

RILIEVO, MONITORAGGIO GEOMETRICO E RAPPRESENTAZIONE DI STRUTTURE A CUPOLA

1. INTRODUZIONE

Tra le forme architettoniche primarie, la cupola rappresenta la tipologia costruttiva che per antonomasia è tridimensionale. Per tale motivo la struttura e la geometria della cupola mal si rappresentano attraverso sezioni piane e sono espresse in maniera adeguata solo attraverso equazioni matematiche. Il rilievo e la restituzione esatta delle geometrie voltate e a cupola richiedono che sulla superficie curva siano raccolti un numero adeguato di punti, individuati e rappresentati attraverso le coordinate nelle tre dimensioni.

La definizione della geometria del manufatto costituisce la base conoscitiva per altre tecniche non distruttive di indagine (termografia, radar, ultrasuoni, prospezioni geofisiche, ecc.). Inoltre l'esatta ricostruzione geometrica delle cupole è uno strumento fondamentale per comprendere l'itinerario progettuale e costruttivo delle strutture, la cui stabilità dipende sia dai materiali che dalle tecniche costruttive, ma anche dalla forma e dallo spessore della calotta. L'analisi e la precisa misurazione geometrica di eventuali deformazioni aiutano infine a definire lo stato di conservazione e di rischio e a predisporre interventi di consolidamento.

Il presente lavoro documenta i risultati di una campagna di rilevamento di alcune strutture a cupola, che presentavano gravi problemi di assetto statico. Essa è stata effettuata nell'ambito del programma INTAS (International Association for the cooperation with Scientist from the independent states of the former Soviet Union) finanziato dalla Comunità Europea, che promuove la cooperazione scientifica tra paesi dell'ex URSS e Paesi Europei. Il progetto riguarda la documentazione e la valorizzazione dei monumenti Timuridi a Samarkand (Uzbekistan). Più in generale, questo lavoro si inserisce all'interno di una linea di ricerca dell'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali del CNR, che ha come obiettivo l'individuazione e la sperimentazione di nuove tecnologie applicabili al settore dei beni architettonici. In particolare, l'attenzione è rivolta a tecniche di remote sensing per il rilevamento e per la diagnostica, a sistemi avanzati per il trattamento dell'immagine e dei dati scientifici e per la loro modellizzazione.

L'integrazione dei rilievi, ottenuti con distanziometro laser, con strumenti topografici tradizionali e con tecniche fotogrammetriche digitali ha consentito di ricostruire con estrema precisione il modello geometrico delle strutture a doppia cupola. Sono state ottenute informazioni dimensionali e geometriche su spessori, deformazioni morfologiche, variazioni degli assi e



Fig. 1 – Sulla sinistra il complesso funerario di Shah i Zindah; sulla destra il mausoleo del Gur i Amir.

dei piani di giacitura delle cupole, utili per programmare interventi di consolidamento. L'insieme dei dati geometrici, ottenuti in forma continua, ha consentito ricostruzioni e simulazioni in tre dimensioni al CAD.

2. LE CUPOLE AUTOPORTANTI

Le strutture a cupola autoportanti sono certamente le più antiche per invenzione e tra le più interessanti per la loro diffusione. Ideate nei paesi del bacino mediterraneo, queste coperture si distinguono per l'innovazione statica rispetto alle costruzioni trilitiche. Numerosi esempi di queste strutture, realizzate in età classica, si trovano in siti greci, romani e del Vicino Oriente.

Caratteri salienti di tali strutture sono: costruzione senza impiego di centine di sostegno; sperimentazione e diffusione dei sistemi a doppia calotta; evoluzione di tracciati geometrici che determinano profili che non spingono sugli appoggi, con riduzione delle componenti oblique delle forze.

Nel nostro progetto ci siamo interessati in modo specifico alle doppie cupole dell'architettura islamica, costruite nell'area del Centro Asia. In questa zona l'abitudine a coprire edifici civili e religiosi con doppie strutture voltate raggiunge la massima diffusione e sperimentazione in epoca timuride (XIV-XV secolo), lasciando un'eredità di monumenti prestigiosi, come il mausoleo del Gur i Amir e la necropoli di Shah i Zindah a Samarcanda, ancora oggi oggetto di studio oltre che di conservazione (Figg. 1, 2).

