

# Monitorare per conservare: il caso della Torre Ghirlandina di Modena

**Eva Coïsson** | [eva.coisson@unipr.it](mailto:eva.coisson@unipr.it)

Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma, Italia

**Lia Ferrari** | [lia.ferrari@unipr.it](mailto:lia.ferrari@unipr.it)

Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma, Italia

**Elena Zanazzi** | [elena.zanazzi@unipr.it](mailto:elena.zanazzi@unipr.it)

Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma, Italia

## Abstract

The monumental complex consisting of the cathedral, tower and main square of Modena (Northern Italy) has been a UNESCO World Heritage Site since 1997. The visible tilting of the Ghirlandina tower has always generated concerns for its preservation, even more after the recent seismic events. This paper highlights the role of structural monitoring for the conservation of the site, with particular reference to the data acquired during the recent Emilia earthquakes. Unexpectedly, the inclination of this leaning tower decreased after the major seismic event. Some considerations are presented regarding the difficulty of modelling this kind of effects on buildings with complex historical stratifications and the application of the observational method, derived from geotechnical engineering, is proposed. The importance of structural monitoring is once again recalled, in order to preserve world heritage and comply with the principle of minimum intervention.

## Keywords

Leaning tower, Seismic behaviour, Structural monitoring, Observational method, Minimum intervention.

## Introduzione

Il Centro del Patrimonio Culturale richiede agli Stati detentori di siti UNESCO un costante monitoraggio, inteso come controllo sistematico dello stato di conservazione dei beni, con l'obiettivo di verificare il mantenimento nel tempo dei valori universali eccezionali per i quali essi hanno ottenuto l'iscrizione. Questo monitoraggio si attua in via ordinaria attraverso i rapporti periodici - richiesti ogni sei anni - e in via straordinaria con monitoraggi reattivi e consultivi. Il presente contributo intende evidenziare come il monitoraggio strutturale possa essere un importante strumento non solo di conoscenza, ma anche di gestione e conservazione del patrimonio culturale architettonico, contribuendo a realizzare quel "monitoraggio" - inteso in senso più ampio - richiesto dall'UNESCO. Il monitoraggio strumentale statico, infatti, con la sua grande mole di dati, può essere molto utile per verificare non solo l'evoluzione di meccanismi lenti (come i cedimenti) ma anche le reazioni a eventi singoli ed improvvisi, come quelli che possono richiedere la redazione di un rapporto reattivo.

