
GLI EFFETTI DINAMICI DEL MOTO DELLE CAMPANE: IL CASO DEL CAMPANILE DI SAN FRANCESCO A PIETRASANTA

di Stefano Cerri *, Giovanni Buratti **, Paolo S.Valvo **, Italo Viti ***

(* Studio Techné s.r.l., Lucca, ** Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale,

*** Libero Professionista, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Lucca)

Premessa

Il presente articolo trae spunto dall'omonima Tesi di Laurea in Ingegneria delle Costruzioni Civili, discussa il 27 febbraio 2018 presso l'Università di Pisa [1].

Sommario

Il moto oscillatorio delle campane è in grado di provocare effetti di notevole entità sulle strutture che le accolgono, specialmente se queste si trovano in cattivo stato di conservazione e presentano fenomeni di dissesto. Una valutazione preliminare di queste conseguenze può essere eseguita per mezzo di trattazioni analitiche, dalle quali è possibile conoscere le caratteristiche principali del moto oscillatorio e le azioni che i bronzi sono in grado di trasmettere alle strutture. Dopo un'adeguata fase preliminare di acquisizione informazioni, i campanili possono essere studiati attraverso modelli di calcolo agli elementi finiti, al fine di conoscerne lo stato di salute globale e le proprietà dinamiche. Per mezzo di ulteriori trattazioni analitiche e agli elementi finiti è possibile conoscere gli effetti che il sistema oscillatorio genera sulla struttura di supporto, in modo da valutare la necessità di analisi approfondite, oltre che di eventuali strategie d'intervento.

Introduzione

I campanili storici costituiscono sistemi molto complessi da analizzare, sia per gli innumerevoli aspetti costruttivi associabili alle torri in muratura, sia per le caratteristiche peculiari legate alla dinamica delle strutture. Studiare una costruzione di questo tipo significa pertanto valutarne la forma e le dimensioni, le caratteristiche meccaniche dei materiali e dei dettagli costruttivi, oltre che il "contesto strutturale" all'interno del quale essa è inserita, senza trascurare lo stato di conservazione delle membrature. Si dovrà ovviamente tener conto anche delle caratteristiche inerziali delle campane, della loro disposizione all'interno della struttura e delle modalità con cui esse vengono suonate.

Questa metodologia è stata applicata al caso di studio del Campanile della Chiesa di San Francesco a Pietrasanta (LU), facente parte del complesso monastico realizzato dai Frati Francescani a

Galileo n.2

partire dal 1535 e oggi sede della Parrocchia del SS. Salvatore e della Fondazione Centro Arti Visive. Contestualmente all'intervento di risanamento conservativo dell'opera, realizzato tra maggio 2017 e giugno 2018, la Soprintendenza Archeologica, delle Belle Arti e del Paesaggio per le Province di Lucca e Massa Carrara ha proposto di eseguire una valutazione riguardo alla possibilità di far tornare a suonare le campane mediante il classico movimento oscillatorio, come avveniva in passato. Oggi, per motivi di sicurezza, i bronzi vengono suonati esclusivamente tramite percussione con martelletto elettrico. Non avendo la possibilità di svolgere rilevamenti diretti sulla dinamica del campanile e delle campane, si è deciso di affrontare il problema mediante elaborazione di modelli analitici e modelli agli elementi finiti.



I - Complesso di San Francesco e dettaglio del campanile

Il Campanile della Chiesa di San Francesco

Il campanile di San Francesco è stato costruito tra il 1670 e il 1678. La struttura portante, realizzata in muratura di pietra calcarea rivestita nella parte alta con laterizi a facciavista, sorge sul fianco sud-est della chiesa, all'intersezione tra i maschi murari del transetto e dell'aula centrale. Ha un'altezza di 23,5 m e una pianta pressoché quadrangolare che alla base misura 4,40 per 4,70 m circa e che si riduce progressivamente con l'altezza fino a raggiungere le dimensioni di 4,10 per 4,10 m in sommità. Lo spessore dei paramenti murari è molto variabile e oscilla tra un massimo di 130 cm a un minimo di 57 cm. All'interno sono presenti quattro impalcati. Il primo e il quarto sono costituiti da volte a crociera in mattoni; il secondo e il terzo sono interamente in legno, così come la struttura di copertura a padiglione. I vuoti dei setti murari si concentrano nella parte sommitale, dove ogni prospetto ospita un'apertura della cella campanaria e un oculo di forma ovale.