In un libro del XV sec. del trattatista persiano Ghiatt al Jamshid, nel quale vengono descritti i metodi per calcolare le superfici geometriche architettoniche e i sistemi per disegnare archi e volte, si afferma che nella tipologia a doppia cupola la calotta esterna, imponente, profilata su un alto tamburo e di grande diametro, veniva usata per accentuare il valore simbolico e celebrativo dell'edificio. In quell'epoca vengono sviluppati nuovi metodi costruttivi che prevedono l'inserimento di filari di mattoni esterni alla superficie volta-

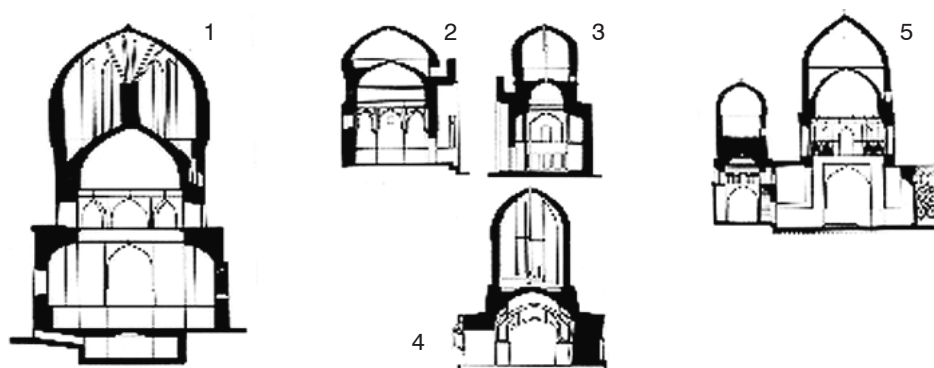


Fig. 2 – Confronti tra cupole di vari edifici: 1. Gur i Amir, 1380; 2. Shirimbek Aka, 1386; 3. Tuman Aka, 1406; 4. Chupan Ata, 1410; 5. Kazi Zade Rumi, 1425.

ta, al fine di fornire un appoggio per la costruzione della restante struttura. La realizzazione delle strutture autoportanti avveniva mediante la disposizione di filari concentrici di mattoni cotti, allettati con malte gessose a rapida presa.

Nel corso del lavoro sono state utilizzate per il rilievo sia tecniche classiche analitiche che tecniche non convenzionali, digitali e non. Infatti, per ottenere un rilievo ottimale, devono essere utilizzate diverse tecniche a seconda del prodotto e dell'oggetto da rilevare. Pertanto nessuna di esse può essere esclusa a priori.

I due casi di studio presi in considerazione sono la tomba di Shad i Mulk Aka nel complesso di Shah i Zindah (IX-XIV sec.) e la cupola del mausoleo del Gur i Amir (fine del XIV sec.).

3. LA TOMBA DI SHAD I MULK AKA NEL COMPLESSO DI SHAH I ZINDAH

La necropoli di Shah i Zindah è composta da una serie di piccoli ma ben proporzionati mausolei edificati tra il IX e il XIV secolo (Fig. 3). Anticamente il complesso comprendeva circa 30 monumenti, mentre allo stato attuale ne sono visibili solo una ventina, la maggior parte dei quali risalgono al Medioevo.

Attualmente si sta procedendo alla restituzione dell'intero lato sinistro del complesso. La rete è stata costruita con 16 stazioni esterne e 2 interne.

All'interno del complesso è stata individuata la cupola della tomba di Shad i Mulk Aka, che presenta vari problemi di dissesto. L'edificio, che si trova nella necropoli subito dopo la grande scala d'accesso, è composto da due volumi distinti: un parallelepipedo di base e una cupola a copertura dell'ambiente centrale.

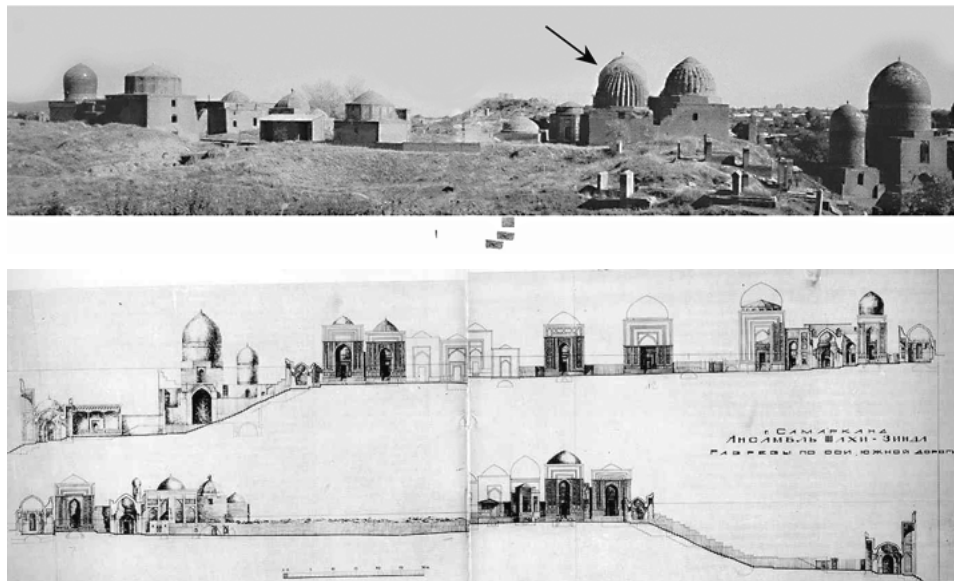


Fig. 3 – Il complesso di Shah i Zindah. La freccia indica la posizione del mausoleo di Shad i Mulh Aka. In basso un rilievo eseguito all’inizio del secolo da rilevatori russi.

