

Storia delle costruzioni e modelli numerici: ricerche sulle cupole di Vitozzi

Original

Storia delle costruzioni e modelli numerici: ricerche sulle cupole di Vitozzi / DE LUCIA, Giulia (QUADERNI DI STORIA DELLA COSTRUZIONE). - In: Storia della costruzione: percorsi politecnici / E. Piccoli, M. Volpiano, V. Burgassi. - ELETTRONICO. - Torino : Politecnico di Torino, 2021. - ISBN 978-88-85745-66-7. - pp. 197-208

Availability:

This version is available at: 11583/2954546 since: 2022-02-03T08:39:32Z

Publisher:

Politecnico di Torino

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Storia delle costruzioni e modelli numerici: ricerche sulle cupole di Vitozzi

Giulia De Lucia

Politecnico di Torino

Introduzione

Quando Ascanio Vitozzi, a fine Cinquecento, elabora il progetto per la chiesa della SS. Trinità, non esistono a Torino – e non esisteranno ancora per molto tempo – cupole in muratura di dimensioni così imponenti.¹ Sempre negli stessi anni, l'architetto orvietano sta predisponendo, nel complesso cantiere del santuario di Vicoforte, una copertura cupolata che diventerà – dopo il suo completamento a metà del XVIII secolo – la cupola ovale in muratura più grande al mondo. Entrambe queste cupole (Figg. 1a-1b), sebbene realizzate postume – e quindi non necessariamente fedeli al progetto originario –, conservano nella loro impostazione aspetti geometrico-dimensionali che Vitozzi stesso ha elaborato e che testimoniano una particolare audacia progettuale nell'ambito delle coperture cupolate nel territorio piemontese di fine sedicesimo secolo.

Ciò nonostante, il tema di Vitozzi progettista di cupole è ancora poco indagato dalla letteratura di riferimento, che si è maggiormente dedicata al Vitozzi ingegnere militare o urbanista.² La storia delle costruzioni, concentrandosi non solamente sugli aspetti tecnico-costruttivi delle strutture, ma anche, sugli attori, i processi e le teorie alla base delle realizzazioni architettoniche, si configura come un contesto ideale nel quale condurre approfondimenti su questo aspetto particolare della figura di Vitozzi. Alla riflessione generale di questo primo volume dei Quaderni di Storia della Costruzione si vuole quindi contribuire con una riflessione sul rapporto tra Vitozzi e le coperture cupolate.

Questo approfondimento prende in esame solamente due cupole elaborate da Vitozzi per edifici di culto, la cupola della SS. Trinità e quella del santuario di Vicoforte, poiché entrambe sono state oggetto recentemente di attività di ricerca multidisciplinare, in cui i metodi propri della disciplina dell'ingegneria strutturale sono stati utilizzati a supporto di letture storico-critiche, con un approccio di tipo circolare. Con approccio multidisciplinare circolare si vuole

¹ L. Re, "Dall'armonia dell'universo alla consistenza dell'architettura", in M. Ruffino (a cura di), *Una chiesa per il Ducato. La SS. Trinità di Torino*, Torino: Clut Editrice, 2020, pp. 61-80.

² Per una bibliografia generale sull'architetto Ascanio Vitozzi: C. Promis, *Gli ingegneri militari che operarono o scrissero in Piemonte dall'anno MCCC all'anno MDCL*, Bologna: Forni, 1871, pp. 584-590; C. Danna, *Vita di Ascanio Vitozzi disegnatore e iniziatore del tempio di Nostra Signora*, Torino: Derossi, 1882; N. Carboneri, *Ascanio Vitozzi: un architetto tra manierismo e barocco*, Roma: Officina, 1966; A. Scotti, *Ascanio Vitozzi ingegnere ducale a Torino*, Firenze: La nuova Italia, 1969; M. Viglino Davico, *Ascanio Vitozzi: ingegnere militare, urbanista, architetto (1539-1615)*, Perugia: Quattroemme, 2003.

³ Il Laboratorio di Dinamica e Sismica del Politecnico di Torino è coordinato dal Prof. Rosario Ceravolo. Per le ricerche in oggetto si ringraziano l'Ing. Ph.D. Gaetano Miraglia e l'Arch. Ph.D. Erica Lenticchia.

Abbreviazioni: ASTo = Archivio di Stato di Torino; BNT = Biblioteca Nazionale Universitaria di Torino; BRT = Biblioteca Reale di Torino.

⁴ Nella vasta letteratura sul metodo agli elementi finiti si rimanda a un inquadramento complessivo: O.C. Zienkiewicz et al., *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals (sixth edition)*, Oxford: Elsevier, 2005 (prima edizione McGraw-Hill, 1967); K. C. Rockey et al., *The finite element method: a basic introduction*, Londra:



[1b.]



intendere un processo ricorsivo della ricerca, secondo cui un dato nodo storiografico è analizzato attraverso diversi approcci disciplinari, ognuno dei quali, fornendo una propria lettura del fenomeno, contribuisce a un percorso progressivo di approfondimento e può affinare l'interpretazione delle informazioni a disposizione. In questo modo è possibile interrogare in maniera più specifica le diverse fonti (documentarie e materiali), collegare le informazioni e collocarle con maggiore precisione nel dibattito critico. Nello specifico, il gruppo di ricerca del Laboratorio di Dinamica e Sismica del Politecnico di Torino³ ha condotto sulle due cupole analisi strutturali che hanno previsto l'utilizzo di modelli numerici a elementi finiti (modelli FEM).⁴ I risultati sono stati successivamente interpretati in una dimensione storico-critica per meglio approfondire la figura dell'architetto e tentare di sciogliere alcuni nodi storiografici.

Sebbene l'analisi numerica delle strutture con modelli FEM sia largamente applicata nell'ambito della verifica strutturale degli edifici esistenti, poiché consente di simulare efficacemente il comportamento fisico reale delle costruzioni, e quindi efficientare gli eventuali interventi strutturali, la possibilità di utilizzarla a supporto di indagini storiche apre a nuovi orizzonti di ricerca in cui gli approcci metodologici più tradizionali sono integrati e potenziati dalla multidisciplinarietà, superando anche una sorta di incomunicabilità disciplinare tra i settori di studio più tecnici e la storia dell'architettura. Le due ricerche presentate, sebbene ancora in fase preliminare, consentono però già di apprezzare un metodo di lavoro fortemente dialettico, in cui le analisi di tipo tecnico sono indirizzate dalla ricerca

Fig. 1a. *Cupola del santuario di Vico-forte*, Cuneo [fotografia dell'autore, 2020].

