

Comportamento strutturale delle cupole murarie

Il caso di San Giorgio a Ragusa Ibla



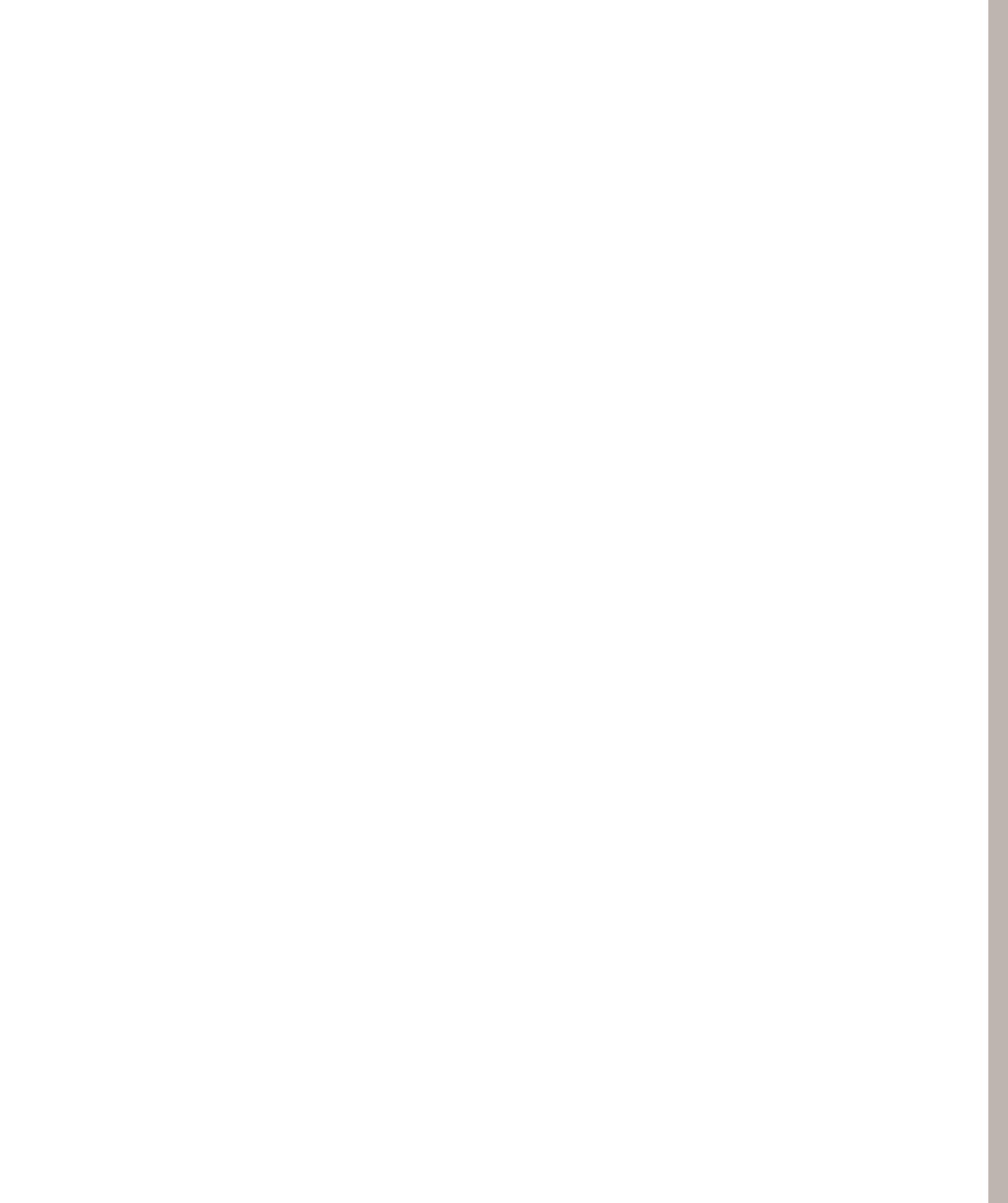
Politecnico di Torino
Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per
il Restauro e Valorizzazione del patrimonio
A.A. 2017/2018



RELATORE
Prof. Cesare Tocci

CANDIDATO
Lorenzo Agosta



F

pag.

2	Introduzione
4	Premessa
7	1. Le cupole in muratura
9	1.1. Inquadramento storico
22	1.2. Tipologie e Tecniche costruttive
34	1.3. Componenti
34	1.3.1. Raccordi
35	1.3.2. Tamburo e Lanterna
39	2. Il comportamento strutturale
40	2.1. Le cupole nei trattati
44	2.2. Studi premoderni nella statica degli archi
44	2.2.1. La meccanica nello studio dell'arco: La stabilità dei piedritti. De La Hire, Belidor
48	2.2.2. La meccanica nello studio dell'arco: La curva delle pressioni
51	2.3. La statica delle cupole
51	2.3.1. L'analisi per meccanismi
54	2.3.2. La teoria della membrana
59	3. Le cupole del territorio ragusano
60	3.1. Inquadramento geografico: Ragusa e il Val di Noto

62	3.2. La sismicità locale
64	3.3. Inquadramento storico: Il terremoto nel Val di Noto del 1693
66	3.4. Le cupole: Rassegna
69	RAGUSA
77	MODICA
83	ISPICA
87	COMISO
97	VITTORIA
100	3.5. Confronti
111	4. San Giorgio a Ragusa Ibla
112	4.1. Cenni storici
119	4.2. La cupola
121	4.2.1. Aspetti costruttivi
124	4.2.2. Analisi strutturale sulla cupola
132	4.2.3. Sforzi nei paralleli e meridiani della cupola
134	4.3. Proposta di miglioramento sismico
135	4.4. Descrizione del progetto
136	4.5. Predimensionamento delle strutture
138	Tavole di progetto
143	Bibliografia

Introduzione

Il tema di questo lavoro di tesi nasce, come si può comprendere dal titolo, dalla volontà di studiare le cupole e i loro comportamenti strutturali, come questi giganti architettonici abbiano attraversato la storia per arrivare fino a noi, a testimonianza della grande cultura architettonica del passato, legata indissolubilmente alla tecnica costruttiva del tempo.

Lo studio effettuato si compone di diverse parti: la prima prettamente storica, analizza lo sviluppo di questa forma nel tempo, Dalla Tholos di Micene considerata quasi come l'origine delle strutture cupolate alla cupola ottocentesca del campidoglio di Washigton. Passando ovviamente per esempi molto importanti come il Pantheon di Roma o la cupola della Basilica vaticana di San Pietro e dando uno sguardo alle tipologie e tecniche costruttive utilizzate nei secoli.

La seconda parte verte sulla spiegazione del comportamento strutturale di queste costruzioni, come lo studio su di queste si sia evoluto nel tempo, dalle prime indicazioni geometriche che gli architetti davano nei loro trattati, come Carlo Fontana quando detta delle regole pratiche per costruire le cupole, o Alberti nel suo *De Re Aedificatoria* alla fine del Quattrocento, fino agli studi di statica premoderni degli archi, arrivando alla concezione moderna della struttura della cupola.

Successivamente il lavoro svolto si è concentrato principalmente sull'analisi architettonica delle cupole del territorio ragusano. Questa scelta è stata dettata non solo da un movente affettivo verso questi gioielli dell'architettura Neoclassica, ma anche dal fatto di avere delle particolari caratteristiche compositive del tamburo. In queste si presenta composto o con grandi aperture, o solamente da colonne binate, come succede per la cupola di

San Giorgio a Ragusa Ibla.

Dalle analisi riscontrate si è deciso di approfondire la cupola di San Giorgio, data la sua particolare composizione del tamburo, con studi statici, che si basano su quelli fatti dai tre matematici nella prima metà del settecento sulla cupola di San Pietro a Roma. Tuttavia per San Giorgio ci si concentra principalmente sulla conoscenza della cupola e come questa si comporti se sollecitata da una forza esterna come quella del sisma.

Dai risultati ottenuti si è stabilito di intervenire sulla cupola con una proposta di miglioramento sismico, con il progetto di nuovi infissi che abbiano una funzione strutturale e stabilizzante. Questi si sostituiranno agli infissi già presenti che hanno essenzialmente una funzione di partizione trasparente. Questa nuova struttura che si andrà ad inserire sarà di ausilio al colonnato presente, in modo tale da assorbire insieme alle colonne la forza del sisma, così da ridurre la possibilità che il tamburo si inclini facendo crollare la cupola.

Il fine di questo progetto è quello di preservare e non rimpiangere un esempio architettonico unico, dichiarato bene patrimonio dell'umanità.

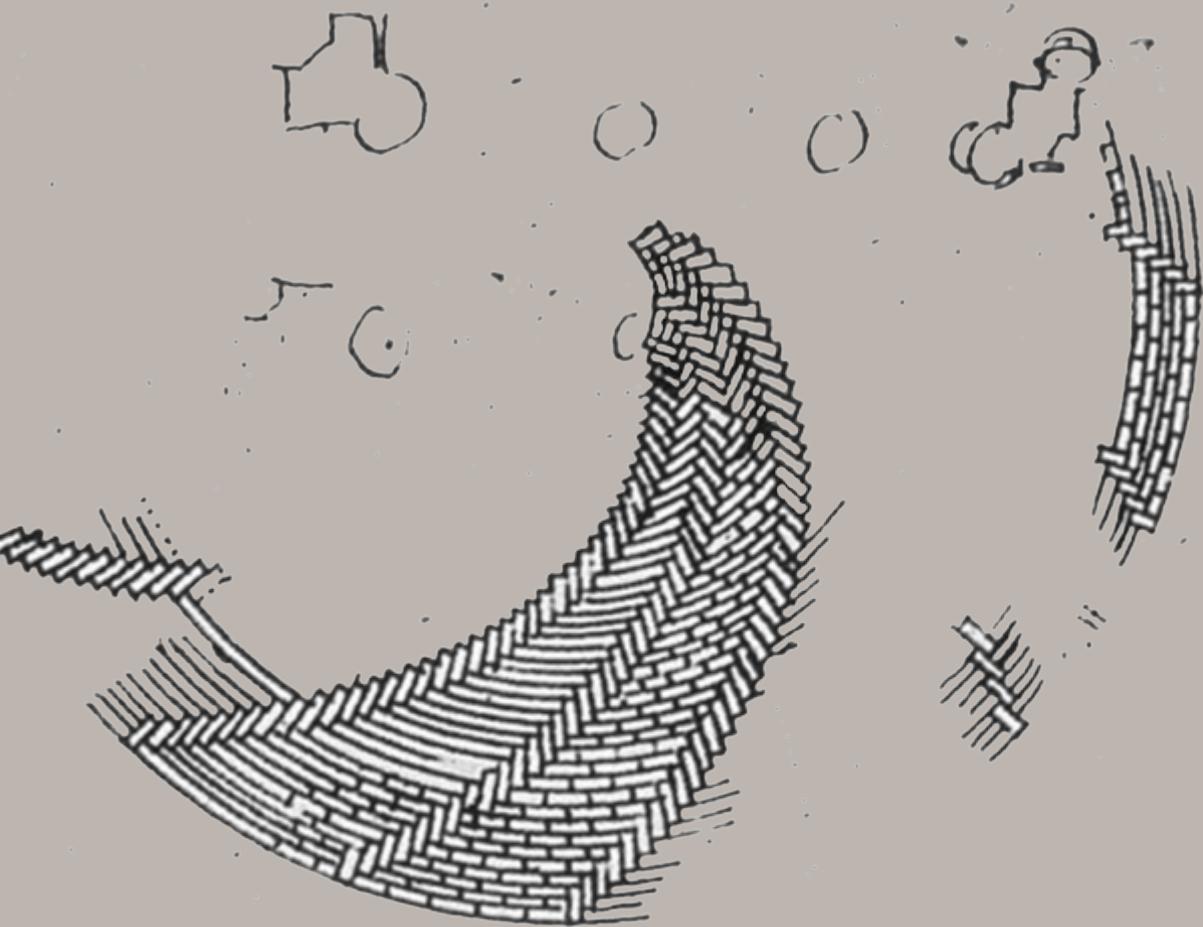
Premessa

“Cupola: copertura a volta, definita geometricamente come la superficie generata dalla rotazione di una curva intorno a un asse verticale...”. Dalla definizione che troviamo nell’enciclopedia Treccani comprendiamo come la cupola non sia altro che una volta, assimilabile a una mezza sfera simbolo di perfezione assoluta. Per Benvenuto la cupola è come un diaframma che separa, ma allo stesso tempo, unisce due nature: *“cielo e terra, Divini e mortali”*¹. Tale affermazione è riportata da Federica Ottoni in *“Delle cupole e del loro tranello”*, quando nel laborando, all’inizio dell’introduzione scrive: *“a un certo punto qualcuno deve aver pensato che la sfida contro il cielo, le torri l’avrebbero persa; e deve essere stato allora che si è cercato di chiuderlo in una cupola, abbastanza grande per dipingerglielo sopra”*.² La cupola diventa, dunque, metafora del cielo. Tale affermazione fornisce uno spunto di riflessione molto interessante per chi deve approcciarsi allo studio delle cupole, non soltanto dal punto di vista tecnico, ma anche del pensiero fondante la nascita di questa tipologia architettonica. Fin dalla sua genesi la cupola o, per meglio dire, la pseudo-cupola, era utilizzata per coprire edifici di una certa importanza, proprio per garantire un senso di sicurezza, forza e unità. La ritroviamo, infatti, su tombe monumentali, luoghi di culto, come chiese e cattedrali o palazzi governativi. Nei secoli, la cupola ha avuto naturalmente notevoli evoluzioni nel campo delle tecniche costruttive grazie alla scoperta di nuovi materiali da utilizzare. Il concetto di unità e sacralità espresso da questa forma architettonica è

¹E. Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo*, Firenze: Sansoni, 1981, (pag 409)

²F. Ottoni, *Delle cupole e del loro tranello*, Roma: Aracne, 2012

diventato un punto di riferimento che ha attraversato i secoli arrivando fino ai nostri giorni. Molte delle nostre città italiane sono ricordate e riconosciute nel mondo attraverso lo skyline di questi giganti architettonici, basti ricordare la cupola di Santa Maria del Fiore con il suo caratteristico colore rosso mattone per pensare a Firenze, o la cupola michelangiolesca di San Pietro per ricordare Roma. Questo grazie anche all'evoluzione dell'idea di spazio cupolato, perché nelle cupole classiche come quella del Pantheon a Roma tale spazio era apprezzabile solo dall'interno, da dove era possibile ammirare l'unicità dell'oggetto, mentre le cupole postmedievali acquistano un ulteriore significato, definito dalla Ottoni come "*elemento svettante*" diventano infatti delle presenze importanti nel contesto urbano, assumono un ulteriore ruolo stilistico oltre a quello funzionale. Notiamo come le cupole in questo periodo si arricchiscono di dettagli architettonici decorativi, elementi nuovi che caratterizzano e rendono riconoscibili le diverse strutture cupolate, grazie ai differenti particolari e tipologie costruttive usate dai progettisti. Purtroppo, è andato perso il significato e l'importanza che originariamente si attribuiva a questi elementi, dal momento che adesso si abusa di questa forma. Magari si riesce ad apprezzare l'innovazione tecnologica e dei materiali, come quella progettata da Foster per il Reichstag a Berlino, ma, in qualche modo, se ne banalizza l'uso. Infatti, la cupola non riveste più il suo significato originario che nei secoli ha rappresentato qualcosa per l'uomo, ovvero un legame con il cielo, uno specchio del divino.



Volte tonde di me game
quale si usava per
armature - affini

LE CUPOLE
IN MURATURA





Fig.1: Tesoro di Atreo, Micene
XIV secolo a.C: veduta interna della cupola
Fonte: <http://www.momondo.tw/inspiration/holiday>
Consultazione: 20 Aprile 2017

1.1 Inquadramento storico

Tra le varie tipologie architettoniche, le prime che utilizzarono la copertura a cupola furono le sepolture a Tholos, tipiche dell'architettura funeraria micenea. Queste tombe ebbero una larga diffusione in tutta l'area mediterranea, erano scavate nella collina e vi si accedeva attraverso un lungo corridoio chiamato "dròmos" che conduceva in un'aula circolare contenente il sarcofago. La sala presentava una pseudocupola per la quale si intende una copertura costruita attraverso la sovrapposizione di blocchi di pietra squadrati e smussati disposti in aggetto su filari concentrici a giacitura orizzontale (e non radiale, come nelle cupole propriamente dette). L'esempio più significativo di questa tipologia è la tomba chiamata "Tesoro di Atreo",³ è situata nella zona archeologica di Micene, risalente al 1400 a.C il suo diametro interno è di 14,50 m e l'altezza di 13,50m. La cupola è formata da 33 filari di pietra apparecchiati in aggetto. Così facendo non occorre utilizzare supporti lignei durante la messa in opera. L'impermeabilizzazione è data da uno strato d'argilla ricoperto a sua volta da terra, formando esternamente un tumulo⁴.

Successivamente i romani con la scoperta del conglomerato cementizio riuscirono a edificare delle vere e proprie cupole, che diventano, insieme alle volte, le coperture preferite dai costruttori. Nelle cupole, l'opus caementicium era un prolungamento aggettante del muro verticale sottostante che sporgendo verso l'interno copriva lo spazio interessato. Allo stesso tempo si configurava come una calotta monolitica appoggiata all'imposta. Il procedimento di realizzazione graduale per anelli orizzontali di conglomerato trae origine dalle coperture di pietra a secco nelle quali i filari sovrapposti si facevano sporgere a sbalzo come nelle Tholos precedentemente citate. La tecnica costruttiva vede il suo massimo apice nella realizzazione del Pantheon, uno degli edifici più caratteristici del mondo romano, voluto da Adriano nel 118 d.C. Questo edificio rappresentò una svolta per tutte le fabbriche sacre costruite in precedenza. All'esterno si presenta con un ampio corpo cilindrico privo di apparato decorativo sul quale si innesta una cupola emisferica, "la più grande cupola in muratura mai

³ G. Dorfles, M. Ragazzi, C. Maggioni, M.G. Recanati, *Storia dell'arte 1*, dalle origini al trecento, Edizioni Atlas, 2006.

⁴ J.-J. Terrin, *Cupole, simbolo tecniche storia*, Milano: Jaca Book, 2006



Fig. 2: Pantheon, Roma
118 d.C, veduta interna della cupola
Fonte: <http://www.theromanpost.com/2014/03>
Consultazione: 23 Giugno 2017



Fig. 3: Santa Sofia di Costantinopoli, Istanbul
532-537 d.C , veduta interna della cupol
Fonte: <http://www.turismoturcia.com/basilica-di-santa-sofia-aya-sofya/>
Consultazione: 20 Aprile 2017

costruita⁵". Il suo diametro esterno è di 43,21m pari all'altezza ed internamente è formata da ventotto fusi verticali. Il cilindro che sostiene la cupola ha uno spessore pari a 6m. La struttura di quest'ultima si compone di lacunari sovrapposti concentricamente su cinque file fino all'oculo.⁶

Il modello romano fu superato da quello bizantino che prevedeva spazi cupolati non più esclusivamente a pianta circolare ma anche quadrata grazie all'introduzione di elementi di raccordo, costituiti da superfici angolari concave chiamate pennacchi, che inseriti ai quattro angoli superiori del volume quadrato, formano l'imposta della cupola. Uno degli esempi più eloquenti è la chiesa di Santa Sofia a Istanbul, costruita tra il 532 d.C e il 537 d.C. Voluta dall'imperatore Giustiniano, fu chiamata ad essere la più grande chiesa della cristianità e i progettisti coinvolti per la realizzazione dell'opera furono Antemio Tralles e Isidoro di Mileto. A 51 metri di altezza sorretta da quattro grandi pilastri in pietra dove si impostano quattro archi a tutto sesto troviamo la cupola di trentuno metri di diametro.

Considerando la tipologia costruttiva adottata dai progettisti, la cupola di Santa Sofia che presenta delle nervature potrebbe essere considerata l'antenata di quella di Santa Maria del Fiore a Firenze. Queste vengono realizzate in contemporanea al riempimento, diversamente da quelle del modello romano, che, dapprima, realizza delle rigide nervature in laterizio e successivamente le chiude con il getto di conglomerato. Inoltre, diversamente da quella fiorentina, le nervature della cupola giustiniana sono realizzate con lo stesso materiale usato per i tamponamenti. In tal modo, la struttura risulta essere monolitica determinando così una diminuzione della spinta⁷.

Per quanto riguarda la cupola del duomo di Santa Maria del Fiore, la più grande realizzata in muratura tradizionale, nel 1418 fu oggetto di un bando di concorso vinto da Brunelleschi. La sua cupola non era semisferica come quella progettata per la sacrestia di San Lorenzo perché le dimensioni della fabbrica ereditata non gli permettevano l'uso di questa forma. Traendo spunto dalle tecniche gotiche, pensò di inserire otto costoloni ogivali agli otto angoli del tamburo a pianta ottagonale, procedendo alla costruzione, senza l'ausilio di

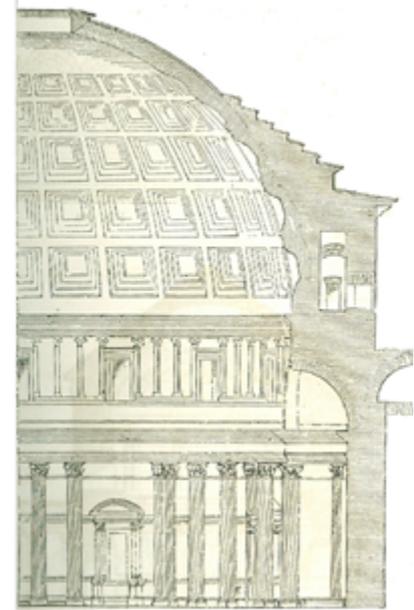


Fig. 4: Pantheon, Roma, sezione
Fonte: -G.A Breymann, Costruzioni
in pietra e Strutture Murarili,
Milano, Editrice Vallardi 1885, Pag 151

⁵ F.Lucchini, *le cupole di Adriano*, in C. Conforti (a cura di), *Lo specchio del cielo*, Milano: Electa, 1997 (pag 9)

⁶ Ibidem, nota 5, pag 12

⁷ R. Gulli, G. Mochi, *il modello bizantino. La cupola di Santa Sofia a Costantinopoli* in C. Conforti (a cura di), *Lo specchio del cielo*, Milano: Electa, 1997 (pag 24)

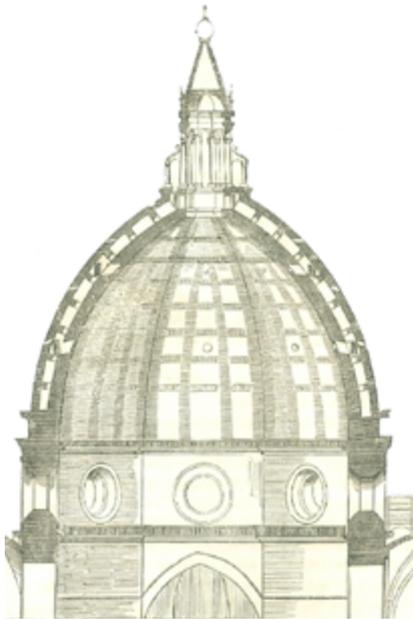


Fig. 5: Santa Maria del Fiore, Firenze, sezione

Fonte: -G.A Breymann, *Costruzioni in pietra e Strutture Murari*, Milano, Editrice Vallardi 1885, Pag 158



Fig. 6: San Pietro, Roma, sezione
Fonte: -G.A Breymann, *Costruzioni in pietra e Strutture Murari*, Milano, Editrice Vallardi 1885, Pag 158

centine, per strati successivi, che collegavano le nervature tra di loro. Lo stesso Brunelleschi ovviò alle difficoltà dettate dalle elevate dimensioni dello spazio che la cupola doveva coprire utilizzando una struttura autoportante. Tra i vari espedienti di sua invenzione ricordiamo la muratura a “spinapesce”, anelli di mattoni arcuati e due calotte, una di spessore maggiore con funzione prevalentemente portante e l'altra, invece, più sottile e di protezione. Tra le due calotte indipendenti è presente un vuoto che consentiva agli operai di muoversi e rifornirsi in sicurezza. Per tali motivi questa cupola è considerata simbolo di innovazione e tecnica.

I lavori per la sua realizzazione iniziarono nel 1420 e terminarono nel 1436, con la chiusura dell'anello prima della lanterna.⁸

Tra le più grandi cupole mai costruite, sicuramente è di assoluto interesse quella della Basilica di San Pietro in Vaticano. L'arduo incarico per la sua progettazione venne affidato a Michelangelo da Papa Paolo III nel 1547, il quale non si occupò solamente della cupola, ma apportò delle modifiche alla Basilica stessa, ai precedenti interventi del Bramante, del Sangallo e del Peruzzi, di Raffaello e di Fra Giocondo. Per quanto riguarda la cupola, Michelangelo ideò un progetto colossale, affinché guardandola trasmettesse l'idea di potenza. Purtroppo, egli non riuscì a vedere l'opera compiuta perché alla sua morte, avvenuta nel 1564, si era giunti soltanto all'imposta. Successivamente vennero apportate ulteriori modifiche, mantenendo comunque il disegno michelangiolesco; essa fu costruita in soli 22 mesi da Giacomo della Porta affiancato da Domenico Fontana. Come la cupola brunelleschiana di Santa Maria del Fiore, la cupola della Basilica Vaticana presenta una doppia calotta, una lanterna di coronamento e costoloni che in questo caso sono portanti, mentre nel Duomo Fiorentino, ogni componente partecipa alla resistenza statica. In San Pietro la cupola è considerata come una vera e propria scultura che lega arte e tecnica. L'alto tamburo è ritmato da colonne binate che realmente sono le terminazioni di grossi contrafforti che hanno il compito di irrigidire la struttura. Inoltre ad essi sono interposte delle grandi aperture finestrate

⁸F.P. Fiore, *Storia dell'architettura italiana, quattrocento*, Milano: Electa, 1998
L. Ippolito, *Cupole Toscane dei secoli XV e XVI*, in C. Conforti (a cura di), *Lo specchio del cielo*, Milano: Electa, 1997 (pag 87)
-J.-J. Terrin, op. cit. alla nota 4, pag 9



Fig. 7: Cupola della cattedrale di
Santa Maria del Fiore
Firenze
1420 - 1436
Fonte: [http://www.socialpost.info/
wp-content/uploads/santama-
ria-del-fiore.jpg](http://www.socialpost.info/wp-content/uploads/santamaria-del-fiore.jpg)
Consultazione: 23 Giugno 2017



Fig.8:Cupola della Basilica di San Pietro,
Roma
1547-1590

Fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Cupola_di_San_Pietro
Consultazione: 20 Aprile 2017

alternativamente centinate o timpanate⁹. Con il barocco l'apparato decorativo delle cupole acquista un significato sempre più importante, statue, bassorilievi, pennacchi che arricchiscono queste strutture spesso non hanno soltanto una funzione decorativa ma anche strutturale, rendendole delle vere e proprie sculture, dei gioielli degni di nota. In Italia, come anche nel resto d'Europa, riscontriamo un'intensa diffusione di cupole monumentali che impreziosiscono il patrimonio architettonico di molte città. Un esempio d'oltralpe è la cupola della Cattedrale di Saint Luis des Invalides a Parigi, facente parte del complesso dell'Hotel des invalides, voluto da Luigi XIV nel 1646. L'edificio si componeva di due parti, una dedicata ai soldati, l'altra la cappella regia, per i visitatori e per il re. Questa è coperta da una cupola composta da tre calotte di cui la prima ammirabile dall'esterno, sorretta da una struttura lignea e ricoperta da piombo dorato, è sormontata da una lanterna, diventando elemento riconoscibile nel paesaggio parigino. Al di sotto di questa troviamo una calotta affrescata e ancora più in giù un'ulteriore cupola troncata all'altezza delle finestre per far entrare la luce. Un ulteriore esempio parigino è la chiesa di Saint Genevieve conosciuta come Pantheon. I lavori di costruzione iniziarono nel 1756, su incarico di Luigi XV e progetto di Soufflot con la nuova tecnica costruttiva della pietra armata cosicché la spinta della cupola esercitata sulla struttura sottostante è minore. Questo tempio è chiaramente ispirato alla chiesa di Saint Paul a Londra, progettato da Wren e costruito tra il 1675 e il 1710; Le sue tre calotte sovrapposte richiamano quelle degli Invalides di Parigi su citate. Tra quella esterna lignea e quella interna in muratura, se ne inserisce un'altra sempre in mattoni come struttura ausiliare che ha il compito di reggere la cupola esterna e la lanterna, ma questa non può essere considerata una cupola vera e propria perché più simile ad un cono, esternamente l'alto tamburo è impreziosito da colonne con capitelli d'ordine corinzio che nascondono i grossi contrafforti¹⁰. Oltre a ricordare la cupola della Basilica di San Pietro, potrebbe quasi sembrare un tempio monoptero e periptero, che richiama l'architettura del tempietto di San Pietro in Montorio del Bramante. Con l'Ottocento, i metodi

⁹ Il Cricco Di Teodoro, *itinerario nell'arte, vol 3*, G. Cricco, F.P. Di Teodoro, Bologna: Zanichelli, 2014

- M.G. D'Amelio, *N. Marconi, Le cupole del XV e XVI secolo a Roma e nel Lazio*, in C. Conforti (a cura di), *Lo specchio del cielo*, Milano: Electa, 1997 (pag 135)

- J.J. Terrin, op. cit. alla nota 4, pag 9

¹⁰ Ibidem, J.J. Terrin, nota 9, pag. 16

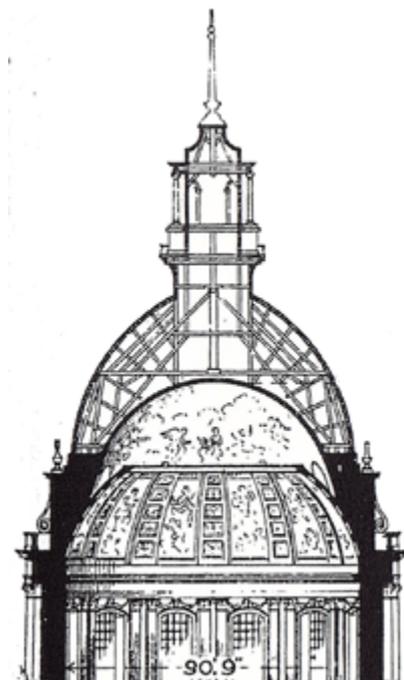


Fig. 9: Saint Louis des Invalides, Parigi, sezione

Fonte: Enrico Mandolesi, *Edilizia*, 4° volume, Torino, UTET editori, 1991, pag 281



Fig. 10: Cupola della cappella Saint
Louis des Invalides, Parigi
1646 -1708

Fonte: <http://www.panoramio.com/photo/54621792>

Consultazione: 20 Aprile 2017



Fig. 11: Chiesa di Saint Genevieve, Parigi
1756 - 1789

Fonte: [http://www.tourasticoparigi.com/
content/guida-turistica/2/36/Pantheon](http://www.tourasticoparigi.com/content/guida-turistica/2/36/Pantheon)
Consultazione: 23 Giuno 2017

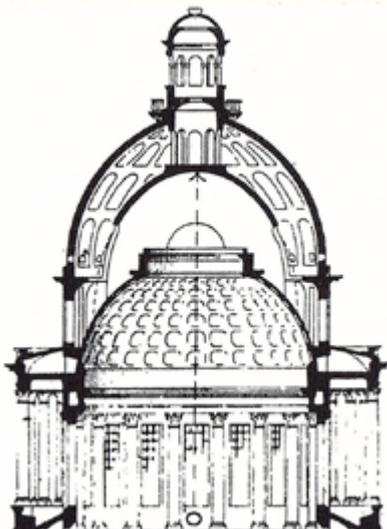


Fig. 12: Cupola di Saint Genevieve, Parigi,
sezione

Fonte: Enrico Mandolesi, Edilizia, 4° volume,
Torino, UTET editori, 1991, pag 281



Fig. 13: Cattedrale di Saint Paul, Londra
1675 - 1710
Fonte: https://www.stpauls.co.uk/SM4/Mutable/Uploads/generic_image/DP073155_8231538.jpg
Consultazione: 20 Aprile 2017

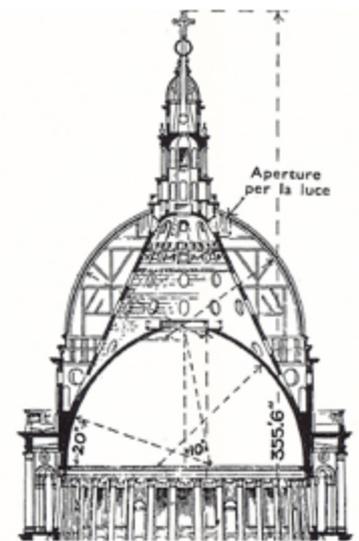


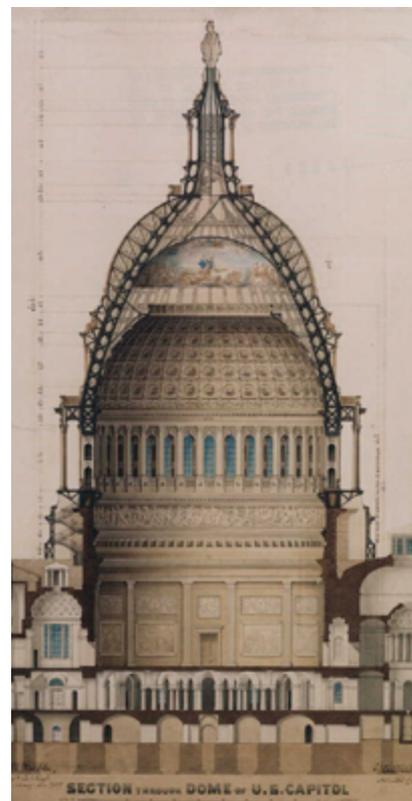
Fig. 14: Cupola di Saint Paul, Londra,
sezione
Fonte: Enrico Mandolesi, Edilizia, 4° volume,
Torino, UTET editori, 1991, pag 281

costruttivi cambiano e si evolvono, tuttavia si guarda al passato per cercare i linguaggi architettonici che esprimano al meglio la funzione che racchiude l'edificio. Una delle cupole più rappresentative di questo secolo è il palazzo del Campidoglio a Washington voluto dopo che la città divenne capitale federale. Nel 1790 fu bandito un concorso, il progetto vincitore era di un medico, poi successivamente modificato da Hallet architetto francese che diede all'edificio una chiara impronta parigina con una cupola formalmente uguale a quella di Saint Genevieve. Nel 1803 Latrobe eredita la direzione lavori e apporta delle modifiche al prospetto con delle aggiunte di linguaggio classico. Inserisce un portico dorico greco nella parte inferiore e un loggiato con colonne sottili, mentre la cupola rimane quella del progetto originario costituita da una tripla struttura metallica composta da trentasei costoloni nascosti dall'involucro esterno in acciaio¹¹. Con il campidoglio americano vediamo come forme precedentemente usate solo per edifici di culto in questo caso le cupole, adesso si adoperino anche per fabbriche con funzioni laiche, questo perché la cupola assume un significato simbolico di unità in cui la comunità si riconosce.