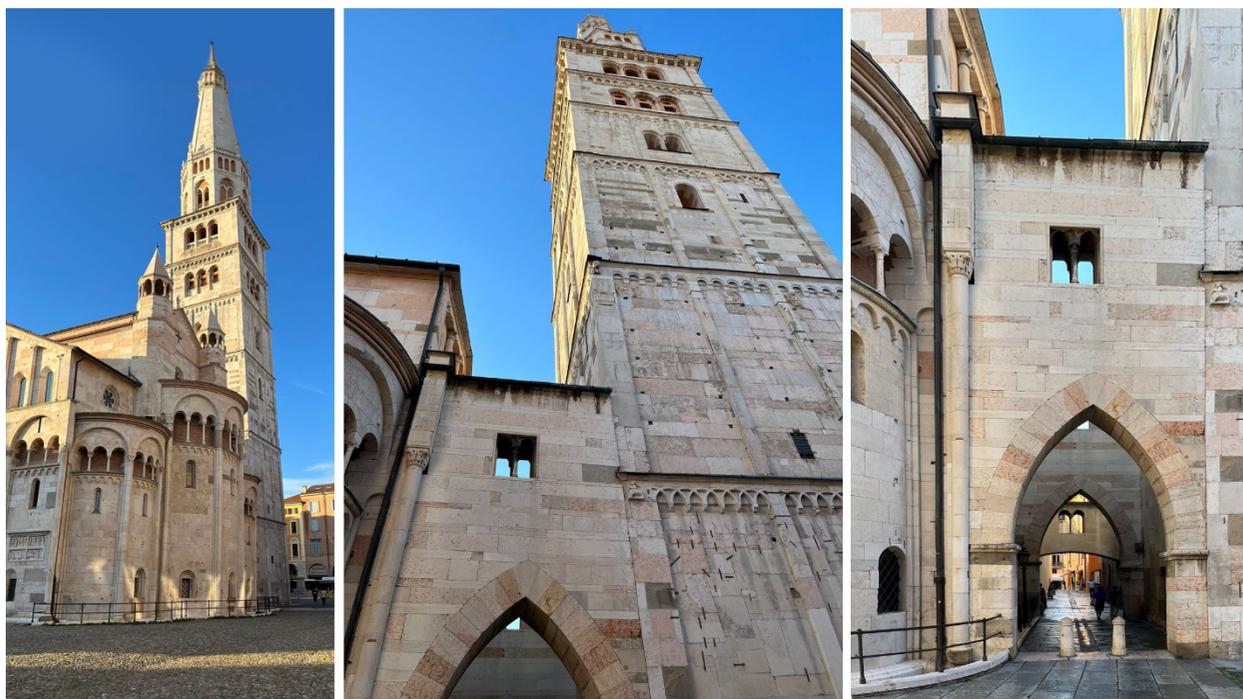


Fig. 1 Torre Ghirlandina e Duomo, Modena.

Il caso studio scelto è particolarmente calzante proprio perché, sottoposto a monitoraggio statico per controllare i lenti cedimenti del terreno, ha subito anche diverse scosse sismiche negli scorsi anni, i cui effetti (in particolare sull'inclinazione) sono stati rilevati dalle strumentazioni. La torre medievale Ghirlandina di Modena – che, insieme alla Cattedrale e alla piazza principale, costituisce un complesso monumentale tutelato dall'Unesco dal 1997<sup>1</sup> (Fig. 1) – è stata infatti oggetto di indagini fin dalla fine del XIX secolo, per studiarne i movimenti e le deformazioni. A partire dal 2003 è stato installato un sistema di monitoraggio strutturale automatico per meglio comprenderne il comportamento sul lungo periodo, cogliendo le deviazioni dal normale andamento fisiologico ed individuando di conseguenza interventi coerenti con i principi di conservazione e minimo intervento<sup>2</sup>. Inoltre, la costruzione è stata sottoposta a uno studio interdisciplinare completo, in occasione di un intervento di restauro integrale, che ha reso disponibili molte informazioni su tutti gli aspetti della storia, dei materiali e della stabilità della torre<sup>3</sup>, fornendo una base importante per l'interpretazione corretta dei dati di monitoraggio.

### **La Torre della Ghirlandina: una lunga storia di inclinazioni e di condizioni al contorno mutevoli**

La torre Ghirlandina, alta 88,82 m, presenta una base quadrata di 11 m di lato, con massicce murature in mattoni il cui spessore varia da 2 m alla base fino a 1,15 m alla quota di 50 m. Qui termina la sezione quadrata della torre per lasciare spazio ad un prisma ottagonale, coronato da una guglia piramidale. Esternamente, le murature sono rivestite da lastre di pietra dello spessore di 10-20 cm. Caratteristica peculiare della Ghirlandina è la marcata inclinazione (circa 1,1 gradi) in direzione sud-ovest. Per contrastare tale rotazione, iniziata già in fase di costruzione, furono realizzati nel 1338 due archi in muratura sul lato sud della torre al fine di collegarla con il Duomo fino alla quota di 11,5 m (Fig. 1), poi ricostruiti nel 1905 a causa della loro eccessiva deformazione<sup>4</sup>.

