

IL SEGRETO DELLA CUPOLA DEL BRUNELLESCHI A FIRENZE

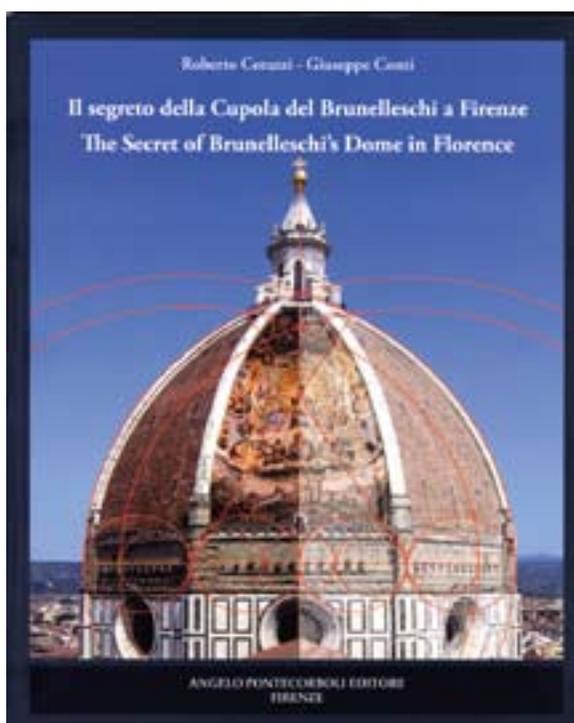
Il libro di Roberto Corazzi e di Giuseppe Conti " Il segreto della cupola del Brunelleschi a Firenze", uscito di recente per i tipi di Pontecorboli, editore a Firenze, è stato pubblicamente presentato e recensito, nel Salone dei Duecento di Palazzo Vecchio, il 7 aprile dell'anno passato.

Francesco Gurrieri, Gennaro Tampone e Carlo Blasi, essi stessi attori e testimoni, direttamente o indirettamente, di attività di interpretazione della cupola di Brunelleschi, sono stati i relatori-recensori che hanno esposto le loro considerazioni sull'opera; hanno partecipato alla presentazione, oltre ai due Autori del volume, gli assessori Elisabetta Cianfanelli e Cristina Scaletti che hanno fatto gli onori di casa e tenuto il discorso di introduzione, il Presidente dell'opera del Duomo Avvocato Franco Lucchesi, e un numeroso, attentissimo uditorio a testimonianza del richiamo che gli argomenti di studio e analisi dell'insigne monumento esercitano su persone di ogni formazione culturale specialmente in occasione di comunicazione di risultati straordinari delle ricerche in corso.

Il Collegio degli Ingegneri della Toscana, per diffondere in maniera capillare le tematiche trattate e la conoscenza di una delle più prestigiose opere di architettura in assoluto, ha promosso la pubblicazione sul proprio organo di comunicazione, il Bollettino Ingegneri, delle recensioni dei Relatori e delle considerazioni degli Autori, anche in previsione di un imminente evento organizzato dalla Fondazione R. Del Bianco, dall'Università di Firenze e dallo stesso Collegio, il Congresso Mondiale sulle Cupole, che si terrà a Firenze dal 18 al 22 di marzo prossimi (v. programma a pag.38), nel quale saranno presentate e discusse, tra le molte altre, alcune relazioni relative alla cupola di Firenze, alle altre cupole note di Brunelleschi e a cupole che con quella di Firenze presentano analogie.

Per ampliare il complesso quadro, che dimostra un picco di interesse per le cupole in generale, si deve riferire che a cura dell'Opera del Duomo è stato tenuto a Firenze nei giorni 19 e 20 gennaio 2012 un Congresso Internazionale sul Monitoraggio delle grandi fabbriche, nel quale i particolari problemi metodologici che pongono i controlli di cupole di grandissima qualità architettonica ma anche storica e artistica, quali quelle della Cattedrale di Firenze, della Basilica di San Pietro a Roma e della Chiesa di Santa Sofia a Costantinopoli, sono stati al centro del dibattito.

La Redazione



Anno/Year 2011
320 pagine/pages
770 illustrazioni/illustrations.
24x30 cm.
ISBN 9788897080107
€ 45.00

Il Segreto della Cupola secondo l'appassionata ricognizione di Corazzi e Conti

Francesco GURRIERI

Non è un caso che questo studio si apra con una serie di testimonianze di amministratori, tecnici, storici dell'architettura. Ciò dimostra come questo straordinario testo monumentale riassume con pienezza lo *status symbol* di una civiltà, mobilitando codici interpretativi diversi, implementandoli in un linguaggio universale che riassume scienza e tecnica, storia dell'arte e storia della civiltà, letteratura e cultura del lavoro. La civiltà è quella del Rinascimento, così come fu richiamata da Mario Salmi nel suo irripetibile *Civiltà Fiorentina del primo Rinascimento* (1943) che così esordisce: "Una tavoletta del Museo del Louvre a Parigi ci dice con chiarezza figurativa quale fosse il concetto dell'arte fiorentina intorno alla metà del Quattrocento in un pittore nato a Firenze, e nell'ambiente in cui egli viveva. Nel dipinto sono raccolti di tre quarti o di profilo, i busti di cinque personaggi indossanti vesti artigiane o borghesi [...]. I cinque fiorentini sono uomini 'segnalati' come ci avverte il Vasari: 'Giotto pittore per il lume e principio dell'arte; Filippo di ser Brunelleschi per l'architettura; Donatello per la scultura'; l'autore del dipinto, cioè Paolo Uccello 'per la prospettiva ed animali'; per la matematica Antonio di Tuccio Manetti 'suo amico, col quale conferiva e ragionava delle cose di Euclide'".

La ricchezza argomentativa e la paziente ricerca che caratterizza questo volume ci riconduce, per più aspetti, proprio a quel confronto culturale, che era il sale del dibattito e della creatività artistica.

Ma nell'introdurre e nel salutare l'accesso di questo studio nella letteratura sulla Cupola, dobbiamo ricordare quanto questo tema abbia goduto di grande frequentazione, quasi senza soluzione di continuità. Anche perché la letteratura ha avuto ed ha una ricca articolazione, da quella tecnico-scientifica a quella divulgativa, da quella dignitosamente manualistica a quella narrativa, da quella descrittiva a quella mitologizzante: così, solo per ricordarne alcuni, è come se sentissimo vicini a noi tutti quelli che, dal Cinquecento in qua, hanno avuto a che fare con questa struttura: dal Nelli al Durm, dallo Sgrilli al Guasti, dal Fabriczy al Prager, dal Ragghianti al Fondelli, al Fanelli, al Ricci. Certo, fra i tanti, e più recentemente, il pensiero va a chi

ha fatto di questo tema la vocazione dominante della propria vita di studioso e, segnatamente, Sanpaolesi, Mainstone, Saalman, Di Pasquale e, in ultimo, Chiarugi e Blasi.

Matematica, geometria, lettura diagnostica, rilevazione strumentale, osservazione diretta, metodo del confronto: è questa la chiave di lettura di questo lavoro, a cui va il merito di riportare ad unum le esperienze fatte in questi ultimi decenni. Non c'è dubbio, infatti, che nuovo e determinante impulso agli studi "applicati" ebbe a derivare dall'attenzione e dalle sollecitazioni della Soprintendenza, a partire dal 1975, che sfociarono nella subitanea formazione del "Comitato Nazionale per la salvaguardia della Cupola di S. Maria del Fiore". L'alta qualificazione degli studiosi chiamati a far parte di quel Comitato, i membri via via aggiunti, le discussioni – talvolta vivaci e vivacissime – che ne caratterizzarono i lavori produssero un avvertibile risveglio di attenzione scientifica attorno ai singolari problemi e "segreti" della Cupola. Del resto, il sesto centenario della nascita del Brunelleschi (1377-1977) non aveva mancato di suscitare nuove linee di ricerca sull'influenza del grande architetto, nel momento sorgivo dell'Umanesimo e sulle prime tecniche rinascimentali che si ripercorsero riandando alla trattatistica (uno per tutti, Bonaccorso Ghiberti) e producendo "modelli" in scala delle macchine di cantiere.

I risultati ragionevolmente oggettivi di quella intensa stagione di studi riguardarono il modo di voltar la cupola senza armatura (senza ponteggio da terra): per dirla con l'Alberti *facta senza alcuno aiuto di travamenti o copia di legnami*; Chiarugi e Blasi contribuirono a spostare l'attenzione dal corpo della cupola (impostata sopra il tamburo del Talenti) all'intero organismo, fino alla base a terra, osservando come l'intensificarsi del quadro fessurativo delle "vele" si alternasse, secondo che il lato di base appoggiasse sul largo piedritto o sull'arcata dell'ottagono; c'era poi l'appassionata (a volte fin troppo enfatizzata) diatriba sulla "spina pesce" e sull'apparecchiatura dei mattoni; il problema della presenza delle "catene" lignee

o in ferro (allora rimasto indeterminato). Pareri e dispareri che, per passione, talvolta arrivarono a ferire consolidate amicizie, come fu per l'utilizzazione delle "buche pontaaie" impiegate per montare lo snello ponteggio tubolare che avrebbe permesso il restauro dell'intradosso senza turbare gli svolgimenti del culto nella Cattedrale. Né si può sottacere il rilievo dei "plessi fessurativi" effettuato dal Petrini o gli studi che poco più tardi avrebbe condotto il Rocchi (con i suoi fedeli collaboratori Giorgi e Matracchi). Credo che ora, nella distanza

del tempo, vada dato merito a tutti di aver contribuito ad una maggiore conoscenza della Cupola e di aver suscitato nuovo e qualificato interesse nei più giovani, come questo volume dimostra. Del resto, se oggi la Cupola dispone del primo sistematico monitoraggio mai effettuato (precedente a quello della Torre di Pisa) si deve a quella stagione di studi di cui, ora, avvertiamo tutta la rilevanza. E che ha prodotto, come ultimo suggestivo indotto, questo volume del Corazzi e del Conti, a cui la comunità scientifica non mancherà di esser grata.

I Segreti della Cupola del Brunelleschi

Gennaro TAMPONE

L'opera

Credo che per descrivere l'opera realizzata da Roberto Corazzi e Giuseppe Conti, edita da Pontecorboli di Firenze, la si debba considerare per distinte parti.

Una parte preliminare è costituita dalla esposizione storiografica degli avvenimenti che riguardano la cupola sin dalle prime fasi del bando di concorso: essa, che costituisce il filo conduttore di tutta l'opera, è una estesa trattazione tematica per argomenti di carattere prevalentemente costruttivo, una esposizione critica dei vari rilievi che, con varie metodologie, si sono compiuti sino ad oggi sulla cupola, connessa ad una disamina delle varie teorie sui vari punti oscuri che la immensa fabbrica presentava e tuttora presenta, seppure in forma oggi attenuata.

Seguono la esposizione dei saggi, delle analisi dirette e delle prove sino ad oggi effettuate sulla cupola, il resoconto della serie delle specifiche prove eseguite per documentare la presenza di elementi metallici all'interno della cupola e per precisare l'apparecchio murario delle varie membrature con una raccolta antologica e una bibliografia, annotata con considerazioni critiche.

L'esposizione storiografica è strettamente correlata con le altre parti più specificamente tecniche ed è stata dagli Autori ritenuta indispensabile per far comprendere tutte le implicazioni tecniche della costruzione.

L'opera è anche una raccolta antologica che comprende testimonianze a noi contempora-

nee che riguardano il libro stesso, l'opera del Brunelleschi, l'atteggiamento in proposito della comunità fiorentina dalla seconda decade del Quattrocento; inoltre gli studi attuali, le teorie, le discussioni ed il dibattito, molto vivace anche se con periodi di picco e periodi di assopimento, che intorno alle varie teorie si è sviluppato relativo a forma, concezione strutturale, metodi di tracciatura, materiali da costruzione e tecniche relative, lo gnomone fiorentino, le macchine da cantiere, la conduzione dei lavori, le lesioni. Essa induce altresì a ricordare il significato delle coperture a volta o a cupola che, non deve essere dimenticato, sono sempre espressione, per le difficoltà costruttive e per le stesse connotazioni spaziali, di particolare dignità dell'architettura, assumendo le cupole, tra gli altri significati, quello di simbolo e simulacro stesso della volta celeste, potendosi affermare che questo si verifica universalmente, in ogni cultura. Esse sono di grande interesse e permettono di comprendere la percezione che persone di varia formazione culturale, non necessariamente tecnica, ricevono dalla diretta esperienza della cupola.

Per quanto concerne la forma, devo ricordare che le divergenze tra Studiosi hanno sempre riguardato principalmente il sesto della cupola cioè il profilo interno ed esterno, che comunque il legato dei costruttori trecenteschi della cattedrale aveva codificato il "sesto", cioè il profilo, in quinto e quarto acuto per i costoloni di spigolo, cioè in archi di cerchio il cui centro è spostato rispetto al centro della figura geometrica che

definisce la cupola ottagonale.

Per quanto concerne il processo culturale e mentale che ha portato Brunelleschi alla concezione strutturale di quella cupola, si può dire che questo è ignoto e che tale resterà, è un segreto che l'Architetto non ha voluto rivelare. Quale sia invece la concezione strutturale non è più un mistero, anche se alcuni aspetti secondari non sono ancora ben definiti; ora la concezione strutturale si può riconoscere, a mio parere, in un unico principio di geometria, tratto dalla geometria Euclidea con la fisica di Aristotele, principio che si traduce in forma materiale e che dalla ricerca di esatti (cioè adeguati) rapporti e proporzioni, dà sostanza e corpo all'opera che coincide quindi con la stessa struttura.

Il predominio della geometria, al tempo stesso matematica al tempo di Brunelleschi, è ben noto: richiamo soltanto alcuni fatti. La geometria era ancora lo strumento di analisi e calcolo di Galilei; ancora nella seconda metà del Seicento il suo allievo Vincenzo Viviani usava la geometria (come ha ben messo in luce P. Galluzzi) esaminare gli "screpoli", cioè le lesioni della cupola, e per progettare e dimensionare le cerchiature da apporre per consolidarle.

È da ricordare a tal proposito che ignoti al tempo del Brunelleschi erano il concetto di forza, ancora nebuloso in Leonardo, poco chiaro il momento di una forza, pure prefigurato da Leonardo, il concetto di peso specifico dei materiali (che si precisa soltanto dalla fine del Seicento), il concetto di scomponibilità delle forze secondo due o più direzioni, soltanto adombrato e in modo molto limitato dalle osservazioni di Leonardo, del tutto ignoto il concetto di sollecitazione interna dei materiali e di resistenza specifica differenziata per i singoli materiali maggiormente in uso per la costruzione, se non a livello empirico e intuitivo, e altri basilari concetti della fisica.

A questo proposito rilevo che un libro tanto esauriente sulla cupola, opera essenzialmente di puntuale verifica e interpretazione geometrica come detto, non poteva essere scritta che da due Studiosi di geometria e di matematica, competenze indispensabili a definire scientificamente la fabbrica; mi riferisco al profilo della cupola innanzitutto, che a Brunelleschi era stato già assegnato in maniera assolutamente vincolante, verificando però i rilievi disponibili con il metodo degli scarti quadratici, alle corde blande

e alla angolazione "radiale" secondo cui sono posati i mattoni, giaciture che derivano in maniera esatta dalla intersezione di coni capovolti con vertice sull'asse verticale della cupola ma di posizione variabile secondo regole di proiezione (il contributo primario di Di Pasquale), inoltre alla spine pesce ed alla loro forma – funzione – posizione (riconosciute disposte come curve losodromiche che formano cioè sempre lo stesso angolo con i paralleli di una sfera, per ciascuna vela e per il complesso di vele), e come tali determinano il percorso più breve tra due punti della calotta. È poetica l'immagine che indirettamente gli Autori suscitano di Brunelleschi, ricordando che era esperto di navigazione (soltanto fluviale però), quale navigatore sulla propria cupola, intento a disegnare coppie di spine pesce che sezione per sezione fanno da centina e sostegno ai mattoni troppo inclinati verso il centro.

Si può riconoscere che gli Autori hanno tenuto un triplice approccio, innanzitutto enciclopedico, riportando tutto quanto noto non soltanto sulla cupola ma su tamburo e lanterna, tribune e camminamenti, con sistematicità, con il doppio filo, come detto, della narrazione degli eventi nella loro cronologia, che corrispondono anche alle fasi costruttive, e al presentarsi di problemi di varia natura, e con la esposizione sistematica delle caratteristiche note e di quelle incerte, ancora problematiche. In secondo luogo antologico, presentando una sistematica raccolta degli studi, delle indagini, delle prove ecc. nonché trascrizione delle teorie, della concezione strutturale, dei metodi di tracciamento, della stessa forma, delle tecniche di costruzione della cupola tanto più che riguardano una costruzione ai suoi tempi assolutamente innovativa e di cui non esistono repliche. Ciò è dovuto a molteplici fattori tra i quali l'assenza quasi totale di scritti da parte del Brunelleschi e la inaccessibilità delle parti interne sotto spessori molto consistenti di muratura a meno di non usare tecniche invasive che però non possono essere messe in atto per rispetto del monumento. Le indagini strumentali infatti non potranno mai sostituire l'indagine diretta quanto a globalità dell'informazione ottenibile.

In terzo luogo un approccio documentario che si sostanzia della ordinata e, bisogna dirlo, anche critica raccolta ed esposizione dei risultati delle analisi e delle prove compiute.

L'opera nel suo complesso

È chiaro che i due autori hanno intrapreso da lungo tempo studi sulla cupola e che li espongono ora in forma meditata, dopo lunga sperimentazione, nell'ambito delle ricerche altrui; notevole a questo proposito il contributo sulla ricerca e su determinazione della presenza, dimensioni, posizione delle barre ferrose. Molto apprezzabile l'assenza di polemiche e l'uso di toni pacati nella disamina critica.

L'intento didascalico e pedagogico è perseguito con testi molto semplici, rinunciando a enfasi stilistiche, come si conviene ad un'opera scientifica il cui intento è anche quello di rendere la cupola patrimonio intellettuale oltre che materiale della intera comunità, quindi anche recuperando e completando l'apparato iconografico con materiali illustrativi di prim'ordine.

È encomiabile l'ottima traduzione in inglese, ormai mezzo indispensabile per la divulgazione a cultori e studiosi di altra lingua.

È un peccato che manchi un indice sistematico trattandosi di un libro che si può leggere e comprendere d'un fiato ma anche da studiare in maniera meditativa confrontando continuamente le varie parti.

Un'opera estremamente complessa che si propone come una enciclopedia della cupola, dal tamburo alla lanterna; credo che essa meriti questa attribuzione di valore, costituendo, al tempo stesso, un resoconto dettagliato di tutte le prove eseguite, documentate peraltro con il tentativo di armonizzare i risultati.

In definitiva un'opera corale con contributi interdisciplinari.

* * *

Un accenno alle testimonianze sullo stesso libro, inserite nell'opera, non può mancare.

F. Gurrieri (Il segreto della cupola secondo l'appassionata ricostruzione di Corazzi e Conti) rileva la capacità della cupola di rappresentare l'intera comunità fiorentina e ricorda gli Studiosi che più di recente se ne sono occupati (P. Sanpaolesi, R. Maistone, S. Di Pasquale, Chiarugi, C. Blasi; successivamente G. Petrini con la rilevazione dei plessi fessurativi, G. Rocchi con la collaborazione di L. Giorgi e P. Matracchi), individua in matematica, geometria, lettura diagnostica, rilevazione strumentale, rilevazione

diretta, metodo del confronto le chiavi di lettura del volume.