Fig. 15: Sezione
cupola Campidoglio,
Washington
Thomas U. Walter
1859

Fonte: <https://govbooktalk.gpo.gov/2013/01/24/the-untold-story-behind-the-engineering-of-washington-dc/>

Consultazione:
27 febbraio 2018



¹¹N. Pevsner, *Storia e caratteri degli edifici*, Roma: Fratelli Palombi Editori, 1986
J.J. Terrin, op. cit. alla nota 4, pag 9



Fig. 16: Campidoglio, Washington
1803 - 1887

Fonte: <https://it.wikipedia.org/wiki/Campidoglio>

Consultazione: 20 Aprile 2017

1.2 Tipologie e Tecniche costruttive

Le cupole, come detto precedentemente, sono delle vere e proprie volte, queste hanno delle caratteristiche ben definite che devono essere rispettate. Nelle cupole non sempre riusciamo ad apprezzare dall'esterno l'estradosso perché è coperto, questa tipologia viene detta "cupola intradossata", mentre quando l'estradosso è visibile, allora parliamo di "cupole estradossate". Quando pensiamo ad una cupola di solito la nostra mente si sofferma soltanto alla parte voltata, senza considerare tutto l'apparato che permette alla "cupola di star su". Questo è composto da diverse parti, anche se non sempre sono tutte presenti, tuttavia la presenza di alcune di esse è di fondamentale importanza, come i piloni che servono a sostenere tutto il complesso della cupola con i suoi carichi verticali e le spinte orizzontali, gli archi d'imposta, sopra ai quali spesso si trovano dei raccordi (pennacchi) che fungono da elementi di collegamento per garantire il passaggio da un pianta poligonale o quadrata a un impianto rotondo, sul quale se è previsto, si imposterà il tamburo che ha il compito dell'illuminazione interna grazie alle sue aperture oltre a rendere la cupola più alta. Al disopra del tamburo troviamo la calotta con l'anello di cervice che, come nel Pantheon, può rimanere aperto formando un oculo oppure essere coperto da una lanterna, elemento svettante finestrato.¹²

La cupola ha avuto diversi sviluppi soprattutto in base all'area geografica in cui sorgeva. In Oriente conserva il profilo semicircolare, tondeggiante, rafforzato in alcuni casi da nervature come in Santa Sofia ad Istanbul, mentre troviamo poco sviluppato l'utilizzo di tamburi e lanterne. In Occidente le cupole tendono ad alzarsi, grazie all'uso di elementi come tamburo e lanterna che conferiscono maestosità al complesso e portano luce al suo interno. Per rispondere a uno dei requisiti base ovvero quello di essere ben visibile e apprezzabile sia internamente che esternamente, le superfici di intradosso e estradosso devono avere specializzazioni differenti, che nel tempo sono diventate sempre più caratterizzanti delle stesse, tanto da scindersi in due superfici distinte. L'una si mostra esternamente e deve attrarre lo sguardo oltre ad avere la funzione di essere impermeabile per coprire la superficie interna da infiltrazione e degradi, che nella maggior parte dei casi si presenta affrescata o decorata con stucchi e mosaici.

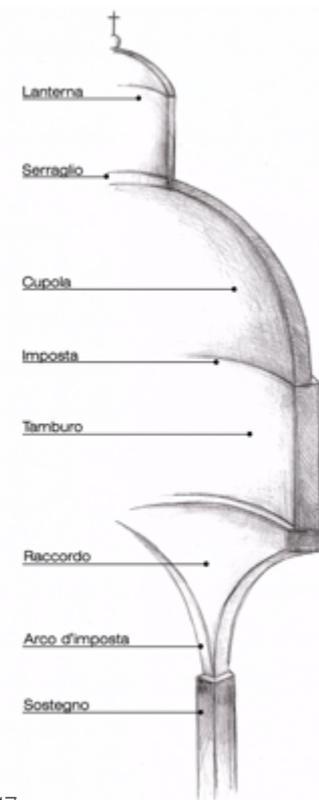


Fig. 17

¹²L. Margani, *Archi e volte in muratura*, Caltanissetta: Lussografica edizioni, 2009

Come prima soluzione si ha la cupola intradossata, ovvero la cupola viene coperta dal tiburio, a sua volta coperto da un tetto spiovente, che nasconde alla vista le soluzioni di irrigidimento della struttura con nervature e setti. Questa soluzione diede il via alla tipologia a creste e vele, evolvendosi nel tempo si tramutò in un sistema a due involucri. Le superfici di intradosso e estradosso ebbero compiti ben precisi riservando la funzione protettiva alla superficie di estradosso, e l'intercapedine che si formava ospitava l'ossatura portante, formata da costoloni e nervature. Quindi la parte strutturale viene celata non più dal tiburio come avveniva precedentemente ma da una seconda calotta. Successivamente si affermò la tipologia a costoloni che poteva essere a doppio involucro o una singola calotta, usata maggiormente per le cupole di grandi dimensioni. Nata per la necessità di costruire queste coperture senza l'ausilio di centine, troppo grandi e costose¹³. I costoloni sono archi che hanno il compito di irrigidire la struttura, canalizzano gli sforzi che vengono trasmessi alle parti inferiori della struttura (ossa della macchina), uno degli esempi più interessanti di cupola a una calotta con costoloni è quella di Santa Sofia a Istanbul dove sono presenti quaranta costoloni. Mentre quella a due calotte costolonate ebbe la massima espressione con le cupole di Brunelleschi e Michelangelo.

Se si volesse compiere una classificazione delle tipologie di cupole esistenti, ci si potrebbe riferire a quella fatta da Margani nel suo testo "Archi e volte in muratura" dove l'autore classifica le cupole in base alle loro geometrie di assetto in pianta, individuando cinque categorie: a pianta quadrata, ottagonale, a 12 lati, a 16 lati, a schema circolare. Ulteriori otto categorie in base agli schemi statico architettonici, e altre dieci in base al loro profilo geometrico¹⁴. Ulteriori classificazioni è possibile trovarle nel quarto volume del testo "Edilizia" di Enrico Mandolesi, quando parla di coperture voltate fa un vasta classificazione in base al rapporto tra la forma della volta con lo spazio interno che copre, avendo così volte a intradosso concavo, convesso, misto. Volte con estradosso piano, gradinato, curvo, quest'ultime possono risultare apparenti quando la superficie dell'estradosso è visibile, occultate quando la curva d'estradosso non è visibile. Altra classificazione è quella basata sulla genesi geometrica della volta, come ad esempio le volte a superficie

¹³ L. Ippolito, *Aspetti costruttivi e strutturali delle cupole toscane dei secoli XV e XVI*, in C. Conforti (a cura di), *Lo specchio del cielo*, Milano: Electa, 1997 (pag 135)

¹⁴ L. Margani, op. cit. alla nota 12, pag. 22

di rivoluzione, ovvero volte generate dalla rotazione di una curva intorno ad un asse verticale, come accade per le cupole. Troviamo ancora volte semplici o composte, classificazioni in base al comportamento statico: volte a conci aggettanti dove la curvatura si ottiene disponendo filari di conci aggettanti in successione, volte con funzionamento ad arco, Volte a cesto ottenute con una trama di elementi lineari che giacciono nello spessore della volta, Volte tese; queste si dividono in base all'azione che la volta esercita sugli elementi che la sostengono, avendo così volte-coperchio quando trasmettono solo forze verticali, volte spingenti queste trasmettono anche le azioni orizzontali, volte caricate quando oltre al proprio peso supportano forze aggiuntive, come l'azione del vento o il carico della neve, infine le volte non caricate non soggette ad altri carichi oltre al peso proprio. Ultima classificazione che Mandolesi fa è quella legata ai materiali per la costruzione, partendo da quelle in laterizio e pietra, a impasto argilloso, in calcestruzzo, fino alle tecniche più nuove di costruzione con ordito di cavi di acciaio o volte in polycarbonato¹⁵.

Una delle cupole più importanti risalente al 118 a.C, che segnò un punto di svolta nel metodo costruttivo e tipologico è quella del Pantheon. Aspetto molto interessante di questa cupola è il metodo e la tecnica costruttiva adoperata, cioè l'opus caementicium, è il primo modo costruttivo adoperato dai romani per l'edificazione di volte, infatti può essere considerato come il precursore di tutte le altre tecniche successive.

L'uso del conglomerato cementizio e del mattone cotto consente agli architetti romani uno sviluppo delle forme. Ciò che fin ora era stato piatto acquista un aspetto curvilineo, le coperture piane vengono sostituite dalle volte o dalle cupole, e l'architrave viene superato dall'arco. L'esteso impiego di queste nuove tecniche e materiali rese essenziale l'uso della malta; composta da calce, sabbia, acqua e pozzolana. Gli artigiani romani furono abili produttori di calce, nella sua cottura in modo da rendere questo legante qualitativamente ottimo. Vitruvio parlando di malta nel suo trattato "De Architettura" suggerisce le proporzioni ottimali di calce e sabbia, ovvero: tre parti di sabbia e una di calce qualora la sabbia utilizzata fosse di cava, mentre due di sabbia e una di calce se la sabbia adoperata provenisse dal mare o dal fiume, inoltre consigliava l'aggiunta ulteriore di aggregato setacciato di dimensioni maggiori come

ROTONDE

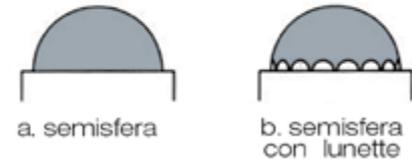


Fig 18

RIALZATE

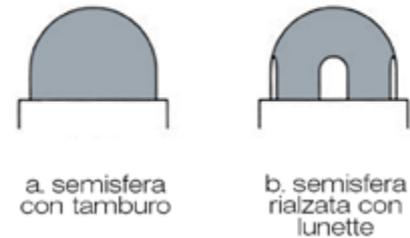


Fig 19

A FUSI

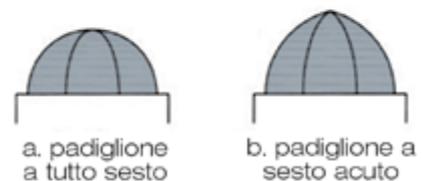


Fig 20

Fig: 18, 19, 20, 21, 22
 Fonte: L. Margani, *Archi e volte in muratura*, Caltanissetta: Lussografica edizioni, 2009

¹⁵E.Mandolesi, *Edilizia, 4° volume*, Torino: UTET editori, 1991

A DOPPIO INVOLUCRO

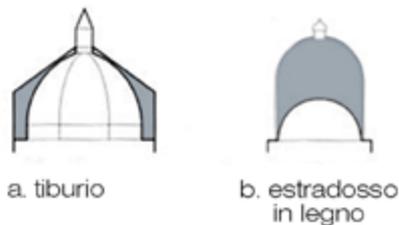


Fig 21



Fig 22

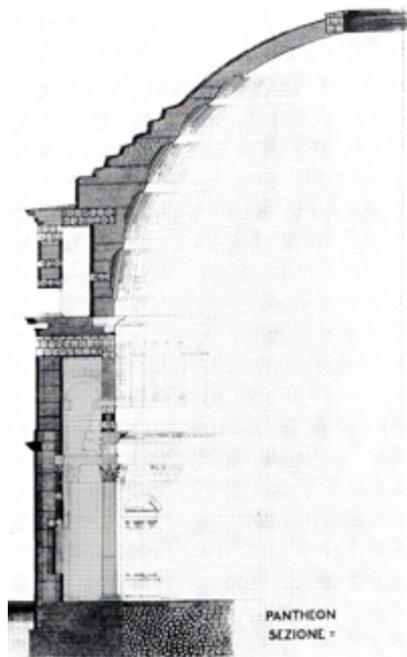


Fig. 23: Pantheon, Roma, sezione
Fonte: Lo specchio del cielo, a cura di C. Conforti, Milano, Electa, 1997, Pag 12

pezzi di coccio, per migliorare la composizione del conglomerato cementizio¹⁶. I Romani poterono usare largamente la copertura a cupola grazie alla elevata lavorabilità e adattabilità della tecnica costruttiva del opus caementicium, che permetteva la realizzazione di queste strutture con diverse varianti, dalla cupola ottagonale a quella emisferica del Pantheon. Per la realizzazione di quest'ultima furono utilizzate delle centine, anche se non conosciamo la forma o come queste furono realizzate, se una struttura unica ben rigida poggiata sul piano d'imposta della cupola o delle centine parziali che venivano man mano spostate e appoggiate sulle parti già costruite. Però si può ipotizzare la forma guardando l'intradosso della cupola nella quale è riconoscibile l'impronta lasciata da essa, infatti all'interno la forma agli strati di conglomerato è data dalla centina curva utilizzata perché il getto venne effettuato direttamente su di essa. Per la sua edificazione il conglomerato venne gettato a strati, quando quello sottostante era sufficientemente asciutto e in grado di resistere al peso degli strati successivi, si procedeva con il nuovo getto. La prima parte della calotta è il proseguimento del muro verticale sottostante, dopo questa alta 8,7 metri si ha un arretramento della parte esterna, così da formare un tamburo alto 2 metri di minore diametro. Da questo punto si nota un graduale restringimento del diametro degli strati sovrapposti di conglomerato così da conferire all'estradosso una forma a gradoni. Inoltre così facendo si registra un restringimento dello spessore della sezione. La prima parte dei gradoni che corrisponde al tamburo e al primo gradone è realizzata in muratura piena, i due anelli successivi realizzati da "caementa" sono costituiti da strati di piccoli pezzi di tufo e mattoni alternati, legati dalla malta che in questa porzione della calotta raggiunge un considerevole spessore. Nei gradoni successivi si registra una diversa composizione dei "cementa" perché si trovano strati di tufo e cruma (lava bollosa). Al termine dei gradoni l'estradosso della cupola assume un aspetto sferico e la sezione della calotta raggiunge un spessore di un metro e mezzo e gli strati "opus caementicium" proseguono fino alla quota dell'occhio dove la cupola finisce con un cerchio formato da una fila doppia di mattoni bipedali, che resiste agli sforzi di compressione. Questa parte è ricoperta esternamente da "semilaters" e resa impermeabile da una

¹⁶ G. Giovannoni, La Tecnica delle Costruzioni Romane a Volta. Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze 1929

G. Dorflès, M. Ragazzi, C. Maggioni, M.G. Recanati, op. cit. alla nota 3, pag 9.

strato di calcestruzzo chiamato “opus signinum”. Il Pantheon riveste un ruolo molto importante per la costruzione delle successive cupole. Infatti molte di queste venivano costruite con metodo molto simile se non uguale a quello utilizzato nella calotta adrianea, anche se queste avessero dimensioni ridotte. Come quelle realizzate nella villa di Tivoli, volute anche in questo caso da Adriano. Il metodo costruttivo qui è identico: strati orizzontali di conglomerato e “caementa”, con all’imposta una piano di mattoni bipedali, e cambiando la composizione del caementa dal muro alla calotta, riducendo anche la sezione così da alleggerire la struttura verso il centro¹⁷.

Ulteriore tecnica costruttiva adoperata dai romani soprattutto nelle regioni africane è quella a tubi fittili, rimane l’incognita dell’origine di questa tecnica costruttiva che ancora oggi non è molto chiara. Forse l’avvio fu dato dalla mancanza di materie prime come il legno per la centinatura e per la costruzione, dovuto ad un crescente sviluppo delle opere di edilizia che l’impero romano ebbe dal II secolo d.C. Anche se si trovarono materiali sostitutivi ad esso come paglia, canne, o tegole e mattoni, comunque non si eliminava il fabbisogno del legname perché le superfici di centinatura non erano completamente autoportanti. Fondamentale per queste nuove centine era l’elemento con la quale venivano costruite ovvero un particolare laterizio a forma di bottiglia senza fondo, in pratica un cilindro in argilla fornito di beccuccio su di un lato, che veniva prodotto con il semplice utilizzo del tornio. Per la realizzazione delle superfici bastava incastrare l’uno con l’altro questi elementi riempiti di malta di gesso, questa, e lo strato applicato esternamente permetteva di ancorare ognuno di questi elementi nella posizione giusta per creare il profilo della volta o cupola desiderata. Formando, così, delle superfici totalmente autoportanti che non necessitavano di legname per il sostegno. Quando questa tecnica arrivò in Italia acquistò un’importanza maggiore dal momento che i tubi non venivano più utilizzati per la realizzazione delle centine, ma diventarono materiale principale per la realizzazione delle volte stesse. Ci si rese conto che queste strutture erano già di per sé delle volte vere e proprie, rendendo superfluo anche l’utilizzo dell’opus caementicium che aggiungeva un grosso peso superfluo alle strutture portanti. Si poterono, perciò, creare edifici con strutture murarie più leggere con più aperture o colonnati perché il carico della copertura era

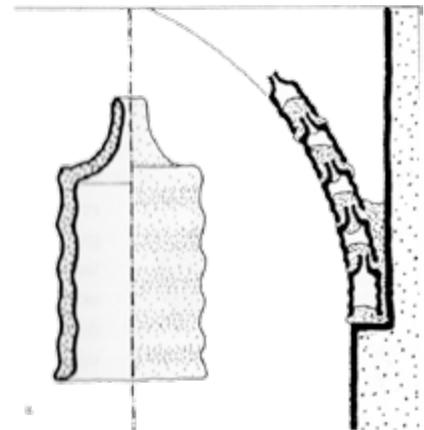


Fig. 24: illustrazione, Volte con tecnica a tubi fittili
 Fonte: Lo specchio del cielo, a cura di C. Conforti, Milano, Electa, 1997, Pag

¹⁷F. Lucchini. op. cit. alla nota 5, pag. 12

notevolmente minore. Per quanto riguarda la realizzazione delle cupole con questa tecnica, essa consiste nel creare strati sovrapposti di cerchi orizzontali chiusi di tubi fittili con il diametro decrescente man mano che si arriva alla sommità della cupola. La genesi di questo particolare laterizio a forma di bottiglia e la tecnica costruttiva a tubi fittili è da ricercare in un'altra tecnica simile, usata per la copertura a volta dei forni dei panifici e dei ceramisti, che consisteva nel coprire questi spazi con delle coppe di argilla inserite l'una dentro l'altra con lo stesso principio dei tubi fittili. L'uso di questa tecnica si estenderà per ben cinque secoli, fino al VII secolo d.C quando l'utilizzo andrà, poi, scomparendo¹⁸.

Per quanto riguarda le cupole “sferiche” a calotta semplice i materiali utilizzati per la loro realizzazione usualmente sono mattoni in cotto e pietre (massi). La calotta viene costruita partendo dall'imposta con filari apparecchiati anularmente con assise coniche radiali, ovvero filari concentrici sovrapposti con i relativi giunti verticali sfalsati tra di loro, con letto di posa diretta verso il centro della cupola. Concluso l'anello i conci non possono muoversi poiché la sezione di ogni filare può essere assimilata ad un cuneo diretto in basso, per la forma tronco-conica assunta dai conci. Con questo sistema se la cupola sarà di piccole dimensioni non occorrerà utilizzare centinature, mentre per cupole di grandi dimensioni sarà necessario una centina girevole attorno all'asse, oppure una più ingombrante e costosa centina completa. In sommità la cupola verrà conclusa con un anello di laterizio di irrigidimento formando l'oculo, o con una lanterna come vedremo più avanti.

Le cupole semplici, soprattutto per le grandi coperture, possono risultare composte da due calotte, così facendo il peso risulterà minore. Generalmente per questa tipologia di cupole si utilizzano profili rialzati dove le due calotte si presentano unite solo nel primo tratto “massivo”, e collegate tra loro da nervature. Quest'ultimi elementi diventano più incisivi quando si tratta di cupole composte, ovvero volte a padiglione su pianta poligonale con profilo rialzato, perché li ritroviamo nelle zone di discontinuità all'intersezione dei fusi del padiglione. Questa tipologia è assimilabile ad una cupola semplice, perché quest'ultime, possono essere considerate come volte a



Fig. 25: Cupola con filari apparecchiati anularmente con assise coniche radiali
Fonte: -G.A Breymann, *Costruzioni in pietra e Strutture Murarie*, Milano, Editrice Vallardi 1885, Tav 48

¹⁸ S. Stroz, *La tecnica edilizia romana e paleocristiana delle volte e cupole a tubi fittili*, in C. Conforti (a cura di), *Lo specchio del cielo*, Milano: Electa, 1997 (pag 23)

padiglione impostate su un numero infinitesimo di lati¹⁹.

Ulteriore cupola “sferiche”, però con la variante delle lunette all’imposta, è quella di Santa Sofia a Istanbul. Anche se questo particolare caso è di tipo misto, perché all’esterno si presenta come semisfera lunettata e internamente è una cupola nervata da quaranta costole. L’apparato costruttivo di questa cupola è composto da mattoni di rodi molto pregiati, lo spessore della calotta varia dai 75 cm all’imposta a 60 cm verso il centro. Per fronteggiare la debolezza della struttura generata dalle forature all’imposta, i progettisti pensarono di inserire una fascia continua in muratura che ha la funzione di cerchiatura, mentre le nervature hanno la funzione di convogliare i carichi agli appoggi, così facendo si scaricavano le zone forate delle aperture²⁰. Le costole furono costruite contemporaneamente e con lo stesso materiale dei riempimenti, assicurando un comportamento monolitico della struttura diminuendo le spinte.

E’ importante non tralasciare, le cupole a doppia calotta che segnarono una svolta compositiva e statica nello scenario delle costruzioni di queste coperture. Per analizzarle nello specifico, i casi più importanti, che esprimono al meglio questa tipologia sono la cupola di Santa Maria del Fiore e quella Di San Pietro in Vaticano. Per quanto riguarda la cupola Brunelleschiana, essa presenta un impianto molto semplice perché essendo una volta a padiglione a otto fusi impostata su un tamburo ottagonale, non è stato necessario utilizzare elementi di raccordo. Il profilo della cupola appare molto rialzato per la sua curvatura a sesto acuto equilatero, oltre al fatto di ergersi su di un tamburo e essere provvista di una lanterna. La caratteristica più importante da registrare è sicuramente la presenza del doppio involucro, che permette di inserire all’interno dell’intercapedine la trama di nervature fondamentali per la stabilità della cupola stessa. L’unico elemento strutturale che emerge in estradosso sono i costoloni marmorei, ma questi sono solo una minima parte di tutto l’apparato strutturale presente, poiché all’interno della muratura troviamo nervature secondarie, speroni, cinture lignee e la caratteristica intuizione Brunelleschiana della corda blanda e dell’apparecchiatura dei mattoni a “spina-pesce”, principale espediente per l’autosostentamento della cupola. Il secondo esempio eseguito più di cento anni dopo la

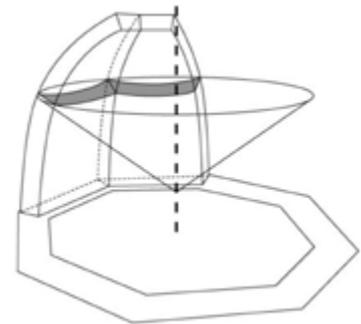
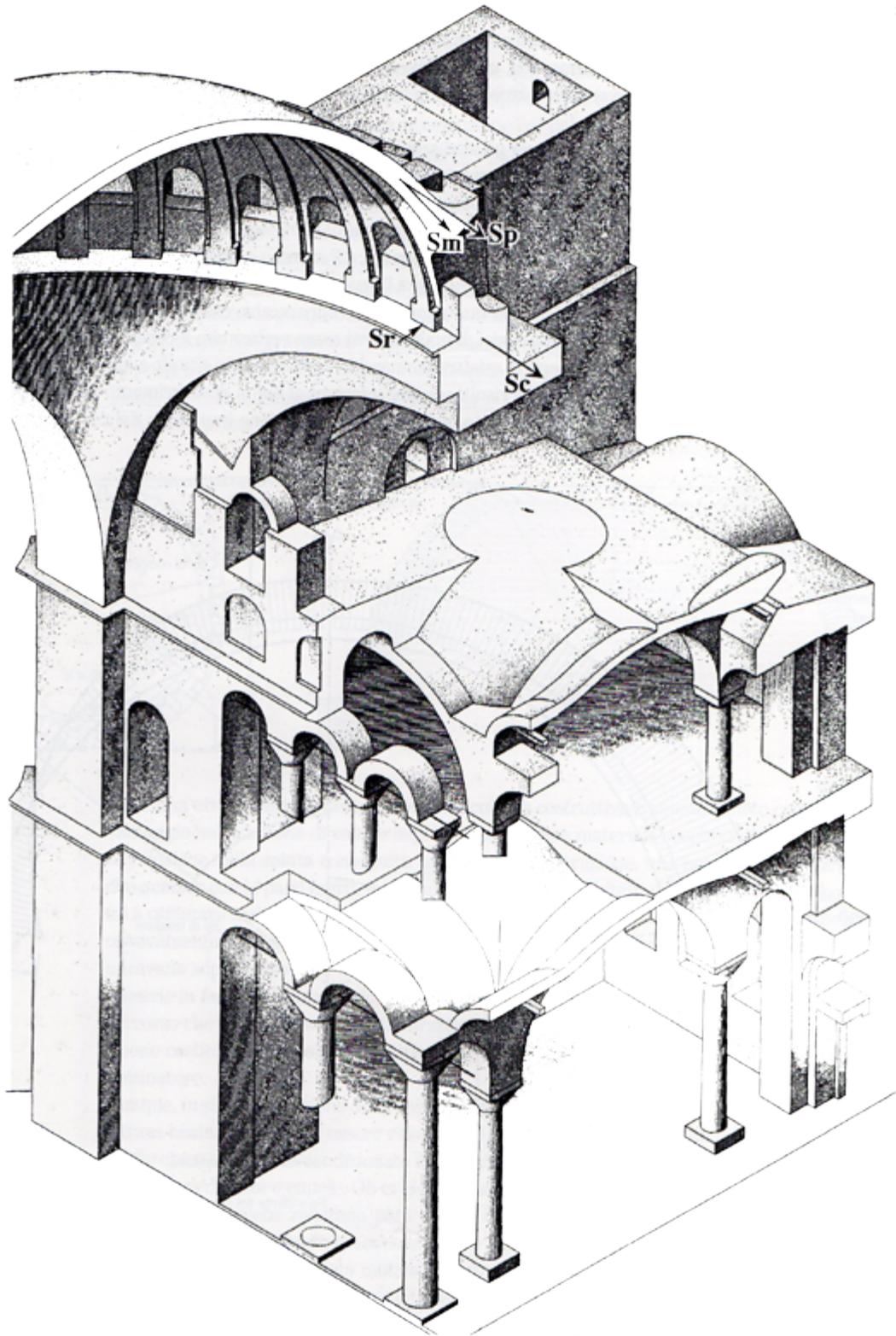


