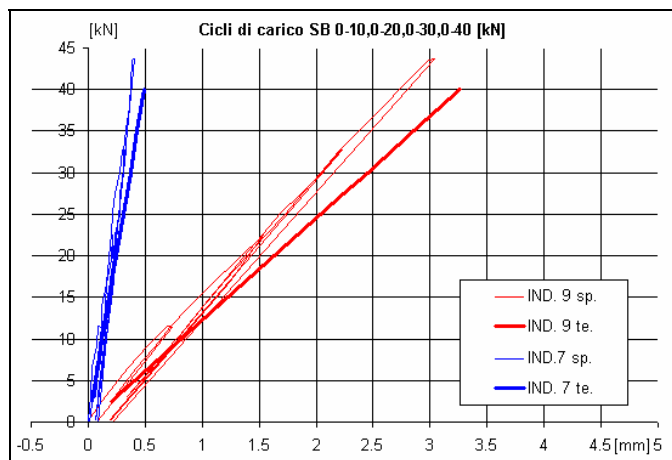


Figura 10. Induttivi verticali (pos. 7,9).

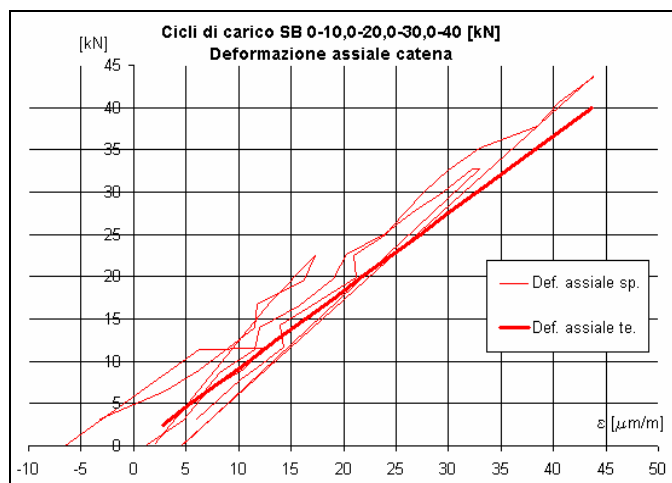


Figura 11. Estensimetri applicati sulla catena.

Nelle figg. 9 e 10 è rappresentato l'abbassamento della cerniera centrale e dei punti della capriata trasversale in corrispondenza dei collegamenti con le travature longitudinali per la prova di carico SB: tali grafici evidenziano che la deformata del modello teorico riflette il reale comportamento della struttura sovrastimando leggermente la risposta.

In fig. 11 è rappresentata la deformazione assiale ε [$\mu\text{m}/\text{m}$] della catena ottenuta mediante le misure registrate dai quattro estensimetri posizionati nella

sezione di mezzaria della stessa: tale misura consente di valutare l'entità dell'allontanamento relativo dei muri perimetrali dovuto alla spinta trasmessa alle imposte dalla capriata soggetta al carico di prova.

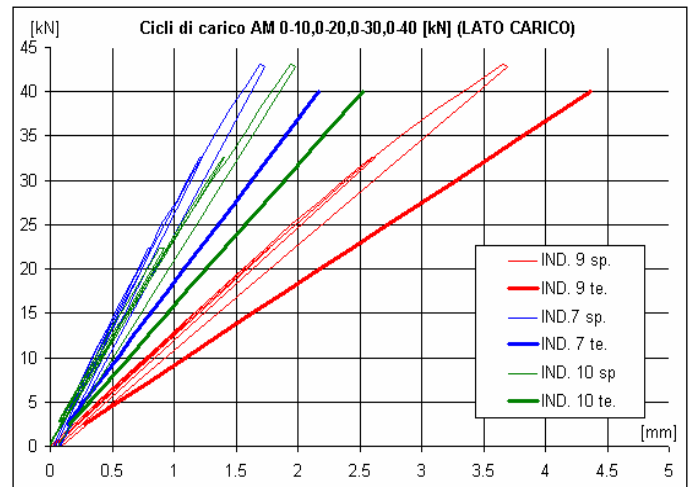


Figura 12. Induttivi verticali (pos.7,9,10).