Prima dell'inizio dei lavori di restauro le superfici esterne in laterizio apparivano particolarmente ammalorate, caratterizzate da scagliature, sgretolamenti e alveolizzazioni dei mattoni, alcuni dei quali in equilibrio precario e minaccianti un crollo parziale. Alcune lesioni verticali interessavano la sommità degli archi sovrastanti le aperture e gli spigoli dei paramenti murari esterni in laterizio in corrispondenza delle antiche catene in ferro, ormai completamente ossidate e inservibili.



2 - Sezione verticale e dettagli dello stato di conservazione della muratura

Galileo n.2

Analisi e caratterizzazione dei materiali

Le membrature degradate sono state esaminate attraverso analisi petrografiche al microscopio su campioni di malta e di laterizio dal Dr. Marcello Spampinato di S. Maria del Giudice (LU). Queste hanno messo in luce la scarsa qualità produttiva dei materiali da costruzione, caratterizzata dalla presenza di impasti friabili con addensamenti e grumi fino a dimensioni millimetriche, manifatture grossolane e cotture insufficienti a garantire la vetrificazione completa della componente argillosa dei mattoni.

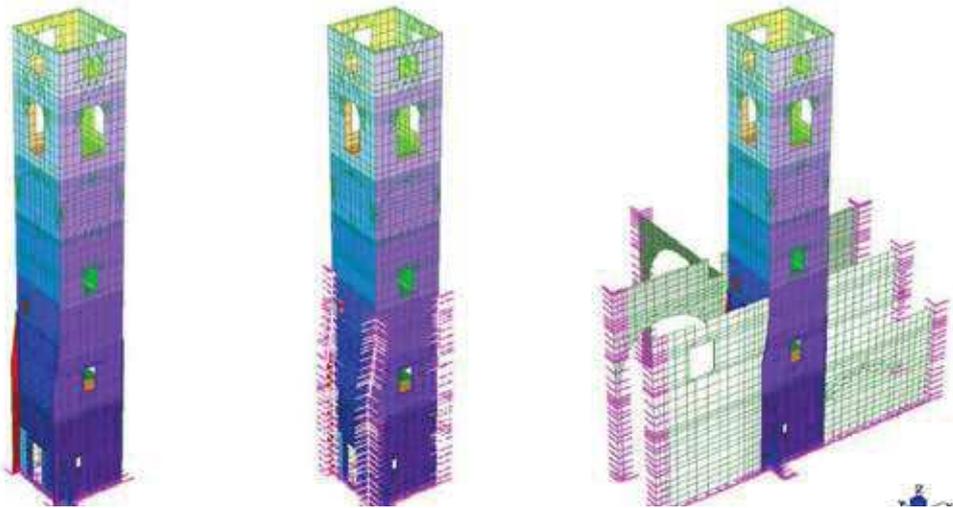
Inoltre, dalla parte superiore della struttura sono stati estratti alcuni blocchi allo scopo di eseguire prove di carico a compressione presso il Laboratorio Ufficiale per le Esperienze sui Materiali da Costruzione dell'Università di Pisa. Contrariamente alle attese, i campioni di laterizio (rettificati e rasati con malta prima dei test di carico) sono risultati dotati di una buona resistenza, evidenziando che le carenze strutturali erano circoscritte alla zona superficiale del paramento murario. Dato il ridotto numero di campioni e l'elevata dispersione dei dati, si è deciso cautelativamente di eseguire la modellazione della muratura in mattoni del campanile facendo riferimento ai valori riportati sulla Normativa Tecnica nazionale [2], come già fatto per quella in pietrame misto.



