



# Studio e monitoraggio del quadro fessurativo e del comportamento sismico del Duomo di Orvieto

Per monitorare il Duomo di Orvieto, l'ENEA ha utilizzato le sue più innovative tecnologie abilitanti, competenze interdisciplinari e strumentazione di eccellenza per la salvaguardia e per la conservazione del patrimonio culturale; grazie a queste indagini è stato possibile definire gli interventi per la messa in sicurezza e il contenimento dei rischi sismici

*DOI 10.12910/EAI2016-051*

*di Gerardo De Canio, ENEA*

L'ENEA già da diversi anni collabora con la Direzione Regionale del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo dell'Umbria e con l'OPSM (Opera del Duomo di Orvieto) per attività connesse alla salvaguardia del Duomo di Orvieto. Nell'ambito di questa collaborazione l'ENEA ha effettuato: il progetto e la messa in opera del supporto per il gruppo scultoreo *Maestà con Baldacchino ed Angeli Reggi Cortina* sulla lunetta del portale maggiore della Cattedrale; il progetto del basamento antisismico della statua bronzea di *S. Michele Arcangelo e Drago*; il progetto di fattibilità, con verifiche sperimentali su tavole vibranti, per la ricollocazione in duomo delle statue dei dodici Apostoli e del gruppo scultoreo dell'Annunciazione di Francesco Mochi, le cui due statue saranno posizionate sui basamenti dotati dei dispositivi antisismici in marmo dell'ENEA (Figura 1).

A seguito della crisi sismica iniziata ad aprile 2009 (poi terremoto de L'Aquila), la Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici dell'Umbria e l'ENEA hanno effettuato diversi sopralluoghi per le verifiche strutturali della Cattedrale. In tali occasioni è stato identificato un quadro fessurativo in larga parte nuovo, e solo in parte collegato a lesioni chiaramente storicizzate e tenute sotto controllo da diversi decenni. Pertanto, nel 2013 la Direzione Regionale Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo ha affidato all'ENEA l'incarico di effettuare lo studio ed il monitoraggio del quadro fessurativo e del comportamento sismico, ai fini della valutazione del comportamento strutturale e della vulnerabilità sismica della cattedrale, e di definire gli interventi per la messa in sicurezza e il contenimento

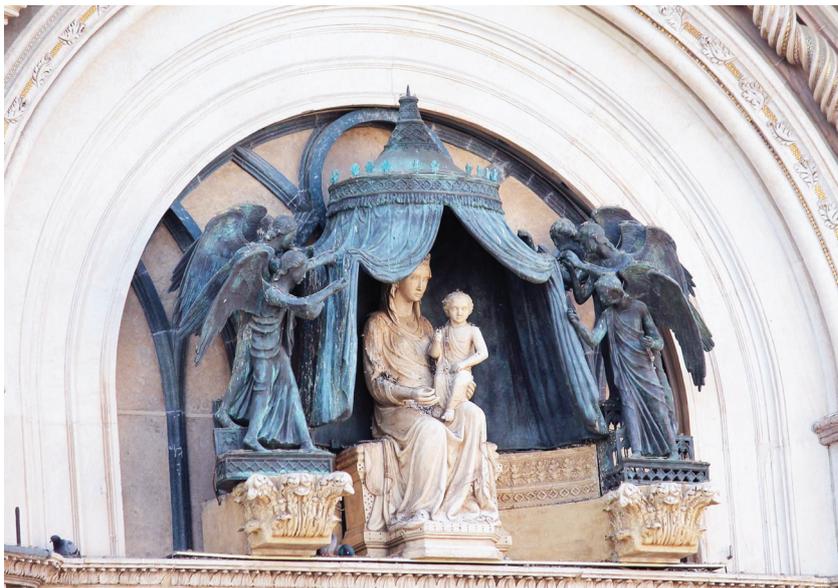


Fig. 1 Il gruppo scultoreo "Maestà con Baldacchino ed Angeli Reggi Cortina" sulla lunetta del portale maggiore della Cattedrale di Orvieto dopo la ricollocazione

dei rischi sismici. L'inquadramento generale dello studio corrisponde agli indirizzi emanati con la pubblicazione nella gazzetta ufficiale del 29 gennaio 2008 della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri e con le *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*.

L'attività ha la durata di quattro anni e si articola in tre fasi:

1. indagini sulle condizioni attuali dell'opera per la determinazione dello stato di conservazione degli elementi strutturali e per la mappatura dettagliata delle fessure esistenti nelle colonne, negli archi delle navate e in tutte le altre superfici, comprese quelle affrescate;
2. uso integrato di tecnologie abilitanti e di competenze interdisciplinari per:

- indagini strutturali e di tomografia sonora delle colonne e delle zone del pavimento della navata intorno alle colonne;

- monitoraggio delle fessure alle connessioni navata-transetto e navata-facciata tramite sensori Fiber Bragg Grating (FBG) su fibra ottica;
- rilievo del quadro fessurativo delle volte affrescate con laser ITR-IRGB a colorimetria remota;
- sondaggi della zona absidale tramite Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) per la ricostruzione della geometria delle murature di fondazione;
- monitoraggio a vibrazioni e sismico del duomo e dei suoi macro elementi strutturali;
- monitoraggio satellitare SAR (Synthetic Aperture Radar) con tecniche PS (Permanent Scatterers) degli spostamenti relativi navata-transetto-facciata;

3. determinazione della vulnerabilità sismica del Duomo ed indicazioni progettuali per eventuali interventi conservativi di riduzione del rischio sismico.