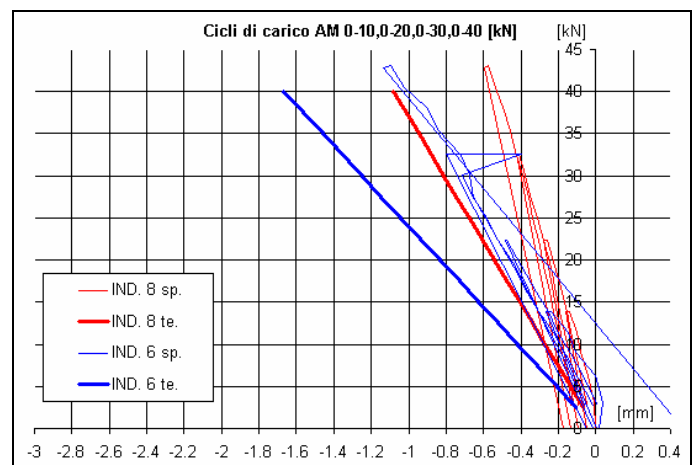


Figura 13. Induttivi verticali (pos. 6,8).

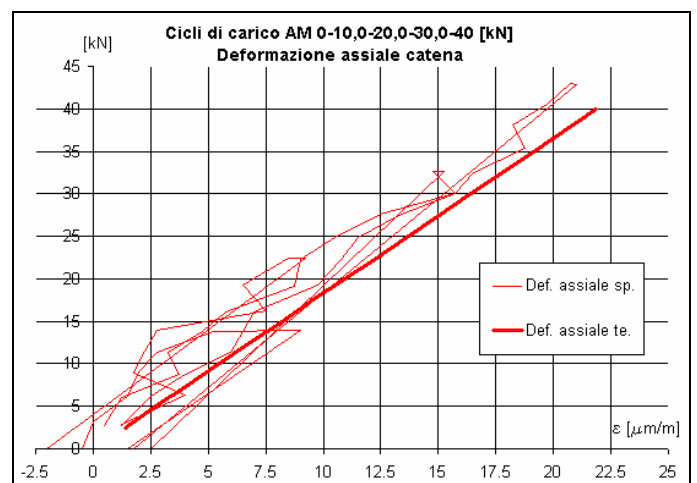


Figura 14. Estensimetri applicati sulla catena.

Le figg. 12 e 13, nelle quali sono riportate le misure degli induttivi lato carico (ind. 7,9,10) e lato opposto (ind. 6,8) per la prova di carico AM, confermano una buona corrispondenza tra i risultati sperimentali e quelli teorici.

Durante l'esecuzione delle prove, il monitoraggio continuo degli induttivi orizzontali orientati in senso longitudinale ha consentito di verificare il mancato insorgere di fenomeni di instabilità come evidenziato in fig. 15.

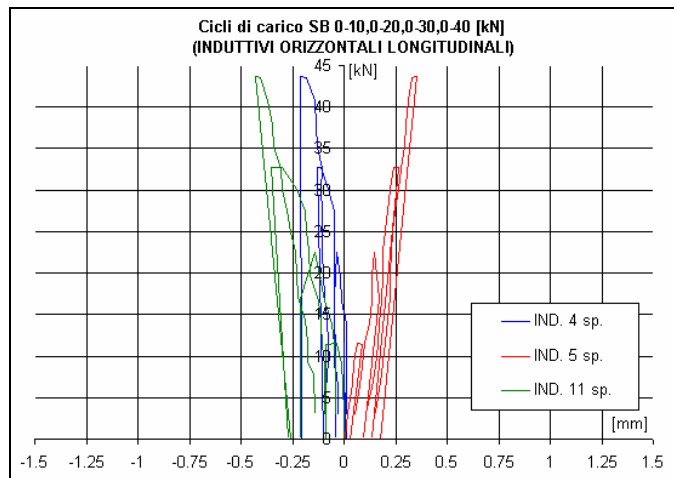


Figura 15. Induttivi orizzontali longitudinali (pos. 4,5,11).