Fig. 26: Disposizione dei filari di mattoni a “corda blanda” ideata da Brunelleschi
Fonte: <http://jsah.ucpress.edu/content/69/1/39.figures-only>

Fig. 27: A fianco: Sezione assonometrica dell’apparato della cupola di S. Sofia a Istanbul.
Fonte: Lo specchio del cielo, a cura di C. Conforti, Milano, Electa, 1997, Pag 48

¹⁹L. Margani, op. cit. alla nota 12 pag. 22

²⁰R. Gulli, G. Mochi, op. cit. alla nota 7 pag. 12



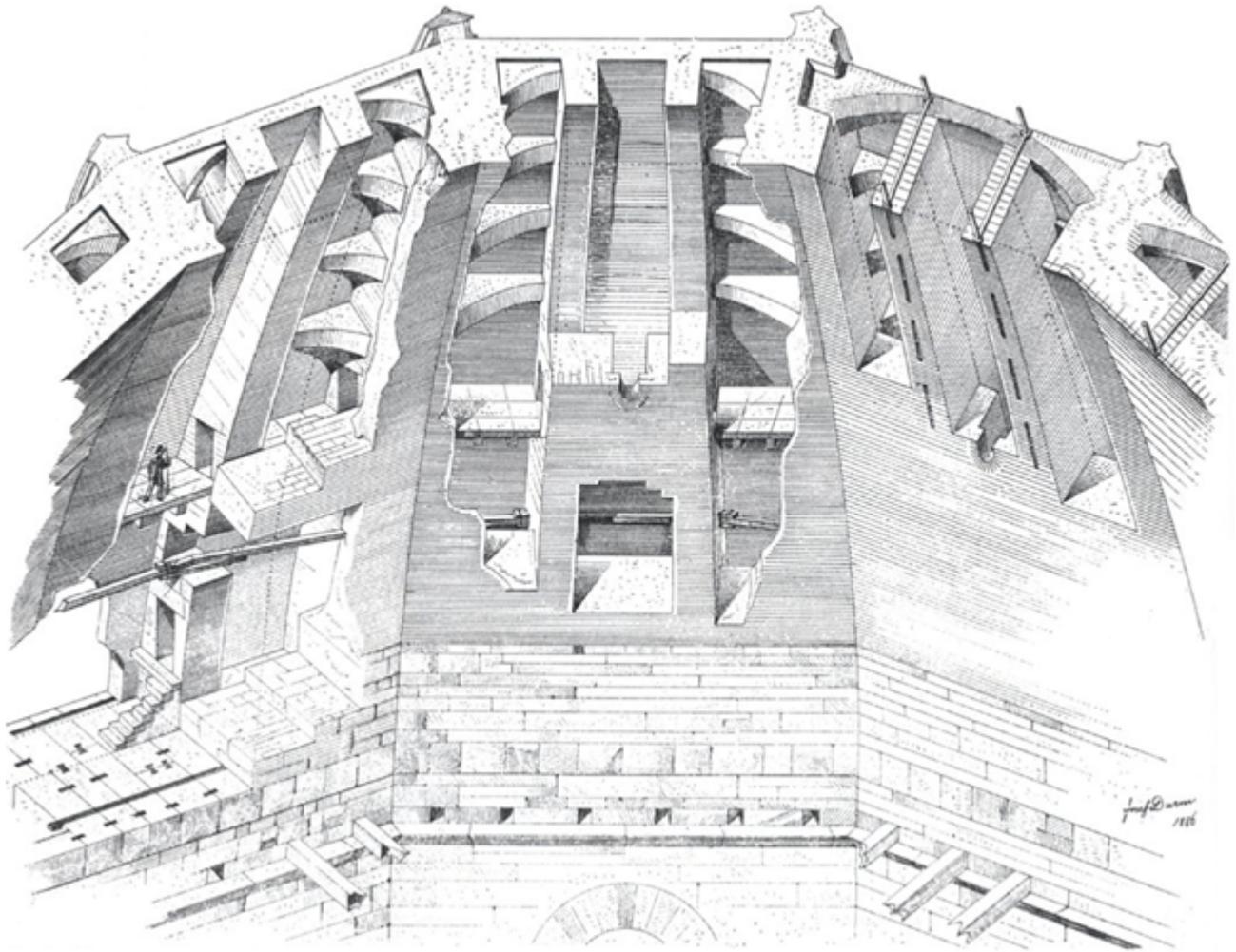


Fig. 28: Durm, Apparato costruttivo della cupola di S. Maria del Fiore, Firenze, Fonte: L. Margani, *Archi e volte in muratura*, Caltanissetta: Lussografica edizioni, 2009

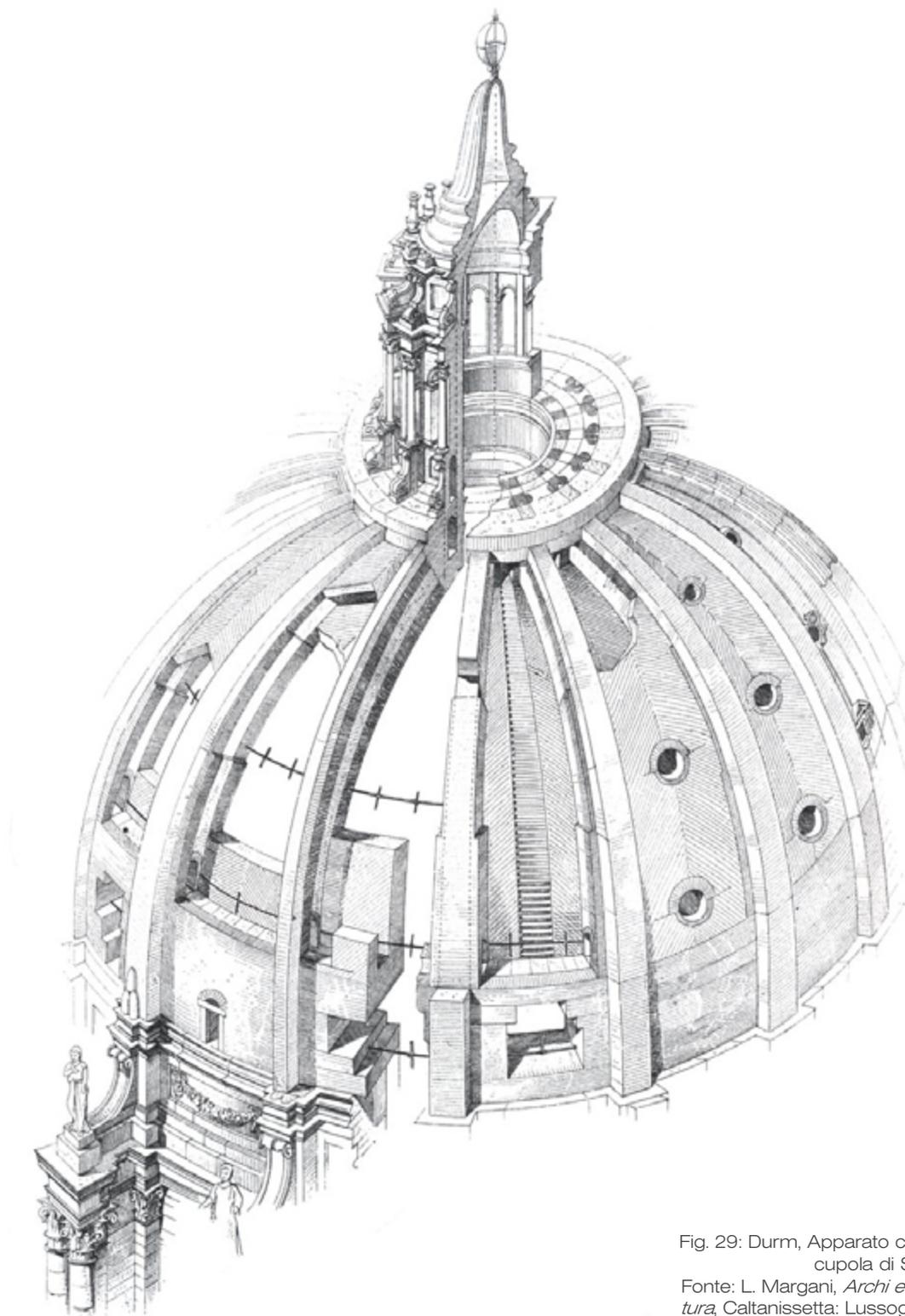


Fig. 29: Durm, Apparato costruttivo della cupola di S.Pietro, Roma, Fonte: L. Margani, *Archi e volte in muratura*, Caltanissetta: Lussografica edizioni, 2009

cupola fiorentina è quello già accennato di San Pietro. Dove Michelangelo si rifà alla cupola di Brunelleschi utilizzando le caratteristiche fondamentali del profilo rialzato con lanterna e tamburo. Le principali differenze ricadono nell'impianto a 16 lati, nell'intercapedine, nel tamburo e nel profilo della curvatura che in San Pietro è semicircolare. Il doppio involucro qui si presenta più largo con l'intercapedine di 5 metri in prossimità della lanterna e più stretto in basso verso l'imposta. Il tamburo sottostante presenta 16 contrafforti costituiti da colonne binate. Ulteriore differenza è la presenza di pennacchi per il raccordo dalla pianta quadrata a quella circolare del tamburo. La cupola vera e propria è scandita da 16 nervature, queste fanno parte di un ossatura meno complessa di quella di Santa Maria del Fiore, perché Michelangelo risolve il problema della spinta inserendo delle cerchiature in ferro, precisamente tre dall'imposta fino a metà altezza. L'illuminazione è garantita dai finestroni presenti nel tamburo e nella lanterna come in quella fiorentina. I due massimi esempi appena citati servirono da modello per la tipologia a "costoloni" per innumerevoli esempi in Italia e Europa. Anche se l'apparato costruttivo si semplifica le dimensioni diminuiscono e i materiali usati cambiano, si raggiunge una perfezione tecnico-costruttiva tale che la cupola può risultare poco o punto spingente come testimonia l'esempio siciliano della cupola di San Giorgio a Ragusa, ma questo specifico argomento verrà approfondito nei capitoli successivi²¹.

²¹ M.G. D'Amelio, N. Marconi, op. cit alla nota 9 pag. 16
- L. Margani, op. cit. alla nota 12 pag. 22



Fig. 30: Cupola del Duomo di San
Giorgio Ragusa
1820
Foto dell'autore

1.3 Componenti

Come detto nel paragrafo precedente, l'apparato delle cupole è composto da diverse parti: i piloni, gli archi d'imposta, i raccordi, il tamburo, la cupola e la lanterna. Tutte queste componenti hanno funzioni specifiche e, non sempre nella casistica esistente, le troveremo presenti insieme, dal momento che il loro utilizzo varia dal luogo geografico in cui sorgono, ma anche da culture architettoniche differenti e dalle varie tipologie di cupole progettate. In questo paragrafo si andranno ad analizzare nello specifico tre componenti: i raccordi, fondamentali per il passaggio da un impianto poligonale a quello tondo dove sorgerà il tamburo o la cupola stessa, il tamburo, elemento di sostegno per la cupola, oltre ad avere il compito di renderla più alta, la lanterna che deve garantire l'illuminazione interna.

1.3.1 Raccordi

Questi elementi di raccordo sono fondamentali per la continuità geometrica e statica e per il passaggio da impianti con perimetri poligonali a impianti circolari. I raccordi ebbero continue evoluzioni con la risultante di avere tipologie differenti. Si passa da semplici soluzioni d'angolo risolte con mensole angolari, a esempi più pregiati con esatte geometrie dei pennacchi sferici. Sempre nel testo di Margani troviamo una classificazione della casistica delle soluzioni d'angolo esistenti, dalle più arcaiche a quelle più raffinate appartenenti al modo islamico. Troviamo raccordi a mensola o scalettati, cilindrici, conici, sferici, speciali, e sesto acuto, frastagliati a stallatiti. Tra i più utilizzati si annoverano sicuramente quelli sferici, questi pennacchi dalla linea elegante vengono ricavati dalla volta a vela, eliminando la parte superiore della calotta. Questo espediente fu utilizzato per ricavare i pennacchi della cupola di Santa Sofia dando origine alla caratteristica composizione delle cupole bizantine con pennacchi sferici su pianta quadrata. Con una pianta quadrata il raccordo che ne risulterà, sarà un pennacchio sferico equilatero. Questa tipologia presenta alcune difficoltà di realizzazione, soprattutto per quanto riguarda la

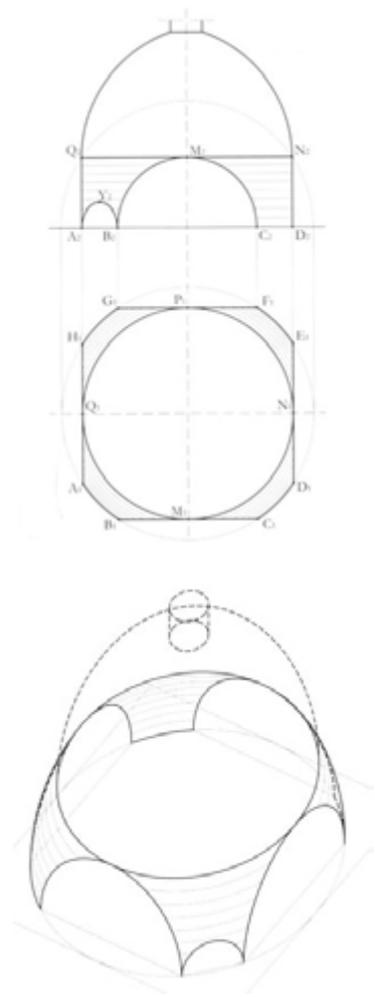
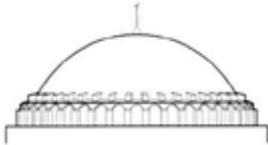


Fig. 31: Pennacchi sferici a base larga, su pianta ottagonale irregolare.
Fonte: L. Margani, *Archi e volte in muratura*, Caltanissetta: Lussografica edizioni, 2009



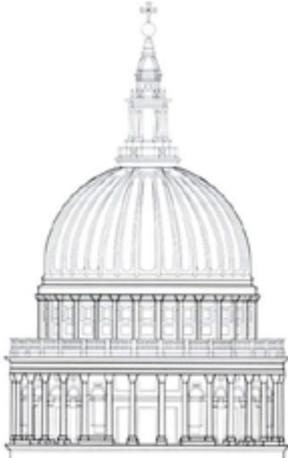
Raccordo a “fazzoletto” (fig 32)



Istanbul, Santa Sofia (fig 33)



Roma, San Pietro (fig 34)



Londra, San Paolo (fig 35)

Esempi di tamburi per le cupole (fig 32, 33, 34, 35, 36)

Fonte: L. Margani, *Archi e volte in muratura*, Caltanissetta: Lussografica edizioni, 2009

parte inferiore, perché è costituito da una “partenza a punta” e un’altezza elevata. Le difficoltà esecutive proprie di questa tipologia si possono superare se trattiamo questi raccordi come se fossero appartenenti a una vela su base ottagonale non regolare. Così facendo si allarga la base e l’altezza risulta essere minore. Ulteriore esempio di raccordo sferico è quello che utilizza mezza volta a vela prendendo il nome di raccordo “fazzoletto o tazza”²².

1.3.2 Tamburo e Lanterna

Il tamburo e la lanterna sono due elementi complementari della cupola, le cui funzioni sono strettamente legate all’illuminazione interna. Il tamburo ponendosi a sostegno della cupola deve rispondere ad un importante ruolo statico, sopportando eventuali azioni spingenti. Inizialmente con i romani l’illuminazione interna era di tipo zenitale perché affidata esclusivamente all’oculo sommitale, come nel Pantheon. Successivamente questa era garantita attraverso aperture verticali a lunette inserite all’imposta della cupola come in Santa Sofia a Istanbul. Altri casi invece vedono la cupola coperta da un muro cilindrico che prendeva la forma di un tamburo, dando origine a questo nuovo elemento dell’impianto. Inizialmente il tamburo se lo spazio da coprire era circolare, coincideva con il corpo perimetrale della fabbrica. Altra soluzione adottata fu quella di praticare delle aperture nel Tiburio in corrispondenza delle lunette interne della cupola. Così facendo la luce riusciva ad entrare all’interno del complesso. Il tamburo vero e proprio, considerato elemento funzionale per rialzare la cupola, ebbe un importante esempio nel cinquecento con la cupola di Michelangelo per San Pietro, dove veniva aggiunto un importante tamburo che presentava 16 contrafforti costituiti da colonne binate intervallati da grandi aperture finestrate. Con il modello a “Costoloni” diffusosi principalmente in tutt’Europa troviamo molti esempi che, differenziandosi dal numero di costoloni o dalla forma

²² L. Margani, op. cit. alla nota 12 pag. 22

-G.A Breyman, *Costruzioni in pietra e Strutture Murali*, Milano: Editrice Vallardi 1885

dell'impianto, grazie al profilo rialzato, e insieme alla possibile presenza di cerchiature metalliche, riescono a risultare poco spingenti. Grazie a questo comportamento statico è stato possibile rendere ancora più snello il tamburo aumentando la superficie vetrata o, addirittura, limitandosi in alcuni casi a un semplice colonnato circolare come accade negli esempi siciliani del ragusano.

Per quanto riguarda la lanterna, usualmente le cupole estradossate vengono dotate di questo elemento, la sua invenzione è dovuta alla necessità di protezione e coperture dell'oculo che restava aperto. Con Brunelleschi nel rinascimento si cominciarono a studiare alcune soluzioni di copertura che ebbero massima espressione con la lanterna di Santa Maria del Fiore, risultando la strategia migliore per l'illuminazione sommitale. Dopo di lui anche Michelangelo ripropone in San Pietro la stessa soluzione di cupola con lanterna ovviamente adattata al suo caso²³.



Ragusa, San Giorgio (fig 36)

²³ L. Margani, op. cit. alla nota 12 pag. 22

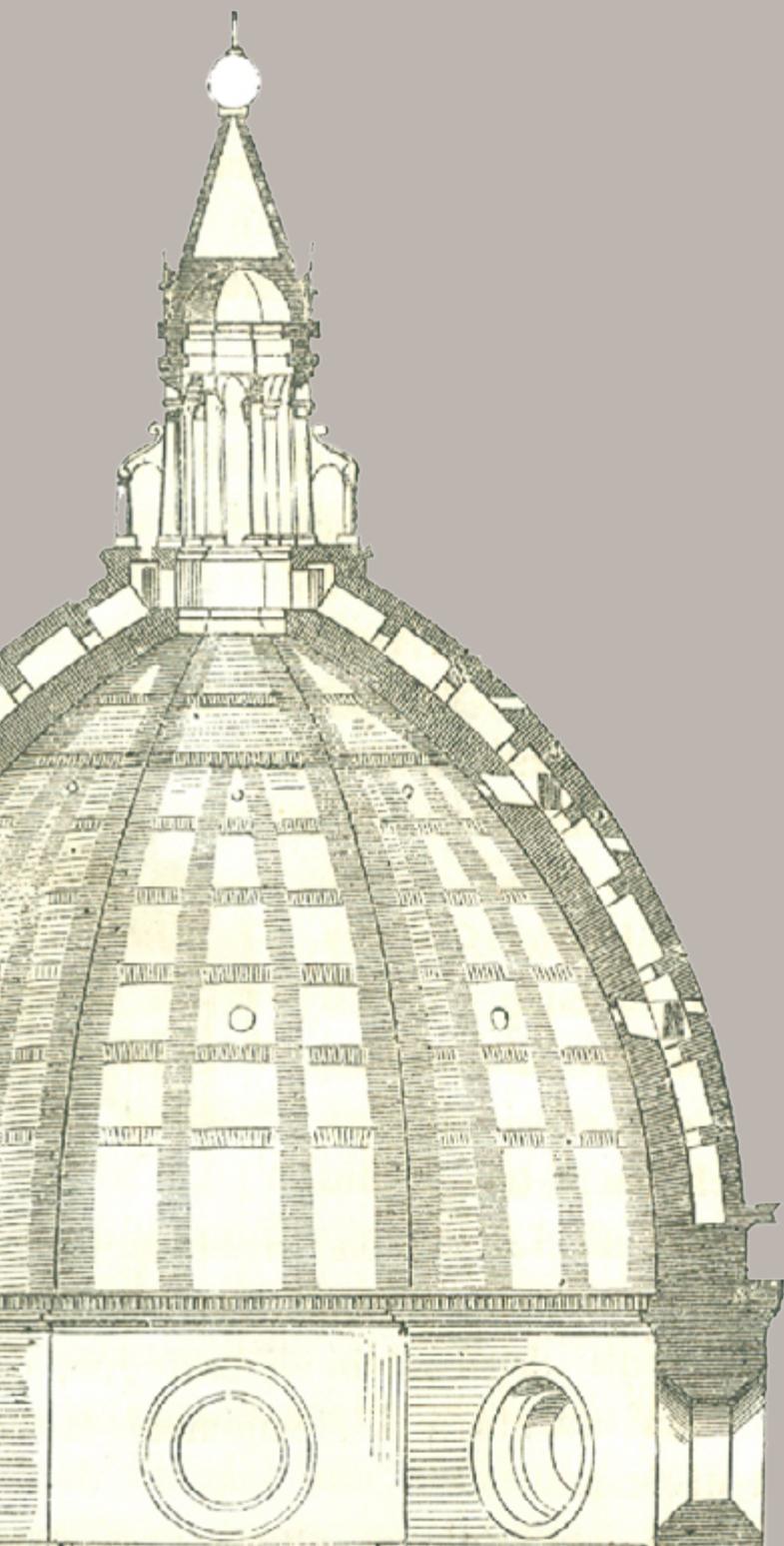


Fig. 37: Interno, Cupola della Basilica di San Pietro, Roma 1547-1590

Fonte: <https://maupes.files.wordpress.com/2016/11/roma-basilica-di-san-pietro-interno-cupola.jpg>

A seguire in copertina cap 2: sezione cupola Santa Maria del Fiore, Firenze.

Fonte: G.A Breymann, *Costruzioni in pietra e Strutture Murali*, Milano: Editrice Vallardi 1885



IL COMPORTAMENTO
STRUTTURALE

2

2.1 Le cupole nei trattati

Leonardo da Vinci scriveva che *“arco non è altro che una fortezza causata da due debolezze, imperochè l’arco negli edifiti è composto di due quarti di circolo, i quali quarti circoli ciascuno debolissimo per sé desidera cadere e opporsi alla ruina l’uno dell’altro, le due debolezze si convertono in una unica fortezza”*. di certo Leonardo non era andato lontano dalla verità, inoltre leggiamo tra i suoi appunti sempre riguardo agli archi che *“l’arco non si romperà, se la corda dell’archi di fori non toccherà l’arco di dentro”* naturalmente qui con archi di fori, e dentro, il genio si riferisce all’estradosso e intradosso di un arco o volta che sia²⁴.

Nella trattatistica a partire dal 1400 le cupole vengono analizzate prevalentemente sotto due aspetti principali. Il primo è legato alla loro conformazione geometrica, il secondo considera le tecniche costruttive adoperate. Sia nei quattro libri dell’architettura di Palladio, e nel V libro dei sette libri dell’Architettura di Serlio, il fattore geometrico è posto alla base di un buona progettazione delle cupole. La conferma teorica dell’importanza del fattore geometrico si avrà con Carlo Fontana nel 1673 con la Dichiatione dell’operato nella cupola di Monte Fiascone colla difesa della censura, e Templum Vaticanum del 1694²⁵. In questi testi l’autore suggerisce rapporti dimensionali scaturiti dallo studio di esempi esistenti e consolidati, confrontando le dimensioni di alcune cupole rinascimentali del territorio romano, con le regole proposte dai principali trattati, come in Dichiatione dell’operato nella cupola di Monte Fiascone dove Fontana riscontra alcune difformità dalle regole. Ad esempio lo spessore del muro d’imposta della cupola che in alcuni trattati viene consigliato 1/9 del diametro del vano da coprire, come in Vitruvio, Palladio e Alberti, e 1/7 in Serlio, mentre in realtà andando ad analizzare casi esistenti Fontana si accorse che lo spessore del muro d’imposta equivaleva a 1/10 del diametro. Alla fine del suo saggio da dei suggerimenti ai fini realizzativi dell’opera, dicendo che lo spessore d’imposta di una cupola doveva essere realizzato con lo stesso materiale adoperato per la struttura sottostante, e che se questa fosse in mattoni lo spessore all’imposta doveva



Fig. 38: Leonardo daVinci: metodo di proporzionamento gemoetrico.
fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 202

²⁴ E. Benvenuto, *la scienza delle costruzioni, e il suo sviluppo storico*, Firenze: Sansoni Editore, 1981

²⁵ C. Fontana, *Templum Vaticanum et ipsius erigo*. Roma: G.F. Buagni, 1694.

essere di 1/10 del vano, mentre se fosse stata realizzata in pietra o tufo lo spessore consigliato era di 1/9.²⁶ In *Templum Vaticanum* sono di particolare interesse le Regole per le Cupole Semplici dove vengono definitivamente fornite le leggi per il dimensionamento geometrico delle parti che compongono la cupola, come la “Grossezza del tamburo, cioè la decima parte del vano, Grossezza del nascimento della Cuppola, cioè tre parti delli 4 del Tamburo, Dritto della Cuppola di altezza una duodecima parte del Vano”²⁷ o le dimensioni della lanterna.

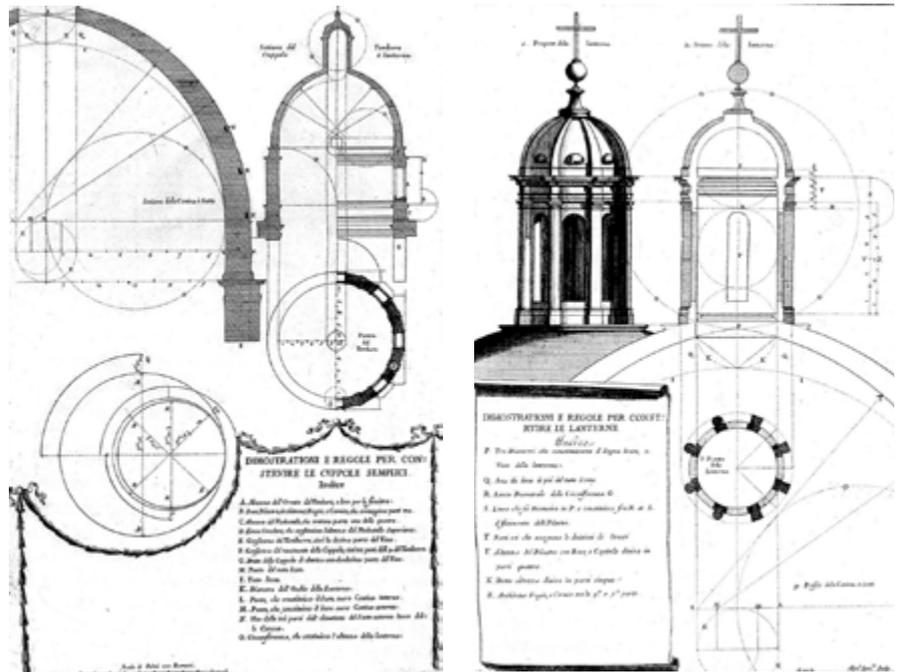


Fig. 39: Carlo Fontana: Regole per costruire le cupole semplici
Fonte: Carlo Fontana, il Tempio Vaticano 1694, a cura di G. Curcio

Come detto prima esisteva un secondo parametro di analisi per le costruzioni, parallelo a quello geometrico, questo traeva informazioni direttamente dai trattati sulle tecniche costruttive da adoperare. Uno dei maggiori esponenti di questa modalità d’approccio era Leon Battista Alberti che nel suo *De Re Aedificatoria* del 1485, da delle indicazioni per la costruzione di volte e cupole. Alberti nel suo trattato indica con determinata precisione la posizione delle catene, la misura che devono avere i conci, descrive accuratamente le armature e come queste sono composte, inoltre sostiene che per la cupola non è necessario utilizzare delle armature “*Nondimeno la volta sferica, unica fra tutte, non richiede armature: poichè essa non è fatta soltanto*

²⁶ N. Marconi, la teoria delle cupole nei trattati di architettura tra seicento e settecento, in C. Conforti (a cura di), *Lo specchio del cielo*, Milano: Electa, 1997 (pag 231)

²⁷ C. Fontana, *il Tempio Vaticano 1694*, a cura di G. Curcio, Milano, Electa, 2003

d'archi, ma anche di anelli sovrapposti... E una volta che siano costruiti gli anelli uno sull'altro, e allo stesso modo gli archi, anche facendo l'ipotesi che la costruzione voglia crollare, non si vede da che parte potrebbe cominciare, soprattutto perché i conci con ugual peso e forza gravitano tutti verso il centro".²⁸Altra notevole informazione è quella del disarmo lento e uguale in ogni parte della volta, *"finchè in tutta la volta i conci di pietra si incastrino e la costruzione si consolidi"* inoltre Alberti da un altro consiglio *"infine consiglio di non togliere le armature finchè non sia trascorso un intero inverno; tra l'altro perché la costruzione, senza di esse, potrebbe essere danneggiata e sconnessa dall'umidità delle piogge e crollare"*.²⁹ Per alleggerire la struttura muraria e per la sua aereazione Alberti suggerisce l'inserimento di olle in terra cotta come si può apprezzare nella cupola di Santa Maria di Loreto a Roma, così facendo si favorisce l'evaporazione dell'acqua e quindi una più rapida presa delle malte.

Nel 1615 Vincenzo Scamozzi con *"l'idea dell'Architettura Universale"*³⁰ da indicazioni sia sul proporzionamento geometrico sia sulle modalità costruttive. Fornisce spunti molto dettagliati, riguardanti l'aspetto costruttivo e statico della struttura, dicendo: *"Tra tutte le forme delle volte non è alcuna più sicura di quella, che è fatta a cupola... la fermezza della cupola procede da una egualità di forze, le quali tendono al centro: onde le sue parti non possono nè procedere, nè retrocedere l'una all'altra"* e ancora *"Tra tutte le maniere delle volte ritrovate per mezzo della speculazione degli Architetti antichi, e moderni non ve ne è alcuna, che si faccia più sicuramente: & anco per modo di dire più facilmente, quanto la cupola perfetta. Perché fermato un raggio del mezzo diametro nel centro della Tribuna, O Cupola, e con esso fatto il principio della volta à torno à torno, e così di mano in mano alciando ugualmente i corsi, facendo il caminar Orizionalmente del raggio, & in alto; a questo modo si pervenirà alla sommità di essa."* In oltre indica come di prioritaria importanza il materiale utilizzato per la costruzione, come ad esempio fornisce consigli sul riempimento dei fianchi delle volte con *"Cacarboni di legno fortissimo, e posti per ordine, e ben ammassati, perché essi sono di estrema*

²⁸ L.B. Alberti, *L'Architettura, De Re Aedificatoria*, a cura di G. Orlandi, Milano, edizioni il Polifilo, 1966

²⁹ *Ibidem*, nota 28 pag. 42

³⁰ V. Scamozzi, *Dell'idea dell'Architettura Universale*, Venezia, 1615

2.2 Studi premoderni nella statica degli archi

Con gli studi di Galileo Galilei nel XVII secolo si registra un graduale abbandono delle regole geometriche, fino ad allora utilizzate per la progettazione e il dimensionamento delle cupole. Questi studi si basavano su nuovi criteri scientifico-matematici, analizzando la resistenza di una struttura e ponendosi il problema di determinare la resistenza di una mensola e il valore del carico di rottura. Galileo con i suoi Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e ai movimenti locali del 1638 volle determinare la resistenza di una trave caricata trasversalmente in funzione della sua larghezza e altezza. Così facendo si poteva derivare una formula dalla quale calcolare la resistenza di una qualsiasi trave con sezione rettangolare, con questi studi Galileo segnò l'inizio della scienza delle costruzioni moderna³⁴.