C. Scaletti (La cupola di Santa Maria del Fiore espressione tangibile del Rinascimento) rileva che la cupola può essere presa a simbolo del Rinascimento.

Il Presidente del Lyons Club di Poggio Imperiale di Firenze molto opportunamente cita le affermazioni di Brunelleschi che esprime la convinzione che l'unico modo per voltare la cupola è farla a doppio guscio.

E. Cianfanelli (Nuove tecnologie e beni culturali) auspica che Firenze continui ad attrarre menti illuminate e speculative oltre che turisti.

A. Mitrano (La cupola di Santa Maria del Fiore) ricorda la poliedricità della cultura dell'architetto, inventore della cupola, direttore della fabbrica, costruttore delle macchine di cantiere, organizzatore del lavoro.

S. Mecca (La Cupola di Santa Maria del Fiore: una sintesi unica di culture architettoniche) invita a sviluppare gli studi sull'influenza della cultura dell'Oriente, specialmente costruttiva, sulla civiltà occidentale.

U. Tramonti (Nuove stagioni della Cupola di Santa Maria del Fiore) mette in evidenza la capacità di Brunelleschi di compiere l'ardito passaggio dalla considerazione degli immani pesi dei materiali messi in opera a quello che oggi chiameremmo configurazione strutturale finalizzata alla stabilità delle costruzioni.

M. Zoppi (Un "nodo" di ancoraggio concettuale), con un corposo contributo che rende conto della percezione che della cupola hanno avuto storici e letterati come M. Marangoni, ricorda l'apertura della cultura fiorentina del tempo alla cultura orientale e ipotizza la possibilità che Brunelleschi conoscesse altre cupole da cui potrebbe aver tratto ispirazione per la propria; richiama, tra gli altri K. Lynch, che ha definito la cupola un nodo di ancoraggio concettuale rispetto al territorio.

G. Morolli (Un cielo di terra) con un esteso e articolato saggio aggiunge una serie di dati sulla cupola e riconduce il successo della intera operazione di costruzione nell'aver individuato, da parte della comunità fiorentina del tempo, una unica personalità, un unico individuo capace di assumere tutte le responsabilità tecniche dell'impresa oltre che della invenzione. Rileva che gli accorgimenti più geniali del Costruttore furono di realizzare non un'unica volta piena

ma due calotte sovrapposte collegate da un ordito di costoloni e una trama di ponti, che fa funzionare il complesso come una trave reticolare ruotata nello spazio, l'impiego vantaggioso del mattone che permette flessibilità e la realizzazione di forme anche complesse, secondo letti di varia inclinazione, a confronto con la pietra, molto più pesante e meno adattabile, infine l'adozione della spinapesce; nelle note sono forniti copiosi dati e sviluppate analogie con la muraglia cinese, nell'ultima versione contemporanea circa alla cupola, e con il noto precedente (circa un secolo prima) del Mausoleo di Oljatu in Persia.

Considerazioni personali

Quasi tutto era stato già esplorato, sull'argomento, da Giovan Battista Nelli nel '700 e da Cesare Guasti a metà dell'800; essi però avevano soltanto mezzi di osservazione diretta e speculativi per intuire ma non avevano strumenti per misurare e dimostrare.

Studiosi come P. Sanpaolesi, M. Fondelli, S. Di Pasquale, A. Chiarugi, G. Petri, F. Gurrieri, R. Mainstone e molti altri hanno dato contributi fondamentali, cui ora si aggiungono quelli più recenti di R. Corazzi e di G. Conti.

A Piero Sanpaolesi, in particolare, si possono attribuire i meriti, tra gli altri, di aver posto sistematicamente tutti i problemi sul tappeto e di avere scelto il metodo della lettura diretta del monumento, studiando estensivamente l'apparecchio murario, come fonte primaria di informazione riconoscendo nel processo costruttivo, cioè la progressione per anelli interi nella costruzione dei filari e la necessità di lavorazioni contemporanee adoperando, in generale, centine mobili parziali, la chiave di interpretazione della realtà strutturale; inoltre rileggendo criticamente tutti i documenti. A lui si deve anche una ricerca specifica sulle conoscenze matematiche e geometriche possedute da Brunelleschi, con una estesa esplorazione dell'ambiente scientifico fiorentino (l'eredità scientifica di Fibonacci, le tesi di meccanica sostenute da Giordano Nemorario del XIII sec., note a Firenze, Paolo Ficozzi e Biagio Pelacani, l'influenza della scuola fiorentina dell'Abbaco).

È suo merito aver creduto che Brunelleschi avesse tenuto fede alla imposizione della forma

ad arco di cerchio dei costoloni di spigolo, fatto successivamente dimostrato, aver compreso l'importanza della forma a doppio guscio sotto il profilo strutturale e aver istituito una ricerca storiografica in proposito, introducendo nella ricerca la considerazione del Mausoleo di Olgiatu Kodabendah a Soltanieh in Persia, da lui rilevato e parzialmente restaurato, come precedente importante e fondamentale per la cattedrale fiorentina, specialmente per quanto concerne la smaterializzazione in doppio guscio della cupola, comprendendo che l'apparecchio fosse uno degli elementi determinanti per la ideazione e per il successo della cupola; ha rilevato le corde blande (anche se intese come anomalie costruttive) e riconosciuto la presenza di mattoni speciali "a libro aperto" per raccordare le vele comprendendo la funzione di guance delle spine pesce per evitare lo scivolamento dei mattoni.

Queste considerazioni permettono di concludere che Sanpaolesi ha elaborato e utilizzato un metodo generale di analisi ed interpretazione cui nessuno ora può sottrarsi.

* * *

L'opera brunelleschiana è soprattutto un testo di geometria rigorosissima, estremamente coerente proprio sul piano della forma. Non bisogna dimenticare in proposito che l'architetto era coadiuvato da matematici, in particolare da Paolo del Pozzo Toscanelli (autore dello gnomone fiorentino) e dal coetaneo Giovanni dell'Abbaco, e certamente stimolato dalle controversie con Gherardo da Prato e altri a definire con esattezza geometrica tutti i particolari costruttivi.

Ha ragione Sanpaolesi a ricordare, a proposito della invenzione della cupola, che Brunelleschi fu unanimemente dai contemporanei ritenuto l'inventore della prospettiva e che quindi era ben addestrato all'esercizio della proiezione; perciò ritengo che con tale strumento è concepita, ideata, proporzionata, dimensionata, anche a fini strutturali e, infine, tracciata la cupola.

La sostanziale convergenza tra le teorie di Di Pasquale e del cono proiettivo per determinare le intersezioni con le superfici delle vele, con quelle di Chiarugi e Quilghini nonché di Carlo Alberto Rossi che identificano tali intersezioni con le lossodromiche ai meridiani quindi più facili da tracciare (?), con uno scarto quasi trascurabile

di 4°, come valutato dai due Autori del libro, lascia aperta la questione se Brunelleschi abbia seguito l'una o l'altra teoria per il tracciamento. Ritengo che si debba propendere per la prima ipotesi perché più immediata, più "geometrica", più facilmente immaginabile o materializzabile con modelli, suscettibile peraltro di traduzione in cantiere per la tracciatura diretta. Il ricorso ad altre interessanti teorie che fanno appello alla costruzione di curve particolari lasciano comunque insoluta la difficoltà della materializzazione della posizione dei singoli elementi che costituiscono la fabbrica.

Hanno ragione gli Autori del libro quando affermano che la cupola ottagonale Brunelleschi l'ha girata (l'aveva già proposto prima di iniziare) come se fosse una cupola di rotazione ma a base ottagonale. Lo provano, tra l'altro, le spine pesce posizionate quasi in continuità vela dopo vela. È quindi verosimile che l'Architetto abbia provveduto alla materializzazione di un asse verticale nel cantiere della cupola cui riferire ogni misura di lunghezze e di angoli.

A proposito della concezione strutturale, si deve osservare che il doppio guscio e le nervature interne di collegamento come in un moderno pannello pluricellulare quindi nervato caratterizzato dalla eliminazione della quasi totalità del materiale intermedio che di fatto da un contributo molto modesto alla resistenza, erano l'unica possibile soluzione strutturale per raggiungere, come oggi diremmo, resistenza e rigidità dell'organismo curvo insieme a leggerezza ed economia. Ne è prova la presenza di leghe di pietra ("catene") a tutti i livelli della duplice calotta; tra queste la catena (rilevata e studiata da Massimo Ricci), che è sì lignea ma avrebbe dovuta essere dotata di "catene" di ferro. I vincoli posti dal contratto e dalla preesistenza della cattedrale arnolfiana (spessori e forma del profilo) lasciavano al Brunelleschi soltanto modesti gradi di libertà progettuale consistenti nel determinare l'ossatura della cupola: cioè la caratteristica di essere piena o cava, lo spessore del vuoto tra le due calotte, le proporzioni tra spessori di guscio interno e guscio esterno. Le spine pesce sono dunque "centine" ma anche, a mio parere, giunti di dilatazione della immensa fabbrica che altrimenti sarebbe stata troppo massiccia, specialmente negli speroni esterni ed interni.

A tal proposito è sorprendente riconoscere che

all'interno dello spessore della cupola interna si possa inscrivere una catenaria, la cui definizione sfuggiva perfino a Galilei che assimilava la curva che forma una corda sospesa ai due estremi ad una parabola (una fune sostenuta ai due estremi si configura in parabola quando è sottoposta ad un carico uniformemente distribuito, in catenaria quando sottoposta soltanto al peso proprio). Devo ricordare che la catenaria ha avuto una espressione definitiva soltanto alla fine del Seicento (1691, in *Acta Eruditorum*) da tre matematici contemporaneamente, Huyghens, Leibnitz (l'inventore del calcolo differenziale) e Johann Bernoulli. Il ponte a Santa Trinita dell'Ammannati, secondo le ricerche condotte da Brizzi con l'ellisse di elasticità per le verifiche, ha la stessa forma a catenaria. Si tratta di una curva ottenibile con facilità quindi caratterizzata da proprietà intuitive.

In architettura è frequente il ricorso a forme reperibili in natura o facilmente riproducibili.

Benché l'uso del ferro sia attestato in architettura per usi strutturali (quindi a parte le grappe di collegamento dei conci litici, specialmente nel periodo classico), sia pure molto sporadicamente e soltanto per modeste quantità, già dall'antichità classica in Grecia (architravi del tempio di Basse di Ictinos e, all'Acropoli di Atene, trave dei soffitti del porto occidentale dei Propilei di Mnesicle), inoltre nella cosiddetta sala dei Pilastr Dorici e nel cosiddetto Teatro Marittimo di Villa Adriana a Tivoli e nel criptoportico di Conimbriga in Portogallo, e comunque in misura sporadica, è certamente insolito l'uso del ferro per cerchiature laddove nella tecnica medioevale e rinascimentale dell'architettura civile e militare erano generalmente, quindi non senza eccezioni (consolidamento di edifici importanti come il Duomo di Siena), usati pali e leghe di legno (per es. alla sommità delle pareti della Cappella Rucellai nella versione albertiana, nel Trattato del Belluzzi per le fortificazioni).

L'impiego di ferro, da supporre forgiato quindi poco ossidabile, nella fabbrica della cupola è da ritenere un ulteriore geniale contributo personale di Brunelleschi per assicurare maggiore resistenza all'intero organismo. Queste e le altre acquisizioni spiegano la passione che gli Autori e i Collaboratori hanno posto nel lavoro di ricerca strumentale, non invasiva, operando inoltre una efficace attività divulgativa.

Note sulla Cupola suggerite dalla lettura del volume di Roberto Corazzi e Giuseppe Conti : "*Il Segreto della Cupola del Brunelleschi a Firenze*"

Carlo BLASI

La cupola brunelleschiana di Santa Maria del Fiore è certamente una delle opere di architettura sulla quale si è più dibattuto e si è più scritto nei secoli, a partire dalla sua progettazione e dalla sua costruzione fino ad oggi.

Il volume di Roberto Corazzi e Giuseppe Conti, ultima pubblicazione in ordine di tempo sulla cupola fiorentina, ha come primo merito quello di presentare in modo ampio e lineare la secolare storia del monumento, con puntuali riferimenti alle numerose pubblicazioni, descrivendo gli aspetti costruttivi più dibattuti, che a lungo sono stati chiamati i "segreti" della cupola. A questa trattazione storica, il volume aggiunge numerose interessanti nuove notizie tecniche sulla fabbrica, sui materiali e sulla geometria, risultati delle ricerche e delle indagini che sono state effettuate negli ultimi anni.

In particolare, per quanto riguarda le numerose contrapposizioni che si sono sviluppate nei secoli intorno alla cupola, il volume di Corazzi e Conti presenta un resoconto esauriente a partire dalle vicende, in fase di costruzione, che videro il Brunelleschi prima contro i saggi dell'Opera, poi contro il Ghiberti e infine contro Gherardo da Prato, "collaudatore in corso d'opera" (al quale Brunelleschi non dette alcuna spiegazione e che, poveretto, scrisse una famosa pergamena dimostrando di non aver capito nulla di come Brunelleschi stava tracciando la cupola), per poi raccontare delle contrapposizioni tra il Viviani e il Cecchini per la cerchiatura, fino ad arrivare alle polemiche tra i membri delle varie commissioni, via via nominate per la stabilità della cupola lesionata, fino all'ultima commissione ministeriale degli anni '80.

Particolarmente difficile deve essere stato per gli autori non tanto raccontare le note vicende storiche lontane, talvolta con aspetti leggendari, quanto orientarsi nella bufera delle violente contrapposizioni che si sono sviluppate tra gli anni '80 e gli anni '90 del secolo scorso.

Per chi non era presente o non si ricorda, alcuni

titoli dei giornali dell'epoca sono significativi per illustrare il livello aspro delle polemiche. Ho molto apprezzato la prudenza e la completezza della trattazione, in quanto in quegli anni, posso dire per mia buona sorte, mi sono trovato proprio nel mezzo delle polemiche raccontate nel volume, partecipando in prima persona alle ricerche che hanno caratterizzato quel periodo di studi brunelleschiani.

Per tale ragione, è su quel periodo e sui risultati di quegli studi, riportati nel volume, che desidero concentrare l'attenzione del mio contributo e aggiungere qualche testimonianza inedita.

Il 1977 fu l'anno del sesto centenario della nascita di Brunelleschi (1377) e quell'anno non solo fu l'occasione per importanti celebrazioni pubbliche in Firenze, ma anche stimolo per nuovi studi sulla cupola e per promuovere iniziative, quali la campagna di restauro degli affreschi - che poi, operativamente, iniziò con la costruzione del grande ponteggio nel 1987 - e l'installazione del più complesso sistema di monitoraggio esistente, ancor oggi, su un monumento.

Sotto la spinta del centenario, gli anni '80 e '90 sono stati un ventennio ricco non solo di polemiche, ma anche di determinanti scoperte e di pubblicazioni che hanno definitivamente svelato i maggiori "segreti" della cupola, relativi, in particolare, alla geometria, al tracciamento e alle tecniche costruttive.

Il volume di Corazzi e Conti ha l'ulteriore merito di riportare un'ampia bibliografia delle pubblicazioni sulla cupola, tra le quali personalmente desidero ricordarne alcune come i più significativi lavori di quegli anni: - il volumetto del 1990 "*Elaborazione ed interpretazione di dati sperimentali da sistemi di monitoraggio: la cattedrale di Santa Maria del Fiore*", curato da Andrea Chiarugi, con contributi di vari autori, edito dal Dipartimento di Ingegneria Civile di Firenze, che riunisce i risultati del primo anno di monitoraggio della cupola, spiegandone, in particolare, il "respiro"; - il volume del 1994 "*Cupola di Santa Maria del Fiore, il cantiere di*

la Repubblica.it

ARCHIVIO LA REPUBBLICA DAL 1984

QUEL RESTAURO SCIAGURATO ALLA CUPOLA DEL DUOMO

23 agosto 1987 — pagina 15 sezione: CRONACA

CORRIERE DELLA SERA

DA DOMENICA SARANNO VISIBILI A SANTA MARIA DEL FIORE LE PITTURE DI VASARI E ZUCCARI ORA RESTAURATE

a passeggio nel "Giudizio Universale"

dopo 14 anni di litigi sulla stabilita' della cupola del Brunelleschi

la Repubblica.it

ARCHIVIO LA REPUBBLICA DAL 1984

BRUNELLESCHI IN PROCURA

Repubblica — 26 giugno 1990 pagina 19 sezione: CRONACA

Titoli dei giornali dell'epoca

restauro", a cura di Cristina Acidini e Riccardo Dalla Negra, che riassume i lavori di restauro compiuti dalla Soprintendenza; - il volume del 2002 *"Brunelleschi. La costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore"*, di Salvatore Di Pasquale, Ed. Marsili; - il volume del 2004 *"La Cupola del Brunelleschi: storia e futuro di una grande struttura"*, Mandragora Ed., di Giovanni e Michele Fanelli, nel quale sono riportati gli studi sulla stabilità condotti con Andrea Chiarugi, che è il più puntuale compendio sulle problematiche statiche della cupola; - il bel volume del 2006 *"S. Maria del Fiore: teorie e storie dell'archeologia e del restauro nella città delle fabbriche arnolfiane"* a cura di Giuseppe Rocchi Coopmans de Yoldi, Firenze, Alinea Editrice, con un importante contributo di Luca Giorgi e Giuseppe Matracchi.

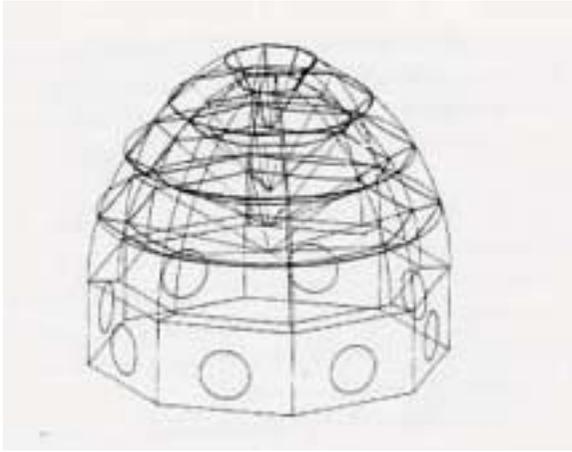
Una produzione notevolissima che ha coinvolto un gran numero di studiosi, che hanno fornito un contributo essenziale alla conoscenza della cupola fiorentina. Tra questi mi piace soffermarmi

con particolare affetto sui due miei maestri che indubbiamente sono stati tra i principali attori degli studi di quegli anni.

Il primo è Salvatore Di Pasquale, che ricordo con particolare riconoscenza in quanto mio relatore di tesi e con il quale ho lavorato per dieci anni dopo la laurea. Purtroppo Di Pasquale, quando accettò di creare la Facoltà di Architettura di Siracusa, non venne più accolto dalla Facoltà di Architettura di Firenze, che negli ultimi anni, non gli assegnò più nessun incarico di insegnamento.

A Salvatore di Pasquale dobbiamo oggi serenamente riconoscere almeno due grandi meriti.

