

La Geometria come filo di Arianna: note di approfondimento sul rapporto ideazione-costruzione della più grande cupola di forma ovata del mondo

Original

La Geometria come filo di Arianna: note di approfondimento sul rapporto ideazione-costruzione della più grande cupola di forma ovata del mondo / Novello, Giuseppa; Piumatti, Paolo. - In: DISEGNARE CON... - ISSN 1828-5961. - ELETTRONICO. - 5:n.9, giugno 2012(2012), pp. 167-176.

Availability:

This version is available at: 11583/2503582 since:

Publisher:

Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale - Università di Bologna

Published

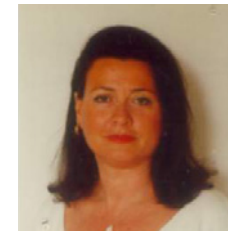
DOI:

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)



Giuseppa Novello

Giuseppa (Pina) Novello Massai, è Professore Ordinario di Disegno e di Tecniche della Rappresentazione presso il Politecnico di Torino. Ha pubblicato studi sulla Rappresentazione delle città e del territorio, con interesse verso l'evoluzione del rapporto tra conoscenza e ruolo dei media nella comunicazione scientifica e nella prassi tecnica.



Paolo Piumatti

Ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino. Ha condotto studi nel campo del rilievo urbano e architettonico, con approfondimenti sull'uso delle tecnologie dedicate alla acquisizione e al trattamento digitale dei dati e alle elaborazioni integrate per il rilievo.

La Geometria come filo di Arianna: note di approfondimento sul rapporto ideazione-costruzione della più grande cupola di forma ovata del mondo

Geometrical analysis of the largest oval dome in the world

La cupola del Santuario di Vicoforte in Piemonte costituisce un'opera di particolare complessità costruttiva sia per le sue dimensioni sia per la sua forma: è infatti la più grande cupola ovata in muratura nel mondo. Questo studio riguarda la genesi geometrica della costruzione delle cupole, ed evidenzia che la cupola costruita è, da un punto di vista dei parametri geometrici, alquanto diversa da quella disegnata nei progetti. La ricerca è focalizzata sull'analisi geometrica delle sezioni verticali della cupola, al fine indagare il profilo delle centine usate nella costruzione. I risultati possono consentire una più attillata definizione dei modelli di simulazione del comportamento strutturale e sismico che sono necessari per la conservazione dell'integrità del manufatto.

The dome of the Sanctuary of Vicoforte, the largest oval masonry dome in the world, is an exceptional expression of building technique for its shape and dimension. This study wants to add information about the geometrical conception of the dome using the modern modeling possibilities based on recent laser scanner survey. In particular it integrates the analysis of the archival drawings and the 3D survey of the dome in order to investigate the geometrical shape of the temporary centrings used in the dome construction. Improving the knowledge about the tridimensional shape and the construction techniques of such dome is of crucial importance at the moment, because the Sanctuary is the subject of a structural monitoring and research campaign due to the important settlements and cracking phenomena that affect the building.

Parole chiave: modello geometrico, forma ovata, ovale, Vicoforte, centine

Keywords: geometrical modeling, oval shape, Vicoforte, centering, scaffolding

La cupola del Santuario di Vicoforte in Piemonte costituisce, nel panorama delle cupole in muratura, un'opera di particolare complessità costruttiva sia per le sue dimensioni sia per la sua forma: le si attribuisce il primato di essere la più grande cupola di forma ovata nel mondo.

La complessità costruttiva e strutturale è testimoniata dal fatto che tra la prima fase di ideazione (Vitozzi, 1596), e la sua progettazione *esecutiva* (Gallo e Juvarra, 1728) sono intercorsi oltre 130 anni, e ancora oggi è oggetto di un costante monitoraggio per via di alcune criticità statiche.

Le fasi costruttive e la successiva vita dell'edificio sono state infatti caratterizzate da una serie di assestamenti e problematiche strutturali. La costruzione del Santuario iniziò nel 1596 su progetto di Ascanio Vitozzi, celebre architetto al servizio del Ducato di Savoia, che però curò la costruzione solo della parte inferiore del santuario fino al tamburo². A causa di cedimenti del suolo di fondazione; la struttura subì notevoli assestamenti. Solamente all'inizio del diciottesimo secolo il problema della costruzione della cupola venne risolto: Francesco Gallo, col supporto di Filippo Juvarra⁴, progettò un nuovo tamburo e una nuova cupola, diversi dall'originale progetto vitozziano, e la cupola venne eretta tra il 1731 e il 1735 (figura 01).

Ma le problematiche legate alla costruzione di una struttura tanto complessa, sia per geometria che per le eccezionali dimensioni che ne fanno un edificio unico al mondo, non si sono esaurite con la fase di edificazione: cedimenti al livello delle fondazioni hanno causato la propagazione di fessure nelle volte che mettevano a rischio l'integrità dell'edificio, tanto che per il timore di un imminente crollo nel 1983 è iniziato un vasto programma di consolidamento e monitoraggio strutturale che continua tuttora.

In particolare gli studi più recenti riguardano le strategie di modellazione strutturale e la caratterizzazione dinamica delle strutture⁵. Tali studi richiedono modelli tridimensionali dell'intero edificio e indagini sulla caratterizzazione dei materiali. Pertanto migliorare la conoscenza delle forme tridimensionali della cupola e



Figura 01. Interno della cupola. La parte inferiore della chiesa fino al tamburo, fu progettata da Ascanio Vitozzi nel 1596, mentre il tamburo e la cupola furono progettati da Francesco Gallo con Filippo Juvarra e costruiti nel 1731-1735.

delle tecniche di costruzione è di fondamentale importanza in questo momento per creare modelli più affidabili.

Le cupole ovate normalmente sono caratterizzate da una sezione orizzontale dalla forma geometricamente semplice (curva policentrica), mentre la conformazione tridimensionale spesso non è assimilabile a solidi semplici. Interessanti in tal senso sono i recenti studi sull'espressione in termini matematici della cupola ovata di San Carlino alle quattro fontane a Roma⁶. I moderni strumenti di acquisizione tridimensionale (laser scanner, fotogrammetria digitale, immagine solida) e di modellazione tridimensionale consentono una più agevole indagine sulla

geometria spaziale delle cupole a base ovata.

Nel caso studio del Santuario di Vicoforte solo recentemente, grazie alla disponibilità di un rilievo LIDAR dello stato attuale effettuato nel 2004, sono stati intrapresi nuovi studi sulle forme della geometria complessiva e che rendono possibile un primo confronto del modello spaziale con alcuni disegni di progetto, datati 1728, redatti per le centine⁷.

Il contributo intende presentare le note di approfondimento sulla costruzione delle cupole, costruzione intesa sia come configurazione geometrico-spaziale sia come risultato materiale del cantiere di costruzione.