2.2.1 La meccanica nello studio dell'arco :

La stabilità dei piedritti. De La Hire, Belidor

Con la nuove idee introdotte da Galileo, gli studiosi del XVII secolo si interessarono sempre di più a queste nuove scoperte. I principali studiosi che si occuparono della statica degli archi furono Philippe De la Hire in *Traité de mecanique*³⁵ e in *Sur la construction des voûtes dans les édifices*³⁶(1712) e Bernard Belidor nel suo trattato *La science des ingénieurs*³⁷ nel 1729. De La Hire studiò l'equilibrio dell'arco attraverso la legge della leva, nella situazione di collasso. Secondo lui la parte dell'arco centrale compresa tra i due raggi a 45° , resterebbe intera formando un cuneo, questo, scivolando sugli appoggi rappresentati dalle parti restanti dell'arco, eserciti una forza che li spingerebbe in fuori (fig 41). Le leve individuate da De La Hire e successivamente da Belidor derivano entrambe

³⁴ A. Giuffrè, op. cit. alla nota 33 pag. 43

-J.Heyman, *Lo scheletro di pietra*, traduzione di Paolo Rugarli, Roma: EPC,2014

³⁵ P. De La Hire, *Traité de mecanique ou l'on explique tout ce qui est necessaire dans la pratique des arts*, Impremérie Royale, Paris 1695.

³⁶ P. De La Hire, *Sur la construction des voutes dans les edifices*, Academié Royale des Sciences, Paris 1712

³⁷ B. Belidor, *La scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e di architettura civile*, Mantova 1729.

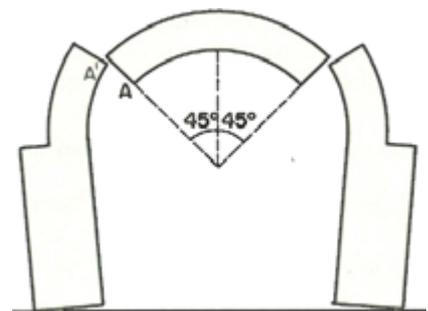


Fig. 41, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 204

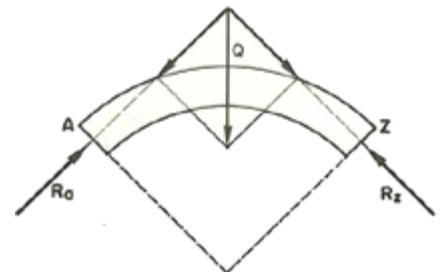


Fig. 42, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 205

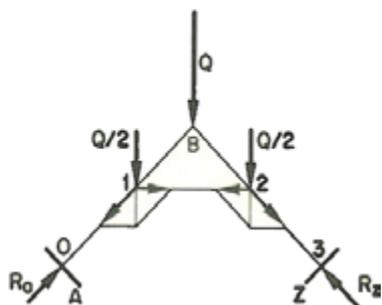


Fig. 43, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 205

dall'ipotesi che il cervello, rappresentato dalla parte centrale dell'arco, considerato come corpo rigido unico, si comporti come un cuneo tra superfici senza attrito. Il vincolo costituito da una superficie priva d'attrito può dar luogo soltanto a reazioni ortogonali alla superficie stessa. Come si vede nella figura 42, queste reazioni sono individuate dalla scomposizione del peso Q dell'arco attraverso l'utilizzo del parallelogramma in due forze nelle due direzioni delle reazioni. Ulteriore scomposizione delle forze è quella in figura 43 dove il peso Q viene scomposto in due ($Q/2$) e applicato nei relativi baricentri dei due semiarchi.

Le principali differenze tra le formulazioni di De La Hire e di Belidor, sono: il punto di applicazione delle reazioni dell'arco, perché Belidor le applica a metà spessore della sezione dell'arco, mentre in De La Hire le troviamo applicate all'intradosso, la leva, quella individuata da De La Hire è più complessa data da un ragionamento più difficile, mentre quella di Belidor mette chiaramente in evidenza la relazione di equilibrio tra la spinta esercitata dall'arco e il peso del piedritto (fig 44). L'espressione ricavata ci porta ad ottenere una relazione che ci permette di calcolare lo spessore del piedritto in relazione al peso Q.

$$P = \frac{Q}{2} \frac{y_a \operatorname{tg} \varphi - x_a Q}{x_c} - \frac{Q}{2} \frac{y_a \operatorname{tg} \varphi - x_a}{x_c}$$

Le ricerche effettuate da questi due studiosi hanno introdotto i metodi della meccanica per il progetto degli archi. Il fine del loro studio era quello di superare la regola grafica tramandata fino ad allora, con qualcosa di più razionale, fornendo delle conclusioni in termini di progetto. Infatti entrambi ricavano un'espressione che fornisce in base alla caratteristiche geometriche e ai relativi carichi lo spessore del piedritto³⁸.

Dalla prima metà del XVIII secolo si registra un susseguirsi di studi in materia, che passano dal dimensionamento dei piedritti, a quello dei conci dell'arco come farà Couplet³⁹, o la scelta della curva migliore per una cupola con Bouguer⁴⁰.

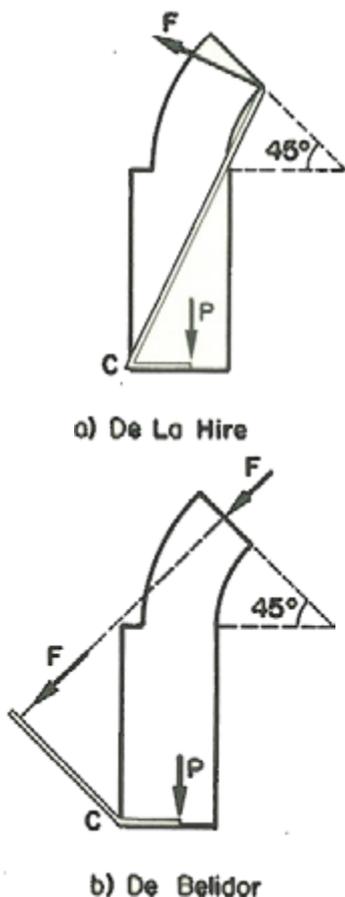


Fig. 44, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 205

³⁸ A. Giuffrè, op. cit. alla nota 33 pag. 43

³⁹ A. Couplet, *La poussée des voutes, e Seconde partie de l'examen de la poussée des voutes*, Accadémie Royale des Sciences, Paris (1729-1730)

⁴⁰ P. Bouguer, *Sur les lignes courbes qui sont propres à former les voutes en domes*, Accadémie Royale des Sciences, Paris 1734

Mascheroni

I risultati pubblicati da Lorenzo Mascheroni nel testo *Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte* del 1785⁴¹, propone due importanti meccanismi di rottura dell'arco. Dove il primo è un meccanismo di scorrimento, mentre il secondo si riferisce ad un meccanismo flessionale. (fig 45)

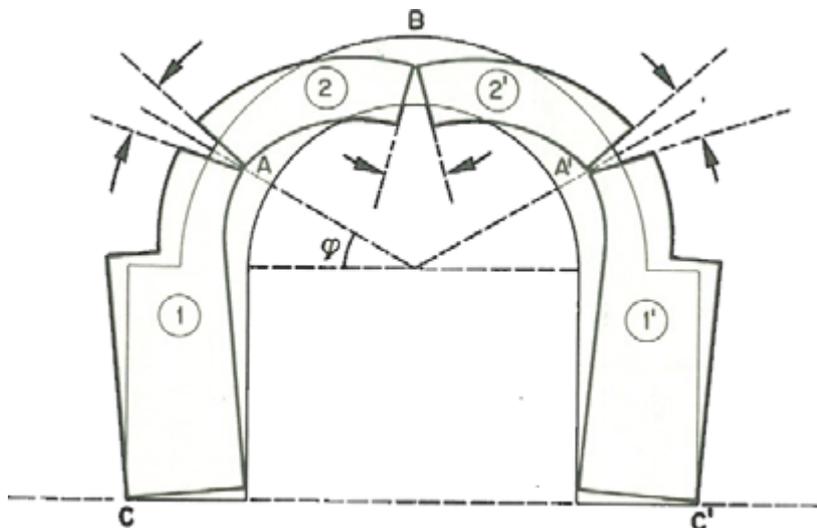


Fig. 45, fonte: Antonio Giuffrè, *La meccanica nell'architettura, la statica*, pag 211

Il sistema della struttura proposta dal Mascheroni è composto da corpi rigidi, vincolati da una cerniera esternamente in C,C' ed internamente in B, A e A', questo sistema è labile, ma ciò che farà Mascheroni è proprio quello di determinare le sue condizioni d'equilibrio. Per spiegare la figura 46 mi servirò delle parole di Antonio Giuffrè: “*si osservi che per la simmetria del sistema la reazione offerta dalla cerniera in B non può essere che orizzontale. Ne segue che il peso Q/2 del tratto di arco AB, passante per il baricentro G₂, dovrà essere equilibrato da una forza passante per A. Come si vede in figura, il parallelogramma delle forze si traccia senza equivoci conducendo una orizzontale da B fino ad incontrare la retta d'azione del peso Q/2, e congiungendo quest'intersezione con A. Costruito il triangolo d'equilibrio si trova l'azione che il corpo AB consegna al corpo AC attraverso la cerniera A*”. Ne consegue la seguente espressione per trovare il peso P del piedritto.

$$P x_G = Q/2 (y_A \operatorname{tg}\varphi' - x_A)$$

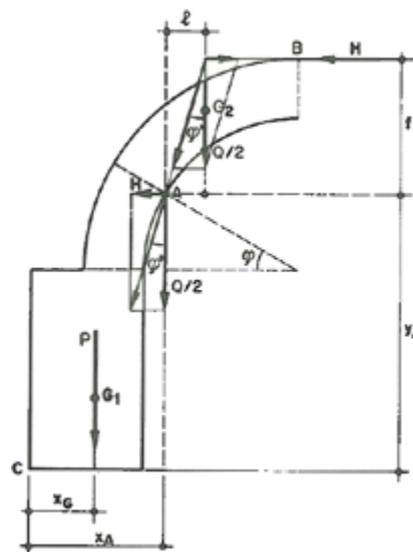


Fig. 46, fonte: Antonio Giuffrè, *La meccanica nell'architettura, la statica*, pag 212

⁴¹L. Mascheroni, *Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte*, Bergamo 1785.

Oppure se volessimo confrontarla con la formula ottenuta da De La Hire e Belidor potremmo scriverla:

$$P = \frac{Q}{2} \frac{y_a \operatorname{tg} \varphi' - x_c Q}{x_c} \frac{y_a \operatorname{tg} \varphi' - x_c}{2} \quad (\text{Mascheroni})$$

$$P = \frac{Q}{2} \frac{y_a \operatorname{tg} \varphi - x_a Q}{x_c} \frac{y_a \operatorname{tg} \varphi - x_a}{2} \quad (\text{De La Hire , Belidor})$$

Mettendole a confronto notiamo come la struttura delle due formule è praticamente identica, anche se in quella proposta da De La Hire e Belidor il meccanismo di collasso dell'arco avviene con lo scivolamento a cuneo della sommità lungo i giunti delle reni, mentre in quella di Mascheroni si propone un meccanismo di collasso dell'arco con la formazione di cerniere in chiave e alle reni. L'unica differenza che troviamo è l'angolo φ e φ' , questo perché secondo Mascheroni è opportuno calcolare per diversi punti dell'arco l'equazione proposta, per individuare l'angolo più critico dove si potrebbe registrare un effettiva lesione dell'arco. Quindi non si considera più soltanto l'angolo a 45° come in precedenza, ma occorre studiare tutto l'arco non conoscendo dal principio quale sarà la condizione più pericolosa⁴².

Rianalizzando le due formule precedentemente proposte, si osserva che nella maggioranza dei casi è $\varphi > \varphi'$, perciò risulterebbe che la rottura dell'arco potrebbe avvenire per scorrimento del cervello, piuttosto che per la formazione di cerniere. Questo però non risulterebbe veritiero perché tra i conci dell'arco solitamente è presente l'attrito, quindi non considerarlo sarebbe sbagliato e inoltre si falserebbero i risultati. La reazione che troviamo tra i conci e il cervello che tende a scivolare con la presenza di attrito, non sarà ortogonale al giunto, ma inclinata nel verso opposto a quello del moto, con angolo ψ , ovviamente più grande sarà l'angolo d'attrito ψ , più il cervello troverà resistenza allo scivolamento. Ipotizzare un sistema in totale assenza d'attrito oltre a non rispecchiare la realtà, rende pericoloso un meccanismo non realizzabile. Basti considerare un attrito, anche minimo, per far sì che la sezione pericolosa si sposti tra i 60° e i 65° rispetto ai 45° (erroneamente considerati).

Il meccanismo di rottura dell'arco per scorrimento proposto da De La Hire, richiederebbe uno spessore del piedritto maggiore. In realtà se aggiungiamo l'attrito con un angolo di $\psi = 30^\circ$ vedremo che la sezione critica per lo scorrimento sarà a 60° e

⁴² A. Giuffrè, op. cit. alla nota 33 pag. 43

Cfr. Benvenuto, pag 367: La cultura scientifica Italiana e Mascheroni

lo spessore del piedritto risulterà inferiore (vedi grafico, fig32). Questi parametri fisici che potrebbero sembrare trascurabili, ricoprono un ruolo importante, quindi bisogna considerarli per non valutare erroneamente il comportamento dell'oggetto che si sta analizzando⁴³.

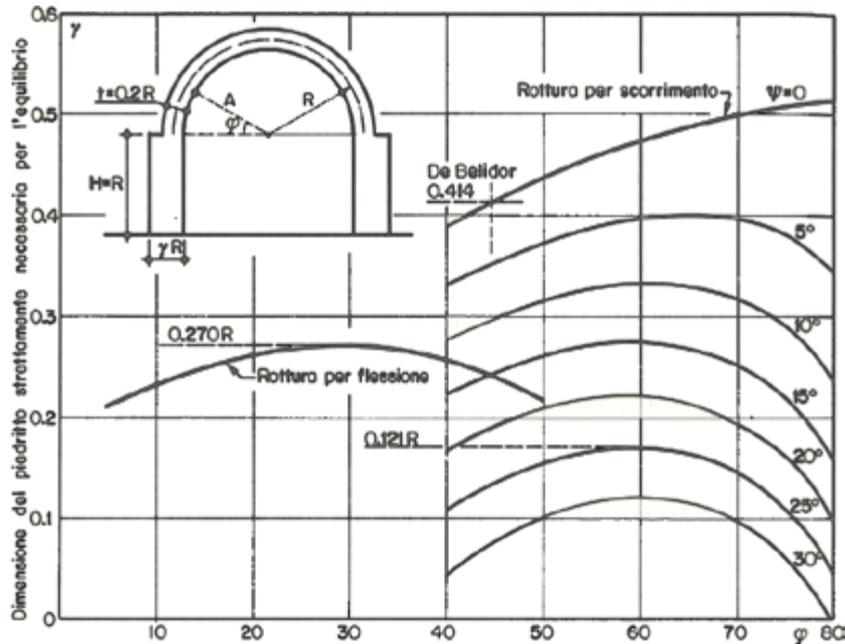


Fig. 47, grafico sull'equilibrio dell'arco in base all'angolo d'attrito, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 216

2.2.2 La meccanica nello studio dell'arco :

La curva delle pressioni

Uno dei metodi più utilizzati a metà ottocento, per la verifica della stabilità di archi e volte consisteva nella costruzione del poligono funicolare del sistema dei vettori, questo rappresenta i pesi dei singoli conci, passanti per punti stabiliti attraverso tutto l'arco e in chiave. Questo sistema fu usato per la verifica delle strutture ad arco antiche da G.Giovanoni. Il poligono funicolare coincide con il poligono delle successive risultanti, infatti ciascun lato rappresenta la retta d'azione del risultante di tutte le forze che lo precedono, cominciando dalla spinta in chiave.

⁴³A. Giuffrè, op. cit. alla nota 33 pag. 43

Per approfondimenti sull'azione dell'attrito, cfr. Benvenuto, pag 361, La teoria di Coulomb sulle volte dotate di attrito e coesione

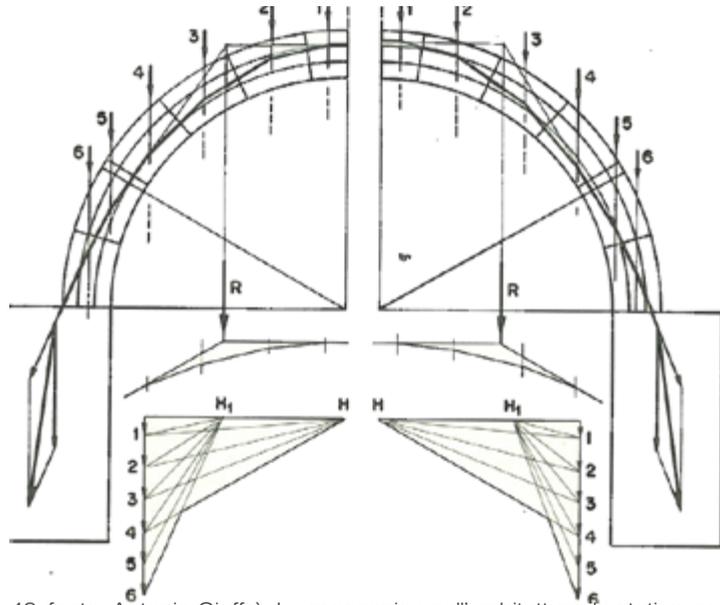


Fig 48, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 225

Questa risultante può anche essere chiamata linea delle pressioni, perché rappresenta l'azione che in corrispondenza del giunto, una parte d'arco esercita sulla seguente, quindi un'azione interna scambiata tra conci contigui (fig 48). Si può affermare quindi che il tracciato della linea delle pressioni è un indice delle condizioni di stabilità di un arco. Più la linea si discosta dall'asse, maggiore sarà l'eccentricità e perciò maggiore sarà anche lo spessore dell'arco, in modo che la linea delle pressioni resti al suo interno. Dagli studi effettuati si riscontra che la linea d'asse dell'arco a sesto acuto si avvicina maggiormente a quelle delle pressioni, rispetto a un arco a tutto sesto, ciò indica che l'arco a sesto acuto può essere più sottile rispetto a quello a tutto sesto (fig 49).

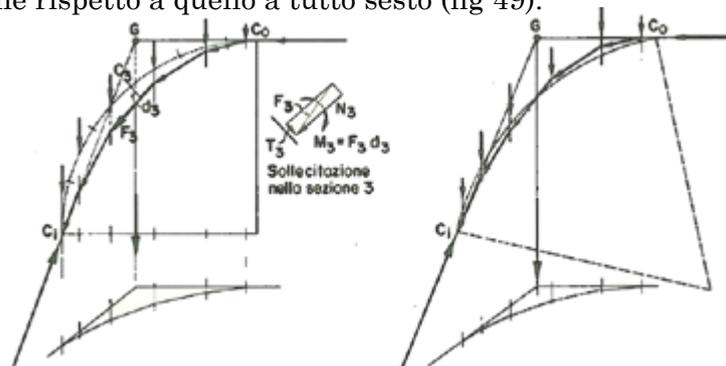


Fig. 49, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 219

Un quesito al quale si cercherà risposta, è quale sia la linea delle pressioni più corretta, quella che descrive al meglio la realtà fisica dell'arco. Troviamo alcune formulazioni, quella

di Moseley⁴⁴ nel 1833 con il suo principio della minima pressione afferma che tra le infinite curve che si possono tracciare all'interno di un arco, quella "vera" è quella che rende minima la spinta orizzontale in chiave. Ma questa non risulta corretta, perché si andrebbe a scegliere una curva che passa per l'estradosso in chiave e all'estradosso alle reni. Ulteriore formulazione è quella enunciata da Winkler⁴⁵ nel 1867, diceva: la "vera" curva di pressione è quella che mediamente si discosta il meno possibile dalla linea d'asse dell'arco, ma anche questa non fu ancora corretta. La più importante considerazione si avrà con Heyman con un teorema (safe theorem) sulla sicurezza nella stabilità degli archi. Egli enuncia che: *"se è possibile trovare una linea delle pressioni per l'arco completo, che sia in equilibrio con i carichi applicati (incluso il peso proprio) e rimane ovunque interna allo spessore dell'arco, allora questo è sicuro"*⁴⁶. Ovvero dal punto di vista della sicurezza non interessa conoscere la vera posizione della linea delle pressioni, basta assicurarsi che ne esista almeno una all'interno dello spessore dell'arco⁴⁷.

⁴⁴ H. Moseley, *On a new principle in statics called the principle of least pressure*, "Phil. Mag." 1833.

⁴⁵ E. Winkler, *Die Lehre von der Elasticitat und Festigkeit*, Praga 1867

⁴⁶ J. Heyman, *The stone skeleton : structural engineering of masonry architecture*, Cambridge: Cambridge University Press 1995

⁴⁷ A. Giuffrè, op. cit. alla nota 33 pag. 43

Per approfondimenti sulla linea delle pressioni, consultare il testo su citato al capitolo 6, paragrafo 6.2.5, pag 218

2.3 La statica delle cupole

2.3.1 L'analisi per meccanismi:

Studi statici effettuati dai tre matematici
per la cupola di San Pietro a Roma.

Thomas Le Seur, Francois Jacquier e Ruggero Giuseppe Boscovich furono i tre matematici che tra il 1742 e il 1743 ebbero l'incarico da Papa Benedetto XIV di valutare il preoccupante stato in cui versava la cupola della Basilica di San Pietro. I tre matematici fornirono nel gennaio del 1743 al pontefice un documento dettagliato su quanto osservato, il "Parere di tre matematici sopra i danni, che si trovano nella cupola di S.Pietro". In questo parere gli studiosi diedero una spiegazione alla causa e al meccanismo che aveva prodotto le fessurazioni, dovute appunto alla grande spinta della cupola stessa, indicando in fine anche dei "rimedi" ai danni analizzati, come ad esempio l'intervento che secondo i matematici doveva essere realizzato nel più breve tempo possibile, e la messa in opera di ulteriori catene. Se questo non fosse stato fatto secondo gli studiosi l'intera cupola sarebbe crollata. Il Parere può essere diviso in tre parti, la prima dove viene analizzato lo stato di fatto della cupola, nella seconda si ricercano le cause che hanno provocato le fessurazioni, e nella terza forniscono delle soluzioni per rimediare al problema.

Nella prima parte il Parere si sofferma ad analizzare le lesioni della cupola in modo specifico e puntuale, avendo come fine l'individuazione del movimento generante.

Nella seconda parte i matematici cercano di individuare le cause, in primo luogo focalizzando il meccanismo di rottura, con gli eventuali movimenti delle parti che compongono la struttura e successivamente prendendo in esame le forze che potrebbero far crollare la cupola e quelle che vi resistono.

Per quanto riguarda la suddivisione dei corpi che formano il meccanismo di rottura, i tre matematici individuano tre elementi: il primo è formato dalla base del tamburo che si sposta insieme ai contrafforti dello stesso, il secondo dal muro del tamburo con l'attico e la parte interna della base, e in ultimo dal costolone che tira con sé una parte della cupola.

Per quanto riguarda, invece, l'analisi della causa delle lesioni, è stata individuata la spinta data dall'eccessivo peso della cupola

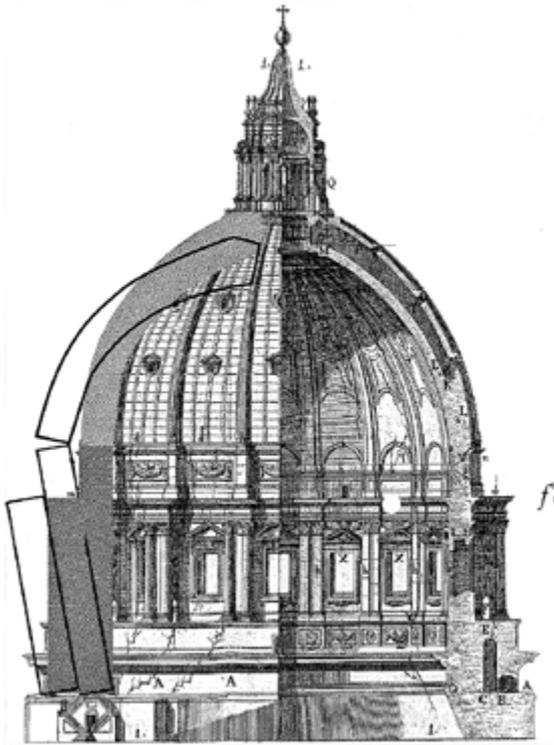


Fig. 50: Cinematismo di rottura della cupola di San Pietro, Roma
 Fonte: Danilo Capecchi, Cesare Tocci, le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquiere e Boscovich, rivista Palladio, Pag 47

con i suoi costoloni e del cupolino, per il fatto che il tamburo, le cerchiature e i contrafforti non siano sufficienti nell'opposizione dell'eccessivo carico.

Per ricercare il lavoro virtuale esercitato dai pesi (stabilizzante/instabilizzante) è "sufficiente moltiplicare i pesi per gli spostamenti virtuali verticali come risultano dal meccanismo di rottura"¹. Per ricercare il lavoro virtuale che le catene compiono, Boscovich, formula:

$$L = 2\pi N \Delta r$$

In cui L è il lavoro del singolo cerchio, N forza di trazione, e Δr è la variazione del raggio.

Per quanto riguarda le soluzioni da applicare per prevenire idanni, i tre studiosi propongono l'inserimento di cerchi aggiuntivi a quelli già presenti sulla cupola, e alla base della medesima. In modo da rendere la cupola più stabile e più sicura. Nonostante il Parere sia stato bocciato dal Pontefice Benedetto XIV e abbia riscosso molte critiche successivamente ritenute inconsistenti, i tre matematici sono stati i primi ad analizzare una struttura differente dall'arco, utilizzando cinematismi di

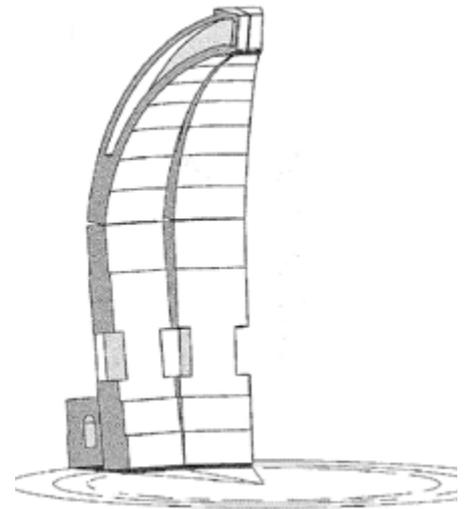
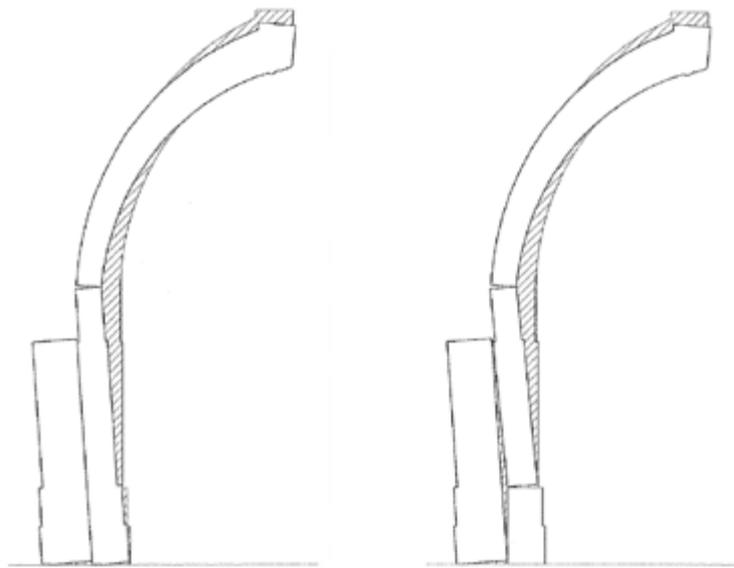


Fig. 51: Il meccanismo studiato dai tre matematici (a sinistra)
 Fonte: Danilo Capecchi, Cesare Tocci, le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquiere e Boscovich rivista Palladio, Pag 49

¹ D.Capecchi, C.Tocci, le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquiere e Boscovich, rivista Palladio n° 47 ,2011, pag 47

Fig. 52: le ipotesi di meccanismo 1 e 2
 Fonte: Danilo Capecchi, Cesare Tocci, le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquiere e Boscovich rivista Palladio, Pag 49



corpi rigidi. Le difficoltà principali nell'affrontare questo studio, se ci si riferisce alle tradizionali analisi sulla statica degli archi, sperimentate da De la Hire, sono legate ai meccanismi che si attivano negli archi, perchè questi non saranno riconducibili alle cupole, essendo strutture con geometrie tridimensionali più complesse. Per San Pietro era ipotizzabile un meccanismo di apertura a “mela granata” in quanto suggerito dal quadro fessurativo che percorreva la cupola stessa. Appare ovvio che la tridimensionalità della struttura non sia un fattore esclusivamente geometrico, ma che questo richiami a se anche il comportamento meccanico, infatti *“Affinchè il meccanismo ipotizzato per la cupola si innesci occorre che venga superata la resistenza a trazione della muratura: sia lungo i piani meridiani della cupola e del tamburo che individuano gli spicchi verticali , sia lungo i piani circolarziali, che individuano le porzioni in rotazione relativa di ciascuno spicchio.”* Per San Pietro *“ la resistenza a trazione era stata superata in corrispondenza delle lesioni che si sono già aperte, tuttavia essa è ancora operante nelle porzioni integre”*.²

Nel Parere viene infine proposta una soluzione di interventi di restauro statico della struttura, basandosi su “minimo intervento” che non alteri la natura dell'architettura in sé, e in secondo luogo degli interventi che garantiscano la sua stabilità, raddoppiando le resistenze, inserendo ulteriori cerchiature metalliche e intervenendo con ulteriori opere murarie.

