

**Alberto Zasso**  
**Giulio Mirabella Roberti**  
**Roberto Corradi**  
**Roberta Tongini Folli**

## **Caratterizzazione della risposta statica e dinamica di architetture storiche: la campagna di misure sul Torrazzo di Cremona**

### **Characterisation of static and dynamic response of historic buildings: experimental investigation and monitoring of the Torrazzo in Cremona (Italy)**

Una campagna di studi multidisciplinare recentemente conclusa, che ha visto coinvolti numerosi dipartimenti del Politecnico di Milano (DSCA, Meccanica, DIIAR, DIS), ha avuto come oggetto la valutazione dello stato di conservazione del Torrazzo di Cremona. La torre campanaria del Duomo, osservabile in Figura 1, la cui datazione ancora discussa può essere collocata fra l'VIII e il XIII secolo, con i suoi 112 m di sviluppo verticale, è l'edificio in muratura più alto d'Europa. Si tratta di una costruzione molto originale, che vede la sovrapposizione di due parti distinte. La parte inferiore è rappresentata da una classica torre romanica con base a sezione quadrata di 14 m di lato, che si erge fino a 70 m di altezza. A partire da tale quota, la massiccia struttura romanica, conclusa da una merlatura Guelfa, è sostituita dalla cosiddetta Ghirlandina, riccamente decorata e formata da due tamburi ottagonali sovrapposti sormontati da una cuspide conica alta 17 m, sostenuta sul perimetro da esili e aeree colonnine binate di granito. Sulla base di un completo insieme di informazioni che spaziano dal rilievo geometrico globale della struttura, all'analisi in-situ dell'impianto murario, dalla caratterizzazione petrografica, fisico-chimica e meccanica della muratura, al rilievo del quadro

An experimental investigation based on a multidisciplinary approach has been carried out recently. The aim of the investigation which has involved many Departments of Politecnico di Milano (DSCA, Mechanical Engineering, DIIAR, DIS), was the evaluation of the stability and safety of the Torrazzo in Cremona. The bell-tower, called Torrazzo, adjacent to the Cathedral of Cremona [Figure 1'] dates back to the Medieval times, even if the date of construction is still discussed and can be put between VIII century and XIII century. The Tower, probably the highest Medieval masonry tower in Europe, is 112 m high. Its original structure is composed by two different part: a typical romanica tower with a squared base (14 m) part with merlons, up to 70 m, and a framed and richly decorated structure, called Ghirlandina, from 70 to 112 m, which is formed by two octagonal drums and by a conic spire, 7 m high, supported by thin granite coupled columns.

According to complete information and resulting from the geometrical survey of the whole structure, from on-site investigation of the masonry, from chemical-physical, petrographical and mechanical characterisation of the materials, from the crack pattern survey, from long-term monitoring of static and dynamic parameters, from the comparison between experimental tests and numerical analyses (FEM), a very deep evaluation of the state of damage of the tower and the indication of some guide lines for the restoration, subsequently carried out, could be achieved. The Department of Mechanical Engineering with the collaboration of the Department of Structural Engineering has designed and set up the monitoring system in order to define static and dynamic parameters of the response of the structure submitted to the action of wind and of thermal variations. As many recent collapses have demonstrated, long-term monitoring of ancient masonry towers can give useful information about their safety due to the propagation of crack pattern and of damage.

The monitoring has been based on two independent acquisition systems: the first one was aimed at storing dynamic signals (wind velocity and direction, tower accelerations) with a 50 Hz sampling frequency, allowing to capture the most significant natural structure frequencies; the second one was designed to acquire continuous information on physical, slowly varying quantities (temperature and cracks opening): therefore a low sampling fre-