La metodologia utilizza, secondo una prassi

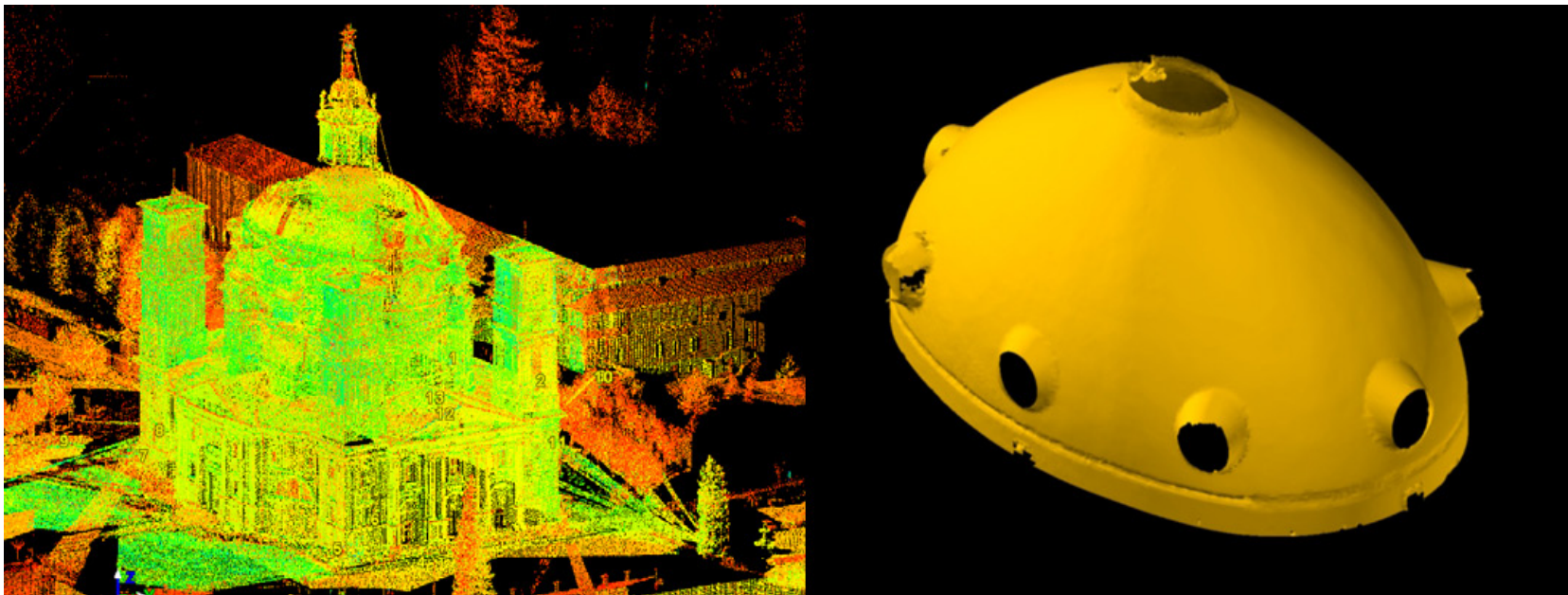


Figura 02.
Modello di rilievo: dalla nuvola di punti dell'intero edificio è stata modellata la superficie mesh della superficie di intradosso della cupola

consolidata, il rilievo dello stato attuale e in particolare sezioni verticali e orizzontali della nuvola di punti per determinare le curve geometriche semplici che meglio approssimano la curvatura dell'intradosso della cupola.

Le verifiche hanno evidenziato che la cupola costruita è, da un punto di vista dei parametri geometrici, alquanto diversa da quella ideata nei disegni di progetto.

METODOLOGIA

La metodologia di indagine utilizzata e di seguito descritta si basa sul confronto di figure geometriche semplici, in particolare ovali e archi di ovali policentrici⁸, dedotte dai disegni

di progetto e il rilievo tridimensionale LIDAR del santuario, al fine di individuare la genesi geometrica della superficie di intradosso della cupola⁹ e delle opere provvisorie di supporto alla costruzione della cupola stessa.

I 25 disegni di progetto conservati presso l'archivio del santuario di Vicoforte riportano la costruzione geometrica della cupola in pianta, sezione longitudinale e sezione trasversale, ma i dati contenuti nei documenti non sono sufficienti a determinare la genesi geometrica delle sezioni verticali. S'è allora elaborato un modello 3D della superficie di intradosso della cupola sulla base di un rilievo LIDAR per determinare il profilo di qualsiasi sezione, verticale o orizzontale,

della cupola e individuare le leggi geometriche utilizzate per definire la sua conformazione (figura 02).

Il metodo di indagine è stato applicato alla superficie interna di intradosso della cupola e alla superficie interna del tamburo.

La metodologia è suddivisa nelle seguenti fasi:

1. Analisi preliminare dei disegni d'archivio per determinare: unità di misura, scale di rappresentazione, posizione dei piani di sezione, superfici ed elementi architettonici di riferimento;
2. Confronto tra i disegni di progetto e il rilievo LIDAR al fine di valutare la congruenza delle dimensioni progettuali riportate nei disegni d'archivio rapportate alle dimensioni dell'opera

effettivamente costruita; determinazione del valore di conversione tra le unità lineari metriche e le originarie unità lineari impiegate nel progetto;

3. Analisi dei disegni di progetto per la ricerca delle costruzioni geometriche concepite in fase di progettazione;

4. Ricerca delle curve policentriche che meglio approssimano le sezioni principali della superficie interna della cupola e del tamburo;

5. Ipotesi sulla posizione delle centine e determinazione dei profili della superficie della cupola in corrispondenza di piani verticali significativi.

La prime due fasi sono volte a valutare le caratteristiche e l'attendibilità dei disegni di progetto conservati presso l'Archivio del Santuario di Vicoforte. Si tratta infatti di disegni dall'attribuzione non certa, tradizionalmente considerati opera di Francesco Gallo ma recentemente attribuiti a Filippo Juvarra¹⁰.

Per valutare la congruenza tra il modello geometrico di progetto e il modello LIDAR ottenuto dal rilievo i disegni sono stati importati in un programma CAD, scalati e ruotati in modo da rendere confrontabili le proporzioni tra i diversi disegni d'archivio e tra questi ultimi e il rilievo dello stato attuale. Per procedere alla scalatura dei disegni è stata utilizzata la scala grafica presente in molti dei disegni originali. La scala grafica è espressa in trabucchi, antica misura lineare piemontese. In prima approssimazione è stato adottato l'equivalenza 1 trabucco = 3,082596 metri che corrisponde al fattore di conversione ufficialmente adottato per il trabucco piemontese nella provincia di Mondovì prima del 1818 (così come indicato nelle *Tavole di ragguaglio dei pesi e delle misure già in uso nelle varie province del Regno col sistema metrico decimale. Approvate con decreto 20 maggio 1877*). Il confronto tra le dimensioni del tamburo così come rilevate (37,03 e 24,63 metri all'altezza delle serliane) e le annotazioni riportate dal progettista nella pianta del tamburo all'altezza delle serliane (12 trabucchi per l'asse maggiore e 8 trabucchi per l'asse minore) sembrano confermare la correttezza del fattore di conversione adottato in prima approssimazione¹².