Il primo è quello di avere attivato una campagna di studi scientifici rigorosi sulla geometria e sui materiali della cupola, proponendo ipotesi innovative che hanno suscitato un dibattito che è presto diventato internazionale. Il secondo merito è quello di aver definitivamente chiarito,



Salvatore Di Pasquale: primi disegni al computer dei "letti conici".

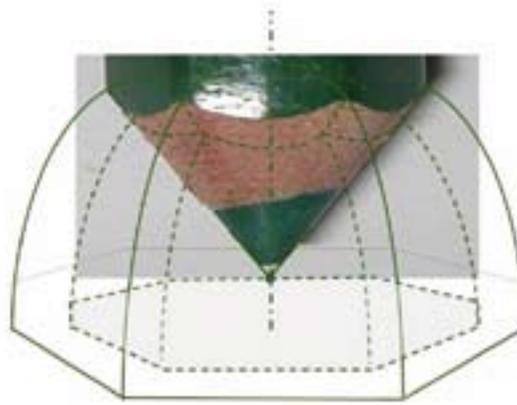
partendo dalle notazioni dello Choisy e del Mainstone, la geometria di concezione della cupola, illustrando le ragioni della disposizione dei mattoni su letti conici con i primi disegni realizzati con un computer.

Quei disegni dei letti conici dimostravano come Brunelleschi avesse indubbiamente avuto e governato una visione geometrica complessiva della costruzione e avesse ricercato un'organizzazione centripeta della cupola ottagonale a sesto acuto, risolvendo il problema geometrico di tracciare una cupola con otto centri facendo riferimento solo al "centro di mezzo", come testimonia involontariamente Gherardo da Prato con i suoi disegni.

Soluzione geniale, perché fare riferimento ad un solo centro, invece che a otto, non solo semplificava il tracciamento, ma riduceva enormemente il rischio di errori geometrici. Salvatore spiegava tutto questo dicendo semplicemente che nella cupola ottagonale Brunelleschi aveva realizzato una "cupola di rotazione": espressione violentemente contestata dai suoi oppositori dell'epoca, ma sostanzialmente confermata oggi dalle precise valutazioni, dalle equazioni e dai disegni di Conti.

Ricordo in particolare l'esempio pratico, estremamente facile da comprendere, che lui proponeva per spiegare la complessa geometria di tale soluzione tecnica: l'esempio della punta di una matita, che ripropongo in queste immagini, dalle quali si vede la stretta similitudine tra la forma della disposizione dei mattoni a "corda blanda" e la linea di demarcazione tra il cono della punta e il prisma della matita.

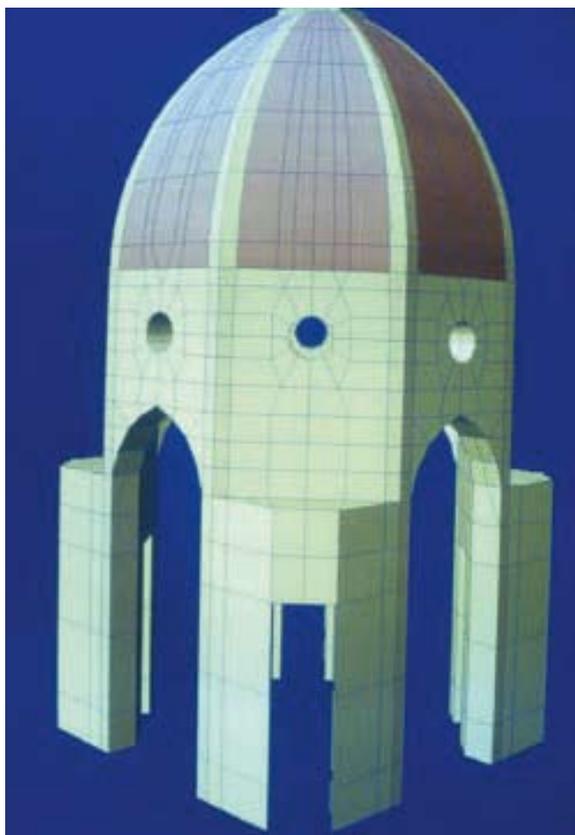
L'altro principale attore degli studi di quegli



Similitudine tra la punta "conica" di una matita prismatica ottagonale e i "letti conici" della cupola (da un'idea di Di Pasquale).

anni è stato Andrea Chiarugi, con il supporto determinante di Michele Fanelli per gli aspetti computazionali e di Demore Quilghini per gli aspetti geometrici. Bisogna riconoscere che è grazie agli studi di Chiarugi, con il quale ho avuto la fortuna di collaborare per tutti gli anni '80 e al quale molto devo delle mie conoscenze strutturali, che l'allora Commissione ministeriale per la cupola arrivò a definire all'unanimità, fatto eccezionale, le cause delle lesioni nella cupola, le ragioni della loro presenza solo sulle vele pari e le cause delle diversità di ampiezza delle lesioni tra le varie vele, ovvero alcuni tra quelli che ancora, all'epoca, venivano considerati come "segreti" della cupola.

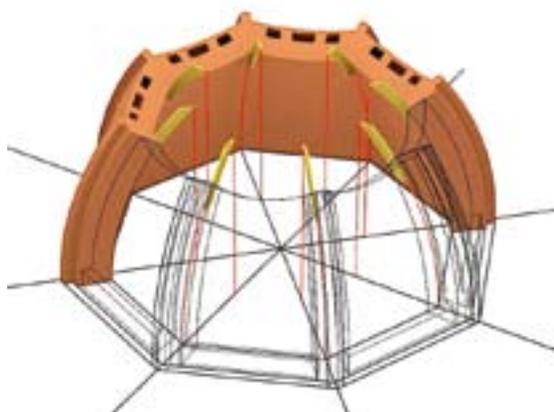
Fondamentale, per l'ottenimento di tali risultati, fu il primo modello numerico strutturale per il calcolo della cupola brunelleschiana realizzato presso il centro CRIS-ENEL da Fanelli e Giuseppetti.



Modello numerico per il calcolo della cupola (Chiarugi, Fanelli, Giuseppetti).

Oltre alle cause delle lesioni Chiarugi e Quilghini definirono, in un loro ben noto articolo su Critica d'Arte, anche un'ipotesi di tracciamento della cupola, mediante centine rampanti con riferimento al centro di mezzo, che cerco di illustrare con un mio disegno, e che, per la semplicità e per le conferme che se ne possono avere su vari documenti storici, appare ancor oggi come l'ipotesi più probabile.

Se, pertanto, Salvatore Di Pasquale è stato attratto soprattutto dai problemi geometrici generali, direi "architettonici", Chiarugi si è



Tracciamento degli spigoli della cupola mediante centine rampanti e riferimento ad una "stella" di cavi convergenti al "centro di mezzo".

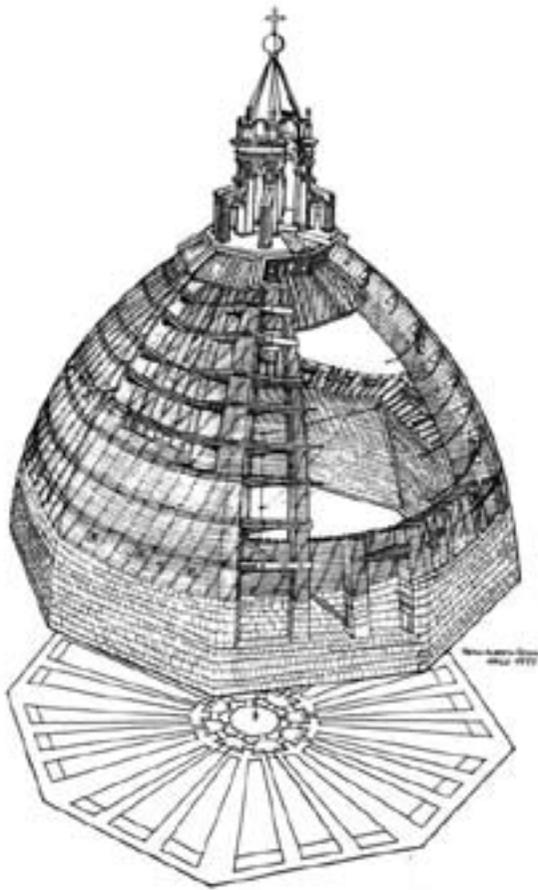
invece concentrato sugli aspetti strutturali e sui problemi tecnico-costruttivi e di tracciamento. Corollario ovvio dell'uso delle centine rampanti è, infatti, la possibilità di realizzazione delle murature, con la complessa disposizione dei mattoni a "corda blanda" (su letti conici), effettuando semplicemente controlli locali, ovvero permettendo alle varie squadre di operai di lavorare autonomamente. L'ipotesi venne sperimentata da Chiarugi su un noto modello a Ravenna realizzato con la cooperazione dei muratori della Cooperativa ACMAR.



Modello della cupola realizzato a Ravenna su idea di Andrea Chiarugi.

Nella bufera delle polemiche tra i vari studiosi, data la mia veste poliedrica di "architetto" che lavorava con gli "ingegneri" nel Dipartimento di Ingegneria Civile, mi è toccato anche lo strano ruolo di ambasciatore con incarichi diplomatici tra le diverse parti in "conflitto". È così che ho avuto la fortuna di confrontarmi direttamente, più volte, anche con gli altri importanti esperti fiorentini che studiavano la cupola, e che sono citati nel volume di Corazzi e Conti. Ricordo, in particolare, con piacere le discussioni con Lando Bartoli e Paolo Alberto Rossi, autore, quest'ultimo, di splendidi disegni della cupola, alcuni dei quali ripresi, completati o semplificati dallo stesso Corazzi in questo volume per meglio spiegare le forme della cupola.

equazioni, quelle curve che fino a ieri erano ipotesi non completamente documentate.

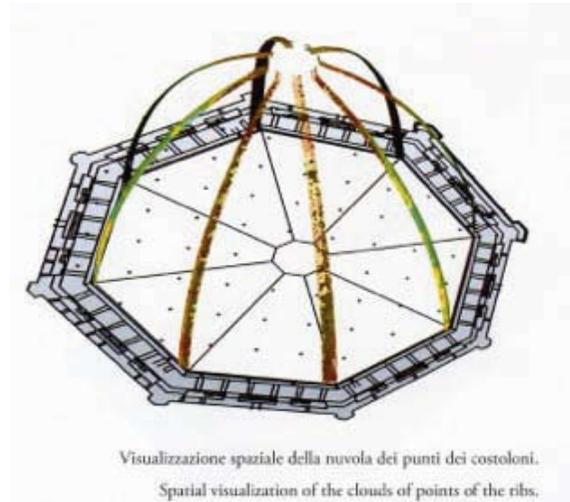


Paolo Alberto Rossi: organizzazione costruttiva della cupola

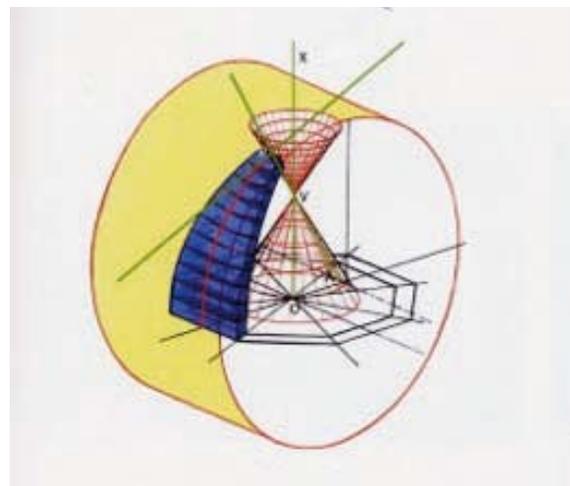
Un altro notevole contributo del volume di Corazzi e Conti è la grande massa di nuove indagini e di rilievi che sono ampiamente illustrati. Si tratta dei rilievi e delle indagini, effettuate con strumentazioni raffinate, che sono state eseguite dal 2002 ad oggi e che, in parte, sono pubblicate per la prima volta: dati fondamentali per una completa conoscenza del monumento.

Non è possibile commentare tutte le nuove indagini riportate, ma basterà elencarle per comprenderne l'importanza e la modernità: indagini fotogrammetriche, rilievi stereofotogrammetrici della cupola effettuati da FOART, rilievi con il laser-scanner, che definitivamente forniscono la completa geometria della cupola, indagini tomografiche per comprendere la composizione delle murature, indagini endoscopiche, indagini con metaldetector, indagini con georadar. Per saperne di più, ovviamente, bisogna leggere il volume.

Tutte queste indagini e questi rilievi hanno permesso, tra l'altro, a Giuseppe Conti di verificare le geometrie delle curve delle vele e dei costoloni, svelando ormai ogni "segreto" della forma e confermando analiticamente, con



Fotogrammetria e rilievi mediante laser-scanner della cupola e della geometria reale degli spigoli (Corazzi e Conti)¹.



G. Conti: geometria delle vele e dei letti conici dei mattoni².

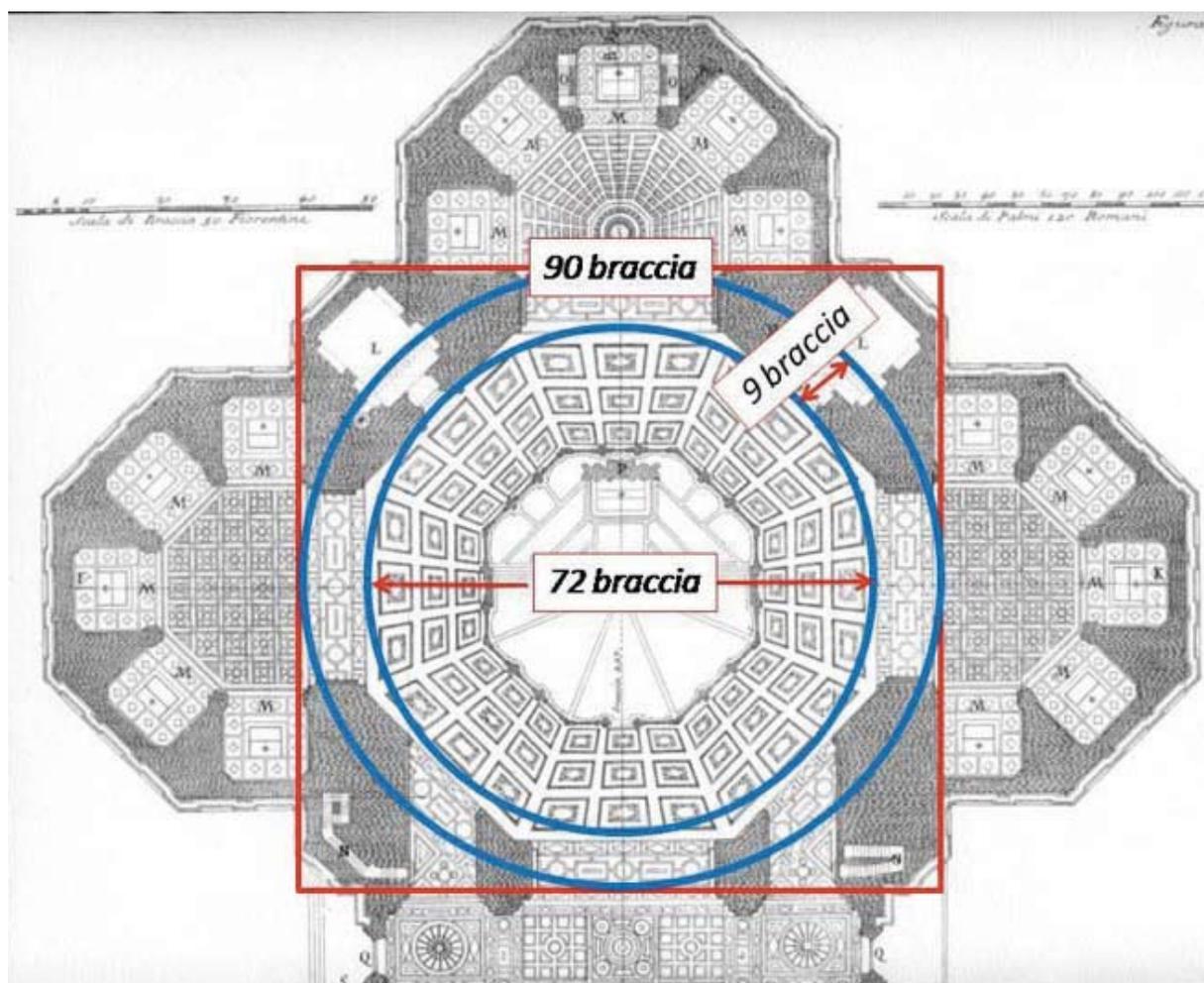
È interessante notare come Conti dimostri che le soluzioni geometriche della disposizione dei mattoni a “corda blanda” proposte da Di Pasquale (superfici coniche) e quelle proposte da Quilghini (lossodromiche realizzate sui piani tangenti alle superfici di ogni vela), oggetto di contrapposizioni violente all’epoca, di fatto, coincidano perfettamente.

È così definitivamente confermata, con questo volume, la geometria reale e quella ideale di riferimento a sesto di quinto acuto in intradosso e a sesto di quarto acuto in estradosso. Geometria che, è forse opportuno ricordarlo, non è un’invenzione di Brunelleschi, ma degli architetti e delle istituzioni fiorentine, che hanno deciso che la cupola dovesse avere tale forma e che l’hanno posta a base del concorso vinto da Brunelleschi.

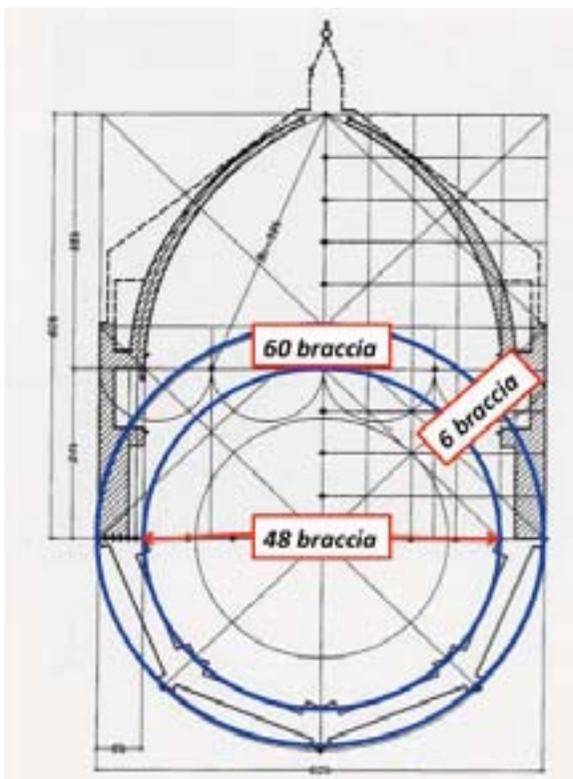
D'altronde anche la geometria di base della cupola venne definita molti decenni prima di

Brunelleschi e, a tale proposito, può essere l’occasione per ricordare, come risulta da alcune nostre valutazioni, che la cupola è stata realizzata con riferimento ad un quadrato di base di lato di 90 braccia e che lo spessore della cupola, misurato alla base normalmente alle vele, comprese le lesene esterne, è di circa 9 braccia, con un rapporto di 1/10. Nella parte in elevazione, scomparendo le lesene esterne di un braccio e mezzo, il rapporto diventa, come ben noto, di 1/12.