1.  
Il Torrazzo di Cremona:  
altezza 112 m  
Torrazzo in Cremona:  
height 112 m

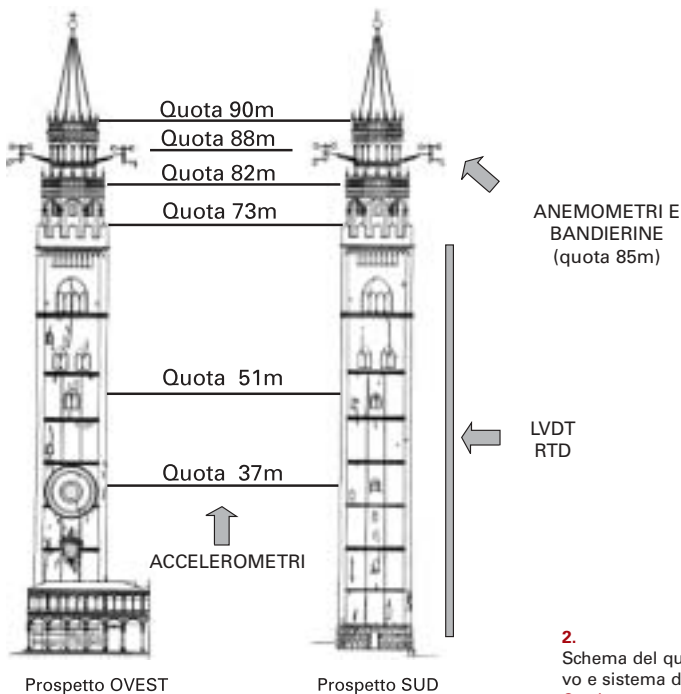
fessurativo, fino al monitoraggio di lungo termine di svariate grandezze statiche e dinamiche, al confronto tra le grandezze misurate sperimentalmente e le previsioni numeriche da modello FEM, è stato possibile formulare una valutazione molto approfondita sullo stato di salute della torre e indicare le linee guida dell'intervento conservativo successivamente intrapreso. In particolare il Dipartimento di Meccanica in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Strutturale sono stati responsabili della progettazione e della realizzazione del sistema di monitoraggio finalizzato alla definizione dei molteplici fattori che caratterizzano il comportamento statico e dinamico della struttura sotto l'azione del vento e delle sollecitazioni termiche. Si noti tra l'altro che il monitoraggio di lungo termine di antiche strutture a torre in muratura ha anche una specifica valenza in termini di sicurezza, a causa della possibile evoluzione del quadro fessurativo e del degrado delle caratteristiche meccaniche dei materiali, come testimoniato nella storia recente da alcuni crolli anche drammatici.

Per il monitoraggio del Torrazzo sono stati predi-

quency is needed (one sample each 10 minutes). 66 transducers have been installed: 4 cup anemometers and 4 wind vanes, 21 accelerometers, 15 LVDT displacement transducers, 22 RTD transducers [Figure 2 '].

In order to measure the instantaneous speed and direction of wind on the structure, 4 cup anemometers and 4 wind vanes have been installed close to the top (85 m), on the four sides of the tower. With reference to the analysis of the dynamic structure wind response and the experimental identification of the structure vibration modes, acceleration has been measured in 7 sections, positioned at different heights (37, 51, 73, 82, 88a, 88b, and 90 m) and defined according to numerically evaluated (FEM) modal deformations. By means of three accelerometers positioned in each section and proper numerical elaboration, it has been possible to identify both flexural vibration modes in different planes and torsional vibration modes.

The high frequency data acquisition system stored blocks of data lasting 10 minutes, only according to specific selection criteria, essentially based on the



**2.**  
 Schema del quadro fessurativo e sistema di monitoraggio  
 Crack pattern and monitoring system

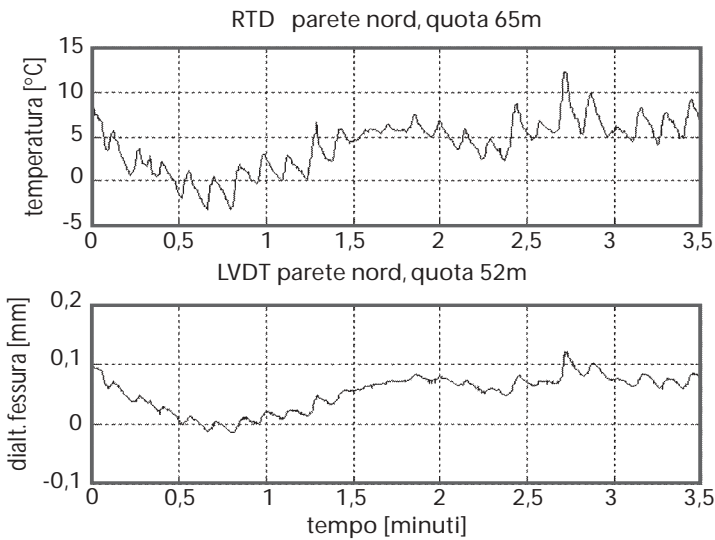
sposti due sistemi di acquisizione indipendenti: il primo consente di registrare i segnali dinamici (velocità e direzione del vento, accelerazioni della torre) con una frequenza di campionamento di 50 Hz e di caratterizzare quindi i più significativi modi di vibrare della struttura; il secondo, progettato per acquisire con continuità informazioni su grandezze fisiche lentamente variabili (temperatura e dilatazione delle più rilevanti fessure presenti sulla muratura del Torrazzo), immagazzina i dati provenienti da diversi punti della struttura, ad intervalli di 10 minuti.