Fig. 1b. *Cupola della chiesa della SS. Trinità*, Torino [fotografia dell'autore, 2020].

Crosby Lockwood Staples, 1975; J.N. Reddy, *An introduction to the Finite Element Method*, New York: McGraw-Hill, 1985.

⁵ Le diverse elaborazioni progettuali per il santuario di Vicoforte sono principalmente conservate in Biblioteca Nazionale di Torino, d'ora in poi BNT, Manoscritti e rari, *Raccolta Tesauro*, 59.24, con successivo numero dell'elaborato. Nello specifico sono conservati i disegni di concorso antecedenti al coinvolgimento di Vitozzi [set. -nov.1595] (BNT, ms. 59.24, Tesauro, cc. 7v-8r, 9v-10r, 12v-13r, 5v-6r, 3v-4r) e quelli di Ercole Negro di Sanfront [ago. 1595- mag. 1596] (BNT, ms. 59.24, Tesauro, cc. 15r sgg.). Per quanto riguarda i disegni relativi alle elaborazioni di Vitozzi, consultare lo studio dettagliato di I. Ferraro, "Gli interventi di Pietro Goano, Alessandro Tesauro ed Asca-

nio Vitozzi per il Santuario di Vicoforte", *Studi Piemontesi*, XXX, 2, 2001, pp. 417-440. In particolare, esiste un primo disegno di pianta a schema ellittico, con prospetto e sezione longitudinale (BNT, *Tesaurus*, cc. 39v-40r, 41v-42r, 43v-44r). Seguono due disegni pubblicati da Lorenzo Mamino, conservati in archivio privato, che sono attribuibili a Vitozzi e che raffigurano studi di piante per il santuario, in L. Mamino, "Il Rinascimento nel Monregalese", in G. Galante Garrone *et al.* (a cura di), *Valli monregalesi: arte, società, devozioni*, Savigliano: L'Artistica, 1985, pp. 37-38. A questi elaborati segue il *corpus* di incisioni del Fornaseri [mag.- giu. 1597] divisibile in due gruppi: il primo all'Archivio di Stato di Torino, d'ora in avanti ASTo, dove sono conservati tre rami raffiguranti mezza pianta, il prospetto principale e l'iscrizione, e il secondo alla Biblioteca Reale di Torino, d'ora in avanti BRT, dove è rappresentata la pianta intera. In seguito, troviamo le tavole del *Theatrum Sabaudiae* [1682] (vol. II, tavv. 39, 40 e 41).

⁶ M. Ruffino, "Settant'anni verso il restauro", in M. Ruffino (a cura di), *Una chiesa per il Ducato. La SS. Trinità di Torino*, Torino: Clut, 2020, pp. 15-18.

⁷ L'attenzione alla conservazione e alla salute strutturale della chiesa è maturata nel secolo scorso attraverso l'interesse di diverse sensibilità, dai religiosi del santuario, all'associazionismo locale e agli enti di tutela. Per un quadro generale: Società degli Ingegneri e Architetti di Torino, "Il Santuario di Vicoforte. Studi editi in ricordo di Giorgio Dardanelli", *Atti e Rassegna Tecnica della Società Ingegneri e Architetti in Torino*, 33, 6, 1979, con scritti di G. Fulcheri, C. Palmas, C. Devoti, G. Pizzetti, L. Barosso, M.I. Cametti, M. Lucat, R. Ientile, F. Bernasconi e S. Marchini, L. Mamino, G. Rigotti. Per un bilancio storiografico recente: P. Cozzo *et al.*, "Un prodigio 'sfortunato'? Valori

storica, la quale a sua volta risulta arricchita dai risultati delle analisi strutturali, innescando, come detto, una ricerca di tipo ricorsivo.

Due ricerche complementari

Considerando la letteratura e le fonti a disposizione, i due casi di studio affrontati mostrano situazioni profondamente diverse che hanno richiesto due percorsi di analisi differenti. Tuttavia, i risultati delle due ricerche vanno letti in maniera complementare, nella prospettiva di una riflessione critica di più ampio respiro.

Nel primo caso, relativo allo studio della cupola del santuario di Vicoforte, la ricerca si è focalizzata soprattutto sulle fonti documentarie, in quanto la cupola effettivamente realizzata è così distante, formalmente e cronologicamente, dalle elaborazioni progettuali di partenza che non è possibile ricavare informazioni utili per questo studio specifico. Tuttavia, è stato possibile contare su un apparato documentario molto ricco, in cui sono conservate anche diverse elaborazioni del progetto ideato da Vitozzi.⁵ In una di queste rappresentazioni (BNT, *Tesaurus*, cc. 39v-40r, 41v-42r, 43v-44r) è mostrata anche una prima copertura cupolata, che, sebbene appartenga a una proposta progettuale preliminare, è comunque segno di un'intenzionalità compositiva dell'architetto, e come tale, nelle analisi a seguire, viene considerata.

Nel secondo caso invece, la cupola della chiesa della SS. Trinità, la situazione è diametralmente opposta poiché le fonti documentarie sono molto esigue, mentre è possibile investigare la fonte materiale diretta – ossia l'edificio costruito – per ricavare informazioni. La mancanza di documenti d'archivio è dovuta principalmente all'incendio che colpì la chiesa a seguito dei bombardamenti su Torino del 1943.⁶ La parte più danneggiata fu proprio il coro della Confraternita, dove era conservato anche l'archivio. Tuttavia, non conoscendo chi – e in che modo e con quali maestranze – si sia occupato della costruzione della cupola, conclusa nel 1664, la ricerca condotta mira a verificare se l'edificio abbia seguito una traccia riferibile alle intenzioni del progettista, interrogando la fonte materiale.