6 IDENTIFICAZIONE STRUTTURALE

Il processo di identificazione strutturale è svolto attraverso l'individuazione dei parametri suscettibili di taratura sulla base dei dati sperimentali, in modo da meglio approssimare il comportamento reale della struttura. Sul modello teorico sono state svolte numerose simulazioni di prova modificando i seguenti parametri:

1) Modifica della rigidità rotazionale dell'articolazione centrale a cerniera delle capriate trasversali. Tale modifica è stata attuata variando lo spessore del profilo piatto posto sopra la cerniera: infatti, nella schematizzazione FEM adottata, il blocco in fusione dell'articolazione è costituito da elementi biella convergenti nel centro di rotazione che costituiscono quindi una cerniera ideale priva di attrito. La rigidità rotazionale della cerniera è dunque fornita dal solo profilo piatto soprastante.

2) Inserimento nel modello di elementi bidimensionali (*plates*) che schematizzano gli elementi di copertura non strutturale (tavolati e arcarecci lignei).

3) Inserimento delle crociere di controventamento di falda costituite da profili metallici piatti.

4) Inserimento di cerniere nei nodi di collegamento tra gli elementi longitudinali e le capriate trasversali.

5) Variazione della rigidità rotazionale delle cerniere degli apparecchi di appoggio delle capriate alla muratura perimetrale.

6) Modifica del momento d'inerzia del profilo a C longitudinale della parete laterale del portale. Nonostante la sezione di questo profilo sia stata

determinata durante le operazioni di rilievo, le modifiche ne aumentano il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse trasversale della copertura, con lo scopo di simulare la presenza di un eventuale collegamento tra il profilo longitudinale e la sottostante travatura longitudinale superiore.

7) Modifica della rigidità delle molle traslazionali che schematizzano la rigidità flessionale della muratura perimetrale; il valore iniziale pari a 9,83 kN/mm è risultato sottostimato; aumentando il valore della costante elastica si ottengono risposte del modello teorico più prossime a quella della struttura reale.

Le modifiche attuate variando la rigidità rotazionale delle cerniere (punti 1 e 5) così come quelle relative ai punti 3 e 4 non hanno influenzato in modo significativo la risposta del modello. Diversamente accade con l'inserimento degli elementi di copertura (punto 2), ma in questo caso all'aumentare della rigidità degli elementi *plates* si ottiene un miglioramento della approssimazione della risposta reale per la prova di carico SB ed una peggiore approssimazione per la prova AM. La risposta strutturale del modello teorico risulta essere particolarmente sensibile alle modifiche attuate secondo i punti 6 e 7. Per questo motivo sono stati adottati come unici parametri variabili del modello nel processo di taratura il momento d'inerzia del profilo a C e la rigidità k delle molle traslazionali.

Per ottimizzare il processo di identificazione si è definito un *indice di affidabilità* rappresentato dal complemento a 100% della media ponderata degli errori relativi, espressi in percentuale, tra risultati teorici e sperimentali in corrispondenza del massimo carico pari a 40 kN per entrambe le prove di carico. Gli errori percentuali sono stati valutati per le misure degli spostamenti verticali di entrambe le capriate e per la misura di deformazione assiale della catena.

Gli spostamenti valutati nel modello teorico iniziale ed i relativi errori percentuali rispetto ai dati sperimentali conducono ad un valore dell'indice di affidabilità pari a 63,9%.