In totale, il sistema di misura è stato predisposto per acquisire i dati provenienti da 66 trasduttori: 4 anemometri a coppe e 4 bandierine segnamento, 21 servo-accelerometri, 15 trasduttori di spostamento induttivi (LVDT), 22 termoresistenze (RTD), come sinteticamente illustrato in Figura 2.

Per quanto riguarda velocità e direzione del vento, la misura è effettuata alla quota di 85 m, tramite quattro postazioni sui quattro lati della torre, ognuna composta da un anemometro a coppe e da una bandierina segnamento. Per misurare la risposta dinamica della struttura all'azione del vento e caratterizzarne i modi propri di vibrare, è stato

wind speed intensity. As a consequence, only the most significant events for the characterisation of the structure dynamics excited by wind were automatically stored. Meanwhile, an historical data base of average wind speed and acceleration rms levels (in 10 minutes time base), has been continuously stored (for each wind and acceleration channel), synchronous with the corresponding temperature and cracks opening data, in order to completely characterise the static and dynamic behaviour of the tower in the long term, in different environmental conditions.

Two significant examples of parameters evaluated during the monitoring program are presented. Figure 3 shows, by means of historical data analysis, the correlation between the temperature of masonry and the crack opening in a period of 24 days (22 January-24 February 2000). The behaviour of the crack shows a clear correlation with the temperature cycles (both seasonal and daily) with an average thermal dilation coefficient of  $9 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ . Other cracks have shown higher values of thermal dilation coefficient ( $20 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ). The long-term monitoring of 15 cracks and 22 temperatures with the identification of their evolution trends, can give



**3.**  
Correlazione temperatura-fessurazione  
Temperature and crack opening correlation

installato sulla torre un esteso sistema di servoaccelerometri, composto da 7 sezioni di misura a quote differenti (37, 51, 73, 82, 88a, 88b, 90 m), scelte sulla base dei risultati preliminari del calcolo dei modi propri di vibrare, forniti dal modello a E. F. Tramite gruppi di 3 servoaccelerometri opportunamente posizionati nelle diverse postazioni e un'adeguata elaborazione numerica dei segnali, è stato possibile identificare i principali modi propri della struttura, sia flessionali sia torsionali. Il sistema di acquisizione ad alta frequenza è stato predisposto per memorizzare selettivamente blocchi di dati della durata di 10 minuti, scelti in base a specifici criteri, legati alla velocità e alla direzione del vento. In tal modo, vengono automaticamente immagazzinati solo gli eventi più significativi per la caratterizzazione della dinamica della torre eccitata dal vento. Contemporaneamente, viene tuttavia aggiornata con continuità anche una base di dati storici (mediati su 10 minuti) di velocità e direzione del vento, temperatura, dilatazione delle fessure e valori R.M.S. delle accelerazioni, garantendo di pervenire nel lungo termine a una completa caratterizzazione del comportamento statico e dinamico della torre, nelle diverse condizioni ambientali. Si riportano due esempi significativi di grandezze rilevate nel corso del monitoraggio.

La Figura 3, ottenuta dall'analisi dei dati storici, mostra la correlazione tra temperatura della muratura e grado di apertura di una delle fessurazioni, per un periodo di 24 giorni (22 gennaio-24 febbraio 2000). Il comportamento della fessurazione

useful information for the modelling of the structural behaviour of the tower and to control the crack pattern and for the diagnosis of the stability of the structure.

Figure 4 shows the dynamic behaviour of the tower submitted to *vortex shedding* excitation during a long gust of wind with a maximum velocity of about 80 Km/h, after a constant and continuous increase of the wind speed from 5 to 22 m/s, then stabilised at 15 m/s: the resonance of the first flexural vibration mode at 0.44 Hz measured by one of the accelerometers can be observed.