La configurazione architettonica della Cattedrale di Orvieto consiste di tre corpi principali: la facciata tricuspidale di Lorenzo Maitani, il corpo della navata centrale e delle due navate laterali, il massiccio transetto. Essi possono essere considerati tre corpi separati, con caratteristiche dinamiche diverse, che interagiscono tra loro durante l'evento sismico. La stima delle masse partecipanti sismiche associate ai modi di vibrare dei tre corpi separati viene fatta confrontando il contributo in frequenza all'accelerazione quadratica media (gRMS), ottenuta tramite integrazione numerica della funzione Power Spectral Density (PSD) dei segnali accelerometrici. Questa informazione, associata all'analisi della parte reale e parte immaginaria della Cross Spectral Density (CSD) tra i segnali in punti diversi, consente di identificare i modi principali di vibrazione e la stima delle masse sismiche partecipanti [1].

Il primo passo delle attività ENEA è consistito nel rilievo del quadro fessurativo dei tre corpi principali nelle zone di connessione, dove sono stati posizionati i sensori accelerometrici per la misura delle vibrazioni ed i sensori FBG per il monitoraggio delle fessure. In parallelo è stata effettuata la mappatura del quadro fessurativo delle colonne della navata centrale ed il monitoraggio nel tempo della sua evoluzione. Le indagini di tomografia sonora delle colonne mostrano come l'interno delle colonne risulta realizzato con muratura (blocchi di tufo o materiale incoerente) con caratteristiche meccaniche inferiori rispetto al rivestimento esterno in blocchi di travertino e basaltina. Per la valutazione della vulnerabilità sismica è applicato il metodo dei cinematismi di collasso dei macro

elementi strutturali in accordo con il DPCM 09-02-2011 "Valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio Culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al DM 14/01/2008", in accordo con il testo approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLP) il 30 luglio 2010. Il DPCM 2011, al Cap. 5.4.3 "Chiese, luoghi di culto e altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi", suggerisce la possibilità di studiare le chiese procedendo

ficati per il duomo di Orvieto ed il posizionamento della rete accelerometrica per il monitoraggio a vibrazioni delle connessioni tra macro elementi.

Ai fini della verifica sismica, la determinazione del Fattore di Confidenza (FC) per il calcolo delle accelerazioni di attivazione dei cinematismi di collasso nelle analisi cinematiche lineari e non lineari è stata fatta in accordo con il DPCM 2011. Il materiale è ipotizzato come muratura rigida non

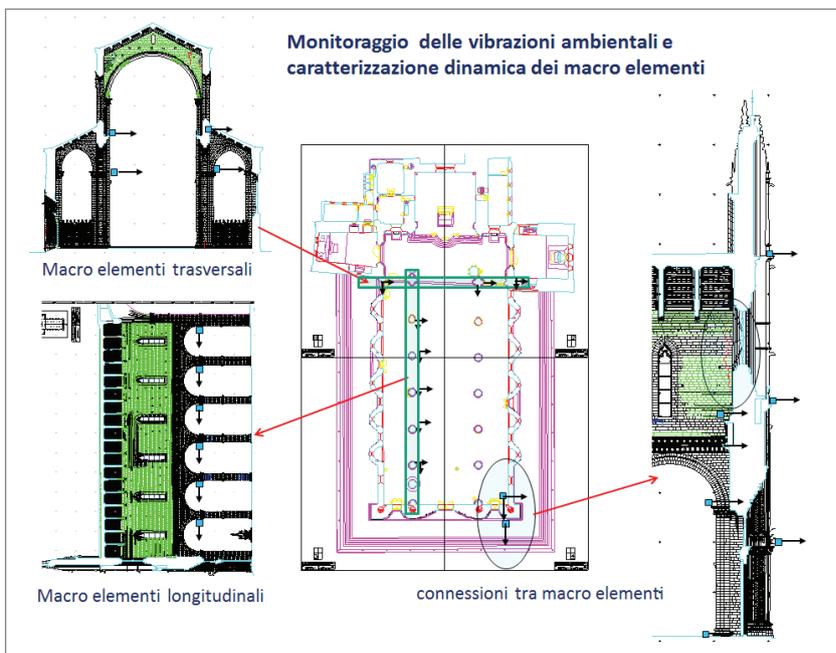


Fig. 2 Cattedrale di Orvieto: macro elementi trasversali e longitudinali e rete accelerometrica per il monitoraggio delle vibrazioni della facciata, della navata centrale e delle connessioni con facciata e transetto

con analisi locali che si riconducano allo studio della struttura per singole porzioni, dette macro elementi. La distribuzione delle forze sismiche deve assicurare l'equilibrio rispetto alle azioni orizzontali. La Figura 2 mostra i macro elementi trasversali e longitudinali identi-

ficanti a trazione ed il fattore di confidenza viene applicato direttamente alla capacità della struttura come fattore di riduzione del valore dell'accelerazione corrispondente ai diversi Stati Limite. L'identificazione delle frequenze critiche e la stima delle masse sismiche partecipanti  $M^*$  è stata