²D.Capecchi, C.Tocci, op. cit. alla nota 1 pag 52

2.3.2 La teoria della membrana

La maggior parte dei trattatisti vede la cupola come costituita da spicchi, perciò per la questione della sua stabilità ci si rifaceva ai criteri usati per l'arco (fig 53). In realtà nella cupola oltre allo stato di sforzo presente nei meridiani (funzionamento dell'arco), si aggiunge uno stato di sforzo anche secondo i paralleli, i singoli spicchi quindi ricevono e esercitano un sostegno laterale l'uno con l'altro. Come affermava il Venturoli: *“le unghie, avendo tutte la stessa tendenza, la eserciteranno per tutta la circonferenza della cupola, nello stesso tempo e con forza uguale, perciò tali sforzi si impediranno e si elideranno vicendevolmente”*¹. Questo funzionamento della cupola può essere spiegato con la teoria della membrana di rivoluzione, già individuata nella prima metà dell'ottocento da Navier e successivamente in chiave moderna da Flügge e Timoshenko. Per membrana si intende una struttura ideale, costituita da una superficie curva sottilissima, come un tessuto. L'analogia tra una cupola in tessuto e quella in muratura, deriva solo dagli sforzi interni, che sia nella cupola che nell'arco devono essere compresi all'interno del loro spessore. E se questo è estremamente piccolo si conduce alla definizione di membrana. La membrana è generata dalla rotazione di una curva (curva generatrice) attorno ad un asse z . La curva generatrice individua l'arco meridiano, che nella rotazione genererà una circonferenza con centro in z , costituendo un parallelo.

Se con una sezione orizzontale dividiamo la cupola in due porzioni, individueremo un parallelo (cerchio), che sarà la linea di separazione tra le due parti. Il carico Q che agisce sulla porzione superiore dovrà trasmettersi alla porzione inferiore attraverso il cerchio individuato. Perciò gli sforzi interni saranno diretti secondo i meridiani, e rispettando la simmetria, saranno tutti uguali lungo il parallelo (fig 54).

Adesso prendiamo in esame un elemento della cupola, individuato tra due meridiani e due paralleli a distanza infinitesima, si nota che esso subisce sforzi interni anche nella direzione del parallelo (fig 55,56). Questi sforzi che agiscono sui bordi sono necessari per raggiungere l'equilibrio dell'elemento, che è soggetto al peso proprio. Gli sforzi che agiscono secondo il meridiano sulle due facce orizzontali, sono inclinati in maniera diversa, e la loro somma è una forza radiale che deve essere equilibrata dagli sforzi sui paralleli.

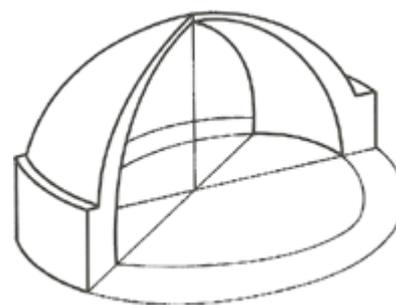


Fig. 53, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 237

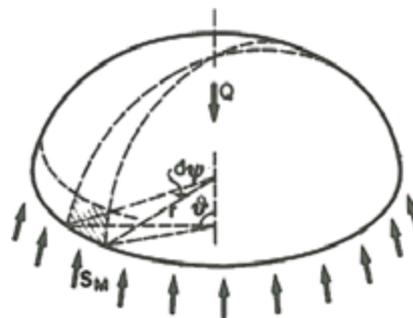
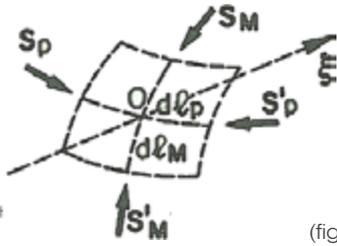


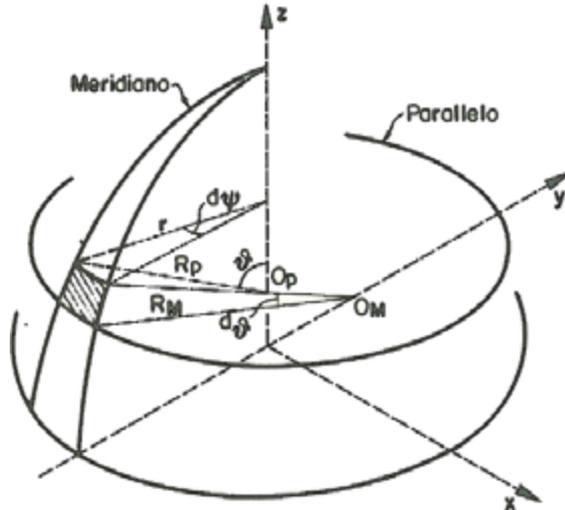
Fig. 54, fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 239

¹ G. Venturoli, Elementi di meccanica e d'idraulica, Milano 1806



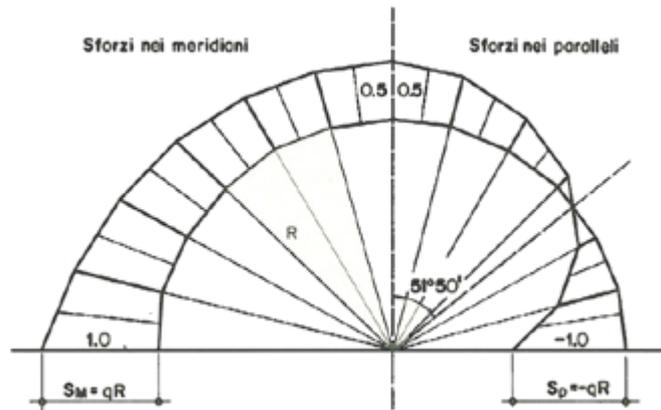
(fig 55)

(fig 55, 56, 57), fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 239



(fig 56)

In una cupola a tutto sesto l'ipotesi di membrana fa sì che questa non trasmetta alcuna spinta alla struttura sottostante, nonostante lo sforzo dei meridiani cresce dalla chiave all'imposta. Sempre all'imposta i meridiani presentano una tangente verticale, questo comportamento è spiegabile grazie allo sforzo presente nei paralleli (vedi grafico, fig 57) .



(fig 57)

dove q è il peso per metro quadro di superficie, R il raggio della cupola

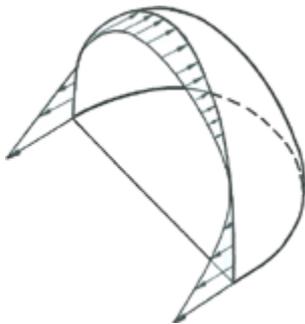


Fig 58: fonte: Jacques Heyman, Lo scheletro di pietra, traduzione di Paolo Rugarli, pag 39

In chiave la compressione dei paralleli vale $0.5 qR$ come i meridiani, questa, nei paralleli diminuisce fino ad annullarsi completamente per un angolo poco più grande di 50° . Oltre questo livello i paralleli risultano tesi, assumendo in prossimità dell'imposta una funzione cerchiate (fig 58).

In una volta in muratura non sempre questo meccanismo può essere presente per questioni legate alla conformazione della muratura e dei blocchi. In questo caso si potrebbero formare delle lesioni lungo i meridiani annullando il sistema a

membrana, che prevede la compresenza di sforzi paralleli.

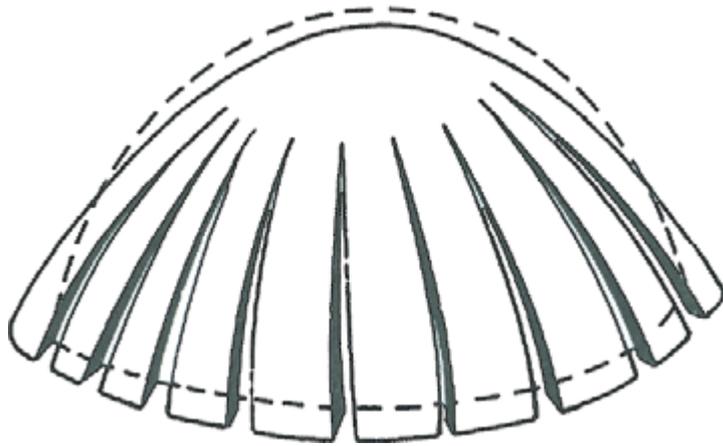
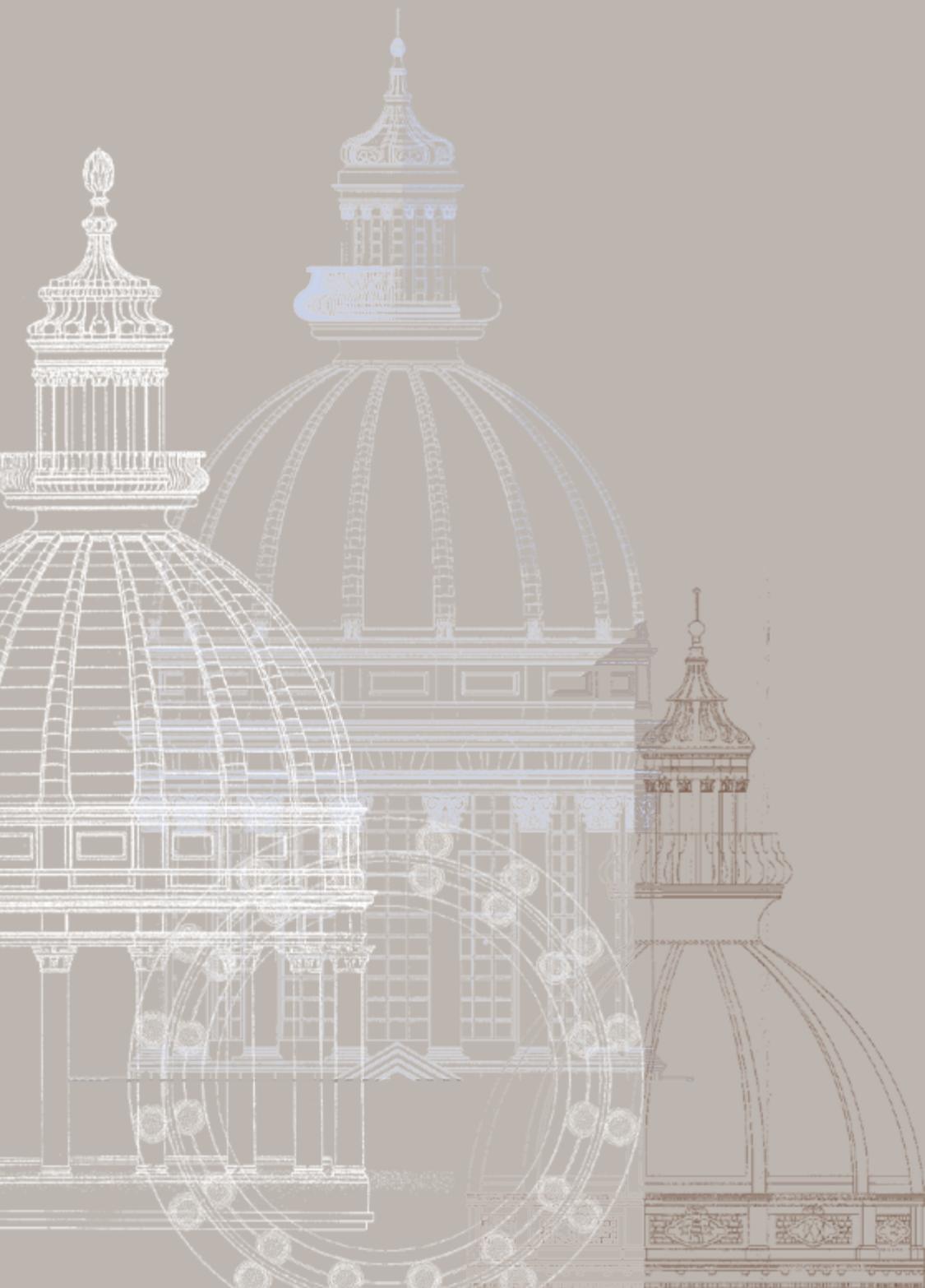


Fig. 59: fonte: Jacques Heyman, Lo scheletro di pietra, traduzione di Paolo Rugarli, pag 40

Gli spicchi che si formeranno mediante le lesioni, assumeranno la funzione di puntone che reggerà la cupola superiore, e con la loro reazione inclinata si avrà la spinta all'imposta. Per questo motivo le cupole vengono cerchiata alle reni².

²A. Giuffrè, op. cit. alla nota 33 pag. 43
J. Heyman, op. cit. alla nota 22 pag. 35

A seguire in copertina cap 3: Rielaborazione
grafica dei prospetti delle cupole di:
San Giorgio a Ragusa, Santa Maria delle Stelle
e della Santissima Annunziata a Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni
Culturali ed Ambientali di Ragusa



3

LE CUPOLE DEL
TERRITORIO RAGUSANO

3.1 Inquadramento geografico:

Ragusa e il Val di Noto

Le cupole che si andranno ad analizzare in questo capitolo insistono sul territorio della provincia di Ragusa, nella zona sud orientale della Sicilia. Questa, insieme ad altre città come Catania, Militello Val di Catania, Caltagirone, Palazzolo Acreide, Noto, Modica e Scicli, fanno parte del Val di Noto. Questo particolare nome venne assegnato durante la dominazione Araba, perché la città di Noto ricopriva l'importante funzione di 'capovallo', ovvero "centro amministrativo di riferimento" da cui deriva appunto il nome di "Val di Noto".

Questi comuni sono stati dichiarati dall'UNESCO patrimonio dell'umanità nel Giugno del 2002. Le motivazioni di tale importante riconoscimento si possono apprendere nella Dichiarazione di Eccezionale Valore universale; "*Le otto città della Sicilia sud orientale (Caltagirone, Catania, Militello Val di Catania, Modica, Noto, Palazzolo Acreide, Ragusa e Scicli) furono ricostruite dopo il 1693 sopra o nelle vicinanze dei resti di quelle distrutte nello stesso anno dal terremoto. Rappresentano il risultato di un considerevole impegno collettivo condotto con successo e con risultati architettonici e artistici di alto livello. Vincolate allo stile tardo Barocco dell'epoca, esse sono un unicum per le importanti innovazioni apportate nel campo della pianificazione e della progettazione urbanistica*".

Inoltre leggiamo nei criteri di iscrizione alla lista che:

(i): *questo gruppo di città della Sicilia sudorientale fornisce rimarchevole testimonianza dell'esuberante genialità espressa nell'arte e nell'architettura del tardo barocco;*

(ii): *le città del Val di Noto rappresentano l'apice e la fioritura finale dell'arte barocca in Europa;*

(iv): *l'eccezionale qualità dell'arte e dell'architettura del tardo barocco del Val di Noto si fonda sulla sua omogeneità geografica e cronologica, nonché sulla sua abbondanza, risultato della ricostruzione dopo il terremoto che distrusse l'area nel 1693;*

(v): *le otto città della Sicilia sudorientale incluse nell'iscrizione, caratteristiche del modello di insediamento e delle forme di urbanizzazione dell'area, sono costantemente soggette al rischio di terremoti e delle eruzioni dell'Etna.*

¹ <http://www.sitiunesco.it>

<http://www.unesco.it>



Queste città furono legate dal terribile evento sismico del 1693, che cancellò il passato di questo pezzo di Sicilia modificandone l'aspetto ma non l'essenza, eliminò per sempre i precedenti insediamenti greci, romani, normanni, svevi, aragonesi e spagnoli. Ma, nonostante tutto, la catastrofe offrì "*l'occasione per un grande rinnovamento artistico, architettonico e antisismico delle città*" dando a questa parte della Sicilia un volto unico, città pensate come opere d'arte, un'architettura tardobarocca unica nel panorama del diciassettesimo secolo³.

² <http://www.unesco.it>

³ A. Casamento, E. Guidoni, *Le città ricostruite dopo il terremoto siciliano del 1693*, Roma: Edizioni Kappa 1997



Fig. 60: Veduta panoramica su Ragusa Ibla, Foto dell'autore

3.2 La sismicità locale

La Sicilia, soprattutto la parte orientale, è contraddistinta da una notevole attività sismica. Infatti i terremoti di forza maggiore sono avvenuti principalmente a sud dell'isola, come possiamo notare dalla mappa storica della sismicità.

Uno dei primi terremoti registrati in questa zona avvenne il 4 febbraio 1169. Questo provocò ingenti danni alle attuali province di Catania, Siracusa e Ragusa. La successiva scossa si registrò il 10 dicembre 1542 di magnitudo 6.8 e anche questa provocò gravi danni. La più distruttiva però si ebbe l'11 gennaio 1693

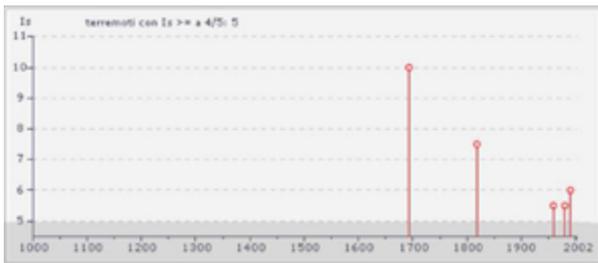
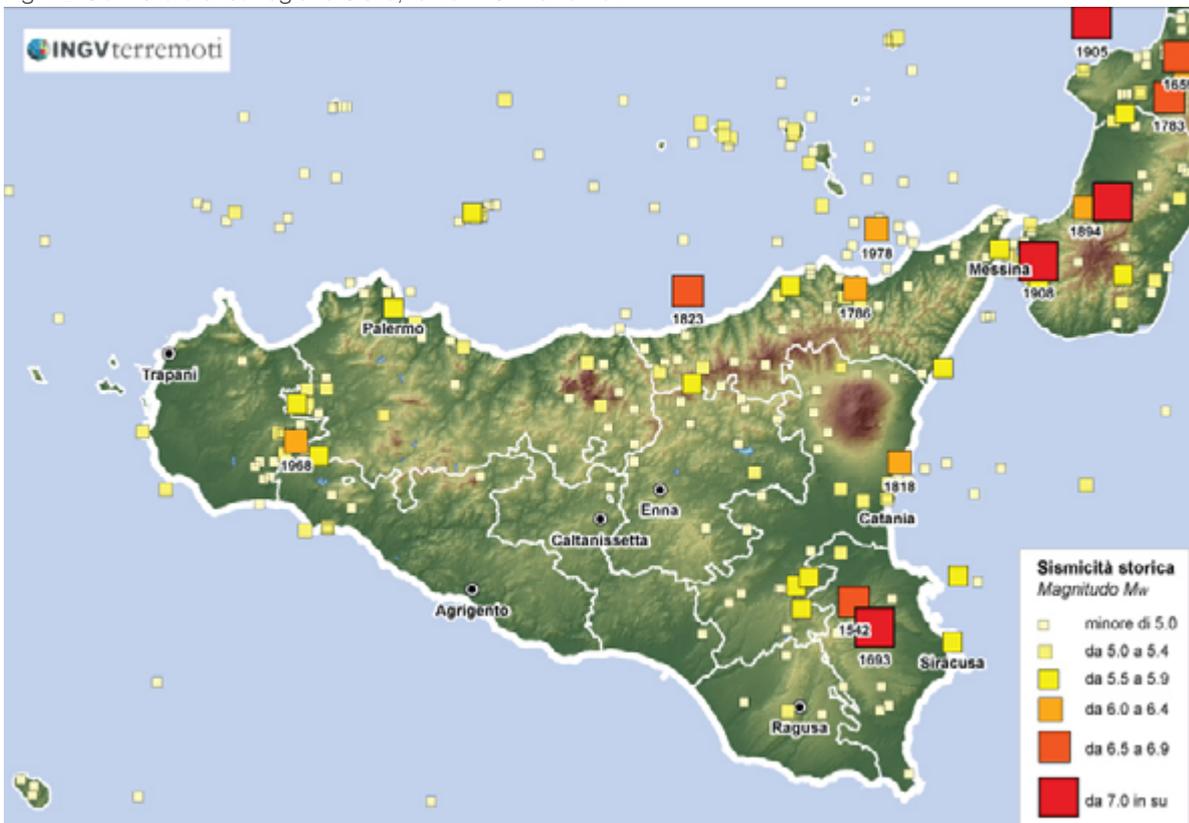


Fig. 61: Sismicità storica provincia di Ragusa, fonte INGV terremoti

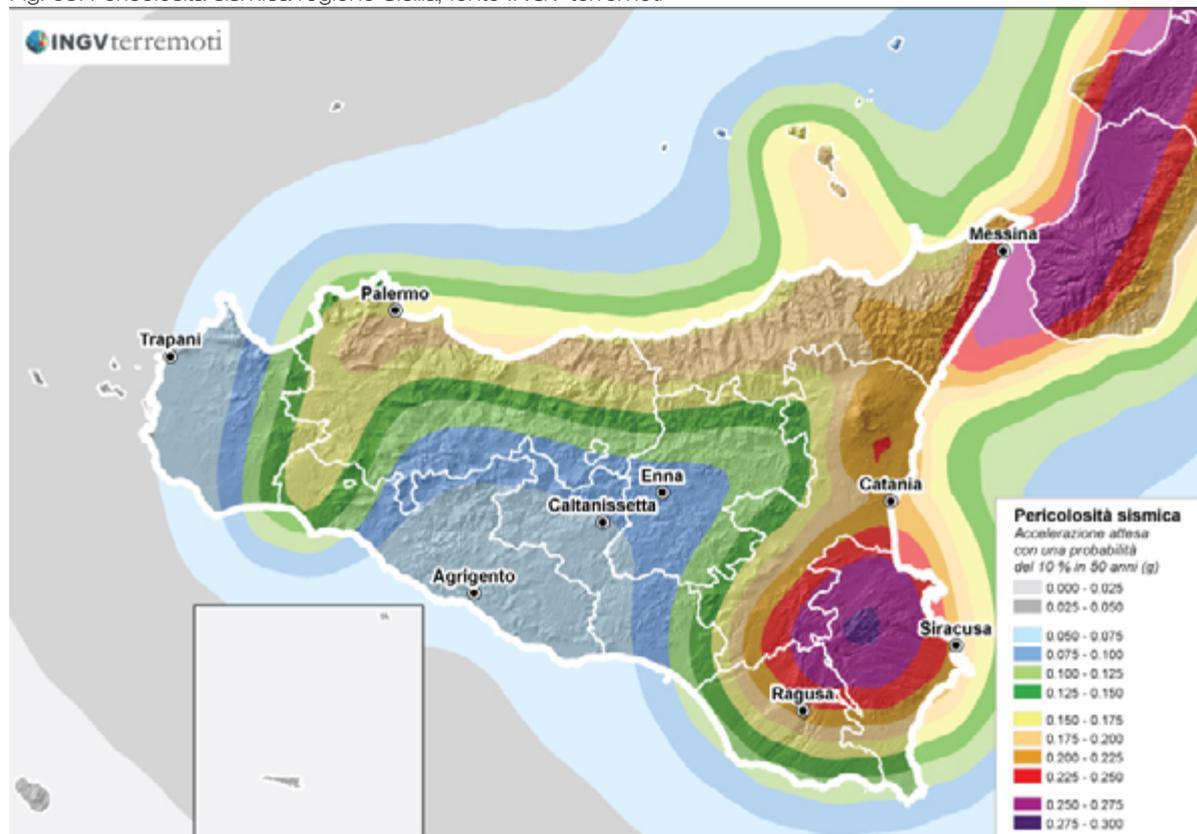
Fig. 62: Sismicità storica regione Sicilia, fonte INGV terremoti



nel Val di Noto di magnitudo 7.4. Questa risulta essere una tra le più forti e gravi avvenute sul territorio nazionale negli ultimi secoli per il numero di vittime, per la vastità di territorio colpito sia per i danni riportati. Infatti interi centri abitati andarono totalmente distrutti come avvenne per la città di Ragusa. Dopo il 1693, nella Sicilia sud orientale si registrarono altre attività sismiche minori: una l'11 gennaio 1848 e la successiva il 13 dicembre 1990 di magnitudo 5.6.

Attualmente l'attività sismica registrata è moderata, si riscontrano delle piccole scosse soltanto nell'area etnea principalmente legate all'attività vulcanica. Nonostante ciò la Sicilia rimane una delle regioni italiane con alta pericolosità sismica, con elevati valori di accelerazione attesa. In particolar modo per la zona orientale, come ad esempio nel ragusano l'accelerazione massima attesa va da 0,220 g a 0,225 g. Questi valori così alti sono determinati in funzione della sismicità storica dell'isola, facendo sì che la Sicilia abbia zone con una pericolosità sismica alta (zona 2) o molto alta (zona 1).

Fig. 63: Pericolosità sismica regione Sicilia, fonte INGV terremoti



3.3 Inquadramento storico:

Il terremoto nel Val Di Noto del 1693

Il 9 e l'11 gennaio 1693 segnarono profondamente il volto della Sicilia sud orientale. Una serie di fortissime scosse di magnitudo M_w 6.2 e 7.4 distrussero la maggior parte dei centri abitati del Val di Noto radendo totalmente al suolo alcuni di questi. La mortalità sfiorò picchi del 50% a Ragusa (5.000 vittime), e del 70% a Catania. La percentuale degli edifici crollati superava il 60%. Questi indici forniscono un quadro generale sulla grave situazione post terremoto in cui versava il territorio, con la relativa urgenza di ricostruire e rigenerare il tessuto urbano cancellato dal sisma. Come accade ancora oggi, anche nel Seicento la ricostruzione fu occasione di sviluppo. Questa venne vista come opportunità di miglioramento dei centri urbani adeguando il linguaggio architettonico degli edifici ai nuovi canoni della cultura barocca.

Per quanto riguarda il patrimonio ecclesiastico, in molti casi si riscontrò la tendenza ad esagerare i danni provocati dal terremoto per ottenere dei vantaggi economici messi a disposizione per la ricostruzione. Forse proprio per questo motivo si riscontra una trasformazione qualitativa e quantitativa senza precedenti in Europa.



Fig. 64: "Forma Piscis"

La forma piscis è il nome dato al vecchio impianto medioevale della città di Ragusa.

Trae il nome proprio dalla caratteristica forma somigliante a quella di un pesce.

Per la ricostruzione post-sisma si decise di ricostruire una parte della città su questo stesso sedime rispettando la vecchia traccia.

La società sentiva l'esigenza di rinnovarsi seguendo nuovi modelli di spazio urbano che potessero rappresentarla e il sisma creò l'occasione per avviare questi processi di rinnovamento. E' proprio quello che accade a Ragusa; la città viene in parte ricostruita sul vecchio tracciato medioevale, mentre un'altra parte viene edificata su nuovo impianto a maglie ortogonali proprio per la volontà di applicare nuovi modelli urbani (fig 45), il tutto utilizzando un linguaggio puramente barocco come si diceva precedentemente. Anche il patrimonio ecclesiastico fu soggetto a questo rinnovamento lessicale, le chiese che verranno trattate in questo capitolo, furono costruite totalmente o ricostruite in parte dopo i danni causati dal devastante terremoto.

È proprio in questa ottica di rinnovamento lessicale e di adattamento ai canoni stilistici europei che si realizzeranno le cupole del post terremoto presenti nel territorio Ragusano.⁴

⁴ L.Trigilia, *Annali del Barocco in Sicilia, Vol 1*, Roma: Gangemi Editore, 1994
L.Trigilia, *1693 Iliade Funesta, Venezia*, Arnoldo Lombardi Editore, 1994
A.Casamento, E.Guidoni, op. cit. alla nota 3 pag. 61

Fig. 65: veduta satellitare del vecchio impianto medioevale, e di quello ortogonale post-sisma della città di Ragusa, Fonte: Google Heart



3.4 Le cupole: Rassegna

Le cupole analizzate in questa rassegna corrispondono tutte alla tipologia di cupola estradossata su tamburo, queste insistono su cinque dei dodici comuni facente parte della provincia di Ragusa. Con precisione troviamo due cupole nel comune di Ragusa: quella del Duomo di San Giorgio e quella della Cattedrale di San Giovanni Battista. A Comiso sono presenti altre due cupole: quella della Chiesa Madre di Santa Maria delle Stelle e nella Chiesa della Santissima Annunziata, mentre nei comuni di Modica, Vittoria e Ispica ne troviamo solamente una, nel Duomo Di San Giorgio a Modica, nella Basilica di San Giovanni Battista a Vittoria e nella Basilica della Santissima Annunziata di Ispica.

Le sette chiese prese in considerazione in questa rassegna hanno degli elementi compositivi comuni, come ad esempio l'impianto a tre navate. L'unica tra queste che fa eccezione, articolandosi su cinque navate, è il Duomo di San Giorgio a Modica. Come tipicamente avviene, anche in questi casi la cupola si innesta all'incrocio tra la navata principale e il transetto. Altro elemento in comune tra i sette casi è la presenza di pennacchi sferici che garantiscono la continuità geometrica tra la pianta e il tamburo delle cupole in oggetto.