Interessante può essere il confronto con la geometria del Battistero di San Giovanni, che invece è stata definita con riferimento al cerchio circoscritto all’ottagono di base che è di 60 braccia. Lo spessore della muratura, misurato sullo spigolo è di 6 braccia. La proporzione, alla base, tra lo spessore della muratura e la distanza tra le superfici esterne è pertanto di 1/10 per entrambe le cupole.



Pianta di Santa maria del Fiore: quadrato di 90 braccia di lato sul quale è impostata la cupola ottagonale di spessore 9 braccia alla base. Proporzioni alla base della cupola: il diametro del cerchio circoscritto all’ottagono di base è di 90 braccia, ovvero 1,5 volte quello del Battistero e il rapporto tra lo spessore e tale diametro è di 1/10. Nella cupola in elevazione lo spessore si riduce a 1/12 del diametro del cerchio circoscritto.



Geometria di base di riferimento del Battistero di San Giovanni, basata su una circonferenza di diametro di 60 braccia (comprendente le nervature esterne). Varie sono le coincidenze con la cupola di Santa Maria del Fiore: lo spessore pari a 1/10 della distanza tra gli spigoli esterni e, probabilmente, i centri di curvatura ad $\frac{1}{4}$ del diametro esterno.³

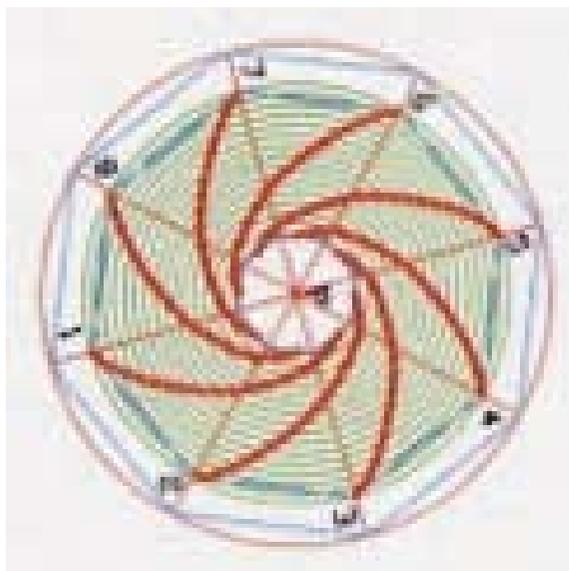
Data l'importanza dei numeri all'epoca (in particolare il 3, il 6 e il 9) se ne deduce che il Battistero, in quanto fabbrica a pianta centrale, nasce da un cerchio (diametro 60 braccia) e che la cupola di Santa Maria del Fiore, spazio definito dall'intersezione di una navata e di uno pseudo-transetto, nasce su un quadrato (lato 90 braccia). È evidente come i progetti di tali grandi opere fossero il risultato di valutazioni e determinazioni dimensionali nelle quali i numeri perfetti avevano un'importanza fondamentale, superiore e antecedente a qualunque decisione progettuale successiva, alle quali partecipava l'intera società, più vincolanti delle nostre norme urbanistiche.

Grazie alle recenti indagini strumentali, riportate nel volume di Corazzi e Conti, è stata documentata anche la presenza di una zona interna di muratura non così accurata come quella esterna, che gli autori hanno chiamato "di riempimento", certamente, comunque, in muratura di mattoni, se pure con molta malta e realizzata con poca cura, come documentato dai carotaggi effettuati a suo tempo da Di Pasquale. Il volume conferma anche l'assenza di cerchiature o di staffe metalliche poste con continuità: fatto importante in quanto a lungo dibattuto.

Il volume di Corazzi e Conti conferma anche gli altri aspetti più complessi della geometria, quali i letti conici, l'inclinazione al centro di curvatura dei giunti e le rastremazioni al "centro di mezzo" dei costoloni.

Per quanto riguarda, infine, la disposizione dei mattoni posti in verticale, ovvero a "spinapesce", il volume, che riporta alcuni rilievi effettuati in intradosso e in estradosso⁴, ripropone l'ipotesi che tali mattoni costituiscano delle vere e proprie "eliche", nonostante le numerose irregolarità rilevate da Luca Giorgi.

Su questo tema, difficilmente qualcuno potrà dire una parola definitiva, ma mi piace mostrare



"Eliche" di mattoni a "spinapesce"⁵.

una foto, da me realizzata dai ponteggi presenti negli anni '80, che mostra uno spigolo senza l'intonaco affrescato. Nella foto si nota come gli spigoli dei mattoni posti in verticale sporgano dalla superficie della vela, a chiara dimostrazione che i mattoni verticali sono stati accuratamente disposti da Brunelleschi in modo "radiale".

Certamente si discuterà ancora a lungo se questa cura è stata tenuta semplicemente per impedire lo "scivolamento" dei mattoni sulla malta fresca, o se per realizzare all'interno delle vele delle "piattabande" (come affermavano Bartoli e Rossi) o per realizzare delle "eliche" che costituissero l'ossatura di una cupola di rotazione come proponeva Di Pasquale.

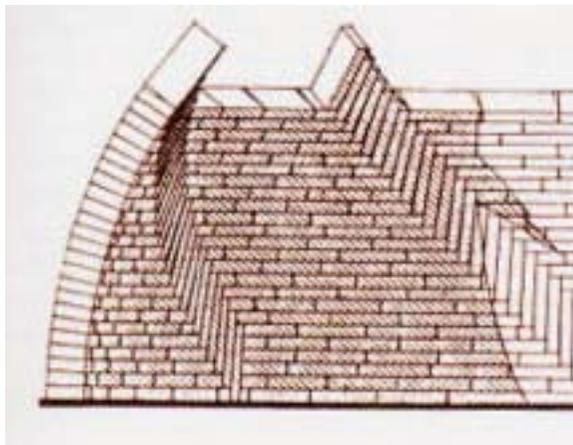
Certamente l'idea di spirali di mattoni verticali per rinforzare le cupole poligonali deve essere molto piaciuta all'epoca, come dimostra anche la cupola di Antonio da Sangallo nella Fortezza da Basso a Firenze, dove le "eliche" sono realizzate con particolare regolarità.



Fotografia dei mattoni “a spina pesce”, che in prossimità degli spigoli sporgono dalle superfici delle vele, a dimostrazione della loro disposizione radiale (Blasi).

Mi piace terminare queste note, suggerite dalla lettura del volume di Corazzi e Conti, notando che queste “eliche” possono ricordare anche un’altra struttura molto cara ai fiorentini, che proprio sulla stabilità di un’elica basa la sua geniale concezione: la struttura portante delle scale dello stadio progettate da Pier Luigi Nervi.

Magia delle forme strutturali e ricorrenze dell’architettura a cinque secoli di distanza!



“Eliche” di mattoni in verticale con funzione strutturale in una cupola in muratura e “eliche” incrociate nelle scale dello stadio fiorentino di Pier Luigi Nervi⁶.

Note

1. Roberto Corazzi e Giuseppe Conti: “Il segreto della Cupola del Brunelleschi a Firenze”. Ed. Pontecorboli, Firenze 2011.
2. idem.
3. C. Blasi C. Blasi e R. Papi: “Il Battistero di San Giovanni a Firenze: geometria e struttura” in “S. Maria del Fiore, Piazza Battistero, Campanile”, a cura di Giuseppe Rocchi C. de Y., Firenze, Ed. Il Torchio, 1996.
4. Giorgi, Luca; Matracchi, Pietro: “Santa Maria del Fiore, facciata, corpo basilicale, cupola” – pp. 277-324, in S. Maria del Fiore : teorie e storie dell’archeologia e del restauro nella città delle fabbriche arnofiane / a cura di Giuseppe Rocchi Coopmans de Yoldi, Firenze: Alinea Editrice, 2006
5. Roberto Corazzi e Giuseppe Conti: “Il segreto della Cupola del Brunelleschi a Firenze”. Ed. Pontecorboli, Firenze 2011.
6. Disegno tratto dalla tesi di Dottorato di Matteo Carobbi.

Il Segreto della Cupola

Roberto CORAZZI - Giuseppe CONTI

Si può tentare di affermare fino da ora, che non vi è mai stato un “segreto” del Brunelleschi; quest’affermazione può essere provata anche dall’esistenza di molte costruzioni, simili alla cupola del Brunelleschi, anche se più piccole, edificate soprattutto nel Cinquecento:

la cupola di San Michele Arcangelo a Petrognano di Barberino Val d’Elsa (Firenze), progettata da Santi di Tito; il cupolino di Peretola (Firenze); la cupola di San Lorenzo a Firenze, progettata dal Nigetti; la cupola del Santuario di Loreto (del Sangallo); la cupola della Madonna dell’Umiltà a Pistoia (del Vasari); la cupola della Madonna del Calcinaio a Cortona (di Francesco di Giorgio); la cupola della sala ottagonale della Fortezza da Basso a Firenze¹ (del Sangallo).

La semplicità del metodo ideato dal Brunelleschi rende ancora più grande il personaggio; è

tipico dei geni trovare un metodo semplice per risolvere un problema difficile.

Per secoli la Cupola fiorentina è stata oggetto di studi e ricerche atte a coglierne le particolarità costruttive e sono state elaborate diverse teorie sulla sua possibile tecnica costruttiva.

Tali studi hanno avuto un incremento soprattutto negli ultimi anni, a partire dagli studi del Sanpaolesi, iniziati nel 1940 circa. Sono state elaborate diverse “teorie” sulla possibile tecnica costruttiva della Cupola, dai tempi della sua costruzione fino ai nostri giorni (L.B. Alberti, I. Ximenes, P.A. Rossi, T. Settle, S. Di Pasquale, L. Bartoli, A. Chiarugi, D. Quilghini ed altri).

Costruendo i modelli matematici di queste teorie si osserva che portano quasi tutte allo stesso risultato e allo stesso andamento delle corde blande, che rappresentano uno degli aspetti più importanti per comprendere la tecnica costruttiva della Cupola.

Gli studi passati hanno appurato in maniera quasi certa che Brunelleschi usò la tecnica della “corda blanda” per evitare che i filari dei mattoni formassero degli angoli in corrispondenza di due vele contigue pericolosi per la statica della struttura.

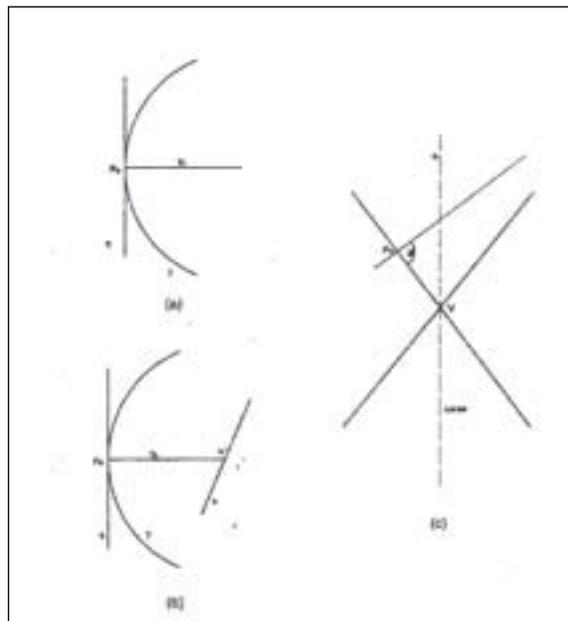
Per quanto riguarda la regola seguita per la formazione delle corde blande, ci sono due correnti di pensiero.

La prima, sostenuta da Di Pasquale e Bartoli, afferma che le curve delle corde blande si

ottengono intersecando un cono variabile con la vela (che è una porzione di cilindro ellittico). La seconda, sostenuta da Ximenes, Quilghini e Rossi suppone che le corde blande siano lossodromiche ortogonali dei meridiani, cioè curve che in ogni punto sono ortogonali ai meridiani delle vele. Questa teoria è più semplice dal punto di vista operativo, perché tale curva viene determinata localmente: è sufficiente costruire la curva che in ogni punto P_0 è perpendicolare alla meridiana dalla vela passante per quel punto. Per determinarla era sufficiente una squadra, forse il gualandrino.

D’altra parte l’altra teoria spiega meglio da un punto di vista globale l’andamento dei mattoni a corda blanda.

In realtà le due teorie sono praticamente coincidenti, a parte un errore massimo di $0,4^\circ$ e quindi quasi trascurabile; infatti, le curve date dall’intersezione del cono variabile con il cilindro ellittico di ogni vela hanno la proprietà che in ogni loro punto P_0 la retta tangente alla curva in questo punto è perpendicolare alla meridiana della Cupola passante per P_0 . Di conseguenza le curve sono delle lossodromiche ortogonali delle linee meridiane.



1. Bisogna notare che in questa cupola le linee dei mattoni sono parallele alle generatrici del cilindro ellittico e di conseguenza sono parallele al piano orizzontale del pavimento. Questa configurazione è possibile per il fatto che esiste una costruzione esterna che sostiene la cupola come nel caso del Battistero di Firenze e del Battistero di Parma.

ancora segreti del passato che nessuno è in grado di svelare e che i protagonisti della storia dell'architettura abbiano avuto una genialità fuori dalla portata della nostra conoscenza e comprensione.



In tutto questo vi è senz'altro una gran parte di verità poiché solo persone illuminate hanno potuto compiere imprese così ardite con mezzi così limitati quali erano quelli disponibili nel XV secolo, (sia per scienza delle costruzioni che per macchinari ed utensili).

La struttura della Cupola si presenta integra, compatta e continua e le possibilità di rilevare le porzioni interne sono molto modeste. Il rispetto per il valore del monumento ci consente di indagare e studiare la struttura con tecnologie non invasive che, per quanto sofisticate, lasciano sempre, per definizione, un certo margine di aleatorietà.

Ad oggi il monumento risulta essere stato studiato e documentato in maniera approfondita limitatamente a tutte quelle porzioni della struttura e dell'architettura che sono direttamente ispezionabili, fruibili e visibili, ma ben poco è stato fatto per indagare le parti interne della cupola che contengono, dietro strati di intonaco e fuorvianti rivestimenti di laterizio, i veri segreti di una sezione resistente che copre uno degli spazi più grandi dell'antichità e che si mantiene

egregiamente, non perturbata dagli agenti atmosferici, ormai da oltre cinque secoli. Per avvalorare quanto appena affermato, basta osservare che ben pochi e vaghi sono i disegni che rappresentano nel dettaglio le murature, mentre moltissimi sono gli scritti, le teorie e le costruzioni geometriche tra coni, cilindri, archi a vari sesti e corde blande.

Con questa ricerca si è pertanto voluto imprimere una svolta decisiva e, con l'apporto delle più recenti tecnologie nei settori del rilievo e della diagnostica, si è avviata una campagna di indagini.

Fino a qualche tempo fa queste indagini risultavano essere parziali ed, in alcuni casi contraddittorie, ma comunque era possibile percepirne le potenzialità ed ultimamente, con la realizzazione di un modello sperimentale è stato possibile risolvere l'enigma di come fu costruita la parte portante della Cupola.

Con le tecniche attuali ci è stato possibile costruire il modello geometrico delle varie teorie elaborate e riprodurle al computer; questo ha permesso di ottenere per ciascuna teoria un modello della Cupola, come se questa fosse effettivamente realizzata.

I risultati ottenuti sono estremamente interessanti: tutte le teorie elaborate dagli studiosi nel corso dei secoli forniscono quasi lo stesso identico modello geometrico (a parte pochissime eccezioni). Il risultato è di estrema importanza poiché dimostra che tutti gli studiosi, pur con parole diverse, hanno dato, in maniera indipendente ed inconsapevole, la stessa risposta allo stesso problema. Abbiamo iniziato un rilievo sistematico della struttura, con particolare attenzione alla tessitura muraria della Cupola.

Un'indagine preliminare sulla muratura è stata effettuata con la collaborazione del Dipartimento di Restauro della Facoltà di Architettura di Firenze; successivamente tali indagini sono state soprattutto incrementate con la collaborazione della Società General Engineering - Galileo Siscam Technology di Firenze, della GEOARTE S.T.A. di Kosak & C. s.a.s. di Castelfranco di Sopra (AR) e della IGeA s.a.s. di Borgo S.Lorenzo e Vicchio (FI).

Le indagini hanno permesso:

- La conoscenza "dell'oggetto" con puntualizzazione delle aree da esplorare.
- La conoscenza delle varie teorie ipotizzate fino ad oggi.

- La messa a punto del metodo per acquisire i dati e in base alle ipotesi sulla tipologia della struttura muraria della Cupola è stato possibile stabilire il verso di percorrenza delle antenne sulla superficie della vela, la strategia pratica per far percorrere alle antenne la maggior distanza possibile, l'interlinea tra le sezioni e le frequenze utilizzabili per sovrapporre i diversi strati di definizione del segnale radar.

- L'acquisizione dei dati con l'utilizzo di due antenne impiegate sempre sulle medesime linee e acquisizioni fotografiche che risultano essere fondamentali per la successiva elaborazione dei dati.

- L'elaborazione dei dati che consiste sullo studio delle caratteristiche elettriche dei materiali costituenti le sezioni e precisamente velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche e permittività elettrica relativa (costante dielettrica) e profondità raggiunte.

- L'interpretazione dei dati e realizzazione dei radar grammi, quali grafici interpretativi.

- Il confronto tra i risultati così ottenuti e le conoscenze attuali sulla Cupola.

- La realizzazione di un modello sperimentale di una porzione di vela, con le stesse caratteristiche di quello reale e costituito con gli stessi materiali, disposti secondo quanto emerso dalle indagini effettuate. Il confronto tra i risultati ottenuti dalle indagini svolte sul modello e sulla Cupola hanno permesso di fare precise affermazioni sulla tipologia della struttura.

Tutte le ricerche effettuate sono state possibili grazie alla collaborazione dell'Opera del Duomo ed in particolare del Presidente Anna Mitrano, di Margaret Haines e Paolo Bianchini, che hanno fornito tutti i supporti necessari per queste indagini.

Anche la Soprintendenza per i Beni Architettonici e Demoetnoantropologico per le province di Firenze, Pistoia e Prato, soprattutto nelle persone del Soprintendente Paola Grifoni, di Vaccaro e di Vestri, hanno fornito tutta la documentazione e tutto il materiale relativo alla Cupola in loro possesso.

Di seguito vengono espone le principali indagini eseguite sulla Cupola del Brunelleschi.

Verifica sezioni Cupola

I disegni che nel tempo sono stati realizzati quali rilievi o che sono stati realizzati per dimostrare le varie geometrie della Cupola non

hanno le caratteristiche a cui dovrebbero rispondere.

Infatti nella maggior parte dei casi le sezioni che sono state realizzate sulla mezzeria delle vele della Cupola sono indicate da archi di circonferenza, mentre sono rappresentate da archi di ellissi.

Le sezioni quali archi di circonferenza si trovano in corrispondenza dei costoloni, come è dimostrato dalle nostre ricerche.

Nella maggior parte dei casi attraverso i disegni si evince che le sezioni sono state eseguite sulla mezzeria delle vele; infatti esse sono state eseguite in corrispondenza della mezzeria delle vele, in quanto l'occhio insistente sul piano parallelo al piano della sezione è un cerchio; solamente nel disegno del rilievo della FO.A.R.T. di Parma la sezione è stata eseguita anche sui costoloni (in questa sezione nessun occhio risulta essere in vera grandezza).

Nei primi casi la sezione deve essere rappresentata da un'ellisse, mentre nell'ultimo da un arco di circonferenza.