Se quindi, nel primo caso, si utilizza un modello numerico di un'architettura, di fatto, mai esistita ma conosciuta attraverso le fonti documentarie tradizionali indagate dalla ricerca storico-architettonica, nel secondo caso viene utilizzato un modello che, a partire dalla cupola effettivamente costruita, cerca di compensare la mancanza di documenti per costruire una riflessione più ampia. Entrambi gli

sviluppi consentono di elaborare alcune ipotesi su Ascanio Vitozzi e sulla relativa padronanza in merito alla progettazione di cupole in muratura consentendo, in questo modo, l'arricchimento degli studi a riguardo e aprendo la strada a nuove ricerche sulle cupole di età moderna in ambito piemontese.

La cupola del santuario di Vicoforte: l'interpretazione di una cupola mai esistita

Per quanto riguarda la cupola del santuario di Vicoforte, l'approfondimento strutturale sul tracciamento elaborato da Vitozzi è possibile a valle delle ormai trentennali ricerche in merito alla salute strutturale della chiesa condotte dal Politecnico di Torino.⁷ Infatti, a causa degli evidenti problemi strutturali che hanno caratterizzato, fin dalle prime fasi costruttive, la cupola ovale in muratura più grande del mondo⁸ – con assi interni di 24 e 37 metri – il santuario è stato oggetto di interventi di rinforzo strutturale ed è costantemente sotto controllo: il Laboratorio di Dinamica e Sismica è impegnato con ricerche, analisi e monitoraggi che vengono condotti anche grazie a un elaborato modello FEM della struttura.

La modellazione di edifici di tale complessità strutturale e geometrica è una questione impegnativa, non solo per la difficoltà di ridurre a uno schema strutturale più o meno semplificato la struttura e le azioni agenti su di essa, ma soprattutto perché a questi edifici sono legate molte incertezze: sulle tecniche e modalità costruttive, sulle caratteristiche dei materiali, sulle eventuali modifiche intercorse nel tempo e per la frequente mancanza di disegni di progetto o di rilievi esaustivi. Tutto ciò rende particolarmente difficile la selezione e la sintesi delle informazioni e delle variabili necessarie alla descrizione del comportamento strutturale. Per questo, nella fase preliminare alla modellazione, la ricerca storica può fornire informazioni molto utili e può supportare il processo di selezione e sintesi delle impostazioni di partenza.

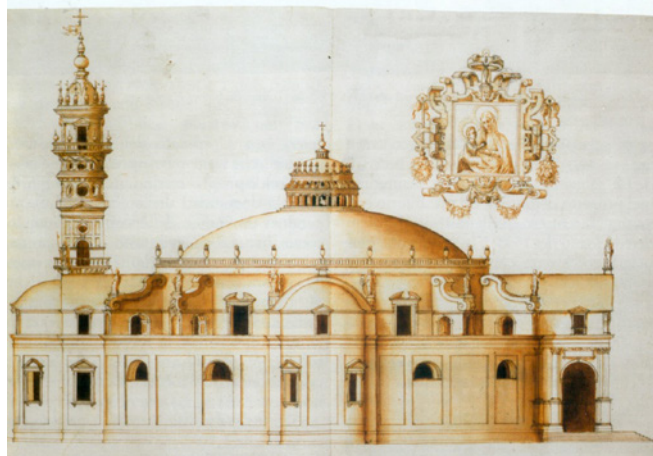
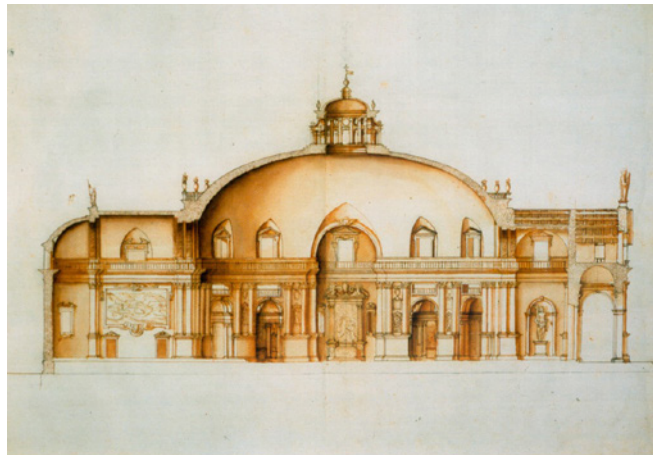
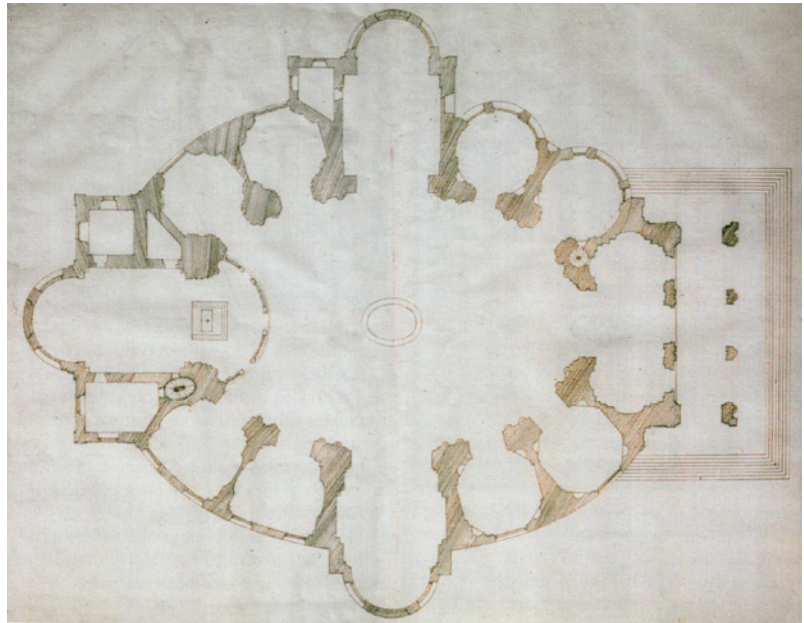
Attualmente il modello FEM del santuario di Vicoforte costituisce un caso di modellazione strutturale, noto ormai alla letteratura internazionale di settore,⁹ definito in molti dettagli grazie alla grande quantità di informazioni derivanti dalla letteratura critica, dai sistemi di monitoraggio (uno di tipo statico e uno di tipo dinamico) e dagli studi condotti negli anni, anche sulla natura del terreno, che è stato a sua volta modellato considerata la grande influenza sul comportamento dell'edificio.¹⁰