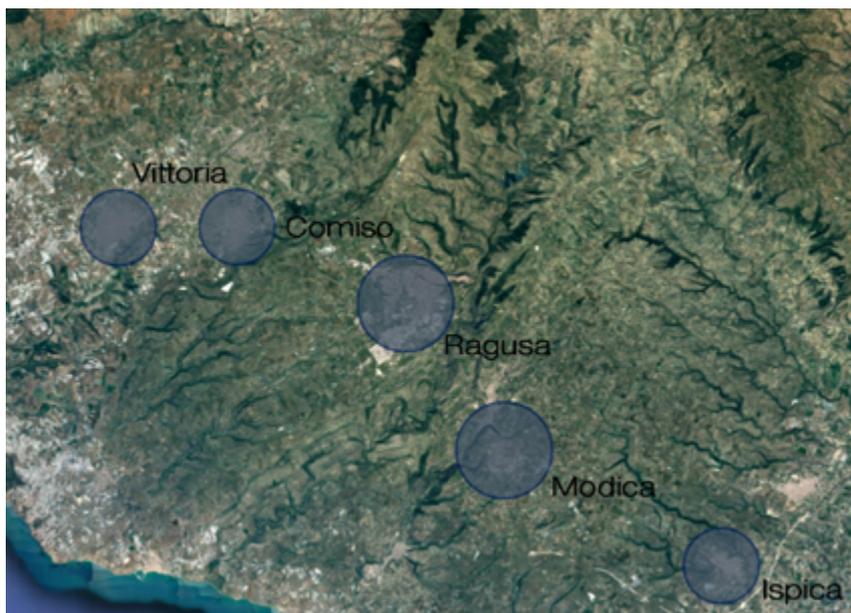
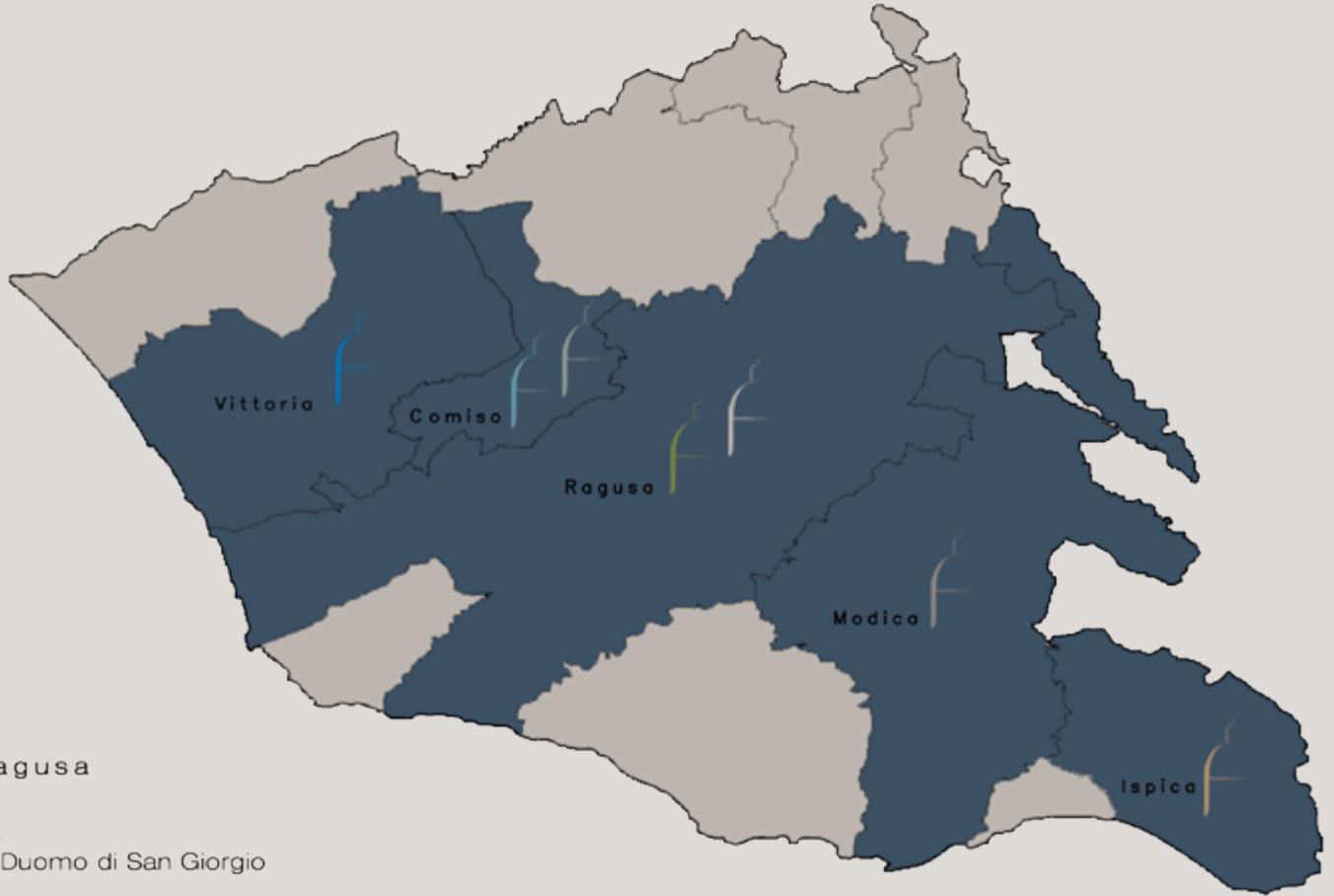


Fig. 66: Veduta satellitare delle provincia di Ragusa con evidenziate le città dove si trovano le cupole analizzate
Fonte: Google Heart



Ragusa

 Duomo di San Giorgio

 Cattedrale di San Giovanni

Modica

 Duomo di San Giorgio

Comiso

 Chiesa di Santa Maria delle Stelle

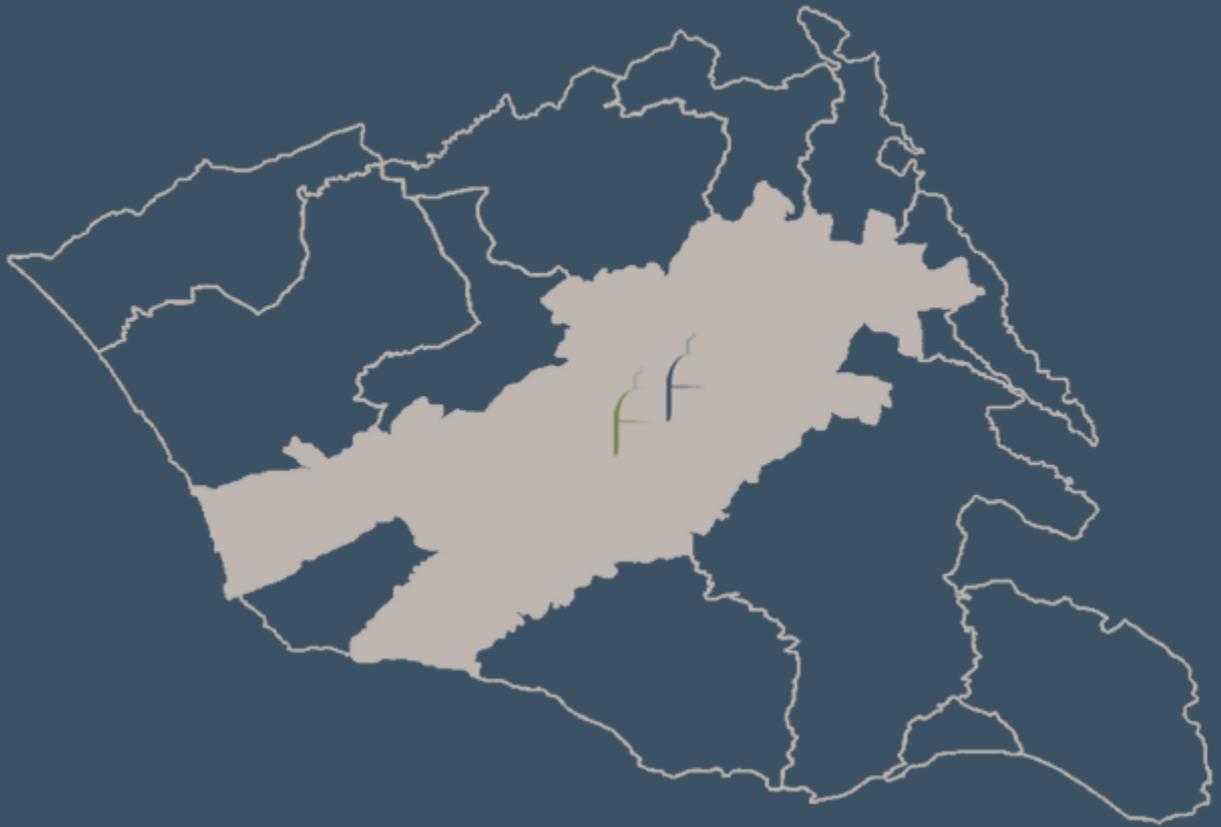
 Chiesa della Santissima Annunziata

Vittoria

 Chiesa di San Giovanni Battista

Ispica

 Chiesa della Santissima Annunziata



RAGUSA

Duomo di San Giorgio

La cupola del Duomo di San Giorgio costruita nel 1820 è fra la più interessanti del territorio ragusano. Progettata e costruita da Carmelo Cultraro, capomastro del posto, ricalca modelli europei precedenti come il Pantheon di Parigi o St Paul a Londra, o forse, più semplicemente, senza oltrepassare i confini, il tempietto di San Pietro in Montorio di Roma. La cupola si imposta sui piloni della crociera di una pianta a croce latina a tre navate. Il raccordo tra i pilastri e l'imposta del tamburo è dato da pennacchi sferici. Il tamburo, elemento caratterizzante della cupola, è finestrato e formato da 16 colonne binate. Queste reggono la calotta costolonata che culmina con una lanterna anch'essa composta da colonnine⁵.

⁵Donatella Germanò, Barocco in Sicilia, Firenze, Donatella Germanò, 1986

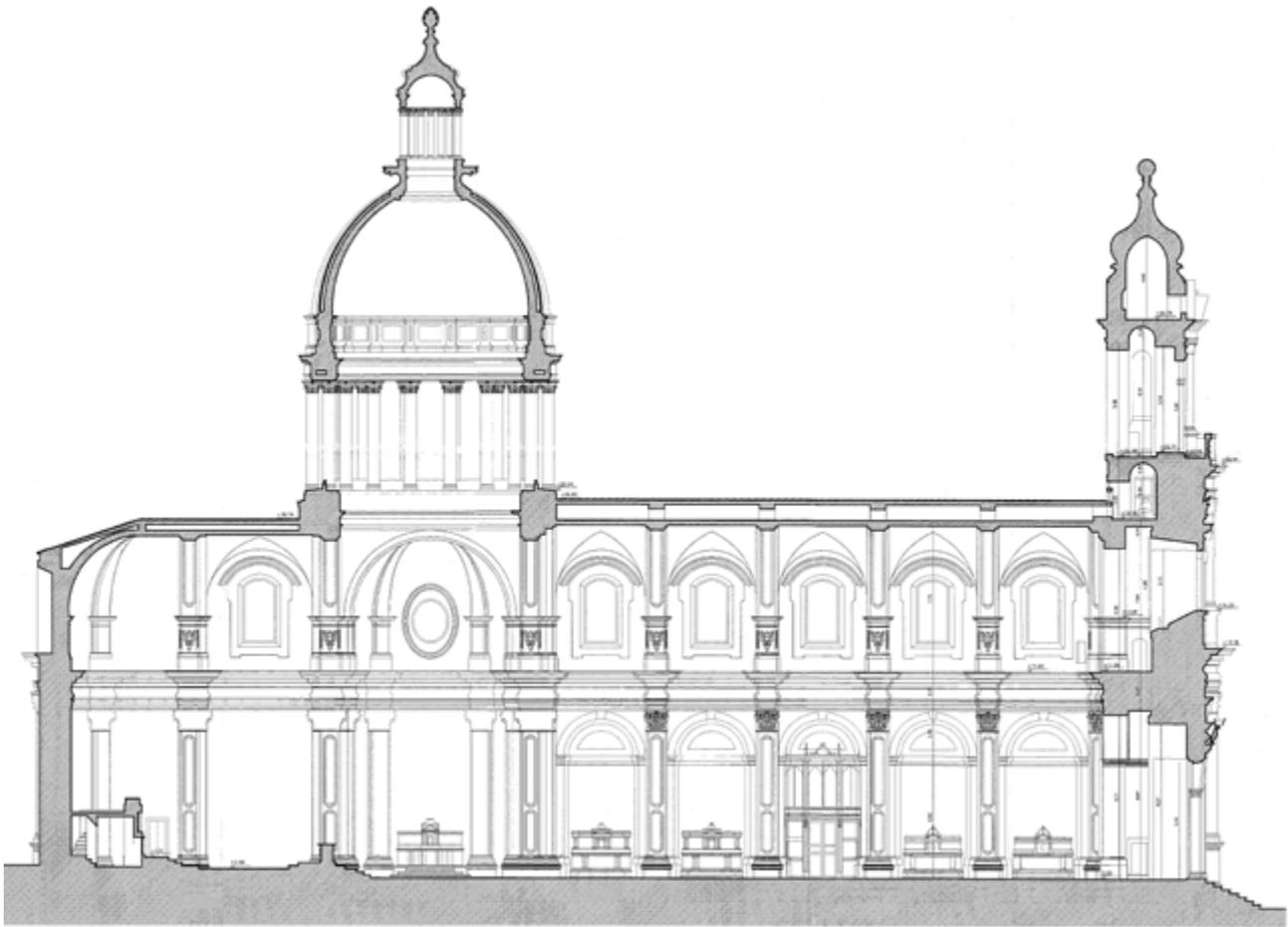


Fig. 67: Sezione longitudinale Duomo di San Giorgio, Ragusa Ibla.
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa



Fig. 68: Foto dell'autore

Fig. 69: Pianta Duomo di San Giorgio, Ragusa Ibla.
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

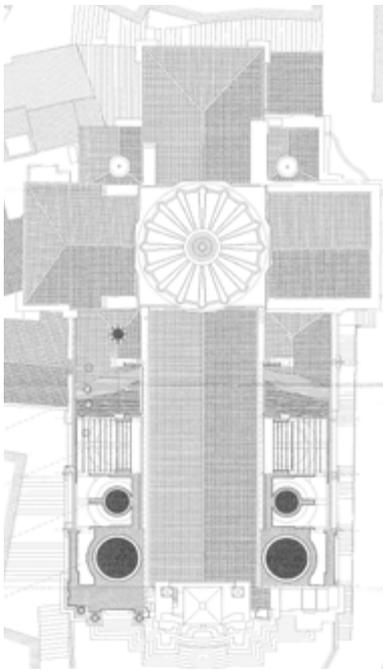
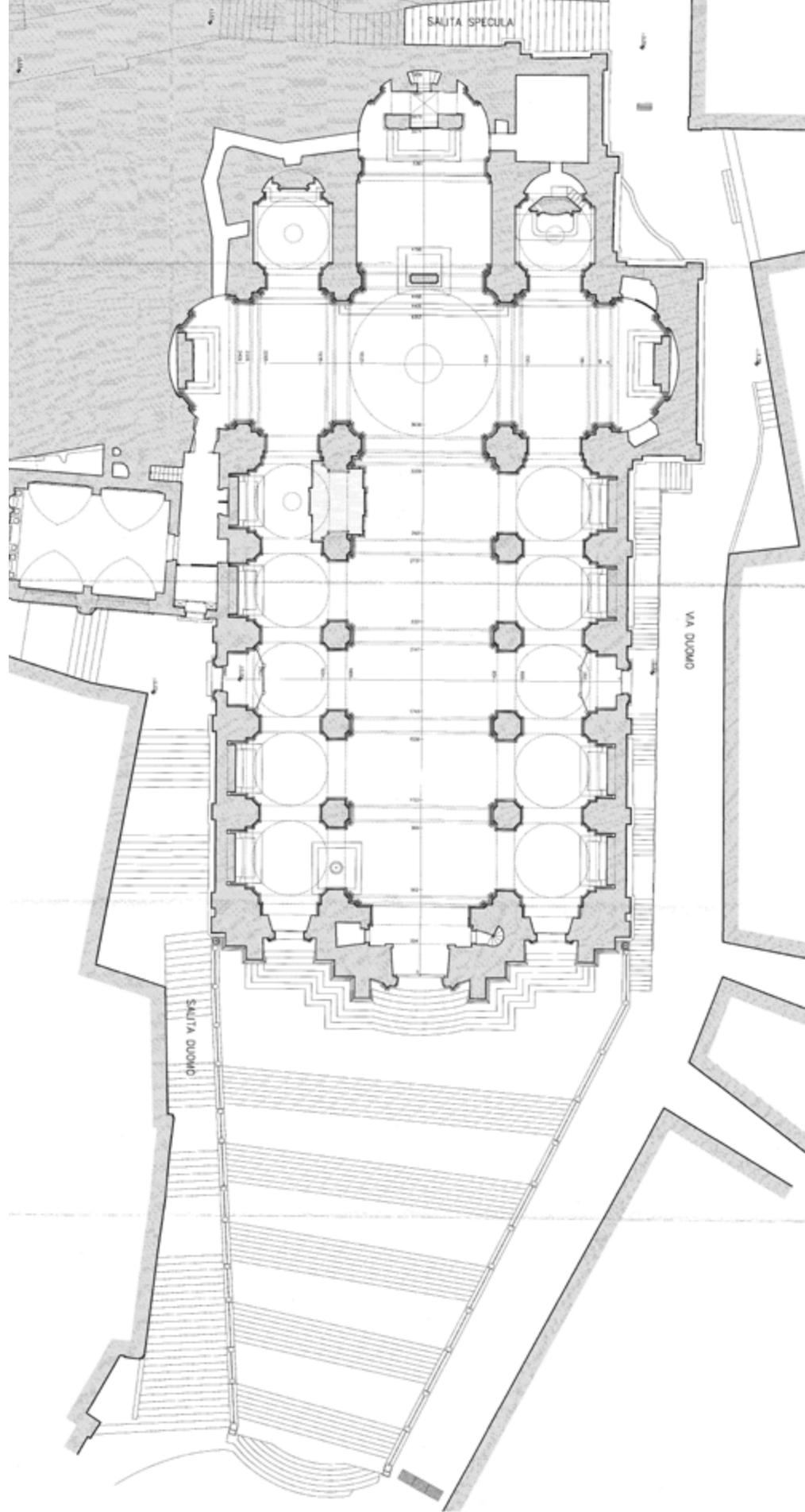
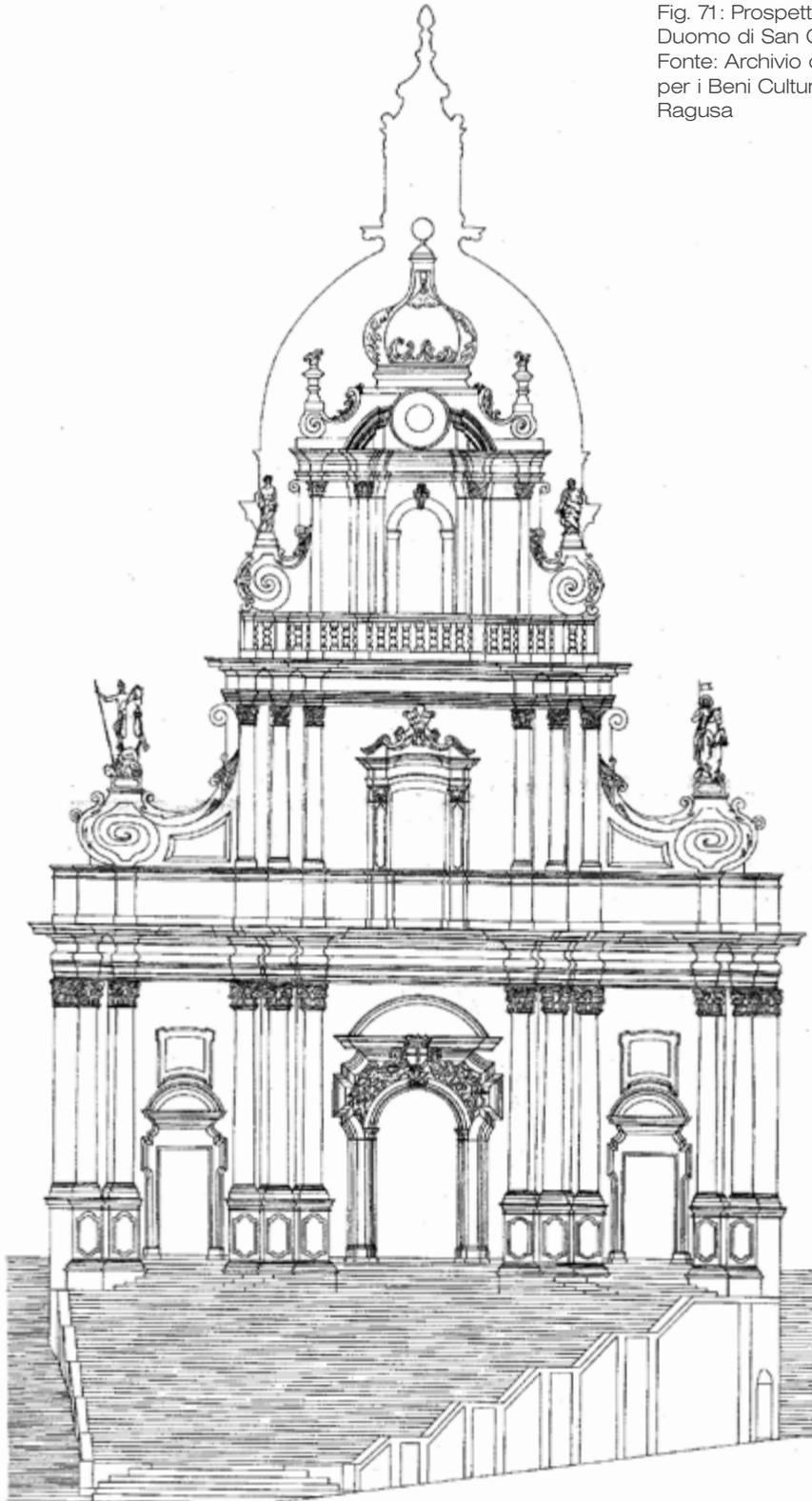


Fig. 70: Pianta coperture Duomo di San Giorgio, Ragusa Ibla.
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

Fig. 71: Prospetto
Duomo di San Giorgio, Ragusa Ibla.
Fonte: Archivio della Soprintendenza
per i Beni Culturali ed Ambientali di
Ragusa



Cattedrale di San Giovanni

La Cattedrale di San Giovanni, con la sua cupola risalente alla fine del settecento (1780-1783), venne costruita con un impianto basilicale a tre navate, dopo che il terremoto del 1693 la distrusse. L'apparato della cupola è composto da pennacchi sferici su cui si imposta il tamburo cilindrico. Questo presenta otto grandi finestroni che scandiscono ritmicamente l'interno dello stesso, insieme a delle lesene con capitello corinzio, esternamente le finestre del tamburo sono intervallate da una colonna con capitello composito. La calotta esternamente è rivestita da lastre di rame, intervento risalente agli inizi del novecento per bloccare le infiltrazioni d'acqua che stavano compromettendo la stabilità della struttura. La cupola è coronata da una lanterna molto alta che presenta aperture strette e lunghe intervallate da paraste scalanate con capitello composito simile a quello del tamburo. La lanterna stessa è coperta da una cupoletta a bulbo culminato dalla sfera e la croce⁶.

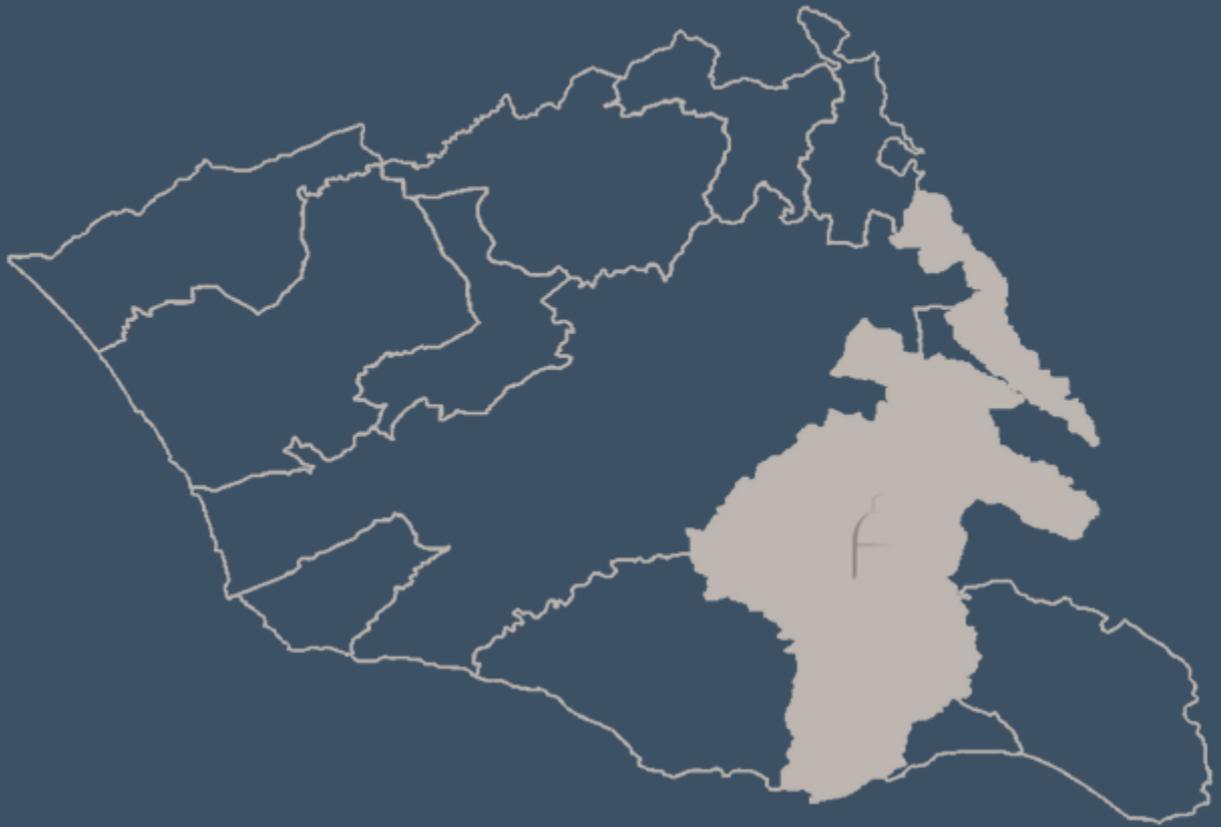
⁶<http://www.beweb.chiesacattolica.it>



Fig. 72: Prospetto principale della Cattedrale di San Giovanni, Ragusa.
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa



Fig. 73: Foto dell'autore



MODICA

Duomo di San Giorgio

I lavori per la costruzione della cupola iniziarono nel 1791 ad opera del capomastro ragusano Giambattista Muccio. La cupola è posta al centro tra il transetto e l'abside centrale della chiesa che ha impianto basilicale a cinque navate. L'apparato della cupola è composto da un alto tamburo cilindrico che presenta otto grandi aperture finestrate. Esternamente tra una finestra e l'altra troviamo una lesena di ordine tuscanico. Il secondo ordine sul quale si innesta la calotta comprende un attico con pannelli scolpiti a maglie mistilinee. La cupola è coronata da un lanternino di ordine tuscanico come il tamburo. All'interno la cupola è impreziosita da stucchi policromi sui pennacchi e sulla calotta, il tamburo è scandito da una coppia di lesene con capitelli coposti con teste di putto⁷.

⁷P.Nifosi, G.Morana, La Chiesa di San Giorgio di Modica, Modica, Stampa La Grafica, 1993

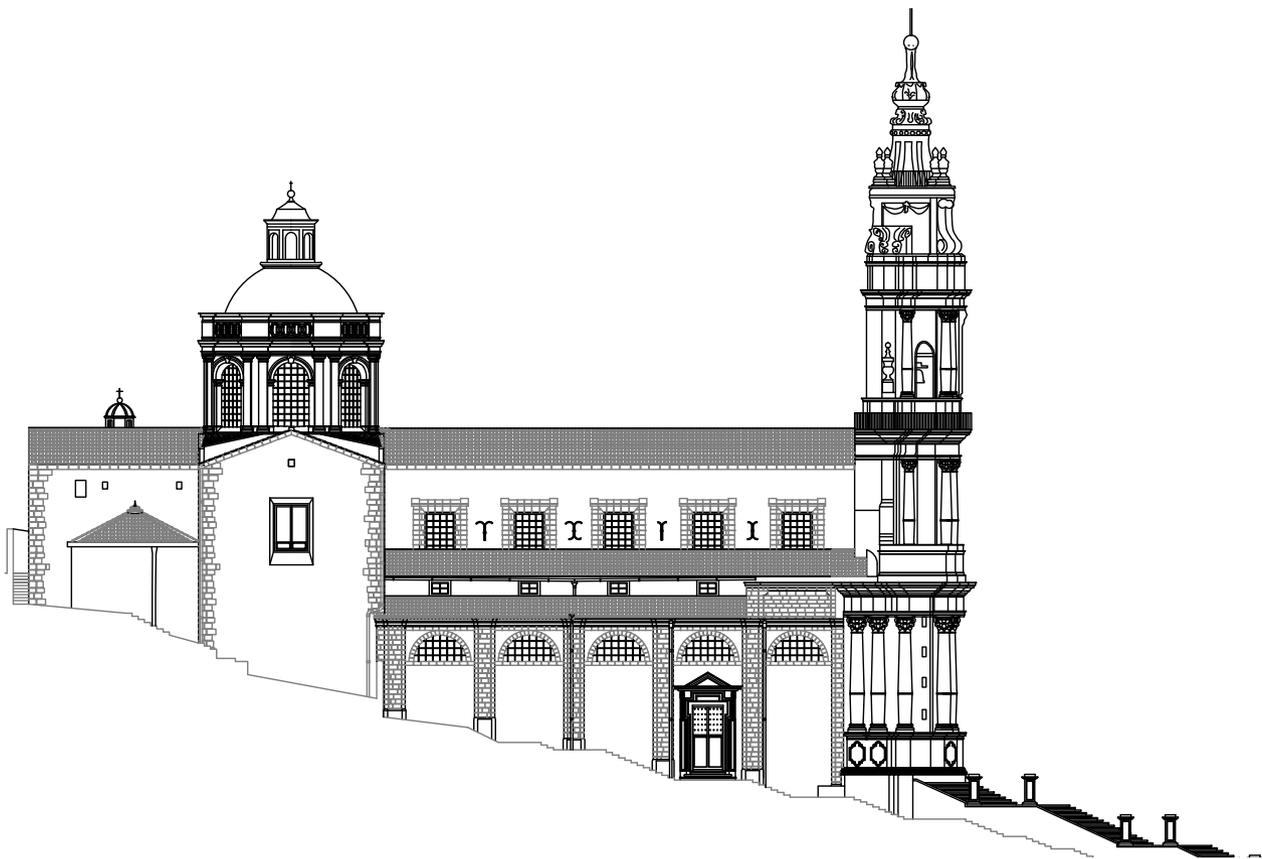


Fig 74:Prospetto laterale del Duomo di San Giorgio, Modica.