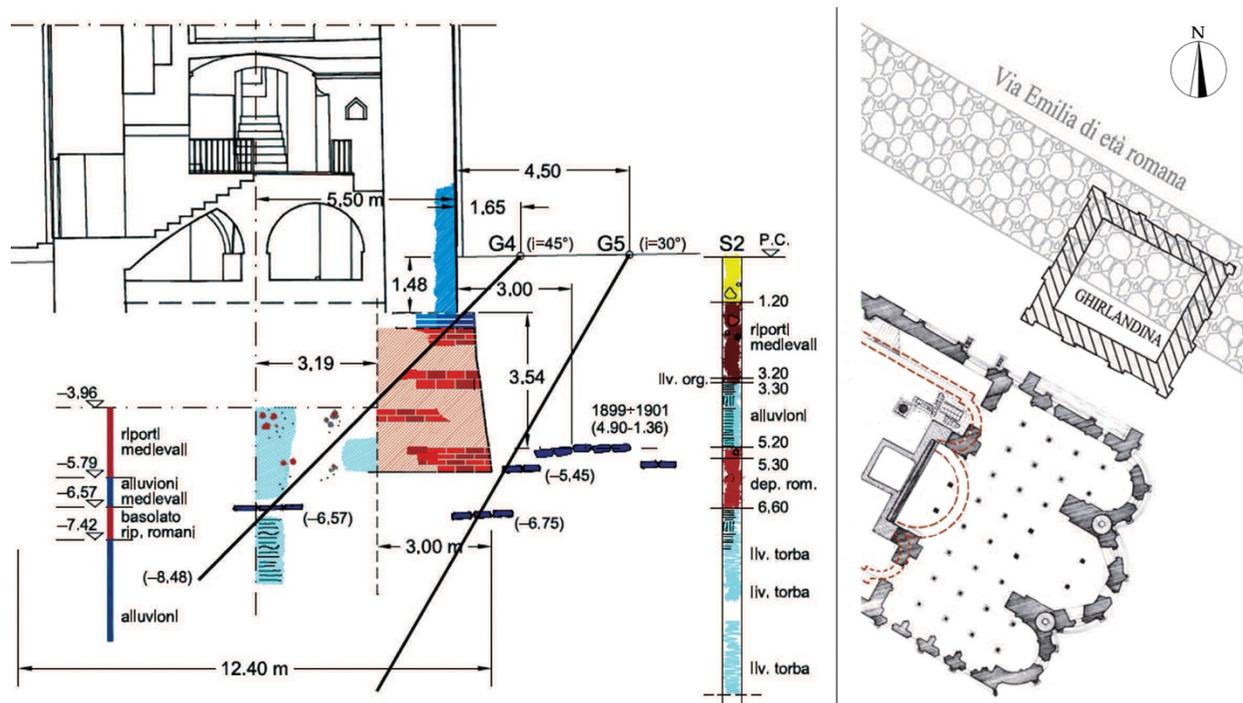


Fig. 2 A sinistra la composizione stratigrafica del terreno di fondazione della Ghirlandina, da RENATO LANCELOTTA, *Aspetti geotecnici nella conservazione della Torre Ghirlandina*, a cura di R. Cadignani, Roma, Luca Sossella Editore 2009 («La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione»), pp. 178-193. A destra, l'ipotesi di localizzazione dell'antica Via Emilia, al di sotto del lato Nord della Torre, DONATO LABATE, *Il contributo dell'archeologia alla lettura di un monumento*, a cura di R. Cadignani, Roma, Luca Sossella Editore 2009 («La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione»), pp. 66-77.

La causa del dissesto va ricercata negli assestamenti del terreno iniziati durante il processo di costruzione e accentuati dalle peculiarità del substrato archeologico e da alcuni errori nella tecnica costruttiva. Recenti studi e ispezioni hanno infatti evidenziato fondazioni molto povere e poco profonde (Fig. 2), senza pali di sostegno, che hanno consentito un cedimento complessivo di circa 2 m dalla costruzione ad oggi<sup>5</sup>. Inoltre, il substrato di fondazione risulta particolarmente disomogeneo a causa della parziale sovrapposizione (nella parte settentrionale) con l'antica Via Emilia<sup>6</sup> (Fig. 2). La presenza della massicciata consolidata ha fortemente limitato i cedimenti verso nord, favorendo l'inclinazione della torre verso sud, dove grava anche il peso del duomo e il terreno è meno consistente<sup>7</sup>. Dai dati a disposizione emerge che la rotazione complessiva della torre è di circa 0,9 gradi verso ovest e 0,7 gradi verso sud. In realtà, parti della struttura appartenenti a diverse fasi costruttive presentano inclinazioni differenti, a testimonianza dell'evoluzione dei cedimenti nelle due direzioni durante le successive fasi di cantiere, in quanto ogni livello è stato costruito sulla verticale (con l'uso del filo a piombo) di quello sottostante. L'evoluzione dell'assetto strutturale della torre è stata ricostruita grazie a un rilievo geometrico ad alta precisione e all'applicazione del cosiddetto "monitoraggio storico"<sup>8</sup>: la rotazione è iniziata dapprima in direzione sud, innescata non solo dalle disomogeneità nel sottosuolo (sopra descritte) ma anche dalla vicinanza della "pesante" Cattedrale. Solo dopo il completamento della torre, la struttura ha iniziato a ruotare anche in direzione ovest, favorita dalla costruzione della nuova sacrestia nel XIV secolo e dalla demolizione di alcuni muri di contrasto alla fine del XIX secolo (Fig. 3). Recenti studi hanno inoltre dimostrato che l'inclinazione in direzione ovest procede ora più rapidamente di quella in direzione sud: tale fenomeno presenta un trend in crescita, con una leggera accelerazione del fenomeno a partire dal 2007 e ancor più dal 2012<sup>9</sup>.