Il rilievo è stato eseguito in due fasi: una poligonale esterna di 6 vertici di stazione ed una interna, legate tra loro. All’esterno si sono rilevati 30 punti con il metodo dell’intersezione in avanti; all’interno 69 punti per irraggiamento.

Grazie al confronto tra i due rilievi si è potuta avanzare l’ipotesi dell’esistenza della doppia cupola di copertura. Infatti, con la doppia misura si è definito lo spessore murario che è risultato non costante.

Nell’anello di base della cupola sono stati rilevati 45 punti, regolarmente distanziati, e si è stabilito il piano passante per l’anello di base della cupola. Le deformazioni sono state definite con i confronti tra l’anello ideale e quello misurato. Il piano di appoggio, interpolato coi punti di base, è risultato essere inclinato.

Dall’insieme di queste osservazioni si è proceduto alla modellizzazione sia delle deformazioni rispetto alla superficie reale che rispetto alla forma ideale della cupola, che sono rappresentate nella Tav. IX, a-1.

4. LA CUPOLA DEL MAUSOLEO DEL GUR I AMIR

Uno dei monumenti più importanti dell’architettura timuride è il mausoleo del Gur i Amir (la tomba dell’Emiro di Tamerlano), collocato nel quar-

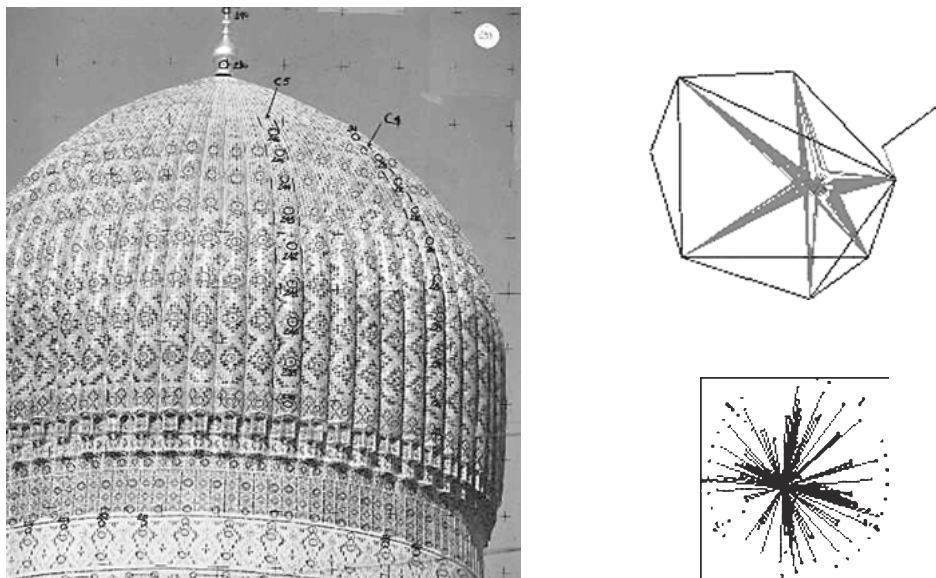


Fig. 4 – Le tre fasi del rilievo della doppia cupola del mausoleo del Gur i Amir. A sinistra un esempio di fotogramma utilizzato per la restituzione fotogrammetrica. In alto a destra il rilievo dell'estradosso della cupola esterna eseguito con il metodo dell'intersezione in avanti. In basso a destra il rilievo dei punti dell'intradosso della cupola esterna eseguito con il metodo dell'irraggiamento.

tiere sud-ovest della città di Samarcanda. Costruito nell'anno 1404, è l'unico edificio rimasto sostanzialmente integro. All'esterno è a pianta ottagonale di cui solo cinque lati sono accessibili, mentre l'interno è a pianta quadrata con quattro incavi rettangolari. La copertura del mausoleo è costituita da un sistema a doppia cupola, di cui quella interna presenta un profilo ripido, mentre quella esterna è caratterizzata da 64 costoloni rivestiti di piastrelle in ceramica colorata.