3 - Misurazione e prova di carico su un provino di laterizio

Modellazione del campanile

Il comportamento meccanico del campanile è stato analizzato secondo il *metodo agli elementi finiti (f.e.m.)*, implementato attraverso il programma di calcolo *Straus7* [3]. La struttura è stata schematizzata con un modello discreto, nel quale i pannelli murari formano una griglia (*mesh*) di elementi bidimensionali a uno e a due strati (rispettivamente elementi *plate* e *laminated*); questi ultimi rappresentano la muratura a due paramenti della porzione superiore della struttura. La mesh è stata dapprima disegnata in *AutoCAD 2016* [4] a partire dai prospetti e dalle sezioni prodotte dal rilievo geometrico e poi importata su *Straus7*, dove sono stati definiti i vincoli e le caratteristiche di ogni elemento. La stessa procedura è stata seguita per la modellazione delle strutture di murarie adiacenti al campanile.



4 - Modelli di calcolo: modello A, campanile isolato (a sinistra); modello B, campanile incastrato (al centro); modello C, campanile con muri di contrasto (a destra)

Galileo n.2

Analisi preliminari

Per valutare la qualità del modello sono state condotte analisi modali su tre varianti: modello A, campanile isolato; modello B, campanile incastrato; modello C, campanile con muri di contrasto (quest'ultimo più vicino alla condizione reale della struttura). I risultati ottenuti sono stati comparati confrontando le frequenze associate ai modi di vibrare simili, osservando che quelle del modello C ricadevano sempre all'interno del campo definito dai due casi limite (modelli A e B), ma sempre più vicine alla condizione di campanile incastrato.

Il modello C è stato sottoposto anche a un'analisi statica lineare sotto l'effetto dei carichi permanenti gravanti sulla costruzione. Le tensioni di compressione massime puntuali ottenute hanno mostrato che la muratura sfrutta circa il 43% della resistenza disponibile. Si è considerata ammissibile la presenza di modesti valori di trazione localizzati in corrispondenza delle aperture in grado di provocare fessurazioni di estensione ridotta e non sufficienti a influenzare il comportamento strutturale globale del campanile.

Studio del moto delle campane

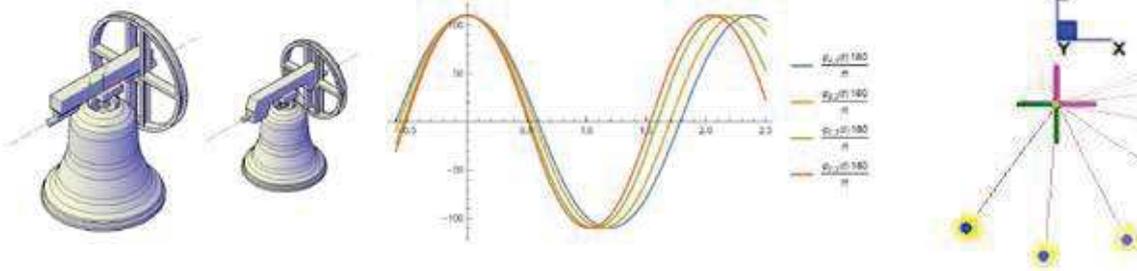
Sulla torre campanaria sono tuttora presenti cinque campane risalenti al 1744. Quattro sono attive ancora oggi e portano i seguenti nomi (in ordine decrescente di dimensioni): la Maggiore, la Seconda, la Terza e la Quarta. Hanno un peso totale di circa 1270 kg e sono sospese alla quota di 19 m, ai fianchi delle aperture della cella campanaria. Originariamente queste dovevano essere installate sul castello di travi in legno posto a 20 metri di altezza, ma sulle memorie dei frati risalenti al 1965 si legge: "Data l'impossibilità di trovare personale per il suono delle campane, abbiamo dovuto provvedervi con l'impianto elettrico messo in opera dalla Spa «Brevetti Lorenzi» Milano" [5]. In quel periodo i bronzi furono appesi ad apposite travi metalliche con sezione scatolare quadrata e svincolate a torsione, a loro volta appoggiate su mensole in pietra murate alle imposte degli archi. Al fianco di ogni campana venne fissato un motore elettrico in grado di imprimere il moto rotatorio alla trave mediante un sistema di trasmissione a pignone e catena. Oggi questi motori sono disattivati e le campane non vengono suonate con il classico movimento oscillatorio ma, come detto in principio, mediante dei martelletti azionati da impulsi elettrici.