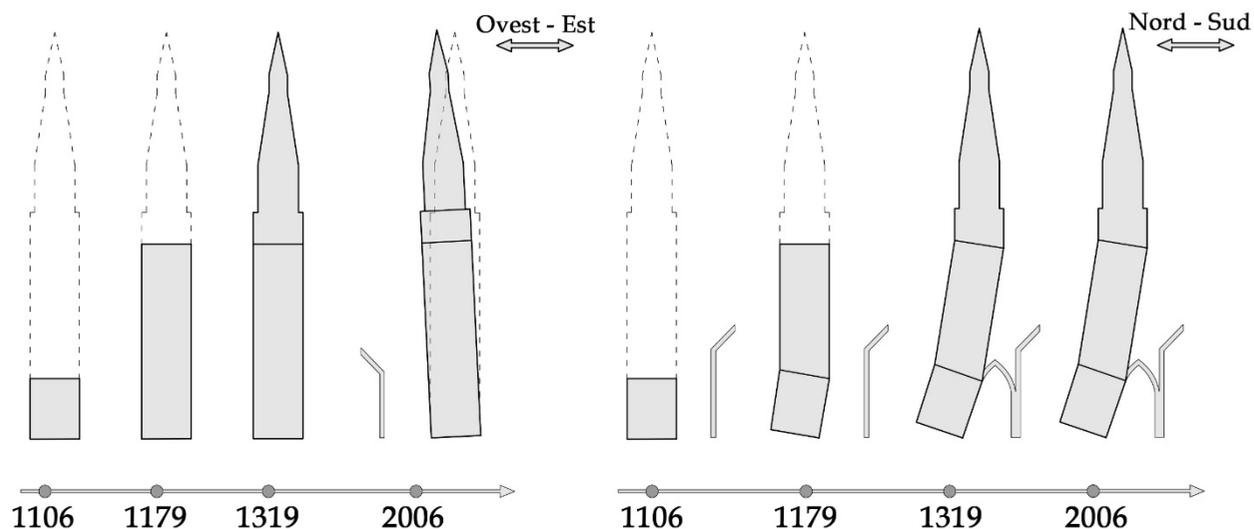


Fig. 3 Inclinazioni della torre durante le fasi di costruzione.

### Effetti dei terremoti sull'inclinazione della torre: i dati del monitoraggio statico

Il sistema di monitoraggio della torre Ghirlandina comprende un pendolo di 23 m di altezza, tre estensimetri di base sotto le fondazioni dei lati sud e ovest e due deformometri sui due archi che collegano la torre alla cattedrale (Fig. 4). Particolarmente significativi sono i dati rilevati in occasione degli eventi sismici che hanno colpito il territorio emiliano nel gennaio e maggio 2012, di magnitudo 5.4 e 5.9 rispettivamente. Durante i terremoti di gennaio, due dei tre estensimetri (E1 e E2) hanno registrato un lieve abbassamento (cioè il terreno sotto le fondazioni si è assestato). Purtroppo però nessun dato è stato registrato durante le scosse di maggio.