e ambizioni di un luogo 'miracolato': il Santuario di Vicoforte (Mondovì)", in O. Niglio *et al.* (a cura di), *Conoscere, conservare e valorizzare il patrimonio religioso culturale. 2. Arte, architettura, paesaggio*, Canterano: Aracne, 2017, pp. 63-70. A partire dagli anni Ottanta del Novecento, il Politecnico di Torino coordina una serie di ricerche in merito e gestisce i due sistemi di monitoraggio strutturale (dinamico e statico) installati sulla struttura. Per un quadro generale: M.A. Chiorino *et al.*, "Modeling strategies for the world's largest elliptical dome at Vicoforte", *International Journal of Architectural Heritage*, 2, 2008, pp. 274-303; Id. "Dynamic Characterization of Complex Masonry Structures: The Sanctuary of Vicoforte", *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 5, 3, 2011, pp. 296-314; R. Ceravolo *et al.*, "Monitoring of masonry historical constructions: 10 years of static monitoring of the world's largest oval dome", *Structural Control Health Monitoring*, 24, 2016, pp. 1-11.

⁸ M. Garro, "Le crepe della cupola hanno una storia antica come il Santuario", in *Salviamo il Santuario della Regina Montis Regalis*, Vicoforte: Eco del Santuario di Vicoforte Mondovì, 1962; N. Carboneri, "Il Santuario di Vicoforte nella storia dell'architettura e dell'arte in Piemonte e in Italia", *Bollettino della Società per gli Studi Storici, Archeologici ed Artistici della Provincia di Cuneo*, 71, 1974, pp. 681-699.

⁹ Per una panoramica generale dei principali studi che hanno utilizzato e implementato il modello FEM del santuario di Vicoforte: T. Aoki *et al.*, "Structural analysis with F.E. method of the elliptical dome of the Sanctuary of Vicoforte", in L. De Laurentis (Ed.), *Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration*, Proceedings of the conference, Lecce,

Fig. 2. A. Vitozzi, *Progetto per il santuario di Vicoforte*, maggio 1596, Torino, BNT, Tesauo, cc. 39v-40r, 41v-42r, 43v-44r [su gentile concessione della Biblioteca Nazionale Universitaria di Torino].



La possibilità di avere a disposizione un modello strutturale così raffinato non solo permette azioni pratiche di tutela e manutenzione ottimizzate, ma ha reso l'edificio – o, meglio, il suo modello – un laboratorio virtuale per sperimentare l'efficacia di sistemi innovativi di protezione strutturale antisismica, potendo simulare diversi scenari di rischio e di reazione della struttura.¹¹

In questa prospettiva sperimentale, il modello è stato utilizzato a sostegno di indagini storico-critiche: potendo infatti contare sulla disponibilità di un vasto apparato documentale e su un modello strutturale molto definito, è stato possibile elaborare un ulteriore modello FEM della cupola ideata da Vitozzi, rappresentata nei disegni preliminari (BNT, Tesauro, maggio 1596, cc. 39v-40r, 41v-42r, 43v-44r) (Fig. 2).

Nello specifico, i disegni considerati mostrano la proposta di quattro diverse versioni di impianto planimetrico, e un prospetto e una sezione in cui è possibile apprezzare il tracciamento preliminare della copertura cupolata immaginata da Vitozzi, anche se non è chiaro a quale dei quattro impianti planimetrici corrisponda. Per tale ragione, è stato utilizzato l'impianto planimetrico attuale per modellare il basamento della struttura. Del resto, va considerato che la pianta attuale, è molto simile alle ultime elaborazioni di Vitozzi (visibili nell'ultima incisione di Fornaseri, BRT 1597, e in quella del *Theatrum Sabaudiae*, 1682).¹²

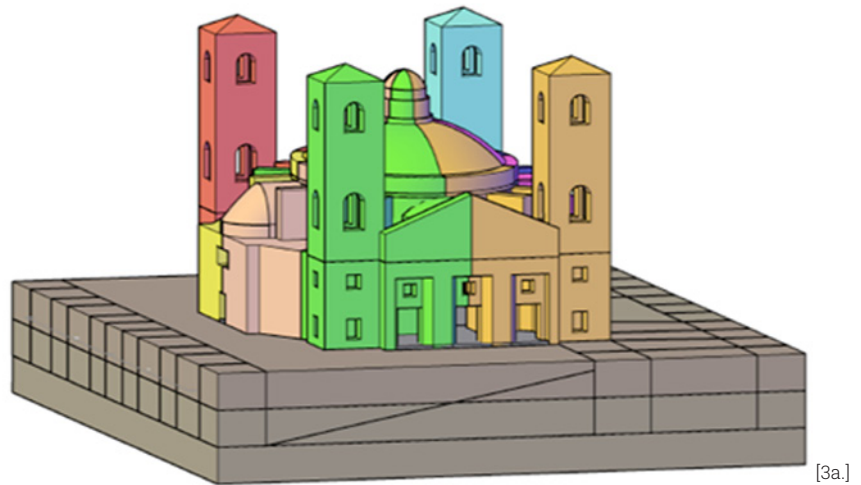
Relativamente alla cupola, il tracciamento propone una curvatura fortemente ribassata, che a una prima osservazione può destare perplessità rispetto alla possibilità di tenuta strutturale: le dimensioni così imponenti dell'imposta e un sesto così ribassato parrebbero significare che la versione vitozziana della cupola, presentata a Carlo Emanuele I come prima proposta progettuale, sia un'elaborazione molto acerba e non supportata da adeguati ragionamenti strutturali. Ciò sarebbe anche plausibile considerando soprattutto il contesto in cui l'architetto dev'essersi trovato a concepire tale progetto: in prima istanza, nonostante i suoi soggiorni nella Roma di fine Cinquecento, che era già un grande cantiere a cielo aperto di cupole,¹³ la letteratura non testimonia il coinvolgimento di Vitozzi in cantieri cupolati, e quindi era probabilmente digiuno di tale settore, ma soprattutto vanno considerate le plausibili pressioni che il Duca, deciso ad affidare l'incarico all'architetto orvietano anche in assenza di un sicuro e preciso disegno,¹⁴ deve aver esercitato su Vitozzi per la rapida realizzazione del santuario, su cui erano già direzionati grandi investimenti di tipo economico, politico.¹⁵ È quindi probabile