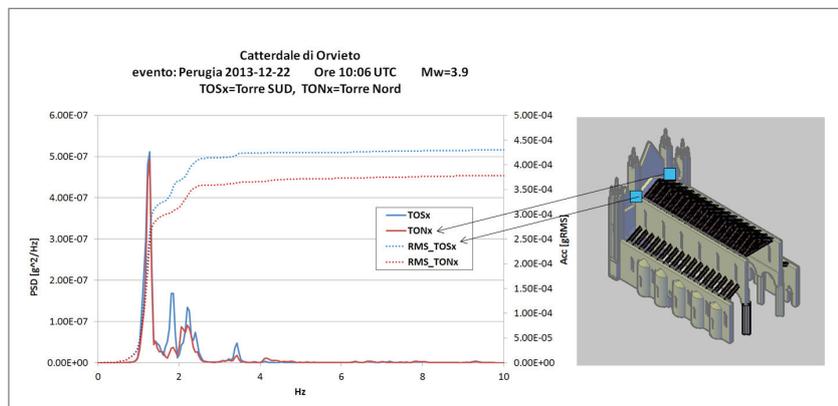


Fig. 3 Analisi in frequenza dei segnali accelerometrici registrati durante il sisma del 22 dicembre 2013 ore 10:06 UTC, Mw=3.9, epicentro prov. Perugia: grafici delle funzioni PSD e gRMS ai punti di misura TON (Torre Nord) e TOS (Torre Sud)

fatta tramite analisi dei dati della rete di monitoraggio strutturale.

In Figura 3 viene riportata l'analisi in frequenza dei segnali accelerometrici ai punti di misura TOS (torre sud) e TON (torre nord) della facciata del duomo, registrati durante il sisma del 22 dicembre 2013, ore 10:06 UTC, Mw=3.9, con epicentro in provincia di Perugia (latitudine 43.38, longitudine 12.50, profondità 9 km). Dai grafici della funzione Power Spectral Density (PSD) e del valore quadratico medio dell'accelerazione (gRMS) (Figura 3) è possibile identificare le frequenze critiche dei principali modi di vibrare e le associate masse sismiche partecipanti  $M_i$ , il cui valore è dato dal rapporto tra il contributo energetico alla frequenza critica, in termini di incremento dell'accelerazione quadratica

media gRMS, rispetto all'energia totale del segnale.

Sulla base dei rilievi per la mappatura dettagliata del quadro fessurativo, dell'identificazione dinamico-strutturale e dei risultati delle verifiche numeriche, sono stati messi a punto i progetti di massima degli interventi strutturali per il miglioramento sismico delle pareti e delle colonne della navata centrale:

- migliorare il comportamento sismico delle pareti tramite consolidamento delle buche pontai e inserimento al loro interno di elementi scatolari con funzione di diatoni di collegamento tra i paramenti delle murature;
- collegare gli elementi scatolari per conferire maggiore duttilità nei confronti delle azioni fuori piano e

capacità portante ai maschi murari tra le monofore;

- inserire catene con elementi dissipatori lungo il pavimento del corridoio della navata centrale;
- rinforzare gli archi di collegamento navata-transetto tra le due colonne lobate della navata ed i due pilastri polilobati del transetto;
- cerchiare con diatono della colonna lobata della parete sud della navata;
- ancorare le travi delle capriate lignee di copertura della navata centrale alle pareti nord e sud tramite staffe metalliche collegate con elementi dissipativi ai capochiavi per ridurre l'effetto di sfilamento/martellamento. Si conferirebbe perciò alle travi del tetto anche la funzione di tiranti per l'incatenamento delle due pareti della navata e la riduzione della luce libera. Questi interventi risultano opportuni anche alla luce degli eventi sismici del 30 maggio e del 24 agosto 2016 (Terni Ml 4.1 e Rieti Mw 6.0).

*Ricercatori ENEA che hanno contribuito alle attività sul Duomo di Orvieto: Flavio Borfecchia, Michele Caponero, Alessandro Colucci, Francesco Di Biagio, Giorgio Fornetti, Massimiliano Guarneri, Alessandro Giocoli, Salomon Hailemikael, Maria Luisa Mongelli, Dario Rinaldis, Ivan Roselli, Angelo Tati.*

*Per saperne di più: gerardo.decanio@enea.it*

## BIBLIOGRAFIA

- [1] De Canio G., Mongelli M., Tati A., Giocoli A., Roselli I., Rinaldis D., Borfecchia F., "Structural monitoring of the columns at the Cathedral of Orvieto", in Proc. of 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMI-7), July 1-3, 2015, Torino, Italy