I dati dei due deformometri D1 e D2 mostrano una diminuzione della deformazione dopo i terremoti di maggio: -0,51 mm su una base di 5 m nella scossa principale e -0,43 mm nella principale scossa di assestamento. Poiché i dati sono registrati ogni 30 minuti, probabilmente durante lo scuotimento si sono verificati anche aumenti di deformazione, ma la configurazione finale delle strutture adiacenti, influenzata anche dagli assestamenti del terreno, è stata tale che la torre si è allontanata dalla cattedrale, causando la diminuzione della deformazione negli elementi di collegamento. Questa ipotesi è coerente coi dati del pendolo (Fig. 4): infatti, dopo la prima scossa (sia nel terremoto di gennaio che in quello di maggio), l'inclinazione della torre in entrambe le direzioni è diminuita. La seconda scossa, in tutti i casi, ha indotto un nuovo aumento dell'inclinazione, ma minore della diminuzione iniziale. Nel complesso risulta quindi che i terremoti hanno avuto un effetto positivo sulla torre, almeno per quanto riguarda l'inclinazione. La riduzione dell'inclinazione considerando tutti i terremoti è notevole: 7,9 mm in direzione sud e 5,1 mm in direzione ovest, sui 23 m di altezza del pendolo. Questa riduzione recupera circa 15 anni di cedimenti, dato che l'aumento medio è di circa 0,5 mm/anno, principalmente in direzione Ovest<sup>10</sup>. È inoltre interessante notare che una misura, del 29 maggio, è stata registrata mentre l'evento sismico era ancora in corso, mostrando un aumento molto consistente dell'inclinazione (+15 mm verso sud, + 7,4 mm verso ovest), mezz'ora dopo assestata a soli 0,5 mm in entrambe le direzioni.