L'aggiornamento del modello è svolto modificando i due parametri di taratura, momento d'inerzia del profilo longitudinale a C e rigidità k delle molle traslazionali, precedentemente definiti, i cui valori iniziali sono riportati in tabella 1.

Tabella 1. Parametri iniziali del modello FEM preliminare.

Momento d'inerzia iniziale	73,9 cm ⁴
Rigidità elastica iniziale	9,83 kN/mm

Nel processo di taratura si è tenuto conto della mutua influenza di questi due parametri definendo un primo valore massimo del primo oltre il quale non si ottengono apprezzabili miglioramenti della risposta del modello teorico: tale valore è stato

adottato in tutti i modelli nei quali si è ottimizzato il secondo parametro.

Si è ritenuto opportuno adottare valori differenziati per la rigidezza delle molle elastiche per i vincoli della capriata caricata ed i vincoli delle altre capriate: tale scelta è motivata dal fatto che sulle capriate non caricate l'entità del carico verticale trasferito dagli elementi longitudinali è notevolmente inferiore rispetto a quella sotto carico per cui i vincoli di queste possono assimilarsi a vincoli fissi. Tale scelta è poi giustificata dai migliori risultati che si ottengono rispetto ai modelli in cui si adotta un valore unico del parametro.

Successivamente, con i valori aggiornati della rigidezza delle molle elastiche, si è incrementato ulteriormente il primo parametro fino ad ottenere il modello tarato che rende massimo l'indice di affidabilità.

In tabella 2 sono riportati i valori dei parametri di alcuni del modello definitivo per il quale l'indice di affidabilità risulta pari a 76,1%.

Tabella 2. Parametri finali del modello FEM tarato.

Momento d'inerzia iniziale	1,04E04 cm ⁴
Rigidezza molle elastiche capriata sottoposta a carico di prova	25 kN/mm
Rigidezza molle elastiche capriate non direttamente caricate	500 kN/mm

Si riportano i grafici forza-spostamento per il modello aggiornato; per i grafici relativi all'induttivo orizzontale trasversale 1, la tangente al tratto elastico è stata sostituita con una retta interpolante l'intero ciclo 0-40kN per il quale si verifica l'incremento di spostamento.

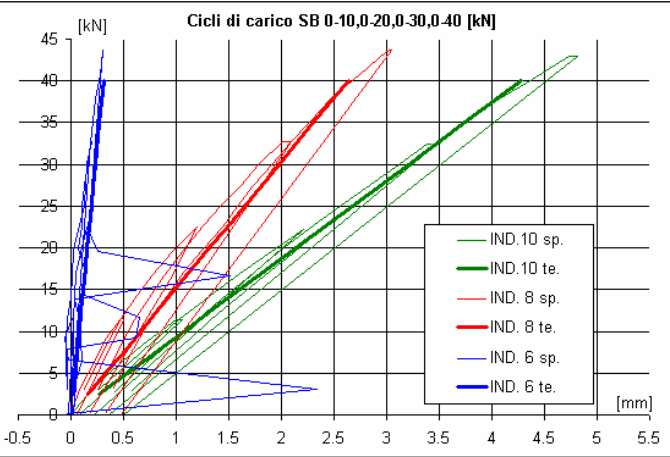


Figura 16. Induttivi verticali (pos. 6,8,10) Prova SB.

7 PROVE DINAMICHE

La prove dinamiche sono state effettuate applicando un'eccitazione impulsiva ad una delle barre del dispositivo di attuazione del carico,

generata da una massa battente lasciata cadere da altezze prestabilite di 20 cm e 40 cm.