Tutti i disegni-sezione eseguiti sulla mezzeria delle vele sono rappresentati, invece, con archi di circonferenza; solamente nel caso del disegno della FO.A.R.T. la sezione è rappresentata da questo tipo di curva.

Dalla verifica analitica si evince che la differenza tra l'ellisse e la circonferenza risulta avere un valore massimo di 30 cm.

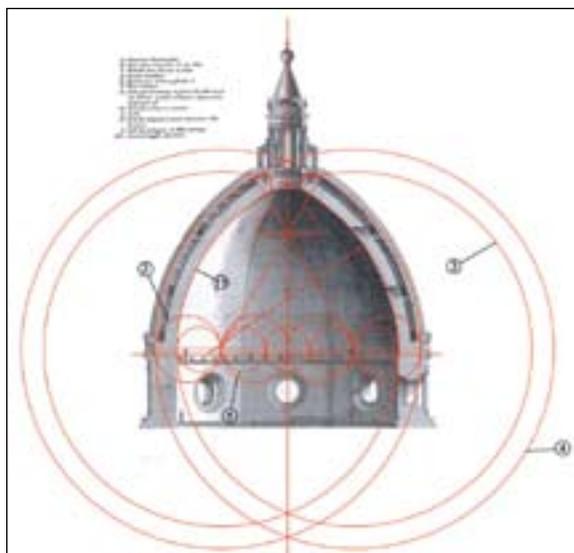
Sul funzionamento statico e sugli accorgimenti costruttivi della Cupola di Santa Maria del Fiore esistono numerose teorie e ipotesi, ma pochi dati sperimentali e indagini strumentali. La sua struttura, infatti, si presenta integra, compatta, e le possibilità di rilevare le porzioni interne sono molto modeste. Fino ad oggi, infatti, il monumento è stato studiato approfonditamente solo nelle parti di struttura che sono direttamente visibili, mentre rimane sempre un certo margine di aleatorietà per le zone interne, che possono essere studiate soltanto con tecniche non invasive, nel rispetto del suo valore artistico.

Nell'ultimo decennio, con l'apporto delle più recenti tecnologie nei settori del rilievo e della diagnostica, sono stati effettuati vari tipi di rilievi degni d'attenzione per i dati che ne sono emersi.

Di seguito sono elencate le campagne avviate e coordinate con queste ricerche, con una breve descrizione dei risultati ottenuti. Con la collaborazione dell'Arch. M. Giannini del Dipartimento di Progettazione dell'Architettura di Firenze è sta-

to avviato un rilievo di parti della struttura che si trovano in aree di scarsissima accessibilità e mai documentate accuratamente con un rilievo fotogrammetrico; in particolare, è stato iniziato un rilievo degli archi orizzontali, visibili nell'intercapedine fra le due calotte della Cupola.

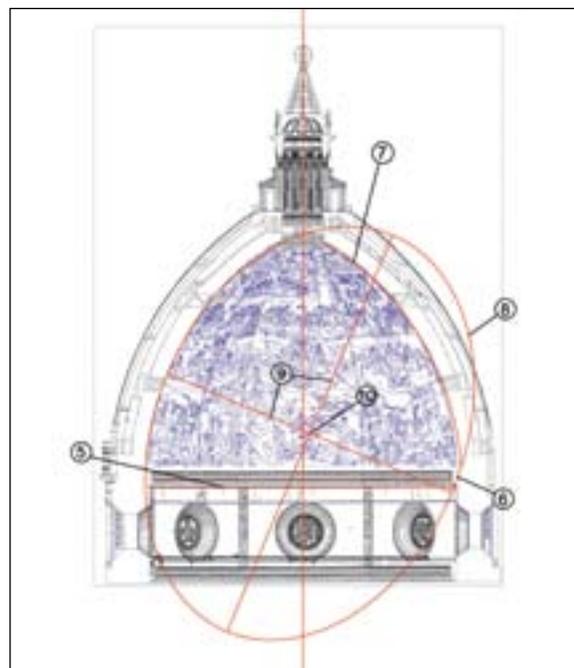
Avvalendosi dei metodi della fotogrammetria, è



G. B. Nelli – Rilievo della della Cattedrale nell'edizione a stampa con incisione di B. Sgrilli del 1733. Sezione trasversale (la sezione è eseguita in corrispondenza della mezzeria delle vele ed è rappresentata da una circonferenza; essa deve essere rappresentata invece da un'ellisse).

stato utilizzato il teodolite, con l'ausilio di «mire» catarifrangenti poste a distanze regolari lungo le linee perimetrali dell'oggetto da rilevare.

Scopo di questa indagine è stato quello della vera rappresentazione geometrica degli archi orizzontali.



Rilievo FO.A.R.T (la sezione è eseguita in corrispondenza della mezzeria delle vele ed è rappresentata da un'ellisse). La sezione è coincidente con l'ellisse teorica.

- 2 Sesto di quarto acuto
- 3 Circonferenza coincidente con l'intradosso della sezione della cupola
- 4 Circonferenza coincidente con l'intradosso della sezione della cupola
- 5 Piano di calpestio del ballatoio superiore
- 6 Sommità della balaustra
- 7 Arco interno della mezzeria della vela
- 8 Ellisse teorica
- 9 Assi delle ellissi teoriche (Asse maggiore = 56.67 m.; asse minore 40.63 m)
- 10 Centro dell'ellisse
- 11 Profilo interno della mezzeria della vela

Rilievo con il laser scanner

Nel febbraio 2004 è stato eseguito un primo rilievo con il scanner laser dalla società fiorentina General Engineering – Galileo Siscam Technology – in collaborazione con la Codevintec di Milano. Per il rilievo è stato utilizzato uno strumento del tipo «a tempo di volo», ritenuto il più adeguato sia per la portata che per la velocità di acquisizione.

Questo strumento ha permesso di definire le volumetrie della Cupola nella loro globalità e di documentare tutte le superfici in maniera continua con una nuvola di punti, che copre il

manufatto in maniera omogenea.

Lo strumento utilizzato per il rilievo aveva le seguenti caratteristiche:

- accuratezza: 3 mm;
- dimensione dello spot: 29 mm a 100 m;
- velocità di acquisizione: 2000 punti/sec.

Sono state rilevate tre vele nella parte nord-ovest dal timpano della cattedrale) dell'estradosso esterno, e una porzione di due vele (parte nord-ovest dal primo ballatoio).

Un ulteriore rilievo con scanner laser è stato eseguito nel 2006 dalla ditta GEOARTE S.T.A. (Sistemi Tecnologici Avanzati) s.r.l. di Castel-franco di Sopra (Arezzo).

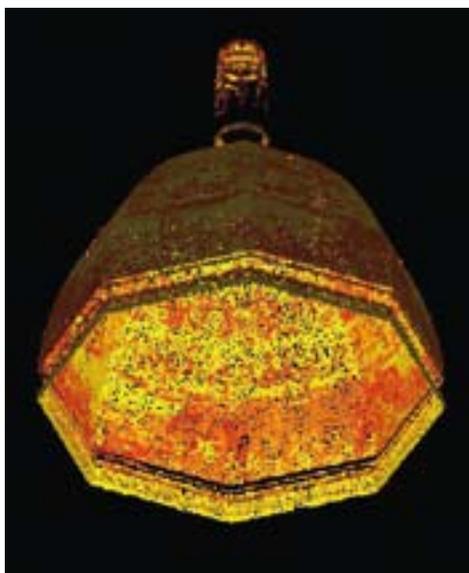
E' stato utilizzato uno strumento LEICA HDS 3000 «a tempo di volo» con le seguenti caratteristiche:

- accuratezza: 6 mm a 50 m;
 - dimensione dello spot: 6 mm a 50 m;
 - velocità di acquisizione: 1800 punti/sec;
- camera con risoluzione di 1 Megapixel (1024x1024).



In questo caso è stato rilevato tutto l'intradosso della Cupola interna.

Questa nuvola di punti è stata oggetto del presente studio per la ricerca della geometria del profilo della Cupola, che è poi stata confrontata con quello ottenuto dalla ditta FO.A.R.T. con il rilievo fotogrammetrico.



Visualizzazione della nuvola dei punti secondo i colori dello strumento

Rilievo fotogrammetrico

Questo rilievo è stato eseguito dalla ditta FO.A.R.T. s.r.l. di Parma per conto della Soprintendenza di Firenze e pubblicato in un'edizione a cura di Riccardo Dalla Negra².

La presenza del cantiere di restauro della Cupola, che ha avuto il suo apice esecutivo tra il 1988 e il 1995, ha consentito l'esecuzione di una serie di indagini altrimenti impossibili da eseguire.

La campagna di riprese fotogrammetriche intradosali è stata iniziata contemporaneamente alle fasi di smontaggio dei ponteggi, tranne in alcune zone dove lo stacco delle pitture murali deteriorate ha subito messo in luce la tessitura muraria dell'opera brunelleschiana.

Per le riprese della superficie estradosale è stato impiegato un elevatore con piattaforma aerea a cella, dotato di braccio estensibile fino a 75 m, con un'altezza massima raggiunta durante le operazioni di rilievo pari a 65-70 m.

Si è proceduto anche al rilievo dell'intercapedine esistente tra la cupola e la controcupola; a causa degli spazi ristretti però il rilievo è stato

realizzato con metodo topografico, effettuando misure con il teodolite o in modo diretto.

Il rilievo è stato finalizzato all'ottenimento di due sezioni con vista dell'intercapedine e quattro piante, con scala di rappresentazione 1:50 e approfondimenti nei rapporti 1:20 e 1:10; è stata inoltre fatta un'elaborazione sugli spigoli congiungenti i vari lati della cupola, interpolando i vertici degli spigoli per ottenere i valori della miglior curva interpolante, il raggio di curvatura e la posizione del centro. Si sono poi realizzati dei grafici che evidenziano gli scarti della struttura muraria rispetto alla circonferenza teorica calcolata.

Sono state rilevate quattro aree a quote diverse:

- 1) la mezzeria della vela Nord in prossimità della lanterna ad un'altezza di circa 30 metri dal terzo ballatoio;
- 2) lo spigolo tra la vela Nord e la vela Nord-Est ad un'altezza di 27 m dal terzo ballatoio;
- 3) lo spigolo tra la vela Nord e la vela Nord-Ovest ad un'altezza di 25 m dal terzo ballatoio;
- 4) lo spigolo tra la vela Est e la vela Nord-Est ad

² Riccardo Dalla Negra, a cura di, *La Cupola di Santa Maria del Fiore. Il rilievo fotogrammetrico*, Sillabe, Livorno, luglio 2004.

un'altezza di 15 m dal terzo ballatoio.

Dal rilievo è emersa una forte differenza tra la muratura intradosale rinvenuta sotto gli intonaci pittorici cinquecenteschi e quella che Brunelleschi lascia in vista in determinati punti percorribili nell'intercapedine. Infatti, mentre nell'intercapedine si ha una muratura perfettamente serrata con giunti di ridottissime dimensioni e una spinapesce che forma un incastro perfetto, nell'intradosso si ha un apparecchio murario molto irregolare dove i letti con andamento a corda blanda sono realizzati con un sapiente impiego di mattoni di varie dimensioni alternati a giunti di malta che a volte raggiungono lo spessore degli stessi mattoni.

La stessa differenza di apparecchiatura muraria si ha tra l'intradosso alla base della lanterna, in cui si nota un continuo adattamento della spinapesce, e il serraglio, in cui si ha un apparecchio di rara perfezione esecutiva assimilabile a un pavimento a spinapesce.

Un'altra differenza riscontrata tra intradosso e intercapedine è negli spigoli, che sono risolti anche con l'utilizzo di mattoni speciali nell'intercapedine, mentre all'interno si osservano situazioni molto differenziate ma più semplici: soluzioni di continuità dei ricorsi dei mattoni; impiego esteso di sottomisure e frammenti di mattoni; utilizzo di mattoni a cavallo tra le due vele, successivamente rettificati con martellinature. I soli elementi di continuità sono rappresentati dai mattoni della spinapesce.

Altra differenza si nota nella disposizione della spinapesce: nell'intradosso è costituita da mattoni abbastanza regolari tutti disposti radialmente, con le teste che negli spigoli risultano ortogonali alle bisettrici degli angoli compresi tra le due vele contigue, per poi portarsi progressivamente in una posizione ortogonale all'asse passante per la mezzeria delle vele. Tutto ciò non è avvertibile nell'intercapedine dove le teste dei mattoni della spinapesce risultano complanari ai mattoni disposti di piatto, dunque sono volutamente rettificati.

I rilievi effettuati hanno consentito inoltre di fare qualche considerazione sul numero e l'andamento delle spinapesce. Nell'area situata tra le vele Est e Nord-Est, ad un'altezza di circa 15,15 m rispetto al piano d'imposta, le spinapesce distano tra loro, sul piano orizzontale, circa 125 cm e sono in numero di 12. Nell'area posta all'altezza di 25 m dall'imposta tra la vela Nord e la vela Nord-Ovest, c'è una traslazione delle spinapesce che da luogo ad un passo differenziato tra i ricorsi verticali dei mattoni. Nell'area posta nella

vela Nord a ridosso della lanterna, ad un'altezza di 29 m dall'imposta, l'interasse tra una spinapesce e l'altra è di circa 75 cm.

“Si può affermare che lo spinapesce abbia subito continui adattamenti man mano che la costruzione progrediva; tali adattamenti, in grado di riassorbire la forte irregolarità dell'ottagono basamentale, dimostrano la grande flessibilità del metodo costruttivo prescelto da Brunelleschi, descritto da molti studiosi, invece, come rigidamente determinato.

Altra osservazione riguarda l'ortogonalità dei mattoni dello spinapesce rispetto ai filari di mattoni disposti a corda blanda. Nell'intercapedine notiamo, infatti, che essi sono sempre disposti verticalmente e non, come in realtà sono, normali al letto di giacitura a corda blanda.”

Un altro dato interessante che è emerso da questo rilievo riguarda la profondità delle buche puntaie che non sono passanti, come da sempre erano state rappresentate, ma si arrestano ad una profondità variabile tra i 232 e i 234 cm, oltre a essere molto irregolari sia nella configurazione prismatica, sia nella loro ortogonalità rispetto ai relativi lati dell'ottagono. Uniche eccezioni riguardano la sesta buca (in senso orario) del settore Sud-Ovest che è profonda 146 cm; la sesta buca del settore Nord-Ovest che misura 110 cm di profondità; la terza buca del lato Sud con 310 cm; la terza buca del lato Est con 304 cm e la quarta buca dello stesso lato con 310 cm.

Rilievo con il metodo georadar

Nel maggio 2002 è stata eseguita una prima indagine geofisica non invasiva con strumentazione georadar sull'estradosso della vela interna, posta a sud-est.

Lo scopo era quello di individuare e mappare l'eventuale presenza di cavità o di elementi di consolidamento presenti nello spessore della muratura.

Sono state utilizzate antenne da 600 e 1500 MHz, con verso di percorrenza sulla superficie della vela perpendicolare rispetto al piano di riferimento dei ballatoi, dal basso verso l'alto e con passo di 50 cm.

Le immagini ottenute con il georadar rappresentano le sezioni verticali relative ognuna ad un profilo lineare coperto dall'antenna mobile sulla superficie investigata.

Per ogni settore sono state messe a confronto le sezioni ottenute con le diverse frequenze e sono state studiate le caratteristiche elettriche dei materiali costituenti la parti indagate, la ve-

locità di propagazione delle onde elettromagnetiche, la permittività elettrica relativa (costante dielettrica) e le profondità raggiunte.

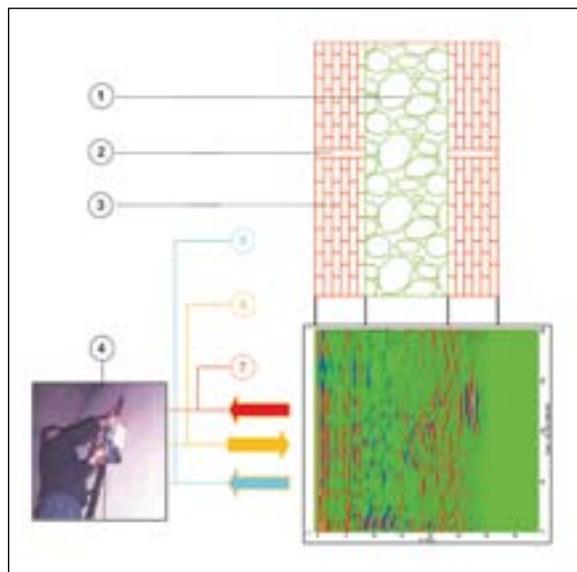
Dall'elaborazione dei dati è emerso che la sezione della Cupola è formata fondamentalmente da due «paramenti o fronti», all'interno dei quali si trova un «riempimento».

Il materiale del fronte estradossale è sicuramente costituito da una tessitura in mattoni, caratterizzata dai filari della corda blanda e dalla spinapesce per uno spessore che non supera i 70 cm; per la cortina opposta, ben delineata per le riflessioni lineari del segnale registrate sempre a circa 1,75 m dalla superficie, si ipotizzano le stesse caratteristiche di tessitura e le stesse dimensioni. Per la parte intermedia, definita «riempimento», è possibile ipotizzare un vero e proprio sacco con materiale incoerente, oppure una diversa apparecchiatura degli elementi in cotto.

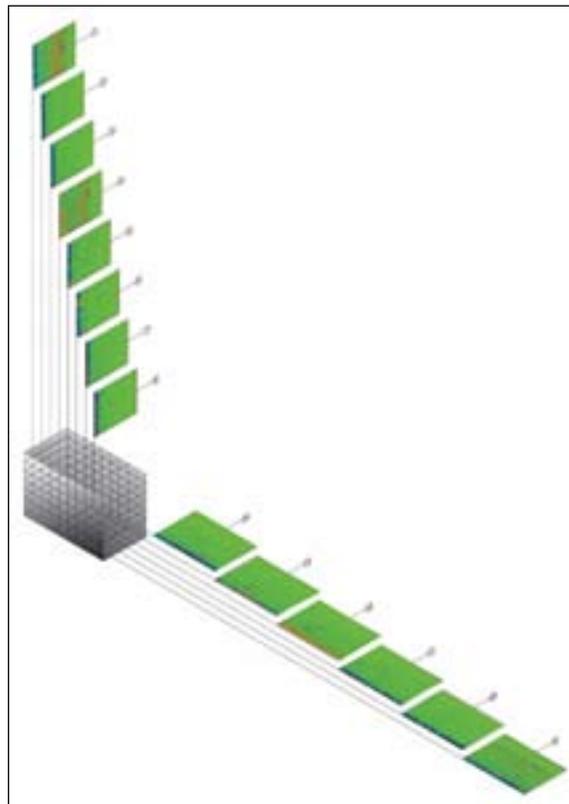
A partire dal vano in alto si sono evidenziate tracce di possibili elementi di collegamento tra le parti. Si tratta di riflessioni abbastanza lineari, che partono dall'intradosso della calotta, sono inclinate sempre nello stesso modo e sembrano «annegate all'interno» del livello di «riempimento».

Nel febbraio 2004 è stata eseguita una seconda indagine non invasiva con metodo georadar, nell'ambito del progetto Optocantieri (PRAI – Regione Toscana), dalla società fiorentina General Engineering – Galileo Siscam Technology.

Questa indagine voleva essere solo un primo tentativo per eseguire una calibrazione della strumentazione ed individuare la configurazione migliore per penetrare con impulsi elettromagnetici tutto lo spessore della muratura.