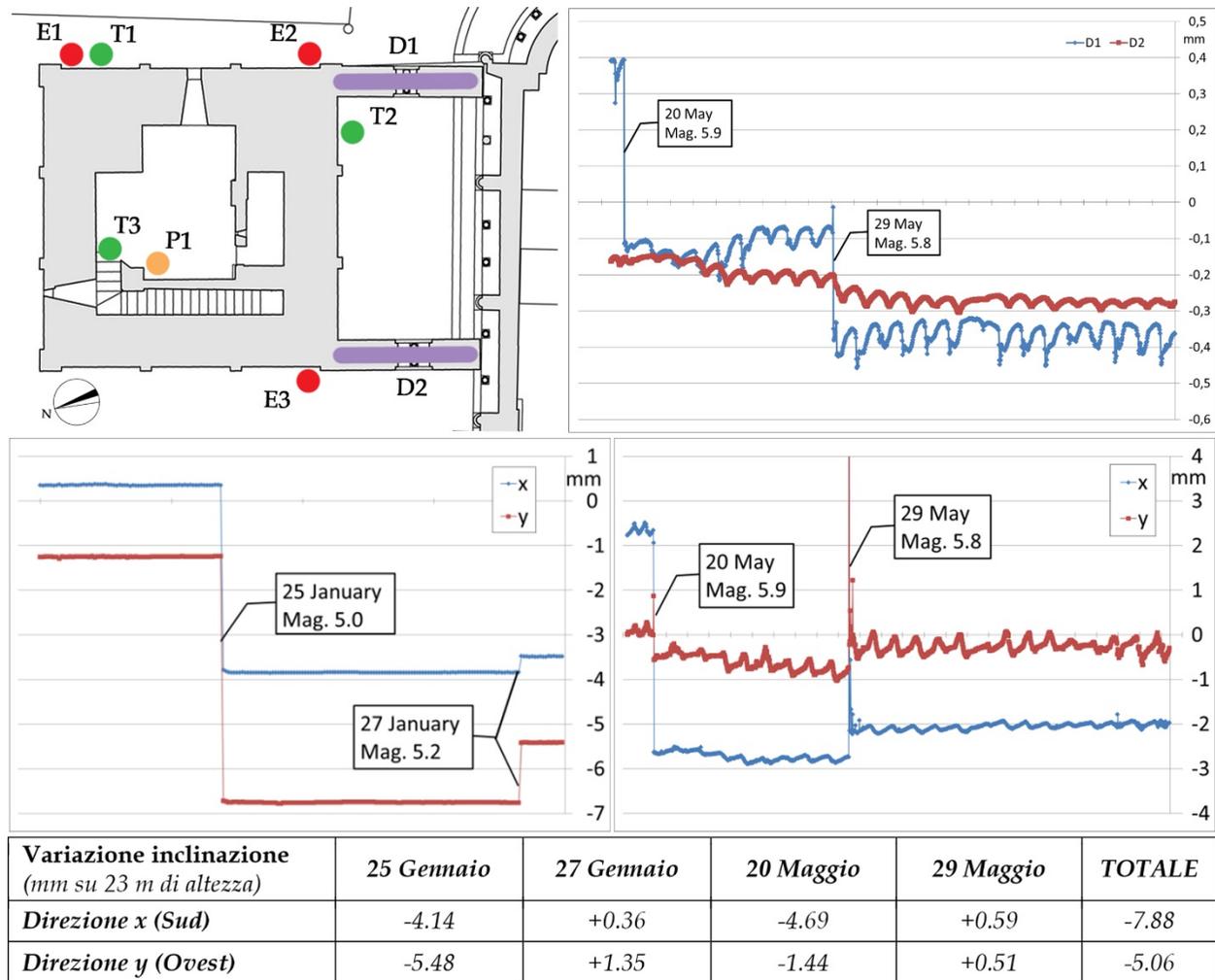


Fig. 4. In alto da sinistra il sistema di monitoraggio statico della Ghirlandina; i dati dei deformometri D1 e D2 a Maggio 2012; sotto, i dati del pendolo (a sinistra le scosse di gennaio, a destra quelle di maggio). In basso, la tabella con i valori registrati dal pendolo in occasione delle scosse principali di gennaio e maggio e i totali complessivi nelle due direzioni.

I risultati inaspettati del monitoraggio statico potrebbero essere legati a una diversa durata dell'evento sismico, a effetti reologici nel terreno, a diverse componenti verticali delle azioni sismiche. Questo mostra quanto complessa e per certi versi imprevedibile sia la relazione tra la torre e ciò che si trova sotto e intorno a lei, sia in campo statico che sismico, aggiungendo ulteriori incertezze al già complesso compito della modellazione strutturale delle costruzioni storiche, che guida i progetti di consolidamento. I risultati del monitoraggio possono fornire informazioni preziose per la calibrazione di questi modelli, soprattutto quando, come in questo caso, gli effetti delle interazioni con il terreno, gli edifici circostanti e la storia stessa sono così difficili da quantificare.

### Conclusioni

I dati di monitoraggio acquisiti sulla torre Ghirlandina durante i terremoti del 2012 hanno dimostrato la difficoltà di comprendere appieno e quindi di modellare il comportamento strutturale degli edifici storici, date le incertezze sulle fasi di costruzione, le mutevoli condizioni al contorno, le caratteristiche dei materiali e del terreno, i danni e altre "orme della storia"<sup>11</sup>. In campo geotecnico, il metodo osservazionale<sup>12</sup> è spesso utilizzato

per sopperire a queste incertezze, adattando il progetto in corso d'opera, sulla base di osservazioni sul campo, che possono differire dalle previsioni teoriche. Un approccio simile può essere proposto anche per il patrimonio culturale architettonico<sup>13</sup>, in linea con le richieste dell'UNESCO di controllo periodico e di analisi delle reazioni ad eventi traumatici. Considerando un monumento come un modello fisico, testato sulla vera scala spaziale e temporale, il monitoraggio permette di leggere i risultati di una parte di questo esperimento ed eventualmente di confrontarli con un modello numerico strutturale. In molti casi, questo può essere sufficiente a garantire la conservazione sicura del monumento, ma quando è necessario un intervento, il metodo osservazionale può aiutare a limitarlo al minimo. I risultati del monitoraggio forniranno poi indicazioni sull'efficacia dell'intervento o sulla necessità di correzioni in corso d'opera. Il metodo osservazionale può trovare così una nuova giustificazione nei principi del restauro, che raccomandano di evitare tutti i lavori inutili e di limitare gli interventi al minimo necessario per la conservazione. In ogni caso occorre agire con consapevolezza, attraverso la definizione di un piano di monitoraggio strutturale adeguato, che permetta di acquisire una visione ampia della struttura e di tutti i fattori che influiscono sulla sua stabilità<sup>14</sup>.