Fonte: Dipartimento della Protezione Civile -Regione Sicilia. Ing Gaetano Marcello Mannino, Arch. Mario Miceli

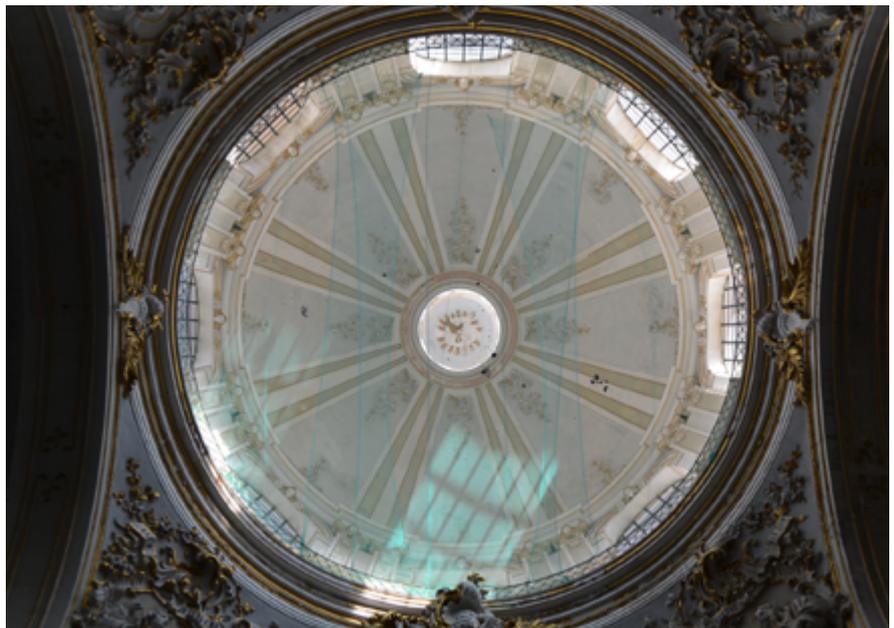
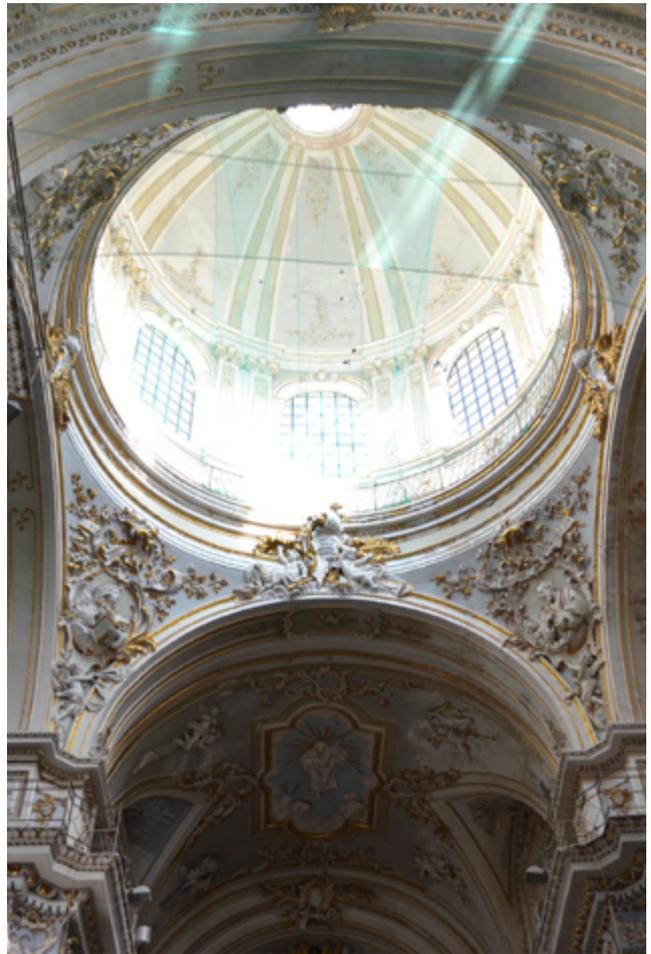


Fig. 75: Foto dell'autore

Fig 76: Pianta del Duomo di San Giorgio, Modica.
Fonte: Dipartimento della Protezione Civile -Regione Sicilia. Ing Gaetano Marcello Mannino, Arch. Mario Miceli

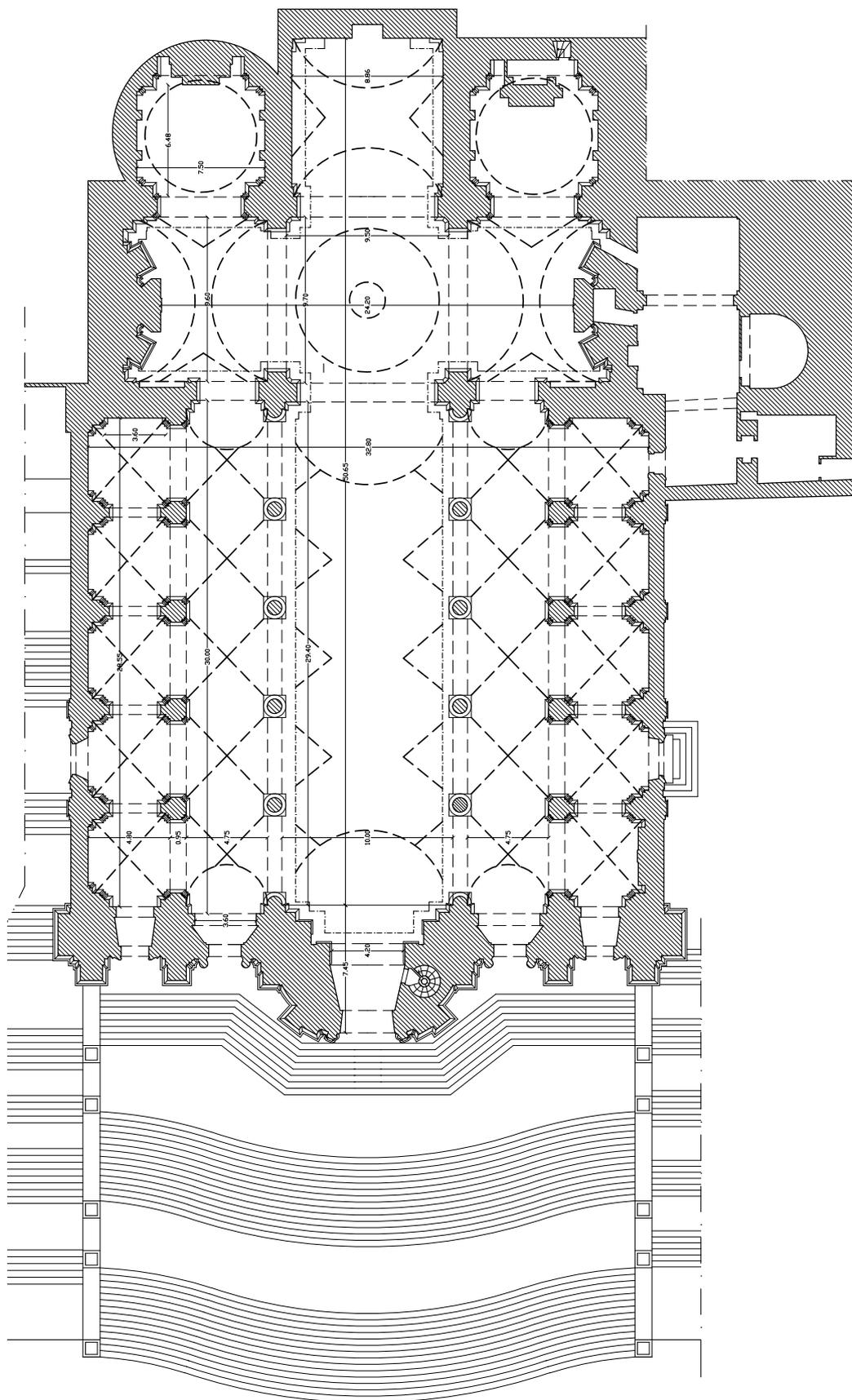
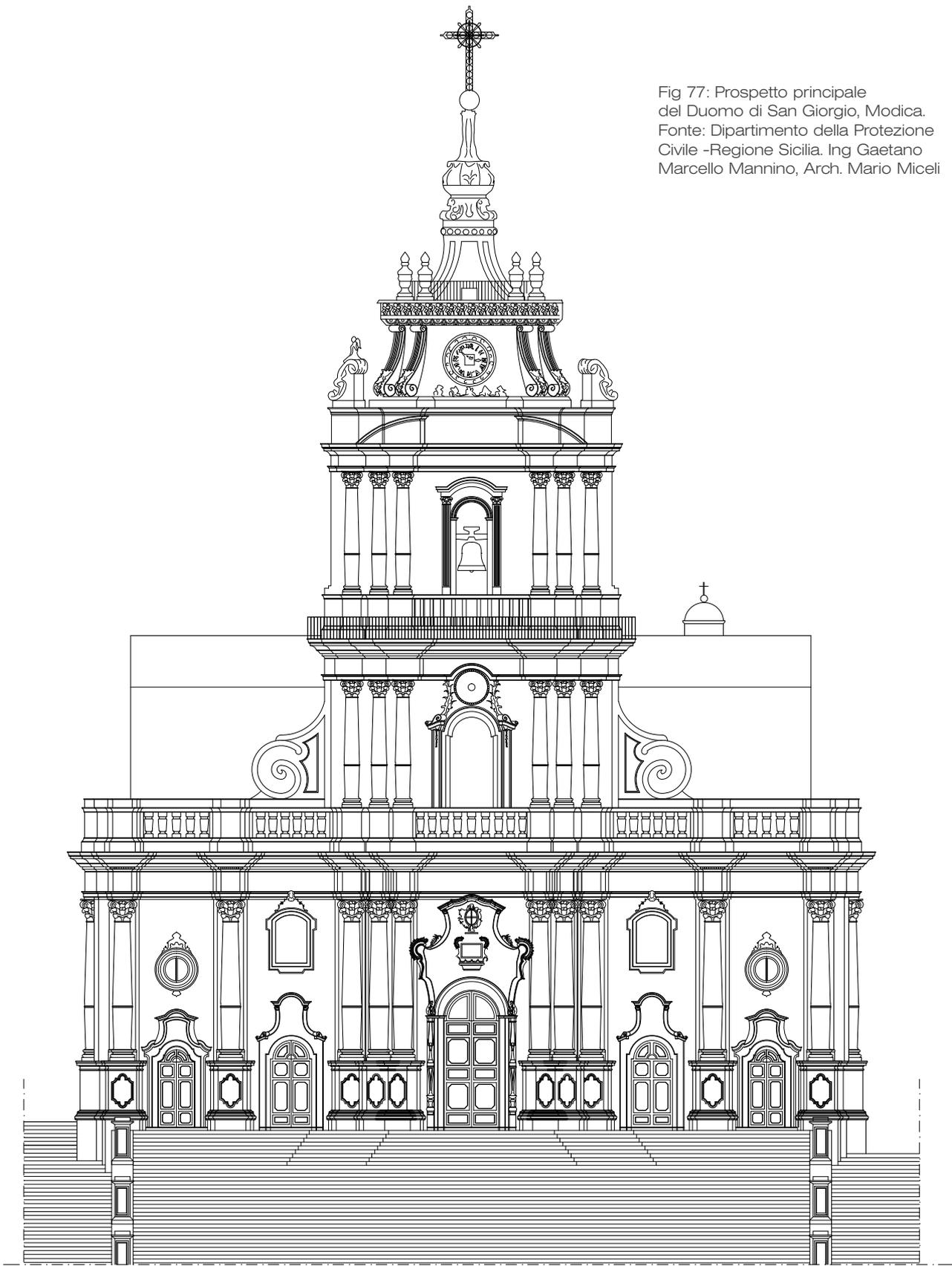


Fig 77: Prospetto principale del Duomo di San Giorgio, Modica.
Fonte: Dipartimento della Protezione Civile -Regione Sicilia. Ing Gaetano Marcello Mannino, Arch. Mario Miceli





ISPICA

Basilica della Santissima Annunziata

La cupola della Santissima Annunziata a Ispica è la più vecchia tra quelle considerate in questa rassegna e risale alla prima metà del Settecento. Anche questa chiesa fu totalmente ricostruita dopo il terremoto del 1693. Infatti dieci anni dopo iniziarono i lavori per la costruzione di quella nuova. La chiesa è ad impianto basilicale, la cupola sorge all'incrocio tra il transetto e la navata centrale, questa è adornata da bellissimi stucchi policromi che ricoprono internamente tutta la superficie della calotta e dei pennacchi. Il tamburo presenta quattro aperture rettangolari in corrispondenza dei sottostanti pennacchi, intervallate da altre quattro finte finestre per creare una continuità ritmica all'interno del tamburo. Tra queste troviamo delle piccole lesene scanalate. Esternamente la cupola si presenta bassa e spoglia perché il tamburo è coperto dal tetto della navata centrale e quello del transetto⁸.

⁸ Melchiorre Trigilia, Storia e guida di Ispica, Ragusa, Ci.D.I.B.I., 1989



Fig. 78: Sezione longitudinale Basilica Santissima Annunziata, Ispica
Fonte: DA INDICARE

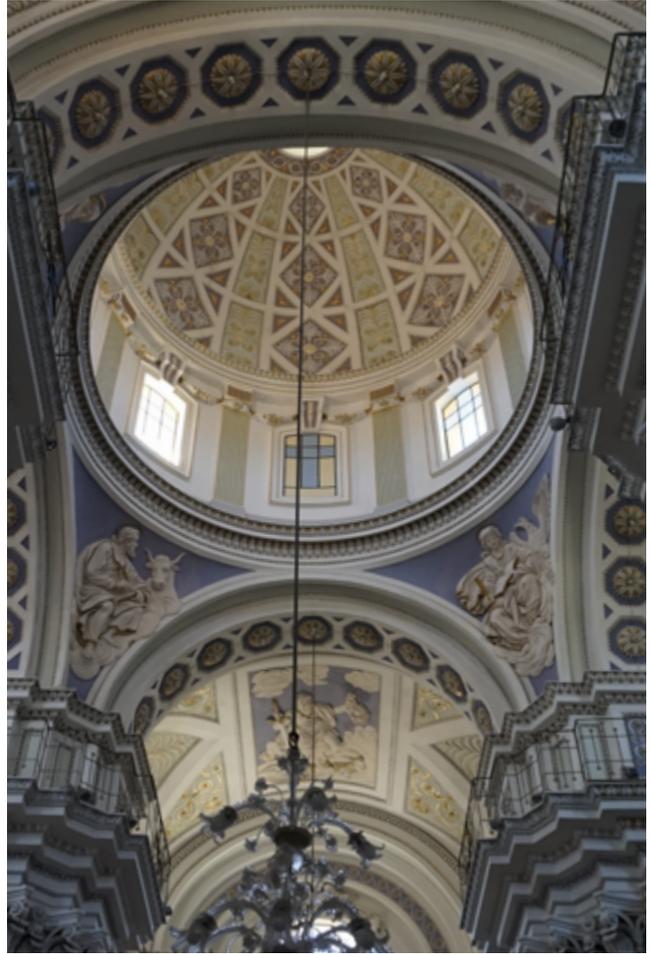
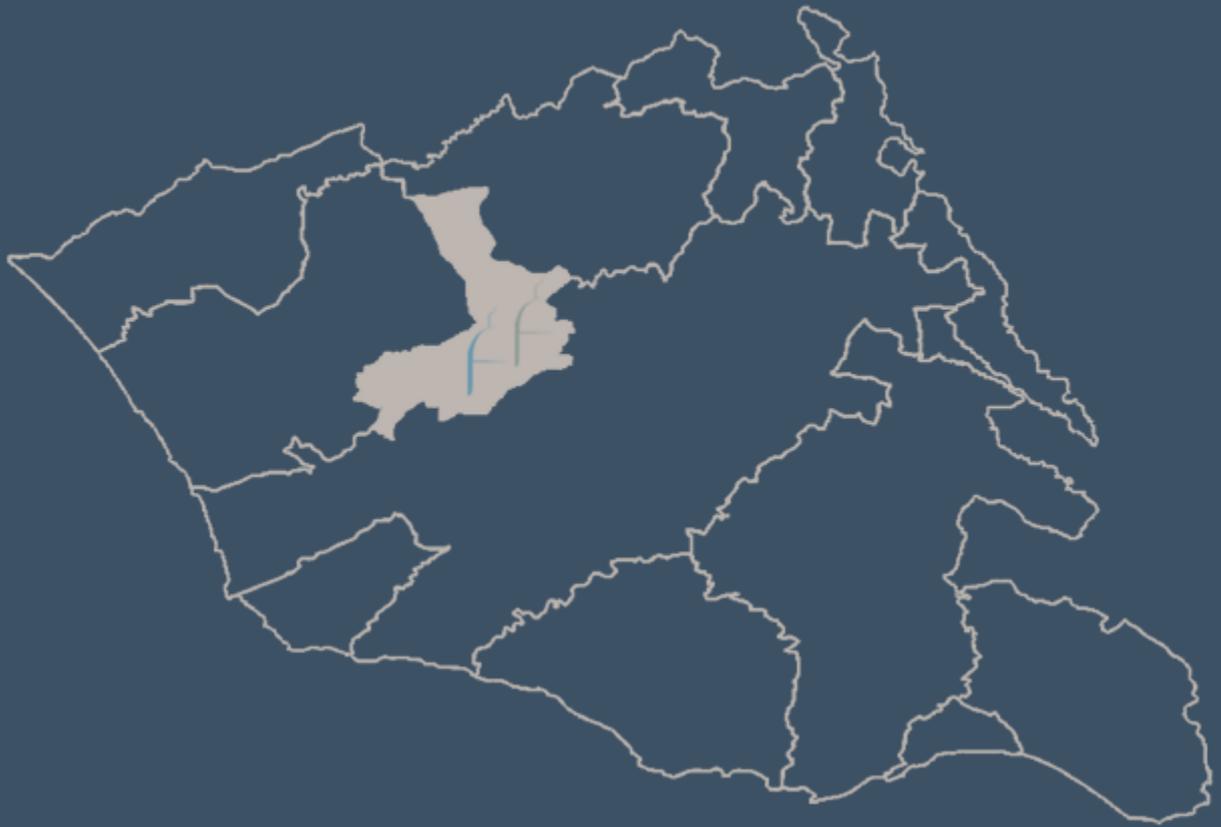


Fig. 79: Foto dell'autore



COMISO

Chiesa della Santissima Annunziata

Per quanto riguarda la cupola della Santissima Annunziata a Comiso, essa fu eretta tra il 1877 e il 1885 dall'ing. Girardo. Fu progettata su copia della cupola del Duomo di San Giorgio a Ragusa, infatti la somiglianza è veramente considerevole e si potrebbe dire che l'unica differenza tra le due è individuata dall'appoggio della calotta che in San Giorgio è riservato a delle colonne binate, mentre, in questa, nel vuoto tra le due colonne è presente un pilastro. Compositivamente si presenta identica alla gemella ragusana, ovvero un alto tamburo totalmente finestrato ritmato dalla presenza di colonne composite su cui si poggia un'alta trabeazione dove a sua volta si imposta la calotta costolonata. La cupola è sormontata da un'alta lanterna con colonnine e copertura a bulbo. Internamente la cupola è arricchita da stucchi e affreschi nei quattro pennacchi e il tamburo si presenta come all'esterno ovvero con colonne composite tra le aperture⁹.

⁹ Biagio Miceli, Comiso Viva, Ragusa, S.I., 1976

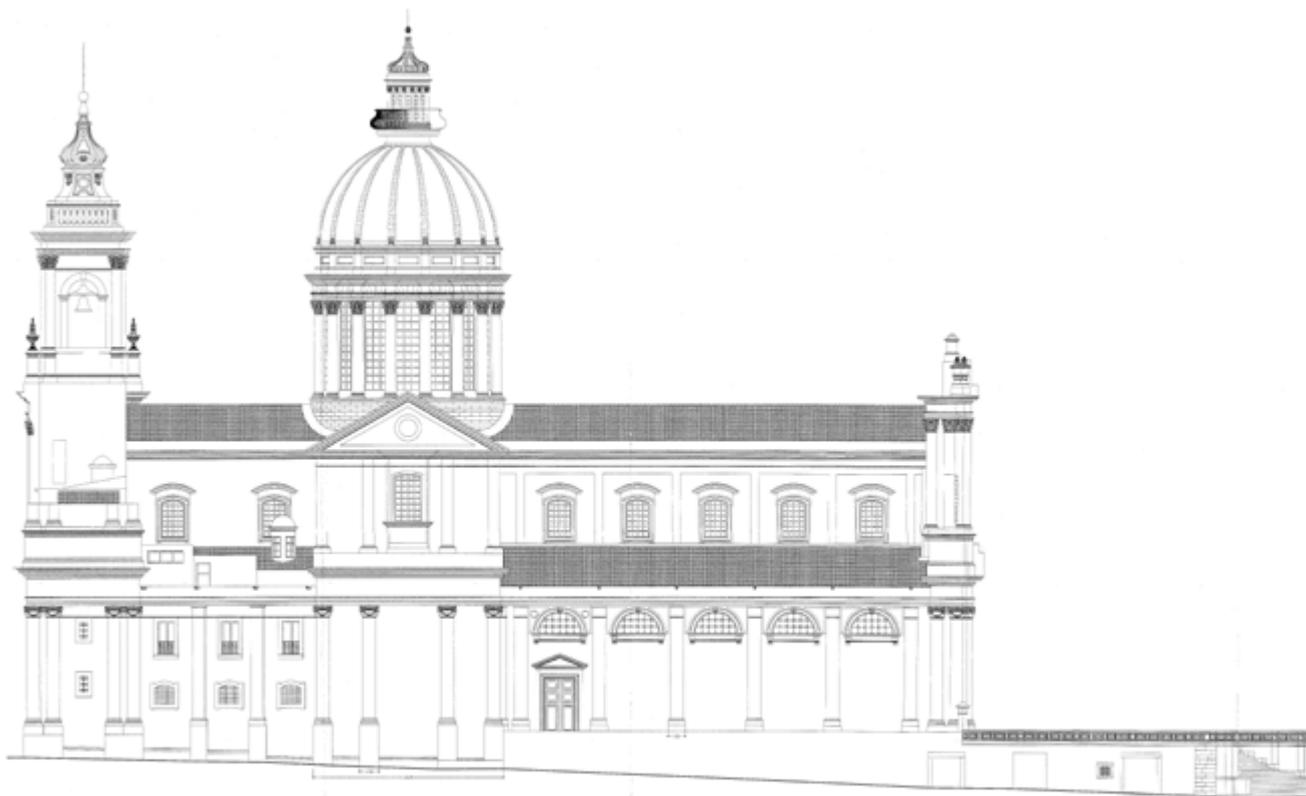


Fig. 80: Prospetto laterale della Chiesa della Santissima Annunziata, Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

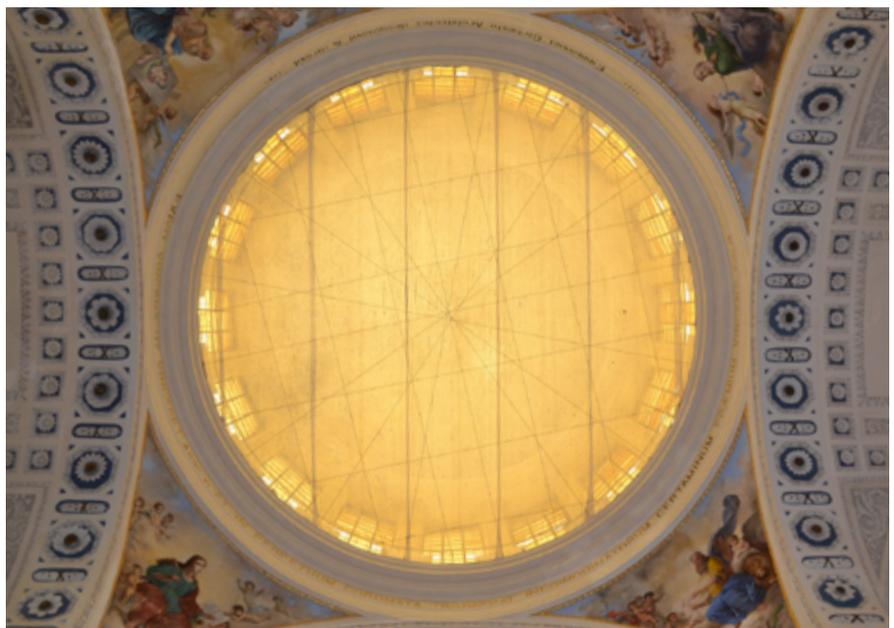
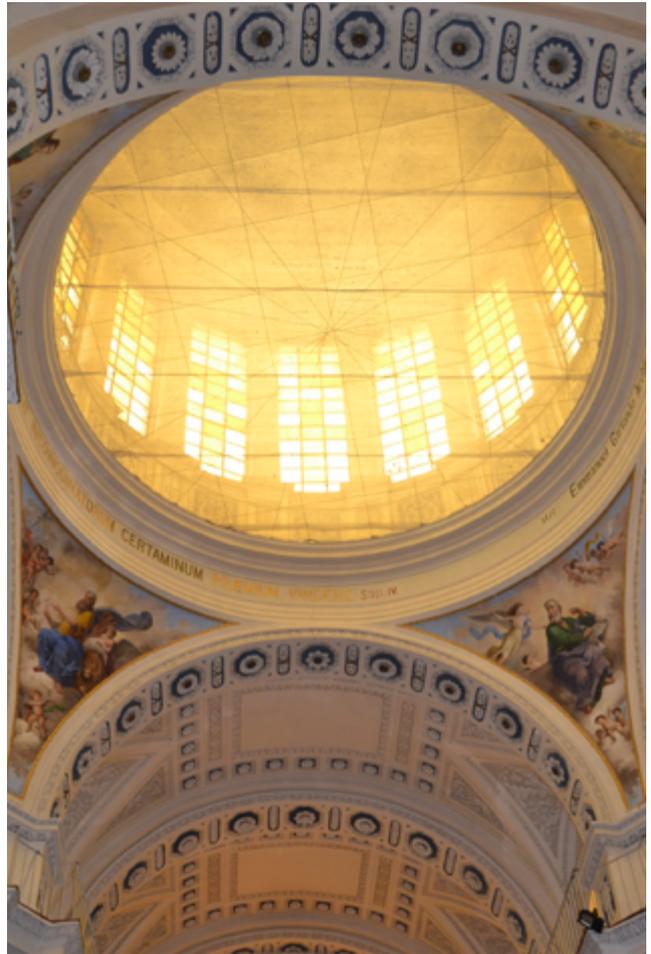


Fig. 81: Foto dell'autore

Fig. 82: Pianta della Chiesa della Santissima Annunziata, Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

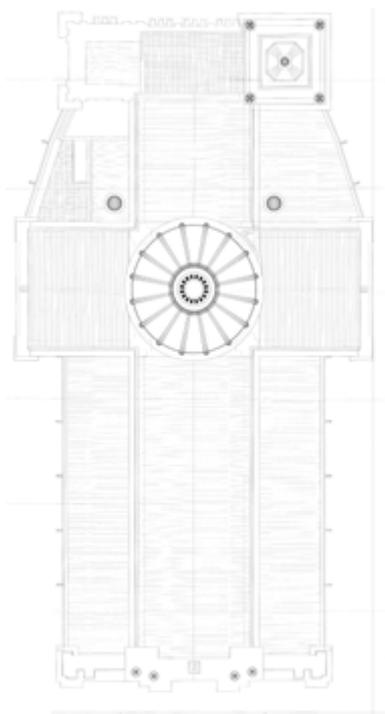
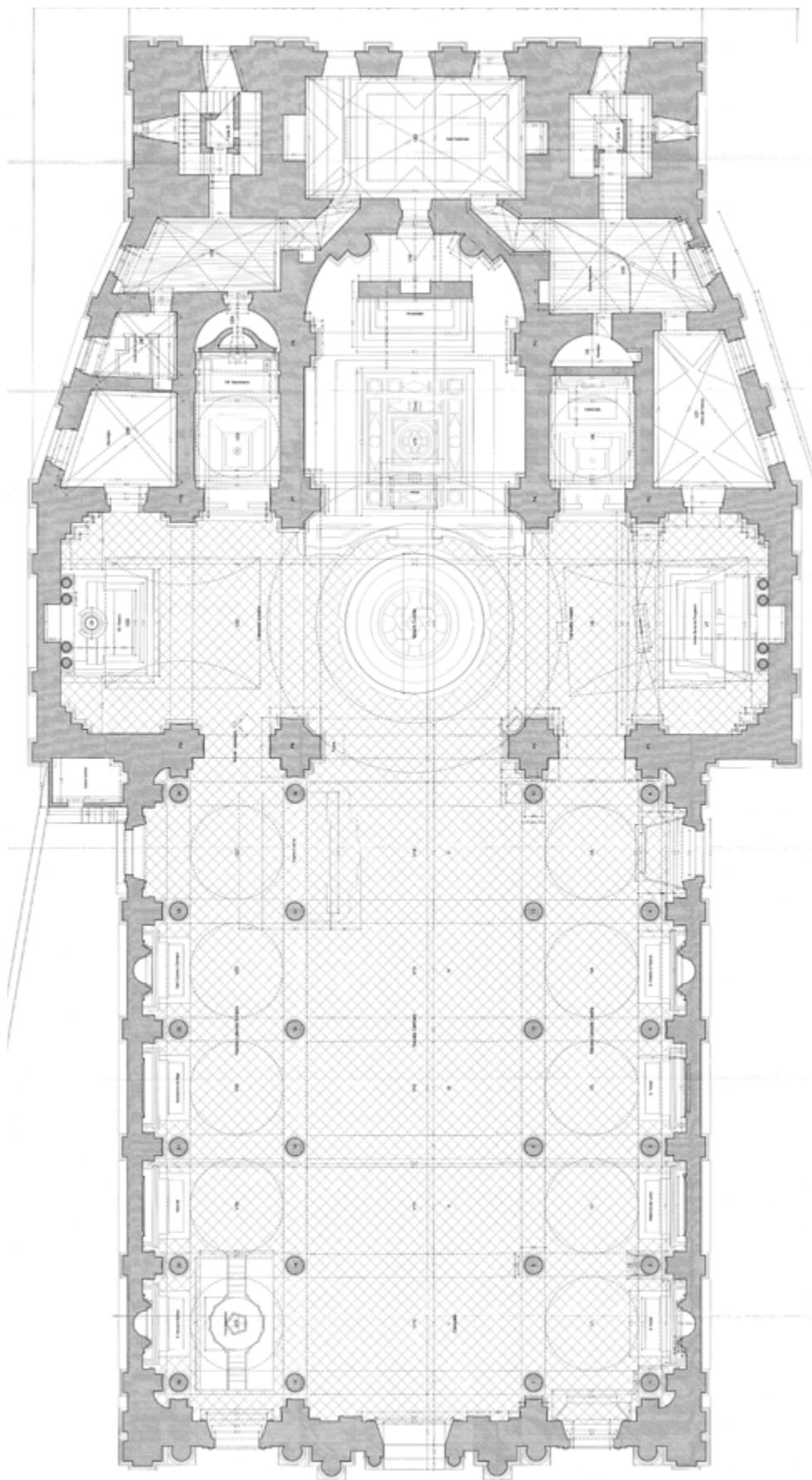


Fig. 83: Pianta coperture della Chiesa della Santissima Annunziata, Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

Chiesa di Santa Maria delle Stelle

La cupola della chiesa Madre di Santa Maria delle stelle fu costruita nel 1894 da Giovanni Galeoto. Anche questa progettata su modello di quella Ragusana del duomo di San Giorgio. Essa si erge al centro della crociera e comprende un alto taburo con dodici aperture ad arco a sesto acuto, strette e molto alte, intervallate esternamente da semicolonne composite. La calotta, in particolar modo, si imposta su un'alta trabeazione riccamente impreziosita di bassorilievi. Questa si presenta suddivisa in spicchi da sottili fasce, anch'esse costituite de bassorilievi floreali, quasi a imitare una labile costolonatura. La chiusura della cupola è garantita da un'alta lanterna composta da colonnine composite e da una copertura a bulbo. Internamente, la cupola si presenta spoglia, totalmente bianca, ma l'unico elemento decorativo è riservato ai capitelli di ordine corinzio posti sulle lesene tra una finestra e l'altra¹⁰.