Radargramma relativo di un'indagine georadar con indicazione grafica della struttura muraria



Visualizzazione assonometrica dei vari radar grammi e della loro posizione ottenuta in ciascuna indagine

Rilievo con il metodo tomografico

Sulla Cupola, per eseguire l'indagine tomografica, è stata utilizzata la geometria Wenner/polo-dipolo utilizzata, che prevede la posizione di un "polo remoto", cioè posizionato a distanza teoricamente infinita. Nel nostro caso, considerate le dimensioni della maglia utilizzata relativamente piccole, abbiamo disposto il polo remoto in cima alla cupola, a circa 40 m di distanza. Per la geometria Wenner, invece, non ci sono stati particolari problemi di realizzazione.

I dati di resistività apparente sono stati elaborati con un apposito programma in grado di ricostruire per inversione numerica, un modello di resistività reale dei terreni sottostanti. Tale modello è stato realizzato tenendo conto del volume "vuoto" sottostante il grigliato e rappresentato dal corridoio che attraversa la vela.

I risultati hanno evidenziato la presenza di materiali con valori di resistività assai diversi fra loro, in particolare è stato riconosciuto un primo livello superficiale (lato estradosso) dello spessore di circa 0,50-0,60 m con valori di resistività compresi tra $4.5 \times 10^4 \Omega m$ e $5.5 \times 10^4 \Omega m$. E' presente in discontinuità stratigrafica piano parallela un secondo livello di materiali più omogenei e conduttivi, dello spessore di circa 0,80 m con valori di resistività compresi tra $1.5 \times 10^4 \Omega m$ e $2.5 \times 10^4 \Omega m$. E' intuibile la presenza di un terzo strato,

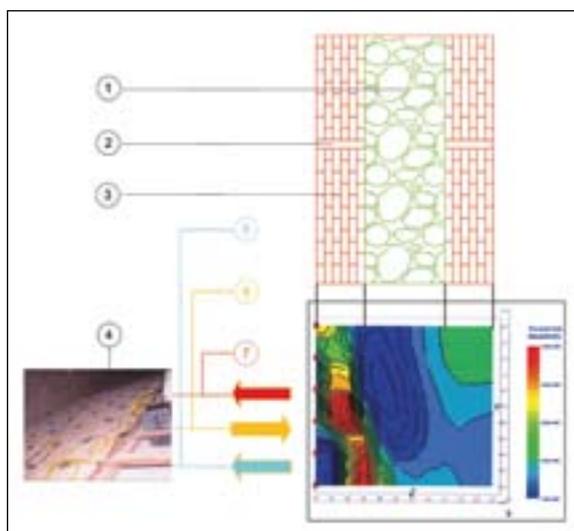
fino all'incontro con l'intradosso, di materiali con resistività maggiore, probabilmente paragonabili alla zona estradosale. A causa della limitata estensione della maglia rettangolare utilizzata, la profondità di esplorazione è stata chiaramente limitata, per cui le misure relative alla zona intradosale sono necessariamente minori e con minore dettaglio.

La zona centrale della Cupola (quella con i valori più bassi di resistività) ha valori di resistività comparabili con la zona in cui è presente un architrave di arenaria, in corrispondenza della parte bassa-centrale del grigliato tomografico. Quanto sopra potrebbe far pensare ad una analogia tra litotipi simili, almeno dal punto di vista mineralogico.

I risultati conclusivi e congiunti delle varie metodologie utilizzate sulla vela indagata, non con-

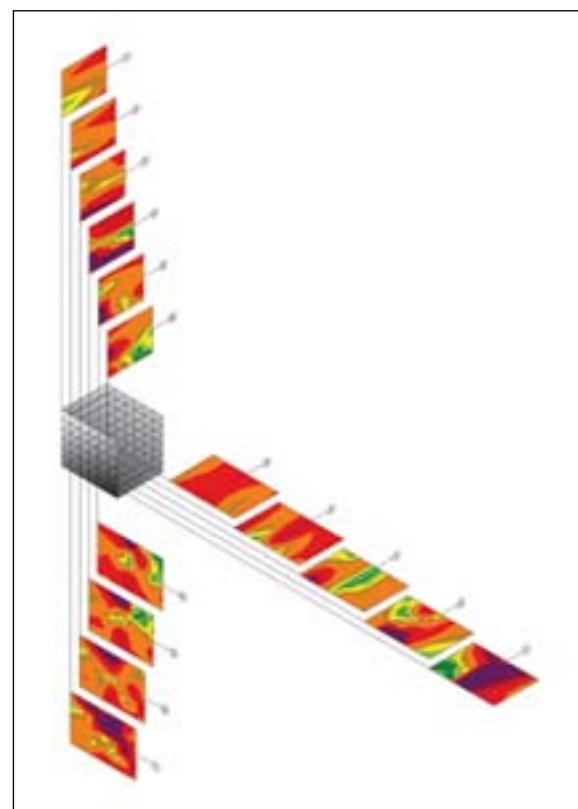
sentono di ipotizzare la presenza di materiale ferroso utilizzato come armatura strutturale della Cupola del Domo. Il materiale ferroso presente è assimilabile a fasce di collegamento tra elementi lapidei o murari disgiunti, ma di dimensioni non superiori a qualche decina di cm. Diversamente nei camminamenti le fasce metalliche e/o ferrose hanno dimensioni e lunghezze maggiori, spesso superiori ad uno-due metri di lunghezza, ma soprattutto hanno una geometria ricorrente nei vari vani indagati.

La struttura della Cupola può essere assimilata ad una struttura costituita da tre strati di spessore abbastanza costante (almeno nella vela indagata), ma costituito da litotipi diversi, sia dal punto di vista della riflettività elettromagnetica, sia dal punto di vista della resistività elettrica.



Radargramma relativo di un'indagine tomografica con indicazione grafica della struttura muraria

- 1 Riempimento
- 2 Mattoni spina pesce
- 3 Mattoni posti per piano
- 4 Complesso antenna. Trasmettitore-Antenna
- 5 Impulso elettromagnetico di risposta di un materiale con riflettività alta (laterizio).
- 6 Impulso elettromagnetico inviato dal radar al materiale.
- 7 Impulso elettromagnetico di risposta di un materiale con riflettività bassa (materiale misto che determina presenza di area interstiziale).



Visualizzazione assonometrica dei vari radar grammi e della loro posizione ottenuta in ciascuna indagine

Rilievo con il metodo endoscopico

Per poter indagare e cercare di svelare i segreti della cupola e poter confermare e confrontare i risultati ottenuti con le altre indagini, è stata approntata la ricerca dei tipi di materiali di cui è costituita la Cupola, utilizzando il sistema endoscopico che viene utilizzato nel campo medicale. Questo tipo di indagine risulta essere non invasiva in quanto la ricerca è stata eseguita utilizzando le fessurazioni e le spaccature esistenti sulle vele.

Comunque sono state utilizzate cavità artificiali, che come vedremo più avanti, sono state localizzate su quattro delle otto vele.

E' stato possibile l'utilizzo di questa apparecchiatura per la presenza di fenditure e spaccature, all'interno delle quali è stata introdotta una sonda rigida o flessibile dell'endoscopio. Attraverso il sistema ottico è stato osservato, fotografato e filmato alle varie profondità quale risulta essere l'assetto murario della Cupola. Sono state approntate più riprese di cui si riportano i risultati e le varie relazioni.

Qui di seguito presentiamo alcune immagini dell'indagine endoscopica condotta sulla stessa vela sulla quale sono stati eseguiti anche gli altri studi. Si deve far notare che durante l'indagine accurata della superficie di questa vela, indicata in figura, è stato scoperto un carotaggio (Ø cm. 8 e profondo mt. 2.00) a suo tempo effettuato da qualche ricercatore³, che da indicazioni importanti sulla tipologia e sulle caratteristiche della struttura muraria. Da una approfondita ricerca è emerso che furono eseguiti ben quattro carotaggi su quattro vele e di cui riportiamo le immagini e le relative relazioni. Oltretutto in uno di questi

carotaggi è stato rinvenuta la camicia, all'interno della quale, come dimostrano le immagini, vi era depositato quota parte di materiale carotato. Le carote non sono più esistenti in quanto furono utilizzate per prove di laboratorio, ma le loro immagini, fornite dalla relazione pubblicata sugli atti del Dipartimento di Scienza di Costruzioni e dalla prof.ssa Berta Leggeri, hanno dato l'opportunità di avere, insieme alle foto della superficie interna di ciascun carotaggio, la conferma di quanto è stato ottenuto con le indagini di georadar e tomografia.



Indagine endoscopica eseguita da Di Pasquale. Le carote presentano presenza di pietra, malta, laterizio.



Comparazione tra tre diverse indagini con metodo radar: 2002, 2004, 2007

Tre diverse indagini sono state eseguite con georadar sull'estradosso della Cupola interna: su una porzione della vela sud-est, e su una porzione della vela est.

In tutti i casi lo scopo è sempre stato quello di individuare l'eventuale presenza di cavità o di elementi di consolidamento presenti nello spessore della muratura, per cercare di capire più possibile della tecnica costruttiva brunelleschiana sulla quale sono state azzardate ipotesi da

numerosi studiosi, a partire già dagli anni della sua realizzazione.

Un primo dato emerso da tutte le indagini è che non sono state individuate anomalie isolate, tranne quelle dovute a strutture visibili come stipiti di pietra e staffe metalliche in superficie (dati emersi dai primi due rilevamenti) o quelle riconducibili ai vuoti delle buche puntaie (dato emerso nel terzo rilevamento). Quest'ultima anomalia è visibile sulla sezione effettuata lungo la linea 7 del grigliato di riferimento, nel punto in cui è stato individuato un segno inciso sull'intonaco a forma di asterisco. Un asterisco, e la

3. Si veda in proposito S. Di Pasquale, *Brunelleschi La costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore*. Pag. 125 – Tuttavia deve essere anche detto che da apposite prove fatte su campioni di tessuti murati con questa tecnica è emerso che il loro collasso ha sempre avuto inizio lungo i giunti di malta posti tra i mattoni verticali, così come si è visto sulla Cupola in talune sue parti in occasione del restauro degli affreschi; e nota 52 pag. 220 – Infine, poiché nelle prime fasi delle indagini sperimentali, concordate con i professori De Angelis d'Ossat e Cestelli Guidi, avevamo estratto alcuni campioni di materiali dalla Cupola, si poterono effettuare prove di laboratorio (L. Barbi, B. Leggeri, V. Vasarri, R. Franchi, F. Fratini, C. Manganelli del Fa, *Indagine Sperimentale sui Materiali costituenti la Cupola di Santa Maria del Fiore*, "Atti del dip. to di Costruzioni", n. 1, 1986).

corrispondente anomalia, è stato riscontrato anche nel punto 36 lungo la linea 2 del grigliato; tali segni sono inoltre visibili sul manto di copertura della Cupola esterna, incisi sui tegoloni nei punti corrispondenti ai vuoti delle buche pontae (informazione confermata dagli addetti ai lavori di manutenzione della Cupola).

Per quanto riguarda le anomalie continue, ne sono state rilevate tre nei rilievi del 2002 e 2007, mentre in quello del 2004 ne è stata individuata soltanto una.

In quest'ultimo rilievo infatti è emersa un'anomalia continua a circa 65 cm dall'estradosso della vela, indicativa di un primo strato in laterizio perché caratterizzata da numerose piccole micro-riflessioni, tipiche del passaggio continuo da un materiale all'altro, cioè dal laterizio alla malta. Dai 65 cm ai 200 cm, invece, è stato individuato un secondo strato in cui non compaiono le micro-riflessioni del precedente e che quindi si presenta più compatto e omogeneo, privo di interstizi. Con i risultati di questa indagine non è stato possibile stabilire se la struttura sia organizzata in maniera simmetrica rispetto all'asse, oppure se nella fascia tra i 130 e i 200 cm possa ritornare lo stesso segnale della prima stratificazione, in quanto, sebbene questo non sia risultato dai profili eseguiti, è possibile che ciò sia stato dovuto ad una perdita di potenza del segnale.

Dall'indagine del 2002, invece, era emersa chiaramente una composizione a tre strati, confermata poi dalle prospezioni del 2007: un primo spessore che non supera i 70 cm sicuramente costituito da una tessitura in mattoni, caratterizzata dai filari della corda blanda e dalla spina pesce; una cortina opposta, ben delineata per le riflessioni lineari del segnale a 175 cm, oltre i quali si perdeva il segnale e per la quale si sono potute solo ipotizzare la stessa tessitura e le stesse dimensioni (ipotesi però avvalorata dai rilievi eseguiti durante i lavori di restauro degli affreschi del Vasari); una parte intermedia, ipotizzata come un vero e proprio sacco con materiale incoerente, nella quale sono risultate ben visibili tracce di possibili elementi di collegamento tra le parti, rese note da riflessioni inclinate sempre nello stesso modo e che sembravano "annegate" all'interno del riempimento.

Anche dall'elaborazione dei dati delle indagini del 2007 è emerso che la sezione vela è composta fondamentalmente da due paramenti separati da un riempimento (da qui la deduzione della muratura a sacco).

In particolare con quest'ultima indagine sono state individuate tre anomalie:

- una a circa 50 centimetri dalla superficie di estradosso della Cupola e a questa parallela. Si può definire così un primo spessore composto da un materiale che produce piccole riflessioni e disturbi diffusi (e quindi si riconferma il primo paramento in laterizio delle due indagini precedenti);

- una a circa 1,30 m dalla superficie di estradosso della Cupola, anch'essa parallela, ma che risulta però più debole della precedente (evidentemente è dovuta solo ad una minore energia del segnale). Il materiale presente in questa porzione di muratura è più omogeneo del precedente, non presentando ulteriori microriflessioni e/o disturbi (e quindi si riconferma l'ipotesi del riempimento emersa con le indagini del 2002);

- una a circa 2,20 m dalla superficie di estradosso della Cupola, indicativa della fine della muratura e quindi dell'intradosso della vela. Il materiale presente in questo terzo strato di muratura sembra avere le caratteristiche di quello incontrato sulla fascia estradosale, nonostante l'energia del segnale (ormai abbastanza ridotta a causa della profondità), non permetta una altrettanto puntuale interpretazione (ulteriore punto di convergenza con l'ispezione del 2002). Questa ipotesi, però, come detto sopra, è avvalorata dai rilievi eseguiti durante il restauro degli affreschi sull'intradosso; ovviamente, per confermare i dati, sarebbe importante poter eseguire una analoga scansione radar anche sull'intradosso della Cupola, in modo da verificare la simmetria geometrica e il parametro di assorbimento/riflessione elettromagnetica.

Sono state inoltre individuate riflessioni continue inclinate di circa 35-45 gradi rispetto alla superficie dell'estradosso della cupola. Tali riflessioni non sempre evidentissime, risultano in talune sezioni sovrapposte, mentre in altre sono quasi invisibili. La geometria risulta inoltre visibile nelle sezioni parallele e longitudinali. Questo tipo di riflessioni diagonali era stato rilevato anche nel 2002 sulla vela sud-est.

Le suddette riflessioni inclinate sono riscontrabili su gran parte delle sezioni verticali e orizzontali fatte passare lungo le otto linee del grigliato di riferimento (quindi con un passo di 40 cm); per questo si possono ipotizzare due possibilità:

- la presenza di strutture o elementi di collegamento tra le parti, posti all'interno dello strato intermedio dello spessore della vela con distanze tra loro corrispondenti a quelle del grigliato di riferimento e per questo visibili in tutte le sezioni verticali

- la presenza di piani inclinati che si sviluppano per tutta la lunghezza della vela e che quindi vengono tagliati e resi visibili in tutte le sezioni.

Queste riflessioni inclinate hanno una corrispondenza geometrica visibile nei carotaggi effettuati da S. Di Pasquale nel 1986, che confermano quindi i risultati ottenuti con il georadar. Dall'osservazione della carota, infatti, sono visivamente identificabili due strati marginali (corrispondenti all'estradosso e all'intradosso della calotta) con caratteristiche compositive simili e uno strato intermedio con caratteristiche diverse (sono visibili per esempio dei frammenti di laterizio). Nella zona centrale, inoltre, è subito evidente una geometria inclinata che potrebbe corrispondere alle riflessioni inclinate visibili nelle sezioni georadar.

Per proseguire nell'acquisizione di informazioni sulla struttura della Cupola, è stato utilizzato, in data 14 maggio 2007 e 12 marzo 2008, un ulteriore strumento di indagine, che sfrutta i progressi dell'elettronica sia per l'acquisizione automatica sul campo che per l'interpretazione dei dati in termini bi- e tri-dimensionali.

E' stata effettuata, cioè, una tomografia elettrica, con la quale si sono ottenute ulteriori informazioni da comparare con quelle delle indagini georadar e con un'altra indagine successiva (effettuata in data 2 luglio 2007) fatta con il metal detector, sia sulla porzione di vela oggetto delle precedenti indagini, che sul secondo e sul terzo camminamento.

Indagini con il metal detector

Nell'ambito delle prospezioni tomografiche e georadar, sono state effettuate anche delle indagini con il metal detector, sia sulla porzione di vela oggetto di studio (8 maggio 2007), che sul secondo e sul terzo camminamento (2 luglio 2007).

Sulla porzione di vela sono state riconosciute due aree relativamente piccole (circa 15 x 15 cm) in cui il detector ha rilevato la presenza di materiale ferroso; queste aree si trovano: una tra i punti 33 e 34 del grigliato di riferimento tracciato sulla parete della vela, lungo la linea 2; l'altra tra i punti 22 e 23 del grigliato, lungo la linea 7. Le sezioni tomografiche e georadar effettuate in tali punti, però, non evidenziano particolari anomalie (tranne quella continua indicativa del primo strato): infatti, non si riscontrano disomogeneità geometriche dei riflettori, né riflettori inclinati che potrebbero far pensare alla presenza di elementi ferrosi di collegamento tra le parti. Per questo, si ipotizza che il detector abbia rilevato sempli-

cemente chiodi o frammenti metallici, probabilmente residui in fase di lavorazione, di dimensioni non superiori a una decina di centimetri.

Sui camminamenti, invece, sono state individuate molte zone anomale, nelle quali il detector indicava la presenza di metallo e/o ferro. Seguendo il suono dello strumento sono state tracciate con del gesso le geometrie di tali anomalie; ne sono risultate forme prevalentemente allungate (nastriiformi), di lunghezza variabile, spesso superiore a uno o anche due metri di lunghezza, e con andamento talvolta parallelo e talvolta inclinato di circa 30° o 45° rispetto al perimetro del camminamento.

In particolare, sono state tracciate 24 linee sul secondo camminamento e 20 sul terzo, e sono stati individuati alcuni vani in cui l'anomalia interessava tutta l'area del pavimento. I camminamenti, però, non sono stati indagati nella loro interezza perché l'indagine è risultata infattibile sia nelle zone di accesso al pubblico, proprio a causa della continua presenza di turisti, sia in molti vani nei quali la presenza di ponteggi ed altre strutture metalliche disturbava lo strumento.

Queste linee sono state fotografate e poi ridisegnate in AUTOCAD, evidenziandole in rosso all'interno delle piante risultanti dal rilievo della ditta FO.A.R.T. (nella scala di rappresentazione 1: 500) ed indicando anche i corrispondenti riferimenti fotografici. Sono poi stati fatti degli ingrandimenti di dettaglio nella scala 1:100, dai quali risultano più leggibili le geometrie di tali segni.