## Ringraziamenti

Questo lavoro non sarebbe stato possibile senza l'esemplare attività di studio e conservazione della torre organizzata dal Comune di Modena, che ha installato il sistema di monitoraggio, costituito un comitato scientifico e diretto i lavori di restauro, grazie anche al finanziamento della Fondazione Cassa di Risparmio di Modena.

<sup>1</sup> MANUEL GUIDO, *Il sito Unesco*, a cura di R. Cadignani, Roma, Luca Sossella Editore 2009 («La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione»), pp. 24-27.

<sup>2</sup> CARLO BLASI, et alii, *I dati del monitoraggio per la comprensione dei movimenti della torre Ghirlandina*, a cura di R. Cadignani, Roma, Luca Sossella Editore 2009 («La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione»), pp. 194-205.

<sup>3</sup> Cfr. Rossella Cadignani (a cura di), *La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione*, Roma, Luca Sossella Editore 2009; Cfr. Rossella Cadignani (a cura di), *La torre Ghirlandina. Storia e restauro*, Roma, Luca Sossella Editore 2010.

<sup>4</sup> RENATO LANCELLOTTA, *La torre Ghirlandina: una storia di interazione struttura-terreno*, «Rivista italiana di Geotecnica», 2013, p. 14.

<sup>5</sup> RENATO LANCELLOTTA, *Aspetti geotecnici nella conservazione della Torre Ghirlandina*, a cura di R. Cadignani, Roma, Luca Sossella Editore 2009 («La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione»), pp. 178-193; RENATO LANCELLOTTA, DONATO SABIA, *Identification Technique for Soil-Structure Analysis of the Ghirlandina Tower*, «International Journal of Architectural Heritage», s. IV, vol. IX, 2015, pp. 391-407

<sup>6</sup> DONATO LABATE, *Il contributo dell'archeologia alla lettura di un monumento*, a cura di R. Cadignani, Roma, Luca Sossella Editore 2009 («La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione»), pp. 66-77.

<sup>7</sup> CRISTINA CASTAGNETTI et alii, *Geodetic monitoring and geotechnical analyses of subsidence induced settlements of historic structures*, «Structural Control and Health Monitoring», s. XII, vol. XXI, John Wiley & Sons 2017, pp. 1-15.

<sup>8</sup> STEFANO ALFIERI et alii, *La struttura, dissesti e lesioni*, a cura di R. Cadignani, Roma, Luca Sossella Editore 2009 («La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione»), pp. 146-163; EVA COÏSSON, FEDERICA OTTONI, *Il monitoraggio storico, ovvero la lezione della storia agli strutturalisti*, a cura di A. Aveta, M. Di Stefano, Napoli, Arte Tipografica Editrice 2013 («Filosofia della Conservazione e Prassi del Restauro»); CARLO BLASI, EVA COÏSSON, *The importance of historical documents for the study of stability in ancient buildings: the French Panthéon case study*, «Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)», s. IV, vol. VII, 2006, pp. 359-368.

<sup>9</sup> CRISTINA CASTAGNETTI et alii, *Monitoring leaning towers by geodetic approaches: effects of subsidence and earthquake to the Ghirlandina Tower*. «Structural control and health monitoring», XXIII, 2016, pp. 580-593.

<sup>10</sup> CARLO BLASI et alii, *I dati del monitoraggio...*, op. cit.

<sup>11</sup> PERE ROCA, *Considerations on the significance of history for the structural analysis of ancient constructions*, a cura di P. Lourenço, C. Modena, P. Roca, Amsterdam, Balkema 2004 («Proceedings of IV Structural analysis of historical constructions»), pp. 63-73

<sup>12</sup> KARL TERZAGHI, RALPH B. PECK, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, In: RALPH B. PECK, *Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics*, «Geotechnique» s. II, vol. XIX, Londra, Chapman and Hall, 1948, pp. 171-187

<sup>13</sup> ICOMOS/ISCARSAH, *Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, 2003.

<sup>14</sup> Il presente articolo è frutto del lavoro congiunto dei tre autori. Nello specifico: Concettualizzazione, E.C., L.F e E.Z.; Acquisizione dati: E.C.; Analisi e interpretazione dei risultati: E.C., L.F e E.Z.; Scrittura - bozza, L.F e E.Z.; Scrittura - revisione E.C.