¹⁰ Biagio Gurrieri, Comiso Viva, Ragusa, S.I., 1976



Fig. 85: Prospetto laterale della Chiesa Santa Maria Delle Stelle, Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

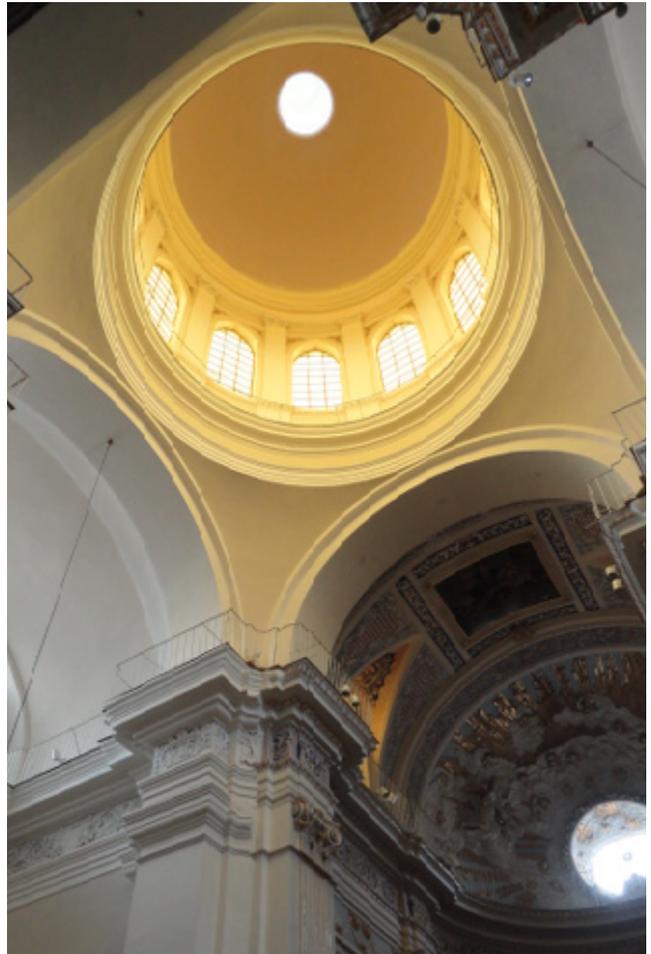


Fig. 86: Foto dell'autore

Fig. 86: Pianta della Chiesa Santa Maria Delle Stelle, Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

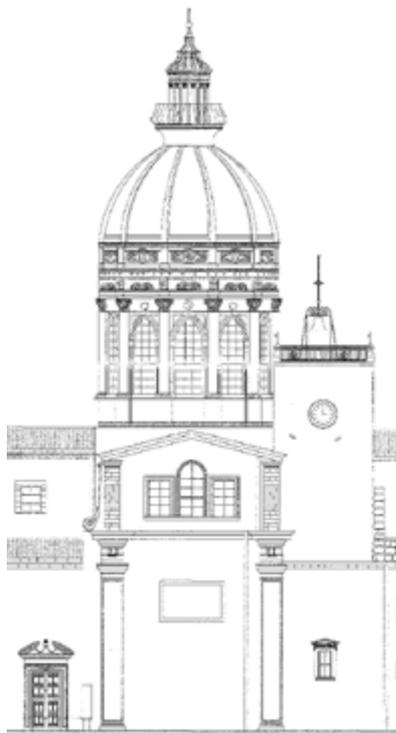
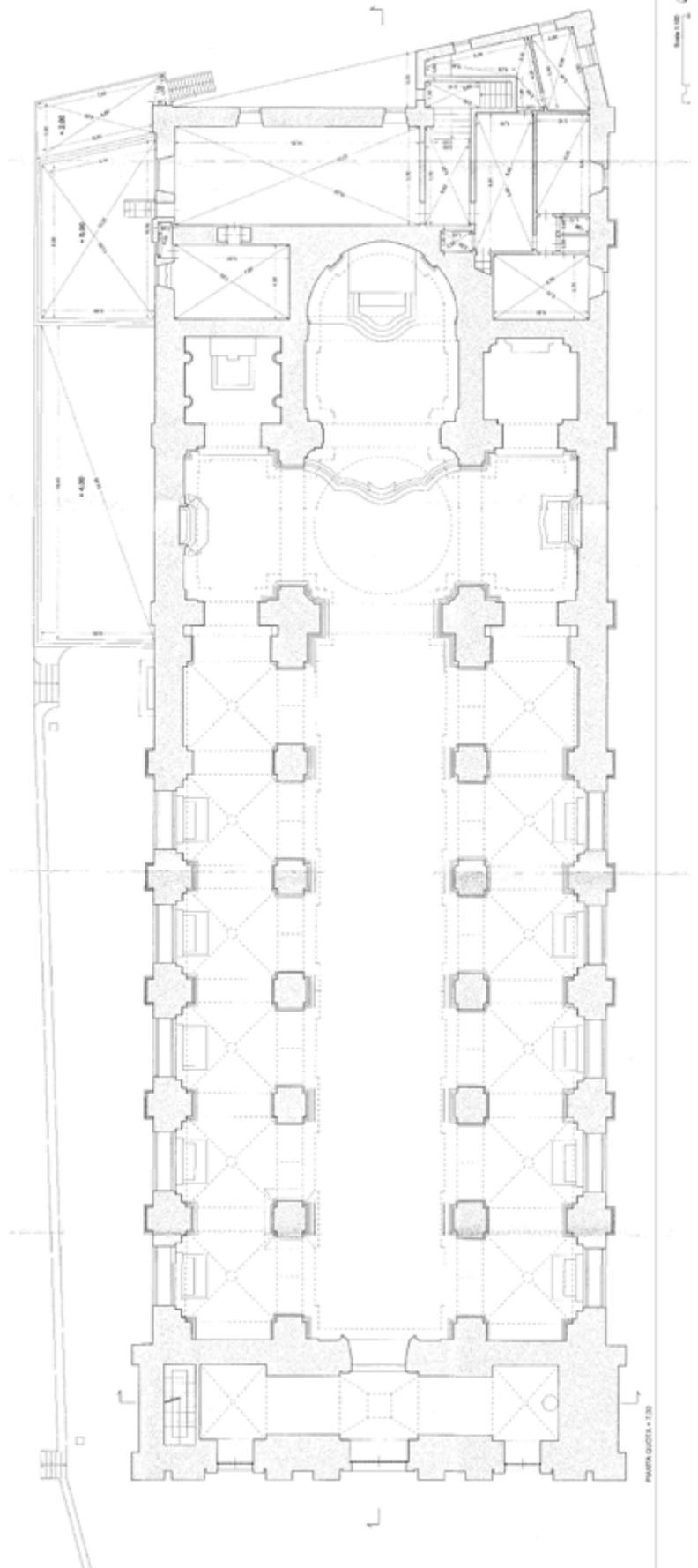


Fig. 87: Prospetto Sud-Est della Chiesa Santa Maria Delle Stelle, Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

Fig. 88: Prospetto della Chiesa Santa
Maria Delle Stelle, Comiso
Fonte: Archivio della Soprintendenza
per i Beni Culturali ed Ambientali di
Ragusa





VITTORIA

Basilica di San Giovanni Battista

La Basilica ha una pianta a croce latina a tre navate con un transetto di larghezza inferiore alla navata centrale. Nella crociera si erge la cupola leggermente ovalizzata, progettata nel 1854 dall'architetto gelese Giuseppe Di Bartolo Morselli. Essa è composta da un tamburo con otto aperture finestrate, alternate esternamente da una coppia di colonne di ordine corinzio e, internamente, da coppie di lesene. Al di sopra della trabeazione esterna del tamburo, troviamo un attico al secondo ordine, dove si imposta la calotta costolonata. Completa l'apparato della cupola una lanterna costituita da colonnine e una copertura a bulbo, come accade negli esempi comisani o in San Giorgio a Ragusa. La cupola, al suo interno, è arricchita da affreschi e stucchi policromi¹¹.

¹¹ <http://www.comunevittoria.gov.it/index.php?content=luogo&id=1>



Fig. 89: Foto dell'autore

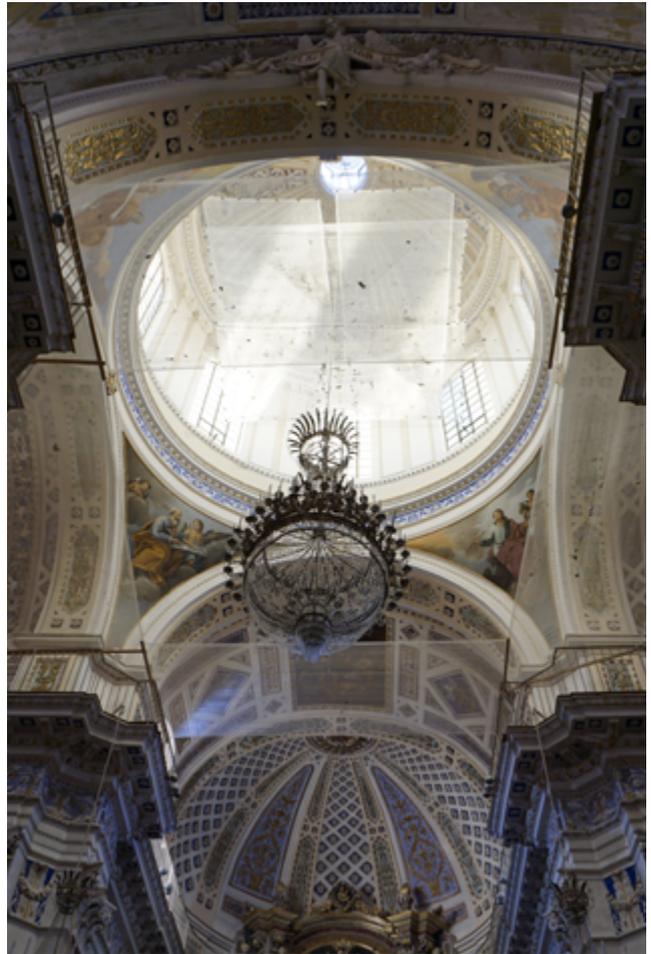


Fig. 90: Foto dell'autore

3.5 Confronti

Analizzando i casi presi in considerazione si è notato come questi abbiano scelte compositive simili o addirittura uguali come accade per la cupola della Santissima Annunziata a Comiso e San Giorgio a Ragusa. In particolar modo si è notato come i tamburi tutti cilindrici tendano a essere particolarmente svuotati dalla presenza di grandi aperture. Fa eccezione il caso ispicese della Santissima Annunziata che presenta soltanto quattro piccole finestre rettangolari. Troviamo l'exasperazione di questa tendenza nella cupola ragusana di San Giorgio, dove il "tamburo", se così è possibile chiamarlo, affida il compito di reggere la calotta a una serie di sedici colonne binate. Questo elemento assume quasi un ruolo esclusivamente formale, ovvero alzare la cupola e fare entrare più luce possibile all'interno della chiesa, dimenticandosi del peso della calotta che deve portare. La chiave per leggere questa tendenza di rendere la superficie del tamburo quanto più possibile vetrata, oltre all'arditezza dei progettisti, è sicuramente da ricercare nello sviluppo compositivo che si ha nei secoli in cui queste cupole furono progettate e costruite.

Come possiamo notare, la prima in ordine cronologico ad essere costruita dopo il terremoto è quella di Ispica, risalente ai primi del Settecento, infatti compositivamente questa esternamente si presenta spoglia senza alcun apparato decorativo, non ha la pretesa di essere vista essendo coperta dalle falde del tetto. Infatti anche le aperture del tamburo sono soltanto quattro, poste dove non c'è il tetto, e il compito di portar luce all'interno è riservato maggiormente alla lanterna.



prima metà del 700
Santissima Annunziata
Ispica (fig 91)



1780
San Giovanni Battista
Ragusa (fig 92)

Le due cupole successive che si avvicinano maggiormente ai canoni stilistici del Val Noto o del Catanese della ricostruzione post terremoto sono quelle di San Giovanni a Ragusa del 1780, e di San Giorgio a Modica del 1791. Queste hanno un tamburo visivamente più solido, più “pieno”, anche se già si registra la tendenza a inserire grandi aperture. In queste è presente anche, un apparato decorativo esterno coronate da lanterne slanciate (più in San Giovanni), contrariamente a quanto succede a Ispica. Con il susseguirsi degli anni per la ricostruzioni di edifici di culto, come già visto nel paragrafo precedente, i progettisti si ispirano a modelli europei. E' sicuramente quello che succede per il progetto della cupola di San Giorgio a Ragusa del 1820, che richiama modelli d'oltralpe come il Pantheon parigino o St Paul a Londra, anche se con sostanziali differenze, basti confrontare il tamburo per notare le differenti scelte compositive. L'ardito coraggio o l'inconsapevole saggezza del progettista, il capomastro ragusano Carmelo Cultraro, portò alla creazione di un gioiello, miracolo della statica, che fece scuola nel territorio. Infatti, le cupole costruite successivamente furono chiaramente influenzate da questa. Elementi come il tamburo colonnato, totalmente aperto, tamponato da vetrate, costituì una novità

1820
San Giorgio
Ragusa Ibla (fig 94)



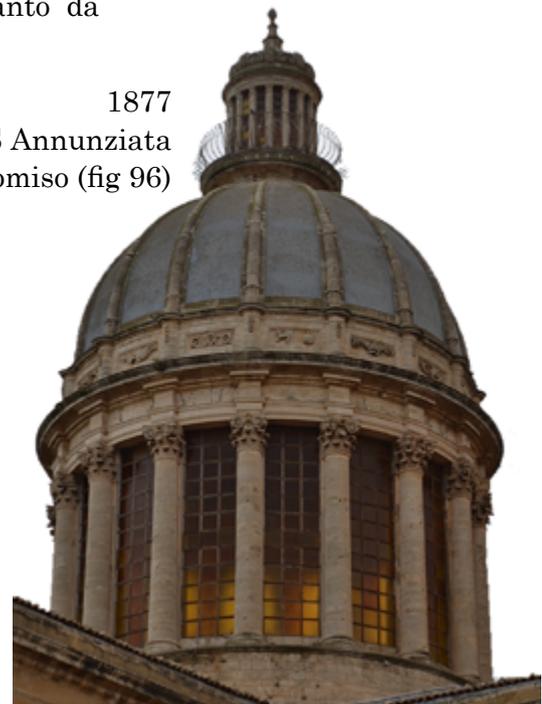
1791
San Giorgio
Modica (fig 93)

assoluta per l'architettura siciliana del tempo.

Nel 1854 a Vittoria sorse una nuova cupola, quella della chiesa di San Giovanni. Questa, insieme a quella di Santa Maria delle Stelle e della Santissima Annunziata a Comiso, come si era già accennato in precedenza, furono chiaramente ispirate alla cupola del Cultraro per le scelte compositive. Per quanto riguarda l'esempio Vittoriese, la conformazione del tamburo si colloca ancora tra una soluzione più robusta, come a Modica o nel San Giovanni di Ragusa, e quella di San Giorgio, con un tamburo "leggero". Questa impressione è data dalle grandi aperture arcate e dalla presenza di colonne binate tra esse che assicurano slancio e leggerezza alla composizione, anche se dietro nascondono una grossa porzione piena di tamburo. La calotta a sua volta vuole somigliare a quella di San Giorgio, con la presenza di coppie di costoloni che scandiscono la superficie leggermente ovalizzata, anche la lanterna è di chiaro richiamo ai modelli ragusani, svettante sulla calotta con colonnine e copertura a bulbo, coronata da una pigna che ritroviamo anche in San Giorgio. La cupola della Santissima Annunziata a Comiso del 1877 è quella che si rifà totalmente alla cupola del Cultraro. Il progettista, Emanuele Girlando, fa una copia della precedente, ma con una differenza che pur piccola, potrebbe essere sostanziale per la resistenza statica della cupola, ovvero nel tamburo che il Cultraro progetta composto soltanto da



1854
San Giovanni Battista
Vittoria (fig 95)



1877
S.S Annunziata
Comiso (fig 96)

colonne binate, il Girlando tra la coppia di colonne inserisce un pilastro.

Per il resto la calotta è stilisticamente identica a quella ragusana, con nervature ma con un sesto più rialzato rispetto alla precedente. L'unica differenza è il materiale di tamponamento tra i costoloni che in San Giorgio è di pietra pece, che conferisce una colorazione scura alla calotta, che a Comiso è data da uno strato di intonaco colorato. Per quanto riguarda la lanterna, questa, è quasi uguale alla gemella ragusana, solo leggermente più piccola con colonnine portanti e copertura a bulbo, e la caratteristica pigna conclusiva. La differenza che si registra è la lavorazione in rilievo della pietra della copertura a bulbo. L'ultima cupola è quella della chiesa di Santa Maria delle Stelle sempre a Comiso del 1894, anche in questa il tamburo si presenta costituito da una superficie vetrata significativa. Le aperture sono molto alte e strette con archi arabegianti a sesto acuto e tra queste si innestano delle colonne con dei bellissimi capitelli compositi. L'apparato decorativo di questa cupola è tra i più ricchi di tutto il territorio ragusano, la calotta scandita da fasce decorative floreali quasi ad imitare dei piccoli costoloni culmina nella lanterna, che anche qui, come nei precedenti casi è caratterizzata da elementi ormai consolidati, diventando quasi tipici, cioè colonnine e copertura a bulbo.



1894
Santa Maria delle Stelle
Comiso (fig 96)

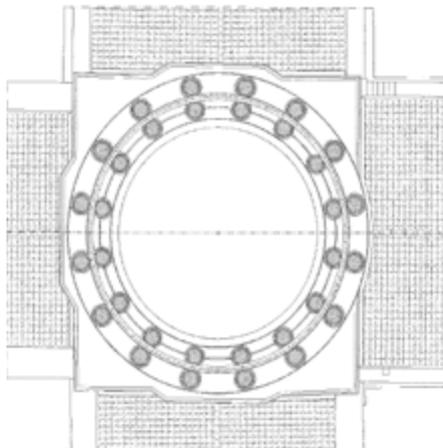
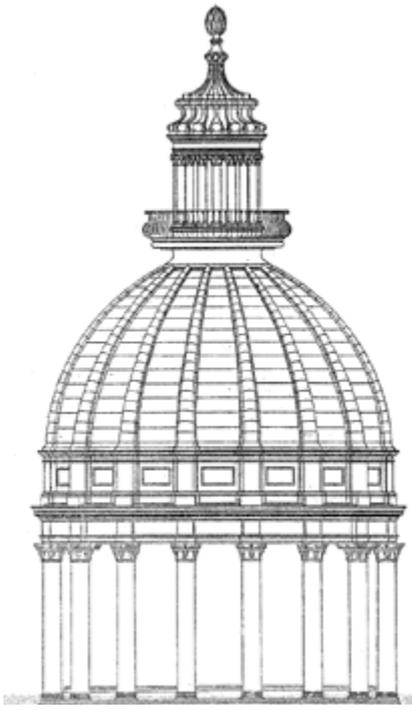


Fig. 97: prospetto e pianta della cupola del
Duomo di San Giorgio
Ragusa Ibla, 1820
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i
Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

Fig. 98: Foto dell'autore



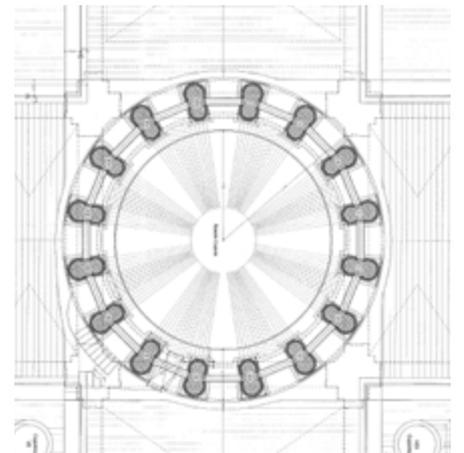
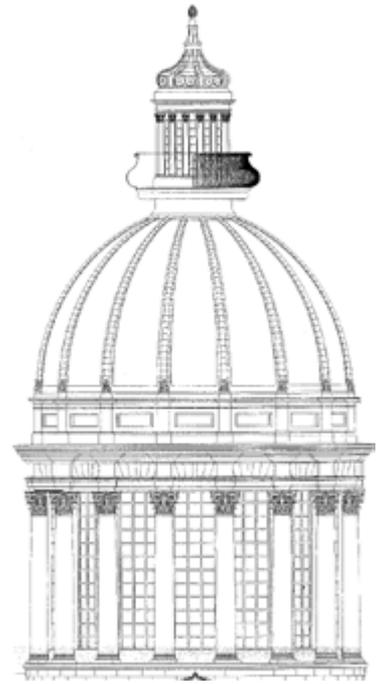


Fig. 99: prospetto e pianta della cupola della Chiesa Santissima Annunziata Comiso, 1877

Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

Fig. 100: Foto dell'autore

La mano dei progettisti della ricostruzione post-terremoto è stata sicuramente guidata da una voglia di innovazione formale crescente negli anni. Infatti si è visto come gli esempi più antichi si rifacevano a canoni stilistici già consolidati del territorio della Sicilia sud orientale, e come, a mano a mano, le forme si modificarono per conformarsi a linguaggi stilistici più consoni al periodo eclettico che si stava attraversando e che guardava all'Europa come fonte di ispirazione.

Tra la prima cupola analizzata quella di Ispica e quella di San Giorgio a Ragusa si nota un divario compositivo non indifferente. Le cupole ottocentesche del territorio si distaccano da quelle settecentesche, pur tenendo un filo conduttore già evidenziato in precedenza, ovvero la presenza di un tamburo con grandi aperture. Tale tendenza trova il culmine, come già detto nella cupola ragusana di San Giorgio, con un tamburo totalmente finestrato. Questa si pone all'avanguardia di uno stile che si affermerà sul territorio, diventando guida per la progettazione delle successive cupole, che si contraddistinguono nel panorama architettonico siciliano.

Fig. 101: Di fianco foto dei tamburi fatte dall'autore



San Giovanni Battista
Ragusa, 1780



San Giorgio
Modica, 1791



San Giorgio
Ragusa Ibla, 1820



San Giovanni Battista
Vittoria, 1854

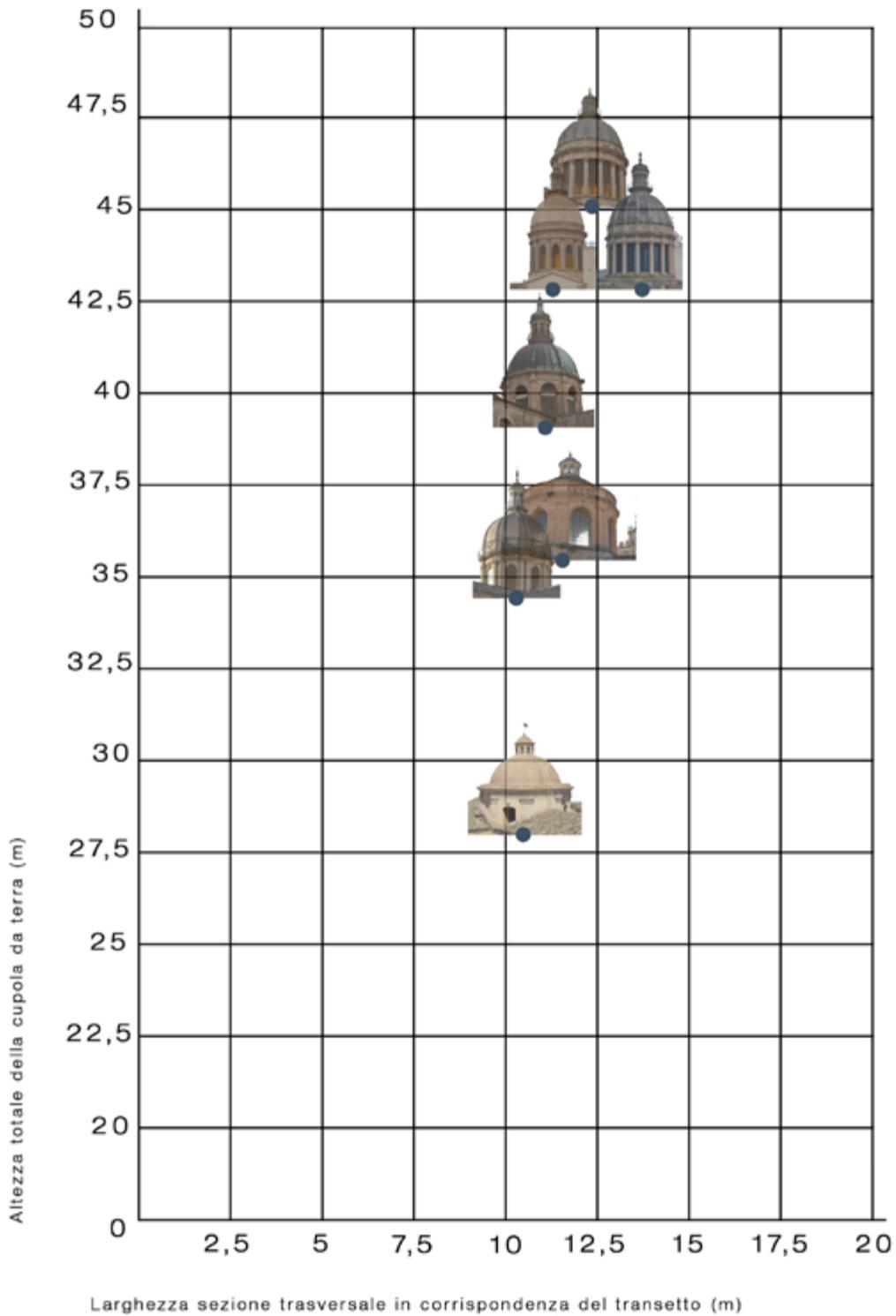


S.S Annunziata
Comiso, 1877



Santa Maria delle Stelle
Comiso, 1894

Snellezza: confronti tra le cupole



	Altezza totale della cupola da terra (m)	Larghezza sezione trasversale in corrispondenza del transetto (m)
 S.S. Annunziata	45,42	12,32
 S. Giorgio	43,24	14,50
 S. Maria delle Stelle	43,00	11,25
 S. Giovanni Battista	40,00	11,00
 S. Giorgio	36,97	11,70
 S. Giovanni Battista	36,00	11,23
 S.S. Annunziata	28,00	10,56

A seguire in copertina cap. 4: Rielaborazione grafica, Disegno originale di Rosario Gagliardi per il prospetto del Duomo di San Giorgio, Ragusa

Fonte: M.R. Nobile, *Disegni di Architettura nella Diocesi di Noto*, Palermo: Caracol 2005 (pag 69)

Sanctissimo che immortale nella facciata
di questa Chiesa con grande santità, e arte in
l'uno, l'altro, l'ultimo, l'ultimo, l'ultimo
per sempre.



Sanctissimo che immortale nella facciata
di questa Chiesa con grande santità, e arte in
l'uno, l'altro, l'ultimo, l'ultimo, l'ultimo
per sempre.

SAN GIORGIO
A RAGUSA IBLA

4

4.1 Cenni storici

Nel 1738 Rosario Gagliardi, l'Architetto del Val di Noto, ricevette l'incarico per la progettazione del Duomo di San Giorgio con il pagamento di otto Onze per il disegno della nuova chiesa¹. I lavori cominciarono il 25 ottobre 1739 come denunciato da un'incisione su uno dei pilastri d'angolo dell'edificio, la costruzione procedette su guida dei disegni fatti dal Gagliardi e acquisiti dal capitolo nel 1744². Si tratta di quattro tavole di progetto rappresentanti la pianta, il prospetto principale, quello laterale e una sezione longitudinale, tutt'ora conservati nel museo del Duomo.

Secondo l'incisione della data sul portale destro il primo ordine in facciata fu terminato nel 1760, mentre nella sommità della cuspide vi è riportato l'anno 1775 e il 1776 sulla torre dell'orologio. I lavori di costruzione del Duomo si prolungarono per più di trent'anni, il Gagliardi seguì il cantiere fino agli anni 60 del Settecento e nel 1762, a causa delle sue condizioni di salute, nominò suo procuratore il nipote Vincenzo Sinatra.

Il prospetto principale si sviluppa con la tipologia della facciata-torre, di cui l'architetto fu fervido promotore nel panorama architettonico della Sicilia orientale, specialmente nel Val Di Noto. Questa tipologia ricollegava l'ambiente siciliano a quello del nord Europa, dove ebbe largo impiego. Inoltre, grazie all'imponenza di queste facciate, si accordava con le disposizioni urbanistiche di Carlo V, dove la cattedrale doveva essere costruita in modo da essere visibile da ogni parte, magari sollevata in modo da accedervi mediante una scalinata, ed è proprio quello che succede in San Giorgio a Ragusa Ibla.

Nella facciata del Duomo di San Giorgio, simbolo della tipologia a torre con campanile alla siciliana, l'architetto combina tra di loro il modello della facciata-torre e lo schema piramidale guariniano a tre piani, inserendo il campanile al centro della facciata piramidale. Il San Giorgio è difficilmente collocabile nel panorama architettonico italiano e siciliano del Settecento, infatti non si trovano esempi italiani tantomeno siciliani, perciò bisogna notare dei legami con l'architettura nordica, iniziando dalla Germania con il duomo di Strasbourg, il Munster di Freiburg o la Hofkirche di Dresden³.

¹ M.R. Nobile, *Disegni di Architettura nella Diocesi di Noto*, Palermo: Caracol 2005

² D. Germanò, *Barocco in Sicilia*, Firenze, 1986

³ A. Kramer, *Rosario Gagliardi e i suoi contemporanei tedeschi*, in L. Trigilia (a cura di), *Rosario Gagliardi; I disegni di architettura della collezione Mazza*, Roma: Gangemi Editore 2014 (pag 105)

Fig. 102: A Fianco: Disegno originale di Rosario Gagliardi per il prospetto del Duomo di San Giorgio, Ragusa
Fonte: M.R. Nobile, *Disegni di Architettura nella Diocesi di Noto*, Palermo: Caracol 2005 (pag 69)



Fig. 103: Duomo di San Giorgio
Ragusa, veduta prospetto principale
Fonte: <http://reddit.h0.re/post/6uueaz/>
Ragusa_Ibla,_Sicily,_Italy
Consultazione: 27 Gennaio 2018



Fig. 104: Katholische Hofkirche,
Dresden, veduta prospetto principale
Fonte: [https://de.wikipedia.org/wiki/
Katholische_Hofkirche](https://de.wikipedia.org/wiki/Katholische_Hofkirche)
Consultazione: 27 Gennaio 2018