Sul secondo camminamento sono da sottolineare tre anomalie che raggiungono i due metri di lunghezza, disposte trasversalmente rispetto ai costoloni d'angolo: si trovano in corrispondenza del costolone destro della vela sud, del costolone destro della vela est e del costolone sinistro della vela nord.

Lungo i corridoi delle vele est ed ovest le linee si dispongono parallelamente al perimetro del camminamento, in posizione ravvicinata all'intradosso della calotta esterna; in particolare, lungo la vela ovest un' anomalia raggiunge la lunghezza di 4 m, sviluppandosi lungo quasi tutto il vano tra il costolone d'angolo e quello intermedio.

Le altre linee risultano avere una lunghezza media di 80/90 cm d un'inclinazione di circa 30° rispetto al perimetro del camminamento.

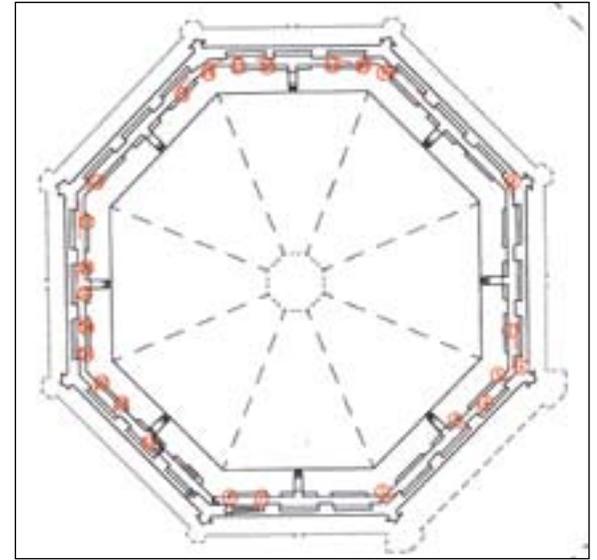
Per quanto riguarda il terzo camminamento, per le motivazioni suddette, non sono stati indagati i corridoi in corrispondenza delle vele ovest e nord-ovest.

Dall'analisi dei disegni si nota subito che, a differenza del secondo camminamento, qui le ano-

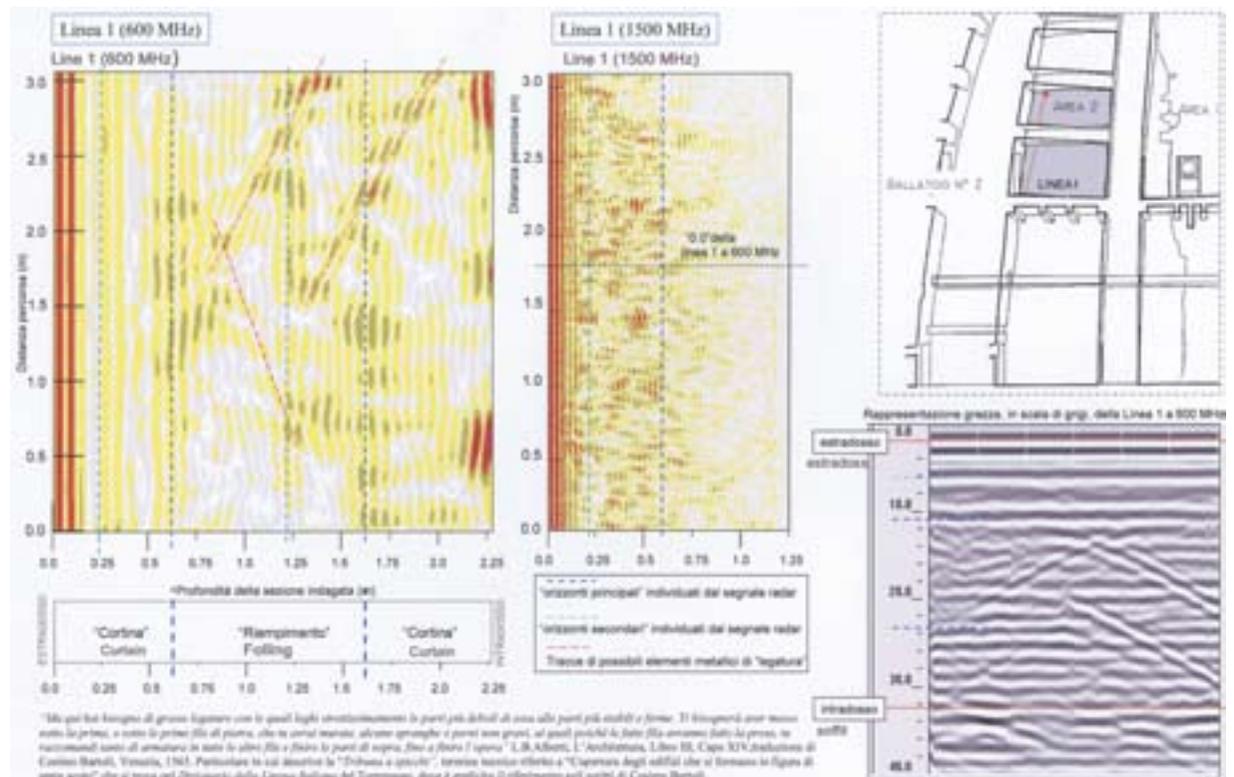
malie non seguono mai un andamento parallelo, ma si dispongono tutte con un' inclinazione che va dai 30° ai 45° rispetto al perimetro dell'ottagono; hanno lunghezze che variano dai 50 ai 150 cm si sviluppano partendo dall'intradosso della calotta esterna, per raggiungere l'estradosso di quella interna, coprendo quindi intere fasce di solaio (a differenza di quanto accade nell'altro

camminamento, nel quale viene coperta al massimo una metà di solaio).

Ci sono altri due dettagli da sottolineare: l'assenza delle anomalie in corrispondenza dei costoloni d'angolo (diversamente dal secondo camminamento), e l'estensione delle stesse all'interno dei passaggi di accesso agli occhi circolari della calotta interna.



Indagine eseguita nel 2007 con il metal detector per la ricerca della presenza di ferro



o0204009.039ve	1422 ottobre 16	Pagamento per acquisto di piastre di ferro per le centine della cupola.	ferro in piastre
o0204009.045d	1422/3 febbraio 5	Pagamento a un fabbro per ferramenta.	ferro, grucce
o0204009.045d	1422/3 febbraio 5	Pagamento a un fabbro per ferramenta.	acciaio
o0204009.052a	1423 aprile 15	Pagamento per spese minute.	ferro - biette
o0204009.054va	1422 aprile 18	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro sottile
o0204009.059va	1422/3 gennaio 26	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro grosso - verghe
o0204009.059va	1422/3 gennaio 26	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro sottile
o0204009.071a	1423 dicembre 18	Pagamento per spese minute.	ferro, piastra - modello per cresta
o0204009.072a	1423 maggio 20	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro - verghe
o0204009.072a	1423 maggio 20	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro, pezzi di saettamento
o0204009.072a	1423 maggio 20	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro, verrettoni
o0204009.072va	1423 agosto 4	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro, spiaggiolate
o0204009.072va	1423 agosto 4	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro sottile per verrettoni
o0204009.076va	1423 ottobre 22	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro grosso - verghe
o0204009.082d	1424 marzo 31	Pagamento per acquisto di ferro.	ferro
o0204009.083vb	1423 agosto 26	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro, pezzi
o0204009.084va	1423/4 gennaio 5	Pagamento per acquisto di ferramenta.	ferro - lavoro di fabbro

Documentazione tratta dal sito "Gli anni della Cupola".

Gli Anni della Cupola. Archivio digitale delle fonti dell'Opera di Santa Maria del Fiore, 1417-1436, a cura di Margaret Haines, Firenze, Opera di Santa Maria del Fiore, 2009, <http://www.operaduomo.firenze.it/cupola> (data di accesso ai dati utilizzati gennaio-febbraio 2012).

Come si può osservare dall'indagine georadar eseguita nel 2002 sono ben chiari i segnali inclinati che rappresentano i ferri e che sono posizionati nelle zone che interessano la cupola portante; il ferro fu acquistato durante il periodo di costruzione della Cupola come dimostrano i documenti dell'archivio dell'Opera del Duomo editi nel sito "Gli anni della Cupola".

Indagine svolte sul modello

Per poter verificare in maniera esatta la composizione della cupola interna portante e determinare l'effettiva composizione e posizione dei materiali è stato realizzato un modello nel resede della sede della Facoltà di Architettura in piazza Ghiberti di Firenze. Il modello è stato realizzato costituito da due paramenti più esterni di dimensioni pari a 75 cm. e costituiti da mattoni e malta e da una zona interna formata da malta, pietra, mattoni e da ferro (questo è stato realizzato con tubi innocenti e inclinati di un angolo pari a 45°). Queste disposizioni sono state realizzate analizzando e confrontando i vari risultati ottenuti con le varie indagini georadar, tomografiche.

Le caratteristiche del modello sono ben visibili nelle foto allegate e sono state verificate con la realizzazione in varie tappe, realizzando per ciascuna di esse l'indagine georadar, permettendo così di poter eventualmente modificare la posizione o la composizione dei materiali.

L'indagine georadar svolta sul modello ricostruito è stata svolta utilizzando la medesima strumentazione utilizzata durante i rilievi condotti all'interno della Cupola del Duomo di Firenze. La strumentazione è stata settata con i medesimi parametri di acquisizione impostati nelle precedenti indagini sulla Cupola. L'unico parametro modificato è il range di fondo scala, leggermente minore sul modello ricostruito.

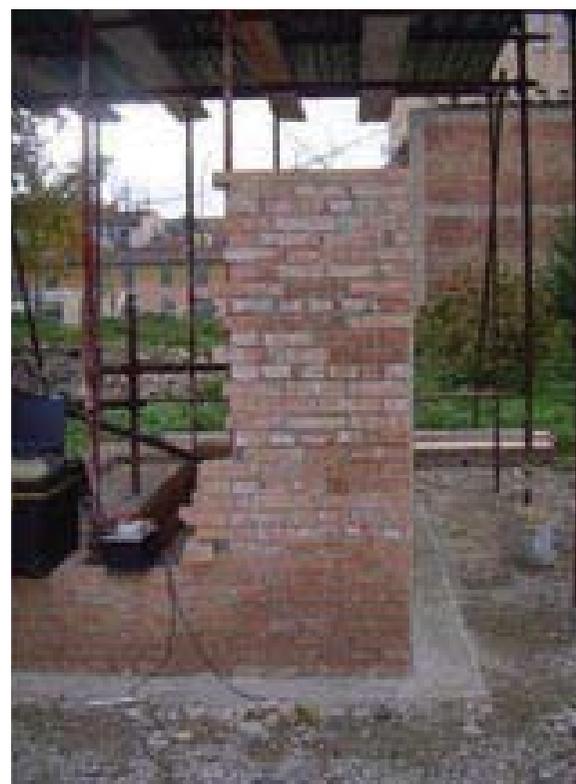
Le misure raccolte, elaborate con apposito software dedicato, hanno permesso di individuare le medesime riflessioni riscontrate nel paramento murario della vela della Cupola del Duomo, tali da confermare la struttura composta da tre strati: Il primo (estradosso) in laterizio di mattoni "spina pesce", il secondo (intermedio) costituito da un riempimento misto di malta e elementi lapidei e/o di laterizio, mentre il terzo (intradosso) sempre in laterizio di mattoni "spina pesce".

Gli spessori sono stati confermati dal rilievo georadar svolto sul modello attraverso il parametro "permittività" che ha confermato la profondità delle riflessioni individuate nella Cupola.

In corrispondenza delle barre metalliche inserite

nel modello, sono state riconosciute le medesime forme di riflessione individuate nella Cupola. L'unica differenza rilevata è relativa all'intensità di riflessione registrata nel modello, in cui è leggermente maggiore e probabilmente dovuta alla sezione del ferro utilizzato, evidentemente maggiore nel modello ricostruito.

In conclusione, le modalità costruttive ipotizzate in seguito ai rilievi georadar, tomografia, endoscopia, metal detector svolti sulla Cupola, sono state confermate dai rilievi svolti sul modello, sia dal punto di vista dei materiali utilizzati, sia dal punto di vista geometrico della struttura e dei rinforzi metallici.



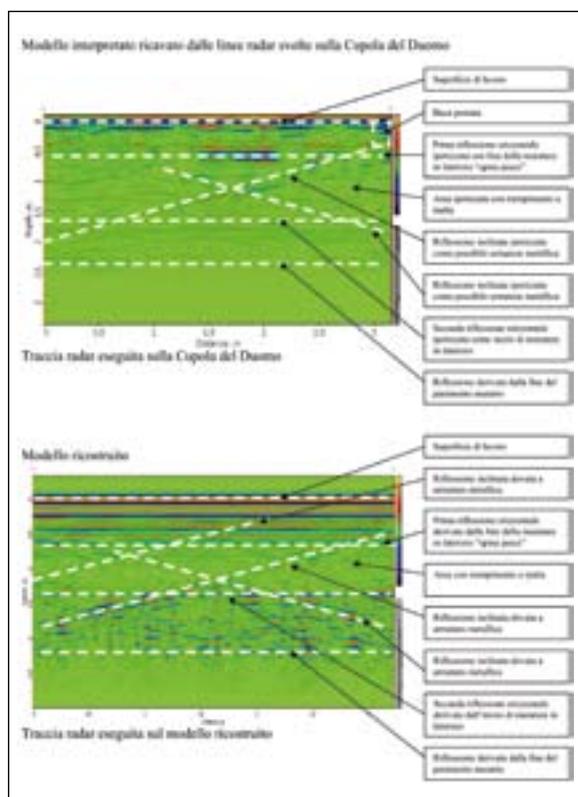
Realizzazione del modello



Realizzazione del modello



Realizzazione del modello



Radargrammi eseguiti sulla Cupola e sul modello e loro confronto

Confronto tra la Cupola e la Fortezza di Staggia

Prendendo in considerazione la fortezza di Staggia della provincia di Siena si possono fare le seguenti considerazioni.

Tra il X e l'XI secolo Staggia compare una curtis fortificata della contessa Ava, fondatrice della vicina Badia a Isola, e dei suoi figli Tegremo e Berizio.

Successivamente i nobili di Staggia (o Sfarzi) divennero una delle maggiori consorterie della Valdelsain, con possedimenti ubicati tra l'Elsa e il suo affluente Staggia.

Spesso coinvolti nelle lotte tra Firenze e Siena, i Soarzi conobbero la loro maggiore fortuna nella seconda metà del XII secolo, ma nel successivo iniziò la loro decadenza, mentre andava sviluppandosi il borgo nato ai piedi del castello.

La fortuna del borgo fu dovuta alla via Francigena che, a partire dal XIII secolo, lo interessò direttamente con uno dei suoi nuovi rami. Alla fine del Duecento i Franzesi, originari del Valdarno superiore e arricchitisi in Francia con le marcature, comprarono il Castello di Staggia e lo trasformarono in un originale palazzo fortificato. Quando, intorno alla metà del trecento, fallì la compagnia commerciale dei Franzesi, il palazzo fu acquistato dalla repubblica fiorentina per la non trascurabile somma di 18.000 fiorini d'oro (1361).

Divenuto avamposto fiorentino contro Siena, Staggia si trovò spesso coinvolta in imprese di guerra: per questo motivo nel 1373, fu potenziato il circuito murario e protezione del borgo. Le mura, raccordate con la Rocca, furono ulteriormente rafforzate nel 1431, occasione nella quale vi fu invitato Filippo Brunelleschi, oggi si presentano pressochè intatte, salvo due brevi interruzioni, e sono intervallate da torri quadrate o poligonali che intercettano il cammino di ronda posto all'interno, del quale esistono ancora le mensole di sostegno in pietra.

Come si può vedere dai dati estratti dall'archivio dell'Opera di Santa Maria del Fiore e dal sito "Gli anni della Cupola" quali furono i viaggi del Brunelleschi a Staggia, i materiali usati e le maestranze che realizzarono la rondella della fortezza.

Documento	Data	Regesto	Contesto ricerca
o0202001.142e	1431 maggio 16	Lettera al capomaestro per i lavori di Staggia.	viaggio a Staggia con scorta
o0202001.137f	1430/1 febbraio 15	Ordine di un viaggio a Castellina, Rencine e Staggia per la fortificazione dei castelli.	viaggio di Brunelleschi a Castellina
o0204013.007vc	1430/1 marzo 2	Pagamento a un maestro di scalpello per viaggio a Castellina.	viaggio di Brunelleschi a Castellina
o0204013.007f	1430/1 febbraio 24	Rimborso di spese per viaggio a Castellina.	viaggio di Brunelleschi a Castellina
o0202001.137f	1430/1 febbraio 15	Ordine di un viaggio a Castellina, Rencine e Staggia per la fortificazione dei castelli.	viaggio di Brunelleschi a Rencine
o0202001.137f	1430/1 febbraio 15	Ordine di un viaggio a Castellina, Rencine e Staggia per la fortificazione dei castelli.	viaggio di Brunelleschi a Staggia
o0202001.251vg	1436 aprile 3	Permesso a Brunelleschi di recarsi a Mantova.	viaggio di 20 giorni a Mantova del Brunelleschi

DOCUMENTO:	o0202001.137f
	I. Trascrizione testo e dati essenziali
DATA:	1430/1 febbraio 15
REGESTO:	Ordine di un viaggio a Castellina, Rencine e Staggia per la fortificazione dei castelli.
FONTE:	AOSMF II 2 1 c. 137 f deliberazioni
TITOLO:	Pro eundo ad castra Castelline, Rincine et Staggie
TESTO:	Prefati operarii, absentibus Alexandro de Alexandris et Bernardo Iacobi Arrigi eorum collegis, servatis solemnitatibus opportunis deliberaverunt quod Filippus ser Brunelleschi cum uno socio et cum duobus equis vadat ad castrum Castelline, Rincine et Staggie ad providendum illud quod opus est circa fortificationem castrorum dictorum locorum expensis Opere; et ad presens camerarius Opere teneatur de pecunia Opere eidem mutuare libras decem pro expensis ytineris.
RAPPORTI:	Cfr. lo stanziamento definitivo delle spese: O0204013.007f(go).
BIBLIOGRAFIA:	Fabriczy 1907, p. 76. Mostra Brunelleschi 1977, n. 143.
Trascrizione:	mh
	II. Analisi del documento
	<i>Indici</i>
NOME E QUALIFICHE:	Alessandro Alessandri - operaio Bernardo di Jacopo Arrighi - operaio Filippo di ser Brunellesco - compagno di Filippo di ser Brunellesco - camarlingo
LUOGHI:	Castellina Rencine Staggia
	<i>Ricerca guidata</i>
PERSONALE:	altre menz. - interni GRUPPO - Castellina, inviato GRUPPO - Rencine, inviato GRUPPO - Staggia, inviato

DESTINAZIONI:	fortificazioni <u>Castellina, castello - sopralluogo di Filippo di ser Brunellesco</u> <u>Castellina, castello - sopralluogo di compagno di Filippo di ser Brunellesco</u> <u>Rencine, castello - sopralluogo di Filippo di ser Brunellesco</u> <u>Rencine, castello - sopralluogo di compagno di Filippo di ser Brunellesco</u> <u>Staggia, castello - sopralluogo di Filippo di ser Brunellesco</u> <u>Staggia, castello - sopralluogo di compagno di Filippo di ser Brunellesco</u>
TRASPORTI:	dorso cavallo - uomini
COSE NOTABILI:	altre viaggio di Brunelleschi a Castellina viaggio di Brunelleschi a Rencine viaggio di Brunelleschi a Staggia
Analisi:	

Gli Anni della Cupola. Archivio digitale delle fonti dell'Opera di Santa Maria del Fiore, 1417-1436, a cura di Margaret Haines, Firenze, Opera di Santa Maria del Fiore, 2009, <http://www.operaduomo.firenze.it/cupola> (data di accesso ai dati utilizzati gennaio-febbraio 2012)

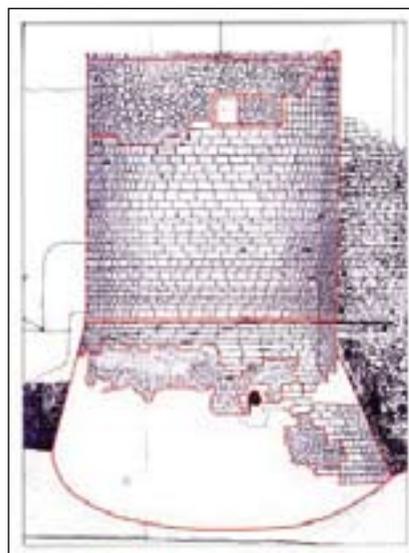


Immagine ed esame stratigrafico della rondella

I lavori continui di riassetto, nella tradizione della Repubblica Fiorentina, venivano di solito eseguiti dalle maestranze dell'Opera del Duomo che proprio in questi anni stanno completando sotto la guida di Filippo Brunelleschi la Cupola di Santa Maria del Fiore.