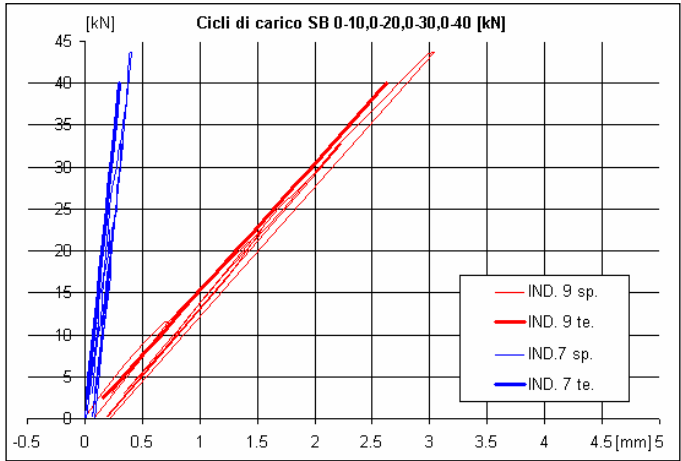


Figura 17. Induttivi verticali (pos. 7,9) Prova SB.

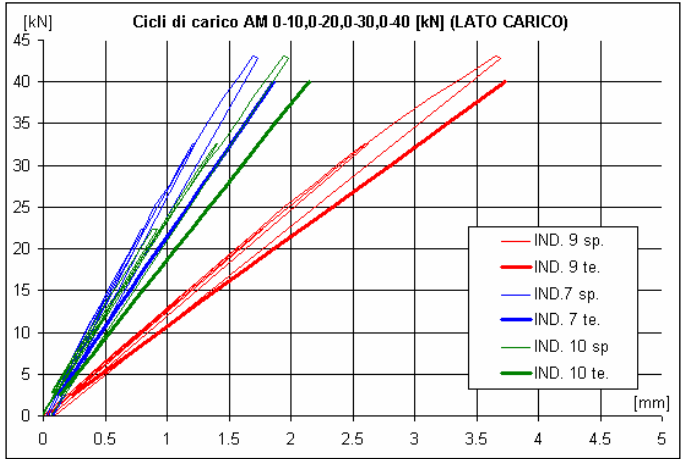


Figura 18. Induttivi verticali (pos. 7,9,10) Prova AM.

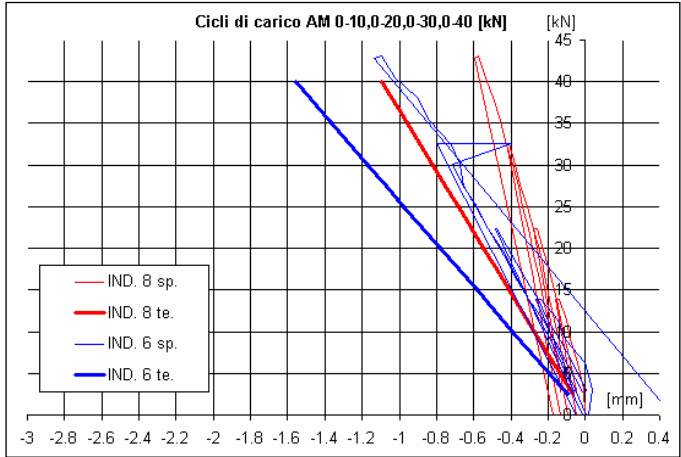


Figura 19. Induttivi verticali (pos. 6,8) Prova AM.

L'analisi sperimentale dinamica è un insieme di tecniche ed analisi che consentono il riconoscimento delle proprietà dinamiche (modi propri di vibrare, periodi e forme modali relativi) e in genere meccaniche della struttura.

Nel caso in esame, mediante analisi modale eseguita sul modello FEM spaziale tarato sulla base dei dati delle prove di carico statiche sono stati

calcolati i periodi dei modi propri fondamentali di vibrazione della struttura e sono stati confrontati con quelli ottenuti dalla elaborazione dei dati sperimentali.

La risposta dinamica della struttura è stata registrata in termini di accelerazione dai trasduttori accelerometri HBM tipo 12, collocati sul corrente superiore della travatura. Le storie temporali della risposta in termini di accelerazione verticale $a(t)$, sono trasformate dal convertitore analogico/digitale (A/D) con frequenza di campionamento $f = 50\text{Hz}$ ($\Delta t = 20\text{ms}$).