Ognuno dei quattro sistemi oscillanti è stato schematizzato come un "pendolo equivalente" da studiare in regime di grandi oscillazioni, dotato di massa e di inerzia rotazionale concentrate nel baricentro del sistema e collegato a una cerniera fissa senza attrito per mezzo di una biella rigida di densità nulla. Le inerzie sono state ricavate a partire da un rilievo geometrico e un controllo incrociato con i dati ricavati dalle notizie storiche [5], mentre per l'angolo di partenza del pendolo rispetto alla verticale sono stati assunti tre possibili valori sulla base della letteratura tecnica presente in materia: 80°, 95° e 110° [6]. L'equazione differenziale non lineare che descrive il moto della campana è stata risolta analiticamente in termini di funzioni ellittiche di Jacobi per mezzo del programma di calcolo *Wolfram Mathematica 10* [7]. Per tutte e quattro le campane e tutti i valori dell'angolo iniziale, sono stati ricavati l'andamento nel tempo del moto oscillatorio e delle reazioni vincolari orizzontale e verticale. I risultati analitici sono stati inoltre confermati dall'esito di alcune analisi dinamiche non lineari in regime transitorio condotte sugli stessi "pendoli equivalenti".

Galileo n.2



5 - Campanile di San Francesco: Campana Seconda con sistema di sospensione e trasmissione del moto e martelletto a impulsi elettrici

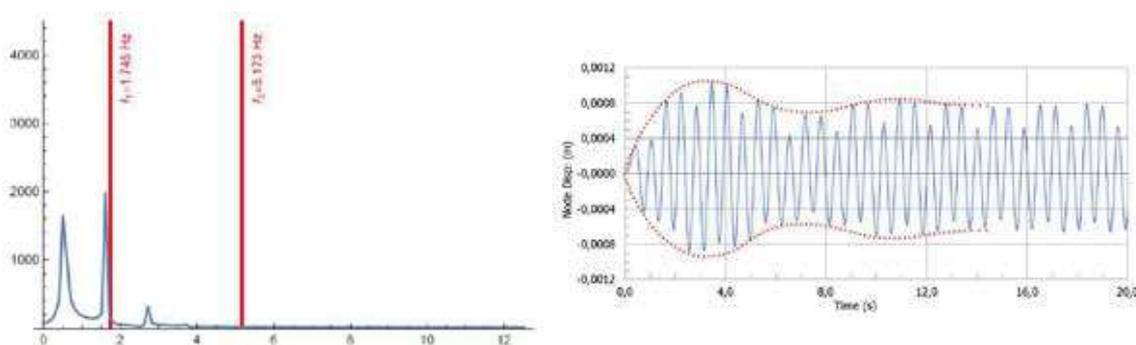


6 - Rappresentazione 3D della Campana Maggiore realizzata a partire dal rilievo geometrico (a sinistra); andamento nel tempo (in secondi) dell'angolo di oscillazione (in gradi) delle campane Maggiore (in blu), Seconda (in Giallo), Terza (in verde) e Quarta (in rosso) (al centro); modello f.e.m. del pendolo relativo alla Campana Maggiore nel caso di angolo di partenza pari a 110° (a destra)

Galileo n.2

Studio del comportamento dinamico del campanile sotto l'azione delle campane

Dopo aver studiato separatamente la struttura a torre e le campane, è stato affrontato il problema combinato, nel quale il campanile è stato sottoposto alle azioni derivanti dall'oscillazione dei bronzi. Per prima cosa si sono ricercati possibili fenomeni di risonanza attraverso un confronto tra le frequenze proprie di oscillazione delle campane e le frequenze associate ai modi di vibrare del campanile agenti sulla stessa direzione. Tutte e quattro le campane hanno manifestato interferenze con i primi due modi di vibrare della torre. Alcune frequenze sono risultate quasi coincidenti, comportando perciò un pericolo di risonanza. Per conferma, il modello agli elementi finiti del campanile con muri di contrasto (modello C) è stato assoggettato alle azioni dinamiche agenti sulla struttura per effetto dell'oscillazione dei bronzi. Dalle analisi dinamiche lineari condotte sono stati ricavati gli oscillogrammi di un punto di controllo scelto sul coronamento del campanile. Nei casi con pericolo di risonanza le curve spostamento-tempo hanno evidenziato la presenza di battimenti, un particolare andamento del moto oscillatorio che si manifesta quando le frequenze del sistema oscillante e della forzante sono molto simili. In questi casi emerge la necessità di effettuare uno studio teorico più approfondito (ad esempio un'analisi dinamica non lineare del campanile con sistemi oscillanti integrati), possibilmente affiancato da una campagna di misurazioni accelerometriche *in situ*. Per quanto riguarda gli altri risultati ottenuti, lo spostamento massimo della sommità del campanile generato dal moto delle campane è apparso molto contenuto e pari allo 0,08% dell'altezza complessiva del campanile e lo 0,15% della porzione superiore, libera dai muri di contrasto. Anche le tensioni verticali indotte sono modeste, di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelle generate dal peso proprio del campanile.