This is a typical example of forced oscillations due to vortex shedding excitation, and similar behaviours were found at different wind speeds, exciting structural modes at different frequencies. The monitoring of these dynamic events not only allowed to estimate the amount of dynamic wind load associated to the turbulent wind or to particular phenomena like the vortex shedding, but also gave a detailed experimental definition of the vibration modes of the structures.

Figure 5 shows the comparison between the numerical modelling by FE and experimental measurements of the first flexural vibration mode.

The experimental modal analysis results have been used to validate the FE model for analysing the large and complex masonry tower, showing a good agreement in the first five vibration modes chosen as a reference, and optimising the values of Young's modulus and Poisson's coefficient which represent the dynamic behaviour of the structure close to the

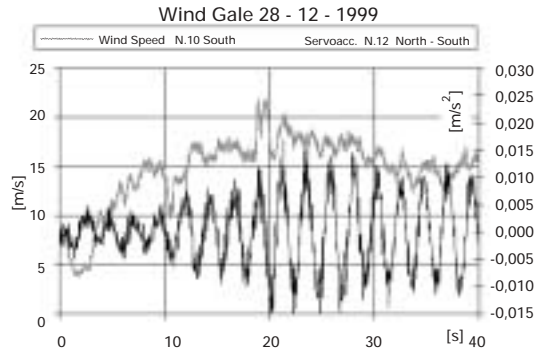
mostra un'elevata correlazione con i cicli termici (sia stagionali che giornalieri) con un coefficiente medio di dilatazione termica di  $9\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ .

Altre fessurazioni hanno mostrato invece valori molto superiori ( $20\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ) di tale coefficiente: il monitoraggio di lungo termine di 15 postazioni fessurative e 22 termiche, con identificazione di eventuali trends evolutivi, è quindi in grado di fornire informazioni di grande utilità per la modellazione del comportamento strutturale della torre e di tenerne sotto controllo il quadro fessurativo globale con ovvie implicazioni in merito alla diagnostica sullo stato di salute dell'opera.

Il secondo esempio riportato in Figura 4, mostra invece la dinamica della torre soggetta ad eccitazione da *vortex shedding* in concomitanza di una raffica di lunga durata con massima velocità del vento registrata pari a circa  $80\text{ km/h}$ : a seguito di un continuo e costante incremento della velocità del vento incidente da  $5$  a  $22\text{ m/s}$ , e successiva stabilizzazione a  $15\text{ m/s}$ , è riconoscibile la risonanza del primo modo flessionale della torre a  $0,44\text{ Hz}$  misurata da uno degli accelerometri in campo. Quanto mostrato è un tipico esempio di oscillazione forzata dovuta a eccitazione da distacco di vortici e simili comportamenti sono stati osservati per differenti velocità del vento con diverse frequenze e modi strutturali eccitati. Il monitoraggio di simili eventi dinamici, oltre che consentire la stima dell'entità del carico dinamico eolico associato al vento turbolento o a particolari fenomeni quali il distacco di vortice, ha permesso una accurata definizione sperimentale dei modi di vibrare della struttura.

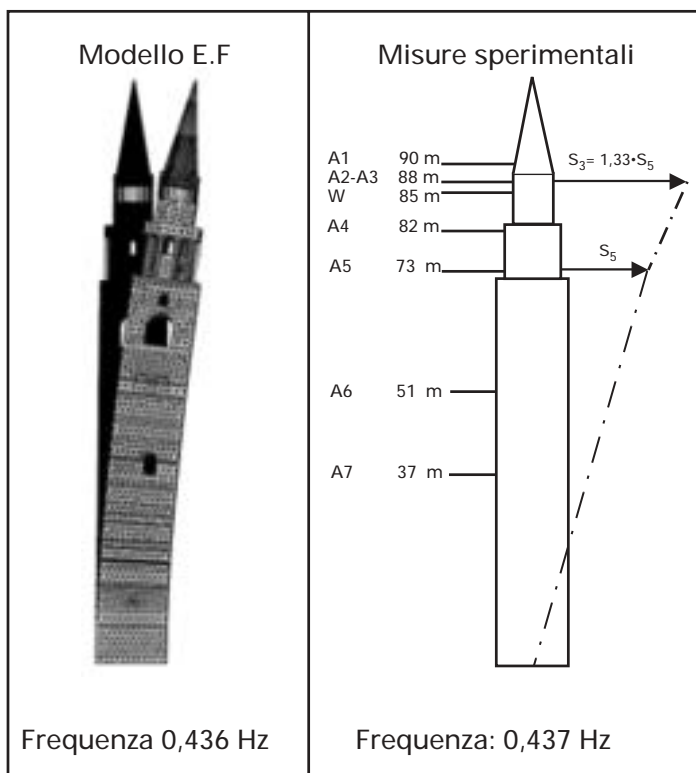
Si riporta in Figura 5 il confronto tra modellazione numerica FEM e misura sperimentale inerente il primo modo flessionale. Si sono quindi utilizzati i risultati dell'analisi modale sperimentale allo scopo di validare il modello numerico FEM con cui la grande e complessa torre in muratura è stata analizzata, raggiungendo un ottimo accordo nei primi cinque modi di vibrare assunti come riferimento e ottimizzando in particolare i valori di modulo di Young e coefficiente di Poisson, rappresentativi del comportamento dinamico della struttura nell'intorno della configurazione di carico statico a cui è soggetta la muratura. Allo stesso modo utili indicazioni sono state ottenute anche per un'adeguata modellazione delle condizioni di vincolo della struttura. Il modello FEM così tarato risulta quindi un valido strumento per l'analisi del comportamento statico e dinamico della struttura ed è in