Il segnale di risposta è trasferito nel dominio delle frequenze per poter essere confrontato con i risultati dell’analisi modale. Alle funzioni del tempo $a(t)$ che descrivono la risposta viene dunque applicata la trasformata di Fourier: a seguito della digitalizzazione del segnale, le acquisizioni sperimentali sono ottenute mediante un campionamento in forma discreta. Per tali funzioni discrete è necessario adottare algoritmi di trasformazione del tipo DFT (Discrete Fourier Transform): tra questi il più diffuso e veloce è sicuramente l’algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) mediante l’adozione del quale sono stati calcolati gli spettri di risposta in frequenza.

La determinazione sperimentale dei parametri modali è stata svolta adottando il “*metodo dei picchi*” che considera lo spettro di risposta in termini di ampiezza e localizza le frequenze naturali in corrispondenza dei picchi. Gli spettri in frequenza sono risultati influenzati dai rimbalzi successivi della massa battente. Per questo motivo in alcuni spettri si verificano alcuni picchi in frequenza che non hanno corrispondenze negli altri. Tuttavia è possibile operare selezionando i picchi che si verificano in uno stesso intervallo di frequenza. Tale operazione ha consentito di ricavare una serie di frequenze dei modi propri di vibrare che in tabella 3 vengono riportate insieme al valore dell’incertezza relativa fornita dalla deviazione standard.

Tabella 3. Frequenze proprie sperimentali [Hz].

Frequenze proprie sperimentali (valori mediati su tutti gli spettri)		Dev. Std.
I° modo	3.24	0.16
II° modo	4.00	0.10
III° modo	4.46	0.05
IV° modo	4.65	0.06
V° modo	5.27	0.23
VI° modo	5.77	0.09
VII° modo	6.26	0.20
VIII° modo	7.38	0.32
IX° modo	8.48	0.13
X° modo	8.82	0.06

Le frequenze utilizzate per il confronto con i dati sperimentali, riportate in tabella 4, sono quelle

relative alle forme modali che presentano maggiore percentuale di massa partecipante e caratterizzano dunque il comportamento dell’intera struttura.

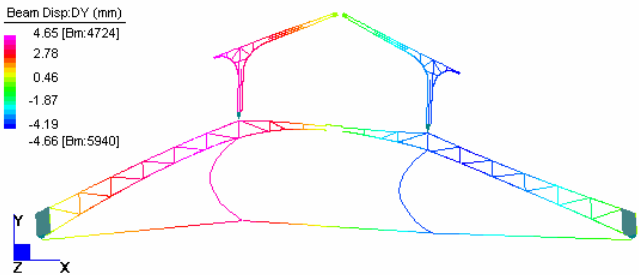


Figura 20. I° modo traslazionale in direzione trasversale, deformata modale della sola capriata trasversale intermedia ($f = 3,320\text{Hz}$).

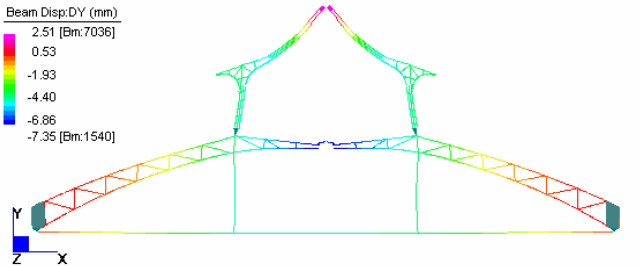


Figura 21. I° modo traslazionale in direzione verticale, deformata modale della sola capriata trasversale intermedia ($f = 6.192\text{Hz}$)

Tabella 4. Frequenze proprie teoriche [Hz].