7 - Confronto tra le frequenze proprie della Campana Terza (spettro) e le frequenze proprie dei modi di vibrare del campanile sulla stessa direzione (marcatori rossi) (a sinistra); oscillogramma del punto di controllo generato dal movimento della Campana Terza nel caso di angolo di partenza sulla verticale pari a 80° con curva involuppo (a destra)

Conclusioni e sviluppi futuri

Riassumendo, il Campanile di San Francesco è stato sottoposto a un'ampia fase di studio preliminare che ha compreso un'analisi storica, un rilievo geometrico e prove di laboratorio sui materiali. Sulla base delle informazioni acquisite è stato realizzato un modello di calcolo, validato attraverso analisi modali e statiche sotto carichi permanenti. Il moto delle campane è stato trattato analiticamente ricorrendo alla soluzione del problema del pendolo non lineare, i cui risultati sono stati confermati da analisi dinamiche non lineari agli elementi finiti. Infine è stata studiata la risposta dinamica del campanile all'oscillazione dei bronzi, dapprima in maniera qualitativa conducendo un confronto tra le frequenze proprie della torre e delle campane, poi attraverso analisi dinamiche lineari agli elementi finiti.

La procedura adottata ha trascurato l'interazione dinamica tra campane e campanile, che sono stati studiati come sistemi dinamici disaccoppiati. Tale approssimazione è tuttavia giustificata dalla differenza tra le masse in gioco ed è risultata necessaria al fine di limitare gli oneri computazionali dei software di calcolo. La risoluzione analitica del problema del pendolo, basata su considerazioni geometriche e su una trattazione teorica piuttosto elaborata, risulta in buona parte automatizzabile e quindi facilmente riapplicabile ad altri casi di studio.

In generale, il Campanile di San Francesco si è dimostrato capace di sopportare gli spostamenti e gli incrementi di tensione provocati dall'oscillazione delle campane, ma in alcuni casi a rischio risonanza appare necessario effettuare studi dinamici più approfonditi, ad esempio effettuando delle misurazioni accelerometriche *in situ*.

Ulteriori studi dinamici sarebbero necessari per valutare la vulnerabilità sismica della struttura, oltre che la sicurezza a livello locale, in merito alla stabilità dei punti di sospensione delle campane e alla sensibilità degli elementi non strutturali alle vibrazioni sulle frequenze medio-alte generate dalla percussione dei bronzi.

Riferimenti

- [1] Stefano CERRI (2018): *Gli effetti dinamici del moto delle campane: il caso del Campanile di San Francesco a Pietrasanta*, tesi di laurea magistrale in Ingegneria delle Costruzioni Civili (relatori: Paolo S. VALVO, Giovanni BURATTI, Italo VITI).
- [2] Ministero delle Infrastrutture (2008): *Decreto 14 gennaio 2008, Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*.
- [3] <http://www.strand7.com>
- [4] <http://www.autodesk.it>
- [5] Frati di San Francesco in Pietrasanta (s.d.): *Cronache francescane manoscritte*.
- [6] Salvador IVORRA, Jose Maria PALOMO, Gumersindo VERDÚ, Alberto ZASSO (2006): Dynamic forces produced by swinging bells, *Meccanica*, Vol. 41, No. 1, p. 47-62.
- [7] <http://www.wolfram.com>