4. Eccitazione da distacco di vortici:  $18\text{ m/s} - 0,44\text{ Hz}$   
Vortex shedding:  
 $18\text{ m/s} - 0,44\text{ Hz}$



static load configuration to which the structure is subjected. In the same way, useful indications have been obtained for a suitable modelling of the boundary conditions of the structures.

The calibrated FEM model can be a useful tool to analyse the static and dynamic behaviour of the structure and to provide useful information for reinforcement and repairing. Dynamic response of the structure under environmental excitation (wind, traffic and vibrations transmitted by soil) can be considered as an interesting tool for the diagnosis of the conditions and evolution of state of structural parameters due to worsening of the crack pattern, constraints settlements or other causes. As briefly described above, the multidisciplinary approach proves to be the fundamental key for the successful development of the research where different aspects like historical studies, surveys, laboratory and on site (static and dynamic) investigation and numerical modelling meet and join together.



5. Confronto numerico-sperimentale: primo modo flessionale (A: sezioni di misura accelerometri, W: sezione di misura vento)  
 Numerical-experimental comparison: first flexural mode (A: acceleration measurement sections, W: wind measurement section)

grado di fornire utili informazioni per il successivo programma di intervento conservativo. In particolare, la risposta dinamica della struttura all'eccitazione ambientale (tipicamente vento, ma anche traffico stradale e altre vibrazioni trasmesse dal terreno) può essere utilizzata come un interessante strumento di diagnostica in merito ad eventuali evoluzioni nel tempo dei parametri strutturali e, in particolare, al degrado degli stessi a seguito, per esempio, di aggravamento del quadro fessurativo, cedimenti di vincolo o altro. Come illustrato da queste brevi note, che peraltro si focalizzano essenzialmente su uno dei molteplici temi affrontati, l'approccio multidisciplinare si è rivelato essere lo strumento chiave per lo sviluppo della ricerca, integrando con successo informazioni di ambiti generalmente molto distanti tra loro quali quello storico, quello del rilevamento, quello delle indagini di laboratorio, quello delle prove sulla struttura al reale statiche e dinamiche e quello della modellazione numerica.

BIBLIOGRAFIA /  
 BIBLIOGRAPHY

[1] Falco, M., Zasso, A., Moschioni, G., Corradi, R., Caratterizzazione della risposta statica e dinamica di una struttura civile soggetta all'eccitazione del vento: la campagna di misure sul Torrazzo di Cremona, proc. 6th Italian Conference on Wind Engineering IN-VENTO-2000, Genova, Italy, - June 18-21, 2000

[2] L. Binda, G. Mirabella Roberti, C. Poggi, R. Tongini Folli, M. Falco, A. Zasso, R. Corradi, Static and dynamic studies on the Torrazzo in Cremona (Italy): the highest masonry bell tower in Europe, Int. Symp. Bridging Large Spans: From Antiquity to the Present, Istanbul, Turkey, - May 29-June 2, 2000

[3] Ronca, P., Tiraboschi, C., Binda, L., In-situ flatjack tests matching new mechanical interpretations, 11th Int. Brick/Block Masonry Conf. Shanghai, China, 1997, 357-366