Infatti, alla data del 1431, in un documento nell'archivio dell'Opera del Duomo, viene riportato che il grande architetto, *Provveditore Generale delle opere di fortificazione della Repubblica*, viene inviato a Staggia (anche a Rencine e alla Castellina) a sovrintendere i lavori

di fortificazione per una possibile invasione di questi territori (avvenimento poi realmente successo da parte delle truppe del capitano di ventura Niccolò Piccinino al soldo del Duca di Milano Filippo Maria Visconti)⁴.

Dall'analisi della rondella in oggetto e dai rilievi effettuati dalla Dott.ssa Cinzia Così si può dedurre infatti che la tipologia costruttiva risulta essere la stessa della Cupola di Santa Maria del Fiore.

Infatti anche in questo caso siamo in presenza di una muratura a sacco.

4. Vedere "La Rocca di Staggia Senese" a cura di Domenico Taddei, Nencini Editore, Poggibonsi 2007

Bibliografia

- Bartoli L., *Il disegno della cupola del Brunelleschi*, Olschki, Firenze 1994.
- Battisti E., *Filippo Brunelleschi*, Electa, Milano 1989.
- Chiarugi A., Quilghini D., *Tracciamento della cupola del Brunelleschi. Muratori e geometria*. in «Critica d'Arte», XLIX, s. IV, n. 3, 1984, pp. 38-47.
- Quilghini D., *La cupola del Brunelleschi: la geometria*, in «Ingegneri Architetti Costruttori», Giugno-Settembre 1984.
- Chiarugi A., *La cupola del Brunelleschi. Problemi di tracciamenti e costruzione: il modello dell'ACMAR*, in «Ingegneri Architetti Costruttori», Giugno - Settembre 1984, pp. 31-37.
- Corazzi R., Conti G., Marini S., *La Cupola di Santa Maria del Fiore, Tra Ipotesi e Realtà*, Pitagora ed., Bologna 2005.
- Conti G., Corazzi R., *La Cupola di Santa Maria del Fiore raccontata dal suo progettista Filippo Brunelleschi*. Sillabe., Livorno 2005.
- Corazzi R., G. Conti, *La Cupola di Brunelleschi fra ipotesi e realtà*, in *disegnare* n. 31 idee immagini (Rivista semestrale del dipartimento RADAAR – Università degli Studi di Roma “La Sapienza”), pp.56-67.
- Corazzi R., G. Conti, *Indagini non invasive e rilievi della cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze*, in *Costruire* in laterizio n. 115 Faenza Editrice, Faenza, Gennaio-Febbraio 2007.
- Corazzi R., *Il rilievo con indagini avanzate – La Cupola di santa Maria del Fiore*, in “I percorsi del Principe” a Firenze – *Rilievo integrato tra conoscenza e lettura critica* (ed. Emma Mandelli), *Materia e geometria* 15/2005, Alinea Editrice, Firenze 2005. pgg. 21 – 36.
- Corazzi R., *Il rilievo. Indagini in profondità sul modello reale con strumentazioni avanzate: il georadar*. in *Le metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e dell'ambiente – Gangemi Editore, Roma 2005. pgg. 251-253*
- Corazzi R., Conti G., *Il Segreto della Cupola del Brunelleschi – The Secret of Brunelleschi's Dome in Florence*, Angelo Pontecorboli Editore, Firenze 2011.
- Dalla Negra R., a cura di, *La Cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze. Il rilievo fotogrammetrico*, Sillabe editrice, Livorno 2004..
- Di Pasquale S., *Recenti ricerche sulla Cupola di Santa Maria del Fiore*, in *Filippo Brunelleschi. La sua opera e il suo tempo*, Atti Convegno internazionale di studi, Firenze 16-22 ottobre 1977, Centro Di, Firenze 1980, pp. 893-902.
- Di Pasquale S., *La costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore*, Biblioteca Marsilio, Venezia, maggio 2002.
- Von Fabriczy C., *Filippo Brunelleschi. La vita e le opere*. ed. A.M. Poma. Uniedit, Firenze 1977.
- Fanelli G., Fanelli M., *La cupola del Brunelleschi. Storia e futuro di una grande struttura*. Mandragora, Firenze 2004.
- Fondelli M., *Rilievo fotogrammetrico della volta affrescata della cupola in Ferri W., Fondelli M., Franchi P., Greco F., Il rilevamento fotogrammetrico della cupola di Santa Maria del Fiore*, «Bollettino di Geodesia e Scienze Affini dell' I.G.M.», XXX, 1971, pp. 158-184.
- Galluzzi P., *Gli ingegneri del Rinascimento da Brunelleschi a Leonardo da Vinci*, catalogo della mostra (Firenze, Palazzo Strozzi, 22 giugno 1966-6 gennaio 1997). Giunti, Firenze 1996.
- Guasti C., *Un disegno di Giovanni di Gherardo da Prato, poeta e architetto, concernente alla Cupola di Santa Maria del Fiore*, Belle Arti. Opuscoli descrittivi e biografici, Firenze, 1974.
- Guasti C., *La Cupola di Santa Maria del Fiore illustrata con i documenti dell'Archivio dell'Opera secolare*, Barbera Bianchi e Comp., Firenze 1857, rist. anast. A. Forni, Bologna 1974.
- Gurrieri F., *La cupola*, in F. Gurrieri, G. Belli, A. Benvenuti Papi, R. Dalla Negra, Fabbri P., Tesi V., *La cattedrale di Santa Maria del Fiore a Firenze*, Cassa di Risparmio di Firenze, Firenze 1994, Vol. I e II.
- Margaret Haines, a cura di, *Gli Anni della Cupola. Archivio digitale delle fonti dell'Opera di Santa Maria del Fiore, 1417-1436, Opera di Santa Maria del Fiore, anno 2009.* <http://www.operaduomo.firenze.it/cupola>
- Ippolito L., Peroni C., *La Cupola di Santa Maria del Fiore*, La Nuova Italia Scientifica, Roma 1997.
- King R., *La cupola di Brunelleschi*, Rizzoli, Milano, Ottobre 2001.
- Lamberini D., *Costruzione e cantiere: le macchine, in Rinascimento da Brunelleschi a Michelangelo*, Catalogo mostra, Bompiani, Milano 1994, pp. 478-489.
- Mainstone R.J., *Brunelleschi's Dome of S. Maria del Fiore and some related structures*, London 1970.
- Mainstone R.J., *Le origini della concezione strutturale della Cupola di Santa Maria del Fiore*, in *Atti del Convegno Brunelleschiano- 1977*, Centro Di, Firenze 1977, p. 884.
- Manetti A., *Vita di Filippo Brunelleschi*, a cura di C. Perrone, Salerno Editrice, Roma 1992.
- Nardini Despotti Mospignotti A., *Filippo di Ser Brunellesco e la Cupola del Duomo di Firenze*, Dalla Tipografia di Giuseppe Meucci, Livorno 1885.
- Nelli G.B., *Ragionamento sopra la maniera di voltar le cupole senza adoperarvi le centine*, in *Discorsi di Architettura del senatore Giovan Battista Nelli*, per gli Eredi Paperini, Firenze 1753.
- Opera di Santa Maria del Fiore in Firenze., *Rilievi e studi sulla Cupola del Brunelleschi eseguiti dalla Commissione nominata il 12 gennaio 1934*, Firenze, 1939.
- Prager F.D., Scaglia G., *Brunelleschi. Studies of his Technology and Inventions*, The Mit Press, Cambridge, London 1970.
- Raccolta monografica, elaborazione ed interpretazione dei dati sperimentali provenienti dal sistema di monitoraggio della cattedrale di S. Maria del Fiore a Firenze*, in «Bollettino Ingegneri» n. 1-2, 1991
- Ragghianti L.C., *Filippo Brunelleschi. Un uomo, un universo*, Ed. Banca Toscana, Firenze 1977.
- Ricci M., *Tecnologia della Cupola di Santa Maria del Fiore in relazione ad una ipotesi sulla sua regola di costruzione*, in «Bollettino Architetti», 8, 1985, pp. 2-15.
- Ricci M., *Il fiore di Santa Maria del Fiore*, Alinea, Firenze 1983.
- Ricci M., *L'accusa di Giovanni di Gherardo Gheparda a Filippo Brunelleschi: spiegazione integrale della pergamena, dei disegni e relativi contenuti tecnici*, Salimbeni, Firenze 1987.
- Saalman H., *Filippo Brunelleschi. The cupola of Santa Maria del Fiore*, London, A. Zwemmer, 1980..
- Sanpaolesi P., *Ipotesi sulle conoscenze matematiche statiche e meccaniche del Brunelleschi*, in «Belle Arti», II, 1951, pp. 25-54.
- Sanpaolesi P., *Il rilievo della cupola del duomo di Firenze*, 1937 in «Rivista d'Arte», 19 (1937) n° 1.
- Sanpaolesi P., Biradi G., *Vecchie e recenti ricerche sulla Cupola di Santa Maria del Fiore e la interpretazione di un nuovo rilievo fotogrammetrico* in «Antichità viva», XI, 1972.
- Sanpaolesi P., *La Cupola di Santa Maria del Fiore. Il progetto-La costruzione*, Edam, Firenze 1977.
- Settle T.B., *Brunelleschi's Horizontal Arches And Related Devices*, Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze, a. III, fasc. 1, 1978, pp. 65-80.

Sgrilli B.S., *Descrizione e studi dell'insigne Fabbrica di Santa Maria del Fiore*, Metropolitana fiorentina, Per Bernardo Paperini, Firenze 1733.

Vasari G., *Le vite de' più eccellenti architetti, pittori et scultori italiani, da Cimabue, insino a' tempi nostri*, Firenze, per i tipi di Lorenzo Tormentino, 1550; rist. a cura di L. Bollori e A. Rossi, presentazione di G. Previtali, Torino, Einaudi, 1991.

Verdon T., a cura di, *Alla riscoperta di Piazza del Duomo in Firenze. 4: La Cupola di Santa Maria del Fiore*. Saggi di C. Acidini Luchinat, S. Di Pasquale, M. Lingohr, A. Paolucci. Centro Di, Firenze 1995.

Ximenes L., *On the Old and New Florentine Gnomon and on astronomic, physical and architectonic observations*, Stamperia Imperiale, Firenze 1757.

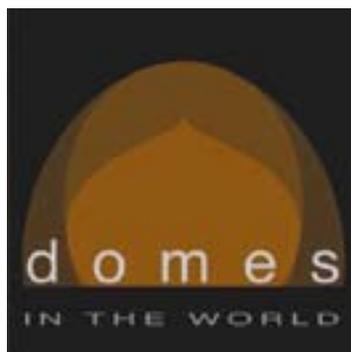
Francesco GURRIERI, nato nel 1938, si è laureato in Architettura a Firenze (1964). Ordinario di Restauro dei Monumenti, e' stato Preside della Facoltà di Architettura dal 1965 al 2000. Laurea Honoris Causa in "Beni culturali" della Università di Lima. E' socio onorario del Collegio Ingegneri della Toscana. E' uno dei maggiori interlocutori internazionali sui non facili problemi della conservazione dei monumenti e delle città.

Gennaro TAMPONE, Ingegnere (Bari 1961) e Architetto (Firenze 1969) e' Professore incaricato di Restauro architettonico nella Università di Firenze; e' Presidente dell' ICOMOS International Wood Committee e Presidente del Comitato Scientifico Italiano ICOMOS per la conservazione delle strutture di legno. Dal 2002 e' Presidente del Collegio Ingegneri della Toscana.

Carlo BLASI, laureato in architettura a Firenze nel 1972, è professore ordinario di Restauro nella Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Parma. Dal 1988 al 2002 è stato professore associato presso il Politecnico di Bari. Esperto di conservazione di strutture storiche, dal 1973 si è occupato dei problemi di stabilità della cupola del Brunelleschi, prima come collaboratore di Salvatore Di Pasquale nella Facoltà di Architettura di Firenze, e poi come ricercatore, con Andrea Chiarugi, nella Facoltà di Ingegneria; attualmente, in collaborazione con l'Opera di Santa Maria del Fiore, è impegnato nell'analisi dei dati del monitoraggio. Per la tutela del patrimonio architettonico, è stato consulente dell'UNESCO, della World Bank e dei governi giapponese, francese e lussemburghese. Ha collaborato con il Ministero dei Beni Culturali per la stesura delle "Linee Guida" per la salvaguardia degli edifici storici dal rischio sismico.

Giuseppe CONTI, laureato in Matematica e Professore associato di Istituzioni Matematiche e Modelli Matematici per le Applicazioni presso la Facoltà di Architettura dell'Università di Firenze. Insegna anche Analisi matematica I e II al Corso di Laurea di Ingegneria Meccanica dell'Università di Firenze. E' autore di numerosi libri di testo per l'università. I suoi campi di ricerca sono la geometria combinatoria e l'analisi funzionale non lineare e applicazioni della matematica nei settori dell'architettura, della musica dell'economia e della fotogrammetria. Nel 2002 ha vinto il premio internazionale Pirelliward (Premio Pirelli) per la divulgazione scientifica tramite internet. Ha tenuto convegni in numerose università nazionali ed estere e in varie istituzioni culturali.

Roberto CORAZZI, laureato in Architettura, e' professore ordinario e insegna Fondamenti ed Applicazioni della Geometria Descrittiva e Rilievo Fotogrammetrico e dell'Ambiente presso la Facoltà di Architettura di Firenze. E' Membro del Collegio di Dottorato di ricerca in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente e del Consiglio Scientifico dell'Istituto Italiano dei Castelli. E' autore di numerose pubblicazioni inerenti la geometria ed il recupero di manufatti architettonici rilevato con strumentazioni tecnologicamente avanzate. Ha partecipato a convegni in numerose università nazionali ed estere ed in varie istituzioni culturali. I principali settori di attività professionale sono stati: settore opere complementari delle autostrade; settore edilizia residenziale; settore edilizia industriale, settore dell'inserimento ambientale; recupero edilizio dei centri storici; E' specialista nel settore di ricerca di misurazioni applicando il processo fotogrammetrico.



1° CONGRESSO INTERNAZIONALE A FIRENZE SULLE CUPOLE "DOMES IN THE WORLD"

FIRENZE, 19 - 23 MARZO

Organizzato dalla Fondazione Romualdo Del Bianco, dal Dipartimento di Architettura, Disegno, Storia, Progetto dell'Università di Firenze e dal Collegio degli Ingegneri della Toscana in collaborazione con i Dipartimenti di Costruzioni e Restauro e di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, e con il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa

L'evento è inserito anche nella programmazione del Comitato ICOMOS WOOD (Ancient Timber Structures) e Comitato ICOMOS ISCARSAH (International Scientific Committee for Analysis and Restoration of Structures of Architectural Heritage).

Lo scopo principale di questo congresso è l'aggregazione di studiosi di vari paesi, aventi formazione culturale differente, motivate da un diverso approccio filosofico alla vita, mossi da un chiaro orientamento a trarre vantaggio dalle diversità culturali e dalla conoscenza tradizionale. I Maggiori esperti e professionisti potranno incontrarsi e confrontarsi in sezioni dedicate al significato culturale e spaziale delle cupole antiche e contemporanee negli edifici, al loro contesto architettonico nel territorio e nel paesaggio, alla loro costruzione (materiali, tecniche, sistemi strutturali), la loro documentazione, interpretazione, conservazione e restauro e alla loro continuità nella costruzione odierna.

SESSIONI DEL CONGRESSO:

- I. IDENTITÀ CULTURALE E SIMBOLOGIA**
- II. GENESI GEOMETRICA E DELLA FORMA**
- III. COSTRUZIONE, DOCUMENTAZIONE, CONSERVAZIONE**

EVENTI PROGRAMMATI NELL'AMBITO DEL CONGRESSO:

Mostra sulla Cupola del Brunelleschi – Opera del Duomo, Centro Arte e Cultura (a cura di R. Corazzi)

Mostra Cupole in Siria – Palazzo Medici Riccardi (a cura di S. Mecca)

Mostra Fotografica "Le Cupole nel Mondo" – Auditorium al Duomo (a cura della Fondazione Romualdo Del Bianco® Life Beyond Tourism®)

Concerto serale nella Cattedrale di Santa Maria del Fiore (a cura dell'Opera di Santa Maria del Fiore)

Visita della Cupola della Cattedrale del Duomo di Firenze (a cura di R. Corazzi in collaborazione con l'Opera di Santa Maria del Fiore)

Visita della Tholos della Tomba Etrusca della Montagnola (a cura di G. Tampone e Pro loco Sesto F.no)

LINGUE DEL CONGRESSO:

La comunicazione sarà agevolata dalla traduzione simultanea in inglese, italiano e russo.

I contributi scientifici selezionati (papers e posters) provengono da 28 Paesi dei 5 Continenti: Armenia, Austria, Azerbaijan, Bahrain, Belgio, Bosnia Erzegovina, Brasile, Canada, Croazia, Egitto, Francia, Georgia, Germania, Giordania, Gran Bretagna, India, Indonesia, Iran, Italia, Malaysia, Marocco, Polonia, Russia, Spagna, Turchia, Ucraina, Uzbekistan, USA.

Il Congresso si svolge con l'Alto Patronato del Presidente della Repubblica

Per maggiori informazioni, quote di partecipazione, registrazione al congresso, per il concorso fotografico ecc., si veda il sito ufficiale: www.domesintheworld.com

SEGRETERIA ORGANIZZATIVA:

Promo Florence Events Promotion and Organization of Events Art-Culture-Science

Palazzo Coppini – Via del Giglio 10, 50123 Firenze, Italy

Tel. +39 055 285588 Fax +39 055 283260

domes@lifebeyondtourism.org oppure domes@promoflorenceevents.com