Per attuare il confronto si sono utilizzate sia sezioni della nuvola di punti, intese come l'insieme dei punti compresi tra due piani paralleli posti a distanza +/- 20 cm dal piano di sezione, sia sezioni della superficie mesh ottenuta come interpolazione della nuvola di punti. La superficie mesh è stata utilizzata per le sezioni verticali e orizzontali della cupola, mentre per le sezioni della parte inferiore dell'aula e del tamburo è stata utilizzata la nuvola di punti: in questo caso infatti la presenza di lesene, finestre, cornici e modanature renderebbe troppo imprecisa la superficie mesh.

Lo scostamento tra punti corrispondenti dei disegni di progetto e della sezione rilevata è stato misurato perpendicolarmente alla tangente della curva conformante la superficie interna, sia sui disegni di archivio che nel rilievo dello stato attuale. Questa operazione ha evidenziato che i disegni relativi alla pianta del tamburo rappresentano un andamento della superficie interna del tamburo confrontabile con la sezione orizzontale della nuvola di punti ottenuta alla medesima altezza (all'altezza delle serliane), con modeste differenze tra il disegno di progetto e il rilievo dello stato attuale. In particolare sono molto contenute le differenze tra i punti appartenenti alla superficie interna degli sfondati compresi tra le lesene degli otto pilastri che sorreggono la cupola e che consentono di definire la geometria della forma del tamburo; la superficie delle lesene, invece, presenta scostamenti maggiori perché nei disegni le lesene, probabilmente per un artificio grafico volto a sottolinearne la presenza, sono rappresentate con un oggetto di circa 27 cm, mentre nella realtà aggettano di circa 7 cm rispetto alla superficie degli sfondati. Più precisamente le distanze tra punti corrispondenti del disegno di progetto e della sezione rilevata, misurata perpendicolarmente alla tangente della curva conformante la superficie interna, presenta differenze normalmente contenute tra +/- 5 cm, e solo in alcune zone localizzate (nel quadrante Sud Orientale) differenze comprese tra -5 e + 17 cm. Il segno negativo indica che la sezione del disegno di progetto è interna rispetto alla sezione rilevata, il segno positivo viceversa indica che la

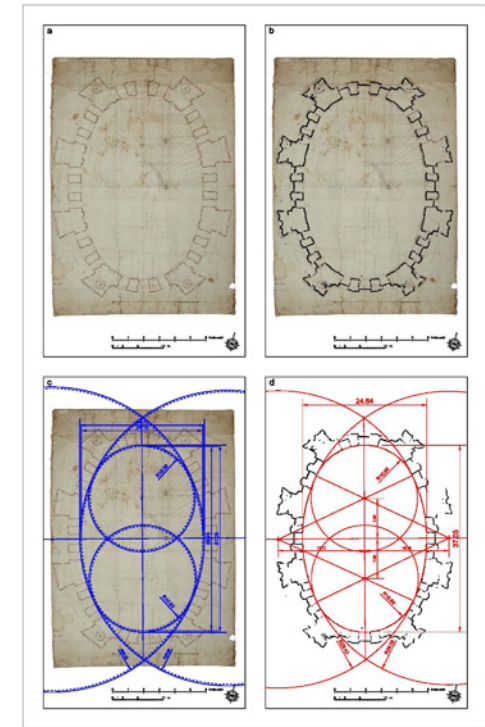


Figura 03.
Il tamburo: geometrie del disegno di progetto e del rilievo. A) disegno di progetto del tamburo (Archivio del Santuario di Vicoforte, Disegni, n. 67); B) sovrapposizione di sezione orizzontale della nuvola di punti al disegno di progetto; C) evidenziazione delle geometrie di supporto alla costruzione dell'ovale a quattro centri conformante la superficie interna del tamburo, così come desumibili dal disegno di progetto; D) evidenziazione delle ipotizzate geometrie di supporto alla costruzione sulla base della sezione della nuvola di punti.

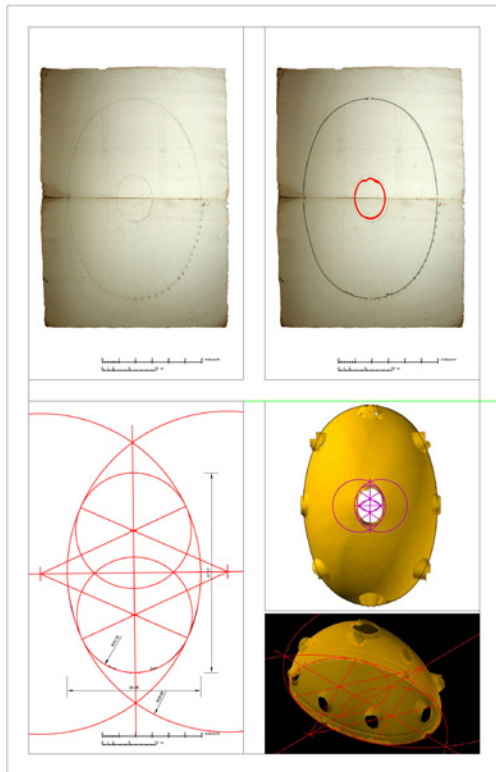


Figura 04
La cupola: geometrie del disegno di progetto e del rilievo. A) disegno di progetto della cupola, del ponte reale e tracciamento della proiezione delle centine; B) sovrapposizione di sezione orizzontale della nuvola di punti al disegno di progetto; C) evidenziazione della geometria dell'imposta della cupola ipotizzata sulla base della sezione della nuvola di punti; D) evidenziazione della geometria della chiave della cupola alla base del lanternino ipotizzata sulla base della sezione della nuvola di punti, si noti la forma canonica dell'ovale.

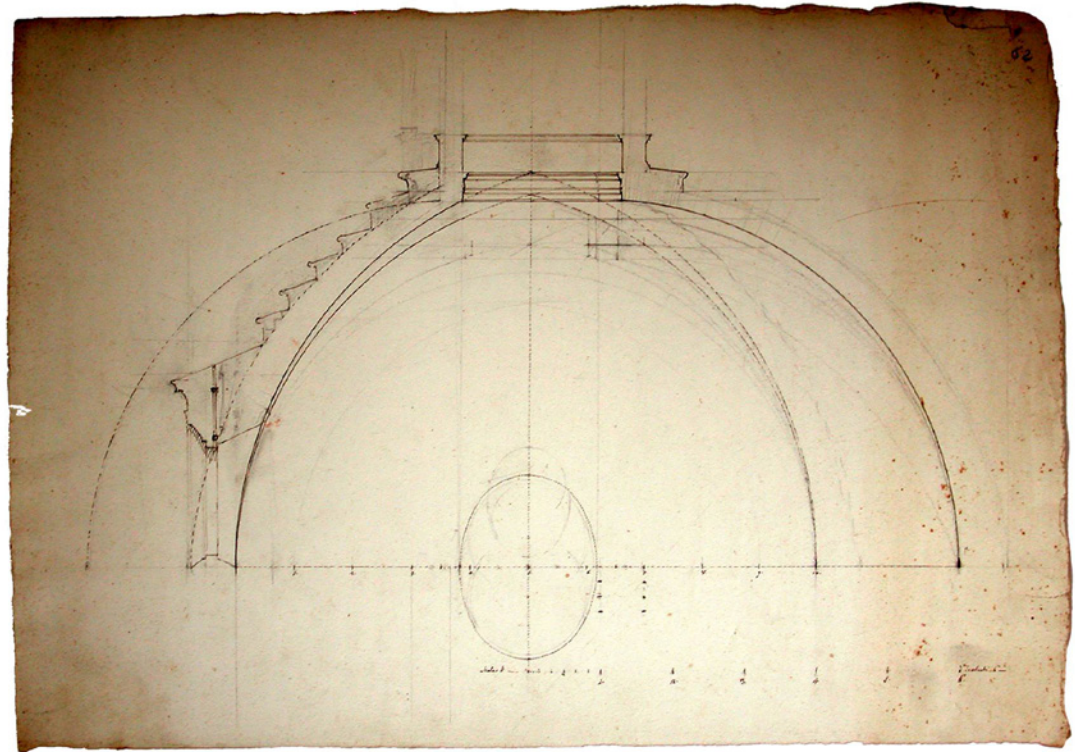
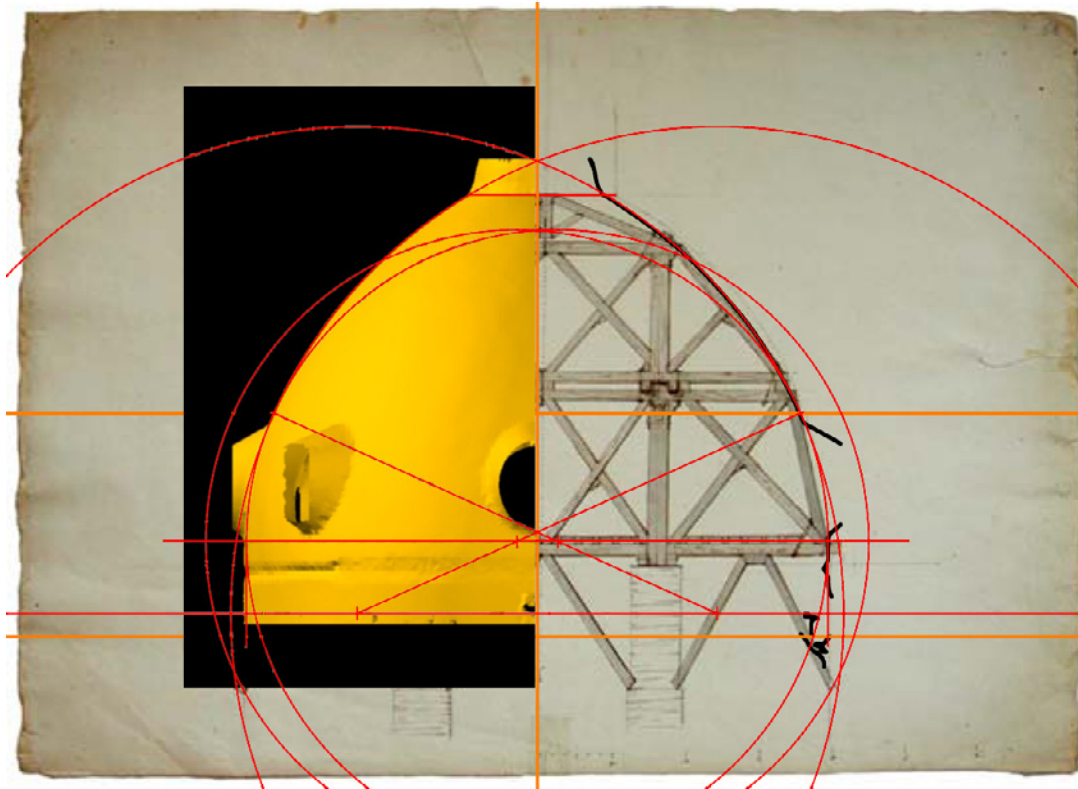


Figura 05
Disegno di progetto sia della sezione trasversale che longitudinale della cupola (Archivio del Santuario di Vicoforte, Disegni, n. 62). Le ipotesi progettuali prevedevano che la centina, sia della sezione trasversale che di quella longitudinale, fosse un singolo arco di cerchio.

sezione del disegno di progetto è esterna rispetto alla sezione rilevata (figura 03).
Le fasi 3 e 4 riguardano la ricerca delle curve che meglio approssimano la superficie dell'intradosso della cupola. I disegni di progetto riportano chiaramente la costruzione geometrica delle sezioni orizzontali del tamburo e delle volta: il progettista ha costruito la pianta sulla base di un ovale a 4 centri (figura 04). I valori caratteristici dell'ovale – posizione dei centri e dei raggi delle 4 circonferenze – desumibili dai progetti e quelli che approssimano le corrispondenti sezioni della nuvola di punti sono confrontabili.



Invece i disegni delle sezioni verticali rappresentano dei profili alquanto diversi dalla cupola realizzata (figura 05). In particolare nei disegni il profilo della centina è un singolo arco di cerchio, mentre la centina della sezione trasversale risulta adeguatamente descritta (con scostamenti massimi inferiori a 5 cm) con una curva policentrica a due archi avente l'imposta a circa 3,15 metri (pari a poco più di un trabucco) sopra il piano della cornice (figura 06). Analogamente la centina della sezione longitudinale risulta adeguatamente descritta (con scostamenti massimi inferiori a 5 cm) con

una curva policentrica a due archi di cerchio (figura 07).

Risulta chiaro che la superficie di intradosso della cupola non è descrivibile con una superficie semplice, ellissoide o superficie di rotazione: per poterla caratterizzare si è deciso di determinare molteplici profili verticali, che possono fornire indicazioni sulla geometria delle centine necessarie alla fase costruttiva.

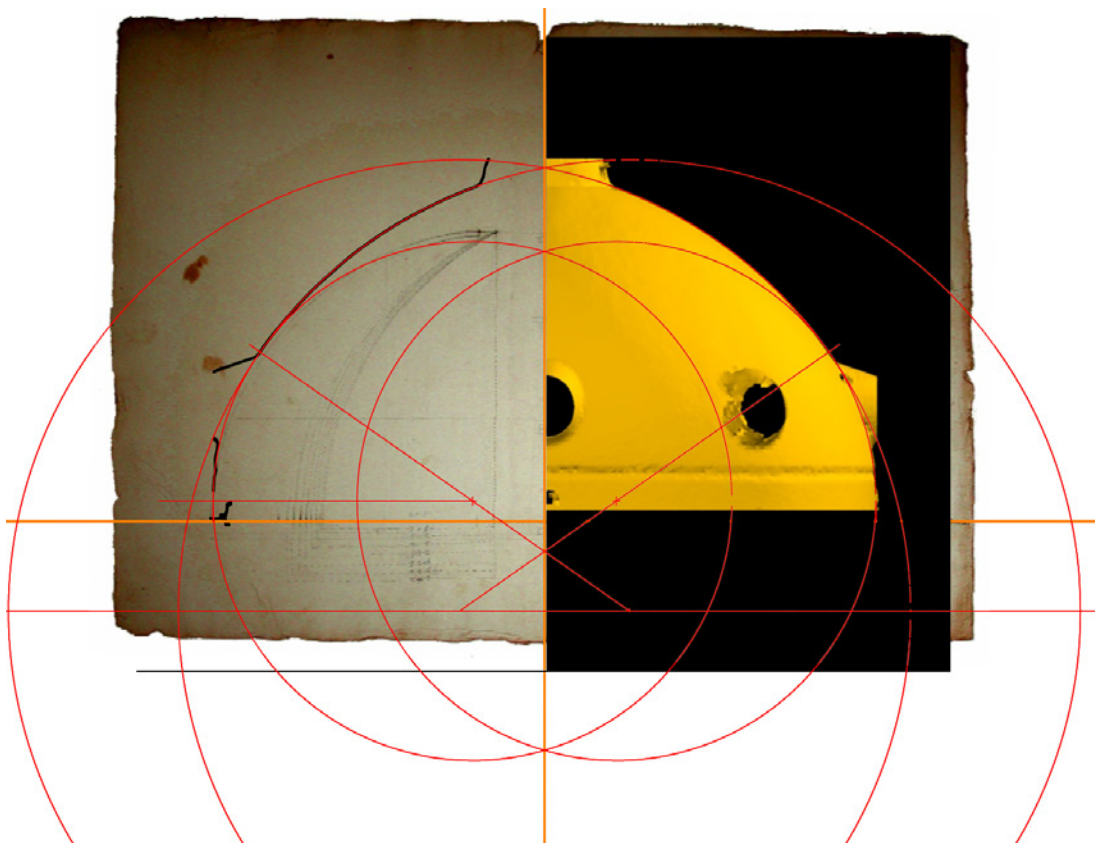
La scelta dei piani verticali è stata effettuata ipotizzando la posizione delle centine sulla base dei disegni di progetto. Sono presenti infatti due disegni di progetto che riportano in pianta la

Figura 06

Elaborazione grafica rappresentante la sovrapposizione del progetto della sezione trasversale della cupola e del ponte reale (Archivio del Santuario di Vicoforte, Disegni, n. 68r), la sezione trasversale della nuvola di punti, la superficie mesh derivante dal rilievo LIDAR, l'ipotesi di curva policentrica approssimante la centina trasversale. Si può notare la differenza tra il profilo progettato, ad un solo arco di cerchio, e il profilo rilevato descrivibile con una curva policentrica.

traccia della proiezione di 20 centine per ciascun quarto della cupola. Nei disegni di progetto le linee puntinate che rappresentano l'andamento delle centine dividono la base della superficie della cupola in parti uguali, e convergono all'incirca nei centri delle circonferenze che descrivono l'ovale del lanternino (figura 08).

Le intersezioni della superficie mesh con i piani verticali prescelti risultano rappresentabili con curve policentriche formate da più archi di cerchio. Il numero minimo di archi di cerchio in grado di descrivere adeguatamente (con scostamenti inferiori a 5 cm) le intersezioni risulta



essere due.
Si prevede di procedere all'acquisizione di scansioni calibrate dei documenti nei futuri approfondimenti della ricerca.

RISULTATI

Precedenti studi sulla geometria della sezione orizzontale della cupola si sono purtroppo basati su rilievi imprecisi. Così per esempio, come si evince dalla tabella 1, Melano Rossi, Michelotti e Zander¹³ riportano come misure dell'asse maggiore e dell'asse minore della cupola rispettivamente 36,25 e 24,20 metri, e Vacchetta

Figura 07
Elaborazione grafica rappresentante la sovrapposizione del progetto della sezione longitudinale della cupola, la sezione longitudinale della nuvola di punti, la superficie mesh derivante dal rilievo LIDAR, l'ipotesi di curva policentrica approssimante la centina longitudinale. Si può notare la differenza tra il profilo progettato, ad un solo arco di cerchio, e il profilo rilevato descrivibile con una curva policentrica. Da notare inoltre che il disegno di progetto riporta una serie di archi di cerchio, probabile proiezione orizzontale delle centine.

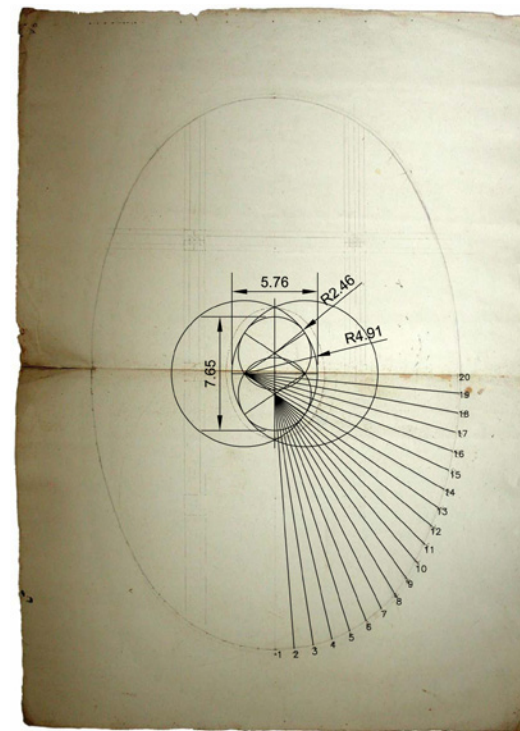


Figura 08
Schema dei piani verticali utilizzati per l'analisi della superficie di intradosso della cupola, individuati sulla base delle tracce delle proiezioni delle centine rappresentate nel disegno di progetto. I piani dividono ciascun quarto della base della cupola in 20 parti uguali e convergono nei centri dell'ovale della sommità della cupola.

riporti i valori 36,58 e 24,38 per il tamburo. Eppure già da tempo erano disponibili rilievi accurati, realizzati anche con tecniche fotogrammetriche: per esempio misure più corrette sono riportate da Garro (37,15 e 24,90 m)¹⁴, Rigotti (37,15 e 24,80 m)¹⁵, Chiorino (37,23 e 24,89 m)¹⁶. Le misure dell'asse maggiore e dell'asse minore ricavate da questo studio sulla base del rilievo LIDAR, 37,17 e 24,86 m rispettivamente, sono comparabili con le dimensioni riportate da Garro, Rigotti e Chiorino. I risultati sopra riportati hanno avuto essenzialmente la funzione di verificare l'attendibilità dei risultati di questa e delle ricerche precedenti. I risultati più interessanti di questo studio riguardano invece le ipotesi sulla geometria delle sezioni verticali della cupola. Lo studio delle sezioni verticali potrebbe fornire informazioni sulla geometria delle centine o del tavolato in legno utilizzati nella costruzione della cupola. I piani di sezione verticali sono infatti stati scelti sulla base delle ipotesi progettuali contenute nei disegni di progetto, passanti per le 20 linee tratteggiate che nella pianta della cupola paiono rappresentare il posizionamento delle centine. Questa ipotesi potrebbe trovare conferma dal fatto che i profili ottenuti sezionando la cupola coi piani verticali previsti dai disegni di progetto sono descrivibili con delle semplici curve policentriche a due archi di cerchio, mentre i profili ottenuti con altri piani verticali sono curve più complesse e irregolari (figura 09).

Come risulta evidente dalla figura 06 che rappresenta la sovrapposizione della sezione trasversale del disegno di progetto e di quella della superficie mesh ottenuta dal rilievo LIDAR, la sezione trasversale della superficie di intradosso della cupola era progettata sulla base di un unico arco di cerchio. Invece la curvatura della sezione trasversale è descrivibile come una policentrica con due raggi di curvatura. Considerazioni analoghe valgono per la sezione longitudinale. Dallo studio delle geometrie della sezione longitudinale e trasversale risulta che la forma tridimensionale, naturalmente anche per questioni di fattibilità costruttiva, non è descrivibile con un ellissoide (a differenza delle cupola di San Carlo alle quattro fontane a Roma,

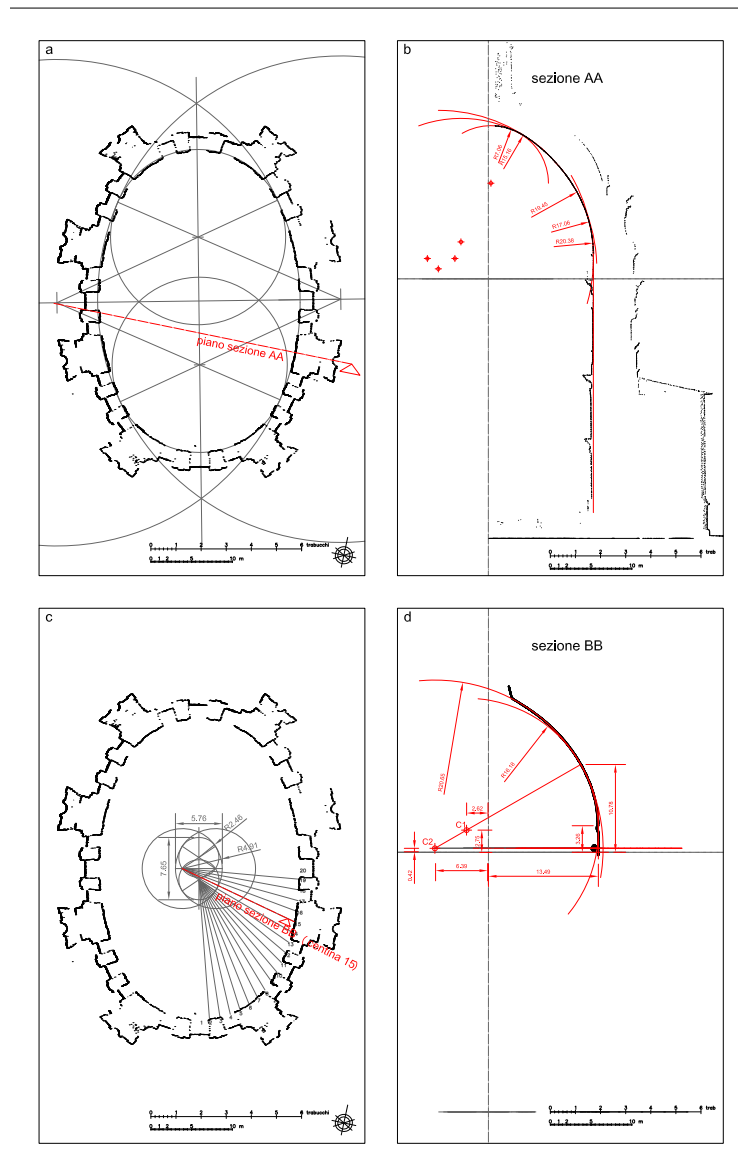


Figura 09
Confronto tra i profili ottenuti sezionando la superficie di intradosso con due piani verticali diversi a partire dal punto 15 della figura 08: nel primo caso, in alto, il piano verticale è perpendicolare all'imposta della volta, e la curva risultante è complessa (nell'ipotesi di descriverla con una policentrica, sono necessari non meno di 5 archi di cerchio); nel secondo caso il piano verticale passa per la traccia della centina progettata nel disegno d'archivio (figura 08), e risulta descrivibile con una policentrica a due archi di cerchio.

che è oggetto di recenti studi), ma è invece alquanto più complessa e non assimilabile neppure ad un solido di rotazione.

Come è possibile vedere nella tabella 1, le curve ottenute sezionando la superficie mesh rilevata con i piani verticali soprammentati, cioè quelli presumibilmente coincidenti coi piani verticali delle centine, sono descrivibili tutte con curve policentriche a due archi di circonferenza, di cui l'arco inferiore ha l'imposta all'altezza di circa 3,15 metri, cioè poco più di un trabucco, sopra il cornicione interno.

L'attendibilità delle curve policentriche individuate è stata verificata misurando gli scostamenti massimi tra le curve policentriche teoriche e le sezioni delle superficie di intradosso. Gli scostamenti sono stati considerati accettabili quando inferiori a 10 cm, per tener conto delle inevitabili irregolarità della superficie di intradosso, dovute alle deformazioni strutturali della cupola (l'asse verticale del santuario risulta inclinato verso Ovest di circa 10 cm)¹⁴ e alle irregolarità costruttive.