6-9 June 2004, Lecce: Università di Lecce, 2004, pp. 417-429; C. Casalegno *et al.*, "Soil-Structure Modeling and Updating of The Regina Monte Regalis Basilica At Vicoforte, Italy", in F. Peña *et al.* (Eds), *Structural Analysis of Historical Constructions*, Proceedings of the conference, Mexico City, 14-17 October 2014, Mexico City: National Autonomous University of Mexico, 2014, pp. 1-12; Chiorino *et al.* (Nota 7); M.L. Pecorelli *et al.*, "A vibration-based health monitoring program for a large and seismically vulnerable masonry dome", *Journal of Physics*, 842, 2017, p. 012009; R. Ceravolo *et al.*, "Issues on the modal characterization of large monumental structures with complex dynamic interactions", *Procedia Engineering*, 199, 2017, pp. 3344-3349; R. Ceravolo *et al.*, "Thermoelastic finite element model updating with application to monumental buildings", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019, pp. 1-15; G. Coletta *et al.*, "A Transfer Learning Application to FEM and Monitoring Data for Supporting the Classification of Structural Condition States", in P. Rizzo (Eds), *European Workshop on Structural Health Monitoring- Special Collection of 2020 Papers*, Proceedings of the conference, Palermo, 4-7 July 2020, Cham: Springer, 2021, pp. 947-957.

¹⁰ La sintesi dei più recenti studi e delle ricerche si può trovare in: G. De Lucia *et al.*, "The role of structural health monitoring in the seismic protection of monumental structures: the virtual lab of the Sanctuary of Vicoforte", in E. Görün *et al.* (Ed.), *Architecture and Structure*, Istanbul, 24-26 April 2019, Istanbul: Maya Basin Yayın Mat. Tic. Ltd. Şti, 2019, pp. 755-766.

¹¹ G. De Lucia, *High performance cable systems for the seismic protection of historical domes*, Ph.D dissertation, Politecnico di Torino, 2018; De Lucia *et al.* (Nota 10).

Fig. 3a. *Modello geometrico del santuario con la cupola elaborata da Vitozzi* [elaborazione a cura dell'autore].



¹² La pianta riportata nell'ultima incisione di Fornaseri (1597) e quella del *Theatrum Sabaudiae* (1682, vol. II, tavv. 39, 40 e 41) differiscono solamente per la forma e il numero dei vani che affiancano il coro. Carboneri sostiene che l'estensore del disegno del *Theatrum* abbia riportato nella pianta le modifiche già riportate nel cantiere. Per chiarimenti: Carboneri (Nota 2), pp. 86-87; Ferraro (Nota 5), pp. 417-440.

¹³ Appare evidente l'influenza dei cantieri romani nell'elaborazione vitozziana della cupola a guscio singolo, unicamente rotto da unghiate entro le quali si aprono le otto finestre e gli arconi del braccio trasversale, una soluzione simile a quella adottata negli stessi anni per la chiesa di San Giacomo degli Incurabili a Roma (per approfondimenti: M. Vanti, *San Giacomo degli Incurabili di Roma nel Cinquecento*, Roma: De Lellis, 1938, pp. 30-31). Più in generale, sui progetti e cantieri di cupole attivi a Roma a fine Cinquecento: M. Villani, *La più nobile parte. L'architettura delle cupole a Roma 1580-1670*, Roma: Gangemi, 2009.

¹⁴ G. Vacchetta, *Nuova storia artistica del Santuario della Madonna di Mondovì a Vico*, Cuneo: Società per gli studi storici archeologici e artistici della provincia di Cuneo, 1894 [1933], pp. 89.

¹⁵ Sul contesto relativo alla costruzione del santuario: P. Cozzo, *Geografia celeste dei duchi di Savoia. Religione, devozioni e sacralità in uno Stato di età moderna (secoli XVI-XVII)*, Bologna: il Mulino, 2006; L. Mamino, "Il popolo di Vico e la costruzione della grande chiesa per la madonna del Pilone",

che inizialmente Vitozzi abbia lavorato senza un piano progettuale chiaro e definito, conoscendo la grande complessità del cantiere e presumendone la lunga durata, e che abbia proseguito in maniera frammentaria, risolvendo di volta in volta i problemi più urgenti, legati soprattutto alle problematiche relative al terreno di fondazione, posticipando uno studio più accurato della superficie cupolata. Il terreno di fondazione, infatti, in larga parte di natura argillosa, ha causato cedimenti e quadri fessurati già dai primi anni di costruzione dell'edificio, di fatto solo tre degli otto pilastri poggiano su terreno roccioso, mentre gli altri cinque sono soggetti a movimento causato dallo strato di argilla.¹⁶

Per valutare quindi la consapevolezza strutturale che Vitozzi può aver adoperato nel tracciamento proposto, sono state condotte analisi sul modello FEM che riproduce la sua proposta di cupola (Figg. 3-4),¹⁷ inserita nel basamento attuale.¹⁸ Si è quindi proceduto a condurre un'analisi statica per comprendere le singolarità della cupola e poi un'analisi non lineare per ottenere i valori di deformazione e tensione presenti, in modo da valutare se, alla luce delle difficili caratteristiche del terreno, la cupola immaginata fosse comunque in grado di reggere al peso proprio, essendo frutto di un ragionamento strutturale consapevole.

I risultati delle analisi preliminari¹⁹ mostrano che le deformazioni del sistema cupola-tamburo soggette al peso proprio non raggiungono i limiti imposti dal materiale e le tensioni hanno principalmente valore di compressione e comunque rientrano nei limiti ammissibili dal materiale.²⁰ Stando a queste prime informazioni, la copertura cupolata vitozziana sembra essere stata elaborata con consapevole capacità progettuale, e quindi va a maggior ragione sottolineata la particolare arditezza formale e strutturale manifestata dal progettista.

Alla luce di questo, rimane da chiarire la riflessione – solo di natura formale o anche strutturale? – che induce Vitozzi ad abbandonare rapidamente questa soluzione per elaborare quella che sarà rappresentata nelle tavole del *Theatrum Sabaudiae* (vol. II, tavv. 39, 40 e 41)²¹ caratterizzata da uno slancio verticale più marcato.²²

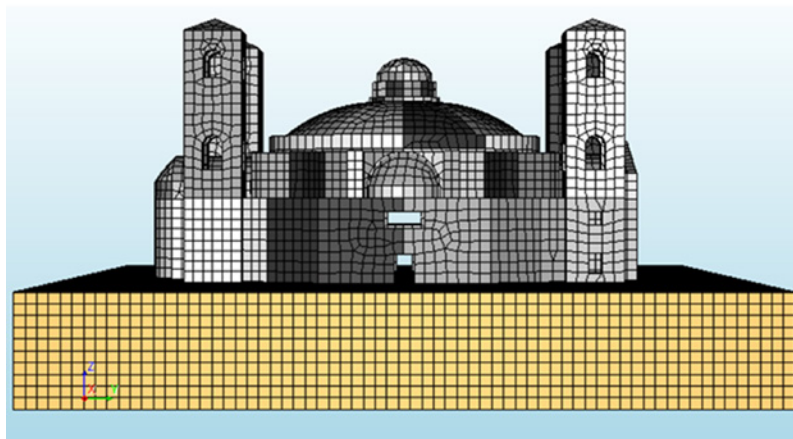


Fig. 3b. *Modello numerico* [elaborazione a cura dell'autore].

[3b.]

La cupola della SS. Trinità: analisi di una fonte materiale

Il secondo caso mostra, *ut supra*, una situazione di partenza nettamente diversa, caratterizzata dalla totale assenza di documenti grafici e d'archivio relativi alla progettazione e alla realizzazione della cupola. In questo caso, il metodo di studio multidisciplinare ha utilizzato il modello strutturale, elaborato a partire dalla fonte materiale, per compensare la mancanza delle fonti di tipo tradizionale. In occasione dei recenti restauri della chiesa²³ è stato realizzato un rilievo digitale dell'intradosso della cupola, che ha evidenziato particolari anomalie nel profilo interno della calotta: in particolare sono stati notati avvallamenti della superficie interna, localizzati in aree specifiche. Per semplicità di lettura, la pianta della calotta, di diametro di circa 16 metri, è stata suddivisa in quattro quadranti da leggere in senso orario. Le maggiori deformazioni sono localizzate nel primo e nel terzo quadrante, con avvallamenti che raggiungono i 19 cm. Si notano anche anomalie all'imposta della lanterna (Figg. 4a-4b-4c). Il modello FEM della struttura è stato realizzato a partire dall'accurato rilievo che ha permesso di integrare nel modello l'esatta conformazione geometrica attuale della cupola, ed escludere, tramite analisi specifiche, problemi strutturali rilevanti.

Successivamente, è stato possibile utilizzare il modello a supporto di indagini storico-critiche per investigare soprattutto la natura di queste depressioni superficiali, che potrebbero essere legate a difetti di progettazione o esecuzione, o a fattori esterni (il peso della copertura, l'incendio del 1943, ecc.). La ricerca assume particolare interesse a partire dal fatto che non si conosce chi abbia completato la cupola, e né se il direttore dei lavori abbia seguito o meno l'ipotesico progetto vitozziano, quesito storiografico da cui muove questa ricerca.

Sul modello FEM del sistema cupola-tamburo è stata quindi condotta un'analisi statica non lineare volta a interpretare gli stress e gli spostamenti nodali della struttura. Si è potuto così escludere che le deformazioni della calotta fossero dovute al peso puntuale della pesante copertura sull'estradosso della calotta, aggiunto dopo

Studi Monregalesi, X, 1, pp. 19-42, 2005; P. Cozzo, «Regina Montis Regalis» *Il Santuario di Mondovì da devozione locale a tempio sabauda*, Roma: Viella, 2002; G. Comino, "Fede e devozione popolare al santuario di Mondovì secondo i documenti del suo archivio. Spunti e prospettive di ricerca", *Bollettino della Società per gli Studi Storici, Archeologici ed Artistici della Provincia di Cuneo*, 88, 1983, pp. 49-73.

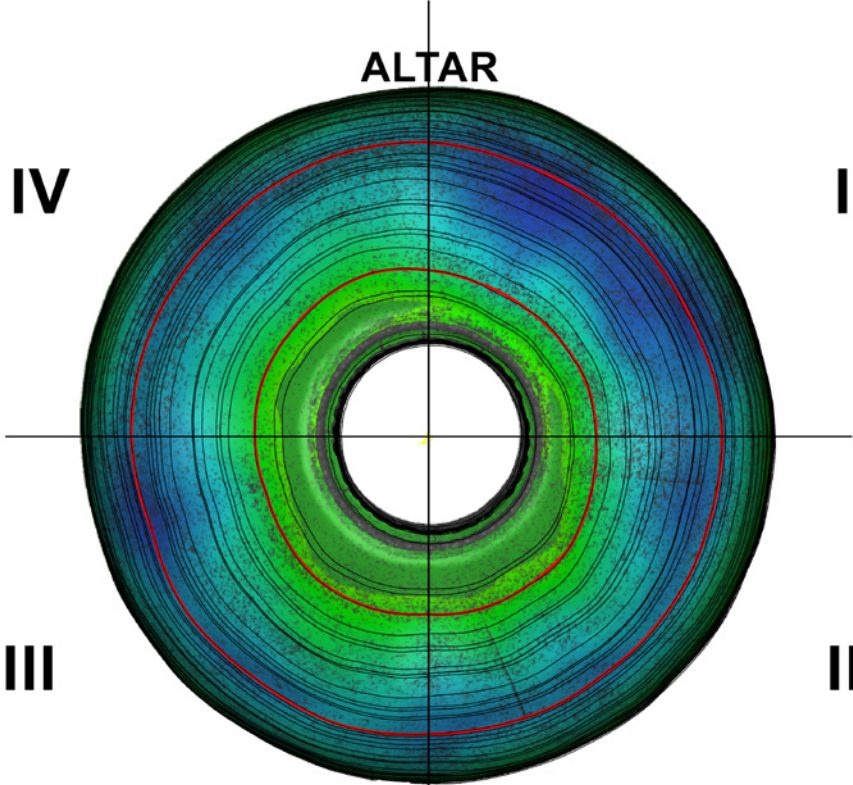
¹⁶ Tra il 1932 e il 1962 l'ing. Martino Garro ha analizzato la natura delle crepe e dei dissesti dell'edificio. I suoi studi sono conservati presso l'archivio del santuario: Garro (Nota 8). Cfr. anche M. Garro, "Brevi capitoli di storia inedita del Santuario", in *Il Santuario di Mondovì. Nuove ricerche e nuovi studi*, Borgo S. Dalmazzo, 1950, pp. 13-17. Per un inquadramento generale sugli aspetti critici della realizzazione dell'edificio: N. Carboneri, *L'architetto Francesco Gallo 1672-1750*, Torino: Società Piemontese di Architettura e Belle Arti, 1954, pp. 142-158; Carboneri (Nota 2); Id. (Nota 8), pp. 681-699.

¹⁷ Per quanto riguarda la caratterizzazione dei materiali e la calibrazione del modello, si possono consultare gli studi relativi al *model updating* esposti nella nota 8.

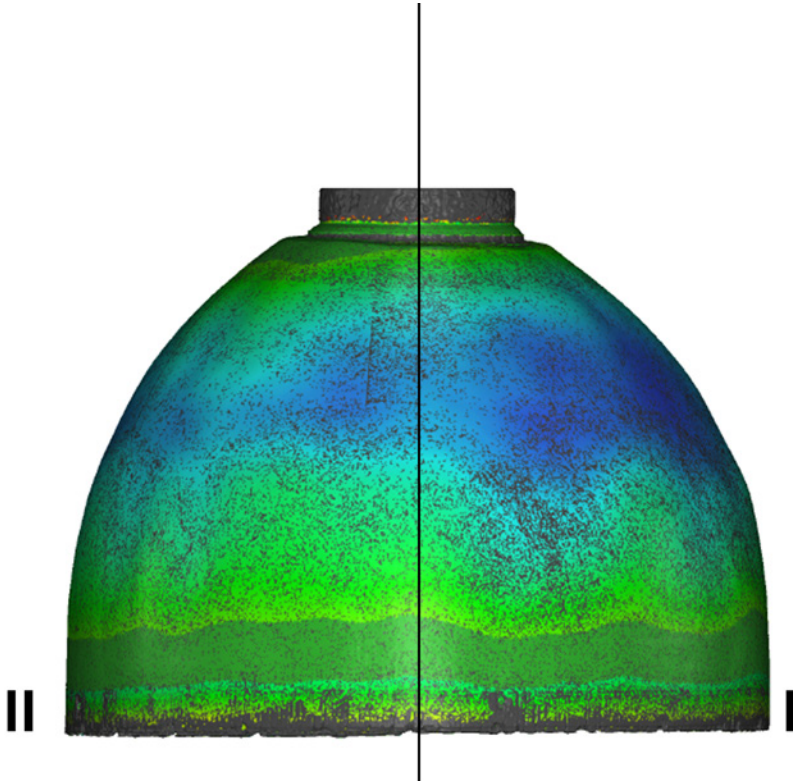
¹⁸ Nel modello è stato possibile lasciare i quattro campanili presenti attualmente poiché, per le analisi condotte, non hanno influenza sul comportamento strutturale del sistema cupolare.

¹⁹ Lo studio è ancora in corso presso il Laboratorio di Dinamica e Sismica del Politecnico di Torino.

²⁰ La conformazione del sottosuolo



[4a.]



[4b.]

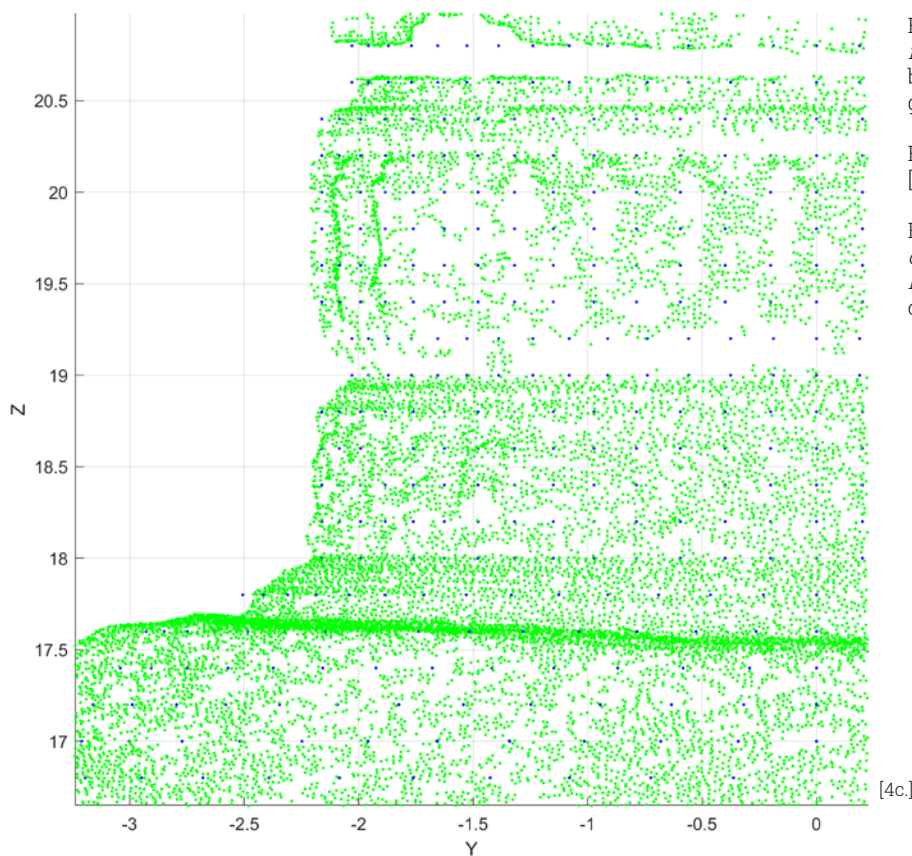


Fig. 4a. Studio della nuvola di punti del rilievo digitale [in pianta]. Le zone in blu sono le aree della calotta a maggior concentrazione di avvallamenti.

Fig. 4b. Studio della nuvola di punti [prospetto].

Fig. 4c. Dettaglio della nuvola di punti che mostra l'anomalia all'attacco della lanterna [tutte le elaborazioni sono a cura dell'autore].

[4c.]

la costruzione. Successivamente tra le varie cause è stato escluso l'incendio dei bombardamenti del 1943, attraverso analisi strutturali che hanno simulato l'influenza delle alte temperature sulla tenuta della calotta.²⁴

L'analisi dello scorrimento viscoso della muratura ha confermato che la cupola non è stata eseguita a regola d'arte: l'inclinazione della lanterna dimostra errori nell'imposta (nel terzo quadrante), che hanno causato le deformazioni nel quadrante opposto della calotta. L'effetto, causato dall'eccentricità della lanterna è un incremento della compressione all'attacco della cupola nel terzo quadrante e una decompressione sul primo quadrante. La decompressione porta, per medesime quote, a raggiungere valori di inflessione maggiori in corrispondenza del primo quadrante, proprio nella zona della cupola maggiormente interessata dalle depressioni.

Sembra quindi plausibile una generale approssimazione costruttiva nella realizzazione di questa cupola, che potrebbe anche aver seguito inizialmente il progetto di Vitozzi, ma sicuramente non in maniera accurata né in modo pienamente competente. Questa lettura è confermata da altre due questioni recentemente approfondite: in primo luogo l'unità di misura secondo cui sembrerebbe essere costruita la cupola, *i piedi liprandi*, differisce da quella utilizzata per il

determina la distribuzione degli stati tensionali in maniera disomogenea, con la concentrazione in alcune aree specifiche della calotta.

²¹ Il *Theatrum Sabaudiae* (1682) è composto di relazioni e tavole. Al santuario di Vicoforte sono dedicate tre tavole – unico tra i siti religiosi insieme alla basilica del *Corpus Domini* – che sono però prive di testo scritto. Tuttavia, nel cartiglio è specificato che si tratta del progetto vitozziano.

²² L'adozione della forma ovale negli alzati delle cupole è oggetto di ampio dibattito critico che si fonda su alcuni saggi decisivi fra cui: V. Fasolo, "Sistemi ellittici nell'architettura", *Architettura e Arti Decorative*, 7, 1931, pp. 309-324; R. Wittkower, *Art and Architecture in Italy. 1600-1750*, Harmondsworth, Penguin Books Ltd, 1958; W. Lotz, "Spazi ovali nelle chiese del Rinascimento", in Id., *L'architettura del Rinascimento*, Milano: Electa, 1977, pp. 15-87; M.R. Nobile, "Chiese a pianta

corpo basamentale della chiesa, in palmi romani (misura che presumibilmente Vitozzi continuava a usare appena giunto a servizio della corte ducale). Inoltre, il tracciamento geometrico della cupola non presenta particolari raffinatezze e arguzie progettuali, che invece Vitozzi inseriva largamente nelle sue elaborazioni planimetriche.²⁵ Evidentemente la grande ambizione costruttiva, auspicata per la prima cupola progettata per Torino città-capitale del ducato – dev'essersi sopita nel lungo perdurare del cantiere e nelle mutate aspirazioni architettoniche della corte, limitandosi a una rilevanza solo dimensionale caratterizzata inoltre da aspetti irrisolti, come la copertura dell'estradosso.²⁶

Conclusioni

I due casi studio hanno evidenziato come un approccio multidisciplinare allo studio storico delle costruzioni, da un lato permetta di sciogliere questioni ancora irrisolte, dall'altro può renderle più complesse, e aprire a nuovi orizzonti di approfondimento, contribuendo con nuove informazioni dedotte dall'interpretazione della fonte materiale e dalle analisi condotte a partire dalle fonti documentarie. I risultati ottenuti permettono di rintracciare l'ingegno progettuale che Vitozzi ha mostrato nelle sue doti da urbanista e ingegnere militare anche nella progettazione di coperture cupolate, elaborate a partire da un notevole slancio dimensionale ma comunque supportate da consapevole controllo strutturale. Nel primo caso, l'analisi numerica del progetto vitozziano non realizzato per il santuario di Vicoforte ha consentito di verificarne la validità strutturale, nonostante il tracciamento della calotta a sesto fortemente ribassato, facendo così emergere la competenza strutturale del progettista. Questa, seppur espressa in modo ancora intuitivo nell'elaborato grafico, era probabilmente radicata in una cultura costruttiva matura per formulare ipotesi di una certa ambizione, il che farebbe pensare a un successivo ripensamento formale più che strutturale della cupola. Nel secondo caso, il rilievo e la verifica della cupola della SS. Trinità nella sua conformazione attuale – realizzata postuma – pone l'accento su una matrice progettuale colta e di derivazione romana, ma con una realizzazione incerta in cui le ingenuità costruttive sono probabilmente dovute all'imperizia di maestranze che hanno agito in assenza di una guida esperta. In entrambi i casi è stato possibile contribuire al più ampio dibattito critica sulla figura di Ascanio Vitozzi, delineando contestualmente nuovi scenari di approfondimento.

ovale tra Controriforma e Barocco: il ruolo degli ordini religiosi", *Palladio*, 9, 17, 1996, pp. 41-50.

²³ In occasione dei restauri condotti dallo Studio Associato degli architetti Michele Ruffino e Lauretta Musso, un gruppo di lavoro multidisciplinare ha condotto nuove indagini, confluite in: Ruffino (Nota 1). Con scritti di M. Albera, M.V. Cattaneo, R. Ceravolo, G. De Lucia, G. Fina, L. Gentile, E. Gianasso, E. Lenticchia, F. Leo, L. Mana, L. Musso, L. Re.

²⁴ Gli studi relativi alla simulazione dell'incendio sono in fase di pubblicazione.

²⁵ G. De Lucia *et al.*, "La geometria della cupola della SS. Trinità: dal dato metrico alle valutazioni strutturali", in Ruffino (Nota 1), pp. 117-142: si faccia riferimento, in particolare modo, agli approfondimenti di E. Lenticchia per le unità di misura e di G. De Lucia per il tracciamento geometrico).

²⁶ Si veda il contributo di E. Gianasso, "Architettura e città per la chiesa dell'Arciconfraternita della SS. Trinità in Torino", in Ruffino (Nota 1), pp. 81-100.