Il rilievo si è svolto in più fasi: dapprima sono stati rilevati gli elementi situati nello spazio tra le due cupole, quindi si è definita la poligonale esterna e per ultimo si è proceduto al rilievo fotogrammetrico dell'intera cupola esterna (Fig. 4). Con il rilievo fotogrammetrico, però, non sono stati coperti due settori: il lato sud per la presenza dell'“iwan”, che copriva la vista della parte inferiore della cupola e del tamburo, e la parte superiore della cupola per la quale non era possibile acquisire fotografie orientate per la fase di restituzione.

L'analisi della forma geometrica, ottenuta topograficamente e fotogrammetricamente, ha permesso di definire il costolone principale. Questo è stato ottenuto confrontando i costoloni rilevati topograficamente con quelli rile-

vati fotogrammetricamente e utilizzando un modello matematico in cui si valutano le differenze tra i costoloni esistenti.

La differenza osservata tra il profilo del meridiano fondamentale e la geometria rilevata è stata riproposta sulla base della forma originaria della cupola, comparando anche la posizione reale dell'asse con quella ideale (Tav. IX, a-2). Si è quindi proceduto alla modellizzazione CAD delle deformazioni della cupola esterna, alla modellizzazione CAD della ricostruzione architettonica virtuale (Tav. IX, a-3) e all'animazione 3D della cupola esterna.

5. CONCLUSIONI

Lo studio delle deformazioni e dei danni alle cupole è generalmente complicato a causa della loro superficie e della loro posizione nei complessi monumentali. Questo lavoro mostra come il rilievo topografico con strumenti che non necessitano di prismi di appoggio e la fotogrammetria digitale sono un mezzo ideale per acquisire questo tipo di informazioni.

La velocità di acquisizione di un grande numero di punti durante un rilievo e la configurazione geometrica ideale (metodo dell'irraggiamento) rappresentano un reale cambio rispetto alle metodologie precedenti. L'integrazione di tecniche topografiche e fotogrammetriche permettono quindi il monitoraggio di strutture disastrose, che viene realizzato confrontando l'attuale stato geometrico dell'edificio con la ricostruzione ideale della forma primitiva.

I risultati raggiunti con il monitoraggio e la restituzione rappresentano il punto di partenza per successive analisi. L'obiettivo finale è quello di costruire un modello tridimensionale della struttura studiata, corredato con dati sui materiali e sul loro comportamento statico per poter poi simulare l'evoluzione dei dissesti e l'effetto degli interventi di consolidamento.

CINZIA BACIGALUPO, LUCIANO CESSARI
Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali
CNR – Area della Ricerca di Roma, Montelibretti

GABRIELE FANGI
Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra
Facoltà di Ingegneria
Università degli Studi di Ancona

BIBLIOGRAFIA

- BACIGALUPO C., CESSARI L. 1998, *Digital Photogrammetry for buildings analyses*, «GIM», January 1998, 78-79.
BACIGALUPO C., CESSARI L., FANGI G. 1997, *Experiences of geometrical monitoring and survey of defects by using laser technologies and photogrammetry*, CIPA (Goeteborg 1997), Stockholm, ISPRS, 168-174.

- BACIGALUPO C., CESSARI L., FANGI G. 1998, *Geometric monitoring and integration of geodetic survey techniques to improve the knowledge of the historic building*, ISPRS, Commission V, Working Group WC V/5 (Hakodate 1998), Hakodate, ISPRS, 502-506.
- BACIGALUPO C., CESSARI L., FANGI G. 1998, *Monitoring of domes by combining geometric survey and laser technology*, in *IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación (Cuba 1998)*, Cuba, Canaricard, 530-532.
- CESSARI L., FRANCAVIGLIA V. 1995, *Integrated documentation system for the Architectural Heritage: the INTAS project for the Gur-i Amir Mausoleum in Samarkand*, in *1st Regional Meeting for the Conservation and Restoration of Cultural Heritage in Central and Western Asia*, Teheran, 106-109.

ABSTRACT

Analysis and geometric measurement represent the main diagnostic tool to define the state of conservation of historic buildings and to plan their restoration. In the case of complex structures, the accurate monitoring and survey of the morphology help to understand the static situation in relation to the original design and materials used. This information is fundamental for the generation of virtual models and for simulating the evolution of deviations.

This paper presents the results of a survey of two Islamic domes in Samarkand (Uzbekistan) which suffer from serious static problems. The integration of the different methods of survey performed with laser distantiometers, traditional geodetic instruments and digital photogrammetric techniques has been found to be vital in order to accurately reproduce the geometrical pattern of these structures. We obtained dimensional and geometrical measurements of the thickness of the walls, the morphologic defects, the variations of the axes and of the supporting surface of the domes. All of the geometric data, obtained in continuous form, was then used for the digital reconstruction and 3D simulation of the domes.