CONCLUSIONI

Già precedenti studi sulla geometria della cupola avevano evidenziato la mancanza di indagini sulla geometria delle centine utilizzate nella costruzione della cupola¹⁵, ma finora gli studi erano concentrati sulla geometria della sezione orizzontale e delle due principali sezioni verticali. Dall'analisi dei profili geometrici delle sezioni verticali, si possono trarre le seguenti conclusioni ed ipotesi:

- il profilo delle centine utilizzate nella costruzione della cupola è molto diverso da quello ipotizzato nei disegni di progetto. Questo potrebbe significare che i disegni pervenuti e tuttora conservati presso l'Archivio del Santuario siano dei disegni preliminari, dal momento che la forma della cupola costruita è alquanto diversa.
- Il piano di imposta della cupola non coincide col piano della cornice (anche questo diversamente dalle annotazioni riportate nei disegni di progetto) ma si situa a circa un trabucco al di sopra dell'estradosso del cornicione.

- La geometria di ciascuna centina, sebbene non si abbia la certezza del numero complessivo e del reale posizionamento, potrebbe essere descritta mediante una curva policentrica a due archi di cerchio.
- Il punto di contatto e di tangenza tra i due archi di cerchio che descrivono il profilo policentrico delle centine si situa approssimativamente alla stessa altezza per tutte le centine, all'incirca all'altezza del secondo livello del ponte reale disegnato da Francesco Gallo e Filippo Juvarra. Questo potrebbe significare – ma saranno necessarie altre e più approfondite ricerche per verificare tale ipotesi – che il profilo dell'intradosso della cupola è stato realizzato utilizzando due gruppi di centine: un primo gruppo tra il primo e il secondo livello del ponte reale, e il secondo gruppo tra il secondo livello e il lanternino.

I risultati che riguardano la valutazione delle ipotesi operate sulla geometria tridimensionale della superficie di intradosso della cupola, coordinati con gli altri dati, possono consentire una più attillata definizione dei modelli cui applicare gli algoritmi di simulazione del comportamento strutturale e sismico che sono necessari per la conservazione dell'integrità del manufatto. Le eccezionali dimensioni della cupola sono infatti alla base di fenomeni di instabilità strutturale che hanno richiesto operazioni di consolidamento e necessitano di controlli continui attraverso un costante monitoraggio strutturale del quadro fessurativo e delle deformazioni.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare:

- M.A. Chiorino, R. Ceravolo, A. Spadafora and G. Abbiati che hanno fornito informazioni e documenti
- il gruppo di ricerca della Nagoya City University coordinato da T. Aoki che ha fornito il rilievo LIDAR

NOTE

[1] Gli studi sull'architettura e la storia del monumento sono stati accurati e vasti, testimonianza di espressione di interesse da parte di personalità scientifiche accreditate. Per ulteriori approfondimenti cfr: Carboneri, Nino (1966), *Ascanio Vittozzi. Un architetto tra Manierismo e Barocco*, Officina Edizioni, Roma; Vacchetta, Giovanni (1984), *Nuova storia artistica del santuario della Madonna di Mondovì a Vico*, in Biblioteca della società per gli studi storici archeologici e artistici della provincia di Cuneo, 20.

[2] Le modalità di partecipazione del grande architetto Filippo Juvarra alla progettazione della cupola sono tuttora oggetto di discussione, tanto che alcuni disegni tradizionalmente attribuiti a Francesco Gallo sono stati recentemente riconosciuti quali opera di Filippo Juvarra (cfr. Dardanella, Giuseppe (2000), *Disegni di Juvarra per il "ponte reale"* e per la cupola del santuario di Vicoforte, in Francesco Gallo 1672-

1750. Celdid, Torino).

[3] Gli studi più recenti riguardano l'analisi strutturale con metodologie computerizzate di modellazione e sono presentati nelle seguenti pubblicazioni: Aoki, Takayoshi, Chiorino, Mario Alberto, Roccati, Roberto e Spadafora, Alberto (2004), *Structural analysis with F. E. method of the elliptical dome of the Sanctuary of Vicoforte*, in Proceedings of the first international conference on innovative materials and technologies for construction and restoration - imtr04, 417–429. Chiorino, Mario Alberto, Spadafora, Alberto, Calderini, Chiara, e Lagomarsino, Sergio. (2008), *Modeling Strategies for the World's Largest Elliptical Dome at Vicoforte*, in International Journal of Architectural Heritage, 2/3, 274-303. Chiorino, Mario Alberto, Ceravolo, Rosario, Spadafora, Alberto, Zanotti Fragnola, L. e Abbiati, Giuseppe. (2011), *Dynamic characterization of complex masonry structures: the Sanctuary of Vicoforte*, in International journal of architectural heritage,

5:3, 296-314.

[4] Canciani, Marco, Falcolini, Corrado, e Spadafora, Giovanna (2012), From complexity of architecture to geometrical rule. The case study of the dome of San Carlino alle Quattro Fontane in Rome, in *Less More Architecture Design Landscape*, Edizioni La Scuola di Pitagora, Napoli, pp. 363-372.

[5] Già nel 1981 Zander aveva sottolineato la necessità di simili approfondimenti e la mancanza di studi sul sistema di centinatura, in Zander, Giuseppe (1981), Su alcuni disegni di Francesco Gallo per le armature della cupola del Santuario di Vicoforte, in *Indice per i beni culturali del territorio ligure*, 25/26, pp. 19-30. Alcune ipotesi e risultati preliminari sono stati presentati al convegno "Domes in the world" tenuto a Firenze nel 2012 e pubblicati in Novello Giuseppa, Piumatti, Paolo (2012), The design of the dome of the Sanctuary of Vicoforte (Piedmont, Italy) among idea, geometry and construction practices: researches on the shape and the size of the largest oval dome in the world, Nardini Editore, Firenze.

[6] Circa le problematiche di determinazione della geometria di edifici ellittici o ovali cfr. Docci, Mario (1999), La forma del Colosseo: dieci anni di ricerche. Il dialogo con i gromatici romani, e Migliari, Riccardo (1999), Principi teorici e prime acquisizioni nel rilievo del Colosseo, in *Disegnare*, 18/19.

[7] Cfr. Docci, Mario (2003), Hagia Sophia. Analisi del rilevamento interno, in *Disegnare*, 26.

[8] I disegni conservati non ripor-

tano indicazioni di date o fasi di elaborazione che ne permettano una precisa collocazione cronologica. La tradizionale attribuzione a Francesco Gallo è stata messa in discussione da Dardanello che li ritiene opera di Filippo Juvarra, in . Dardanello, Giuseppe (2000), Disegni di Juvarra per il "ponte reale" e per la cupola del santuario di Vicoforte, op. cit.

[9] Il valore del fattore di conversione poteva subire variazioni locali. Per esempio Vacchetta ipotizza un valore di 1 trabucco = 3,047 metri, in Vacchetta, Giovanni (1984), Nuova storia artistica del santuario della Madonna di Mondovì a Vico, in Biblioteca della società per gli studi storici archeologici e artistici della provincia di Cuneo, 20.

[10] Bertone scrive "Gli autori più antichi, quali Melano Rossi e Micheliotti, o le vecchie storie popolari, danno per gli assi planimetrici del tempio - che si presumevano uguali a quelli del tamburo e della calotta - le misure di m. 36,25 e m. 24,10", in Bertone, Lorenzo (1995), Francesco Gallo e la cupola ellittica del santuario di Mondovì a Vicoforte, in *Studi piemontesi*, 2. Zander scrive "La cupola e il cupolino sono due semiellissoidi a tre assi rispettivamente di: m. 36,25; m. 24,10; m. 16 (asse verticale), per la cupola; m. 7,74; m. 5,94; m. 2,97 (asse verticale) per il cupolino." In Zander, Giuseppe. (1981), Su alcuni disegni di Francesco Gallo per le armature della cupola del Santuario di Vicoforte, op. cit.

[11] I valori sono riportati nella Tavola n. 7 allegata a relazione ing.

Garro, 24 gennaio 1961 - Studio di consolidamento e restauro conservata presso l'Archivio del Santuario. [12] Rigotti, G. (1979), Due rilievi di chiese a pianta ovata nel cuneese, In *Atti e rassegna tecnica della Società Ingegneri e Architetti di Torino*, Torino, XXXII/6 nuova serie.

[13] Il modello agli elementi finite della cupola è stato costruito sulla base di un rilievo fotogrammetrico condotto nel 1976, in Chiorino, Mario Alberto, Spadafora, Alberto, Calderini, Chiara, e Lagomarsino, Sergio. (2008), Modeling Strategies for the World's Largest Elliptical Dome at Vicoforte, op. cit.

[14] L'inclinazione dell'asse verticale era già stata riconosciuta da Garro, e valutata in 8 cm nella Tavola n. 7 allegata a relazione ing. Garro, 24 gennaio 1961 - Studio di consolidamento e restauro conservata presso l'Archivio del Santuario.

[15] "in realtà gli accurati disegni dell'architetto [...] mostrano nelle sezioni trasversali la vera curva - a sesto rialzato, non a semicerchio - sicché la superficie d'intradosso che ne deriva è piuttosto complessa a descriversi", in Zander, Giuseppe. (1981), Su alcuni disegni di Francesco Gallo per le armature della cupola del Santuario di Vicoforte, op. cit., pag. 19.

BIBLIOGRAFIA

Aoki, Takayoshi. Chiorino, Mario Alberto. Roccati, Roberto. Spadafora, Alberto (2004), Structural analysis with F. E. method of the elliptical dome of the Sanctuary of Vicoforte, in *Proceedings of the first international conference on innovative materials and technologies for construction and restoration - imtcr04*, 417-429.

Bellini, Federico (2004). Le cupole di Borromini, Electa, Milano.

Bertone, Lorenzo (1995), Francesco Gallo e la cupola ellittica del santuario di Mondovì a Vicoforte, in *Studi piemontesi*, 2.

Canciani, Marco. Falcolini, Corrado. Spadafora, Giovanna (2012), From complexity of architecture to geometrical rule. The case study of the dome of San Carlino alle Quattro Fontane in Rome, in *Less More Architecture Design Landscape*, Edizioni La Scuola di Pitagora, Napoli, pp. 363-372.

Carboneri, Nino (1954), L'architetto Francesco Gallo. 1672-1750, Società Piemontese d'archeologia e di belle arti, nuova serie, volume II, Torino.

Carboneri, Nino (1966), Ascanio Vittozzi. Un architetto tra Manierismo e Barocco, Officina Edizioni, Roma
Cervavolo, Rosario. Chiorino, Mario Alberto. Novello, Giuseppa. Abbiati, Giuseppe. Zanotti, Fragonara L. (2012), Reconciling geometry and dynamics: models for oval domes, in *Domes in the World*, Nardini Editore, Firenze, pp. 13-20.

Chiorino, Mario Alberto. Spadafora, Alberto. Calderini, Chiara. Lagomarsino, Sergio. (2008), Modeling Strategies for the World's Largest Elliptical Dome at Vicoforte, in *International Journal of Architectural Heritage*, 2/3, 274-303.

Chiorino, Mario Alberto. Cervavolo, Rosario. Spadafora, Alberto. Zanotti, Fragonara L., Abbiati, Giuseppe. (2011), Dynamic characterization of complex masonry structures: the Sanctuary of Vicoforte, in *International journal of architectural heritage*, 5:3. 296-314.

Dardanello, Giuseppe (2000), Disegni di Juvarra per il "ponte reale" e per la cupola del santuario di Vicoforte, in Francesco Gallo 1672-1750. Celid, Torino.

Dardanello, Giuseppe (2008), Pensieri e disegni - ragione e seduzione - Guarini e Juvarra, in Dardanello, Giuseppe e Tamborrino Rosa (a cura di) Guarini, Juvarra e Antonelli, Silvana Editoriale, Milano, pp. 19-35.

Docci, Mario (1999), La forma del Colosseo: dieci anni di ricerche. Il dialogo con i gromatici romani, in *Disegnare*, 18/19.

Docci, Mario (2003), Hagia Sophia. Analisi del rilevamento interno, in *Disegnare*, 26.

Griseri, Andreina (1983), Il Santuario di Vicoforte a Mondovì: da Vittozzi a Gallo a Schellino, in *Bollettino della Società per gli studi storici, archeologici ed artistici della Provincia di Cuneo*, 88, pp. 35-42.

Mamino, Lorenzo (2000), Geometrie spaziali al di là del Barocco nei

cantieri di Vicoforte e di Mondovì Piazza, in Francesco Gallo 1672-1750. Celid, Torino.

Migliari, Riccardo (1999), Principi teorici e prime acquisizioni nel rilievo del Colosseo, in *Disegnare*, 18/19.

Novello Massai, Giuseppa (1993), Idee a confronto disegni in concorso, in *Il disegno di progetto. Dalle origini al XVIII secolo*, Gangemi, Roma, pp 190-197.

Novello Giuseppa, Piumatti, Paolo (2012), The design of the dome of the Sanctuary of Vicoforte (Piedmont, Italy) among idea, geometry and construction practices: researches on the shape and the size of the largest oval dome in the world, Nardini Editore, Firenze.

Palmas Devoti, Clara (1983), Il Santuario di Vicoforte a Mondovì: storia di un restauro, in *Bollettino della Società per gli studi storici, archeologici ed artistici della Provincia di Cuneo*, 88, pp. 43-48.

Vacchetta, Giovanni (1984), Nuova storia artistica del santuario della Madonna di Mondovì a Vico, in Biblioteca della società per gli studi storici archeologici e artistici della provincia di Cuneo, 20.

Zander, Giuseppe (1981), Su alcuni disegni di Francesco Gallo per le armature della cupola del Santuario di Vicoforte, in *Indice per i beni culturali del territorio ligure*, 25/26, pp. 19-30.