Modi propri di vibrare coinvolgenti l'intera struttura		
	X	Y
I° modo	3.32	6.19
II° modo	4.00	6.65
III° modo	5.01	7.53
IV° modo	9.69	8.47
Modi propri di vibrare che coinvolgono principalmente il portale lucernario		
I° modo	2.03	4.50
II° modo	2.11	4.63
III° modo	2.20	6.88

Il confronto tra dati sperimentali e teorici è presentato in figura 22 in cui sono riportate le frequenze delle forme modali determinate tramite l’analisi del modello di calcolo e le medie dei campioni di frequenze individuati sperimentalmente a cui è stato associato un errore pari alla deviazione standard del campione stesso.

Nel grafico, si riportano anche le frequenze contrassegnate con il simbolo (L) associate ai modi di vibrare traslazionali (secondo l’asse verticale) relativi al solo lucernario le cui forme modali coinvolgono comunque, nella configurazione deformata, anche la capriata.

(frequenze naturali e smorzamenti associati) caratteristici della struttura.

BIBLIOGRAFIA

Ewins, D.J. 2000, *Modal testing: theory and practice*, John Wiley & Son, New York.
Maia N.M.M., Silva J.M.M., 1998, *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, Research Studies Press LTD. Baldock, Hertfordshire, England.

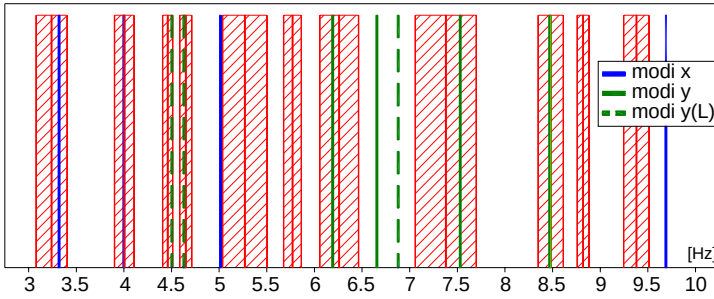


Figura 22. Confronto tra frequenze sperimentali e teoriche.

I risultati ottenuti confermano il buon grado di affidabilità del modello teorico che ha permesso di identificare i primi quattro modi di vibrazione in buona corrispondenza con le frequenze misurate sperimentalmente.

8 CONCLUSIONI

L'analisi svolta ha consentito di convalidare l'utilizzo del modello di calcolo spaziale aggiornato, tarato sulla base dei dati sperimentali delle prove di carico statiche, quale realistico mezzo di analisi dello stato di sollecitazione e di verifica del grado di sicurezza attuale. Con questo modello sono state eseguite le verifiche dei diversi elementi strutturali soggetti alle combinazioni di azioni di normativa.

Il metodo utilizzato per individuare le frequenze naturali della struttura, *metodo dei picchi*, è caratterizzato dalla semplicità di applicazione, in quanto l'estrazione dei parametri modali si limita alla diretta osservazione degli spettri in frequenza ricavati sperimentalmente.

Sono tuttora in corso ulteriori elaborazioni dei dati sperimentali basati sul MDOF Circe Fit Method (Maia & Silva, 1998) attraverso una preliminare valutazione della funzione inertanza (FRF). Il metodo è basato sulla considerazione che la FRF, rappresentata in un piano di Nyquist, descrive un cerchio nell'intorno di una frequenza naturale del sistema; l'algoritmo di fitting consente di ricercare il cerchio che interpola l'FRF sperimentale con il minimo errore. All'estrazione dei parametri modali della struttura farà seguito l'aggiornamento del modello numerico agli elementi finiti mediante l'utilizzo di algoritmi di ottimizzazione (Maia e Silva, 1998) che consentono di individuare i valori ottimali dei parametri in grado di ricondurre il comportamento modale del modello a quello determinato sperimentalmente. Una ulteriore ipotesi di studio è basata sull'analisi diretta della forzante impulsiva e della risposta strutturale in termini di accelerazione nel dominio del tempo e nella conseguente ricerca della funzione di trasferimento dalla quale è possibile dedurre i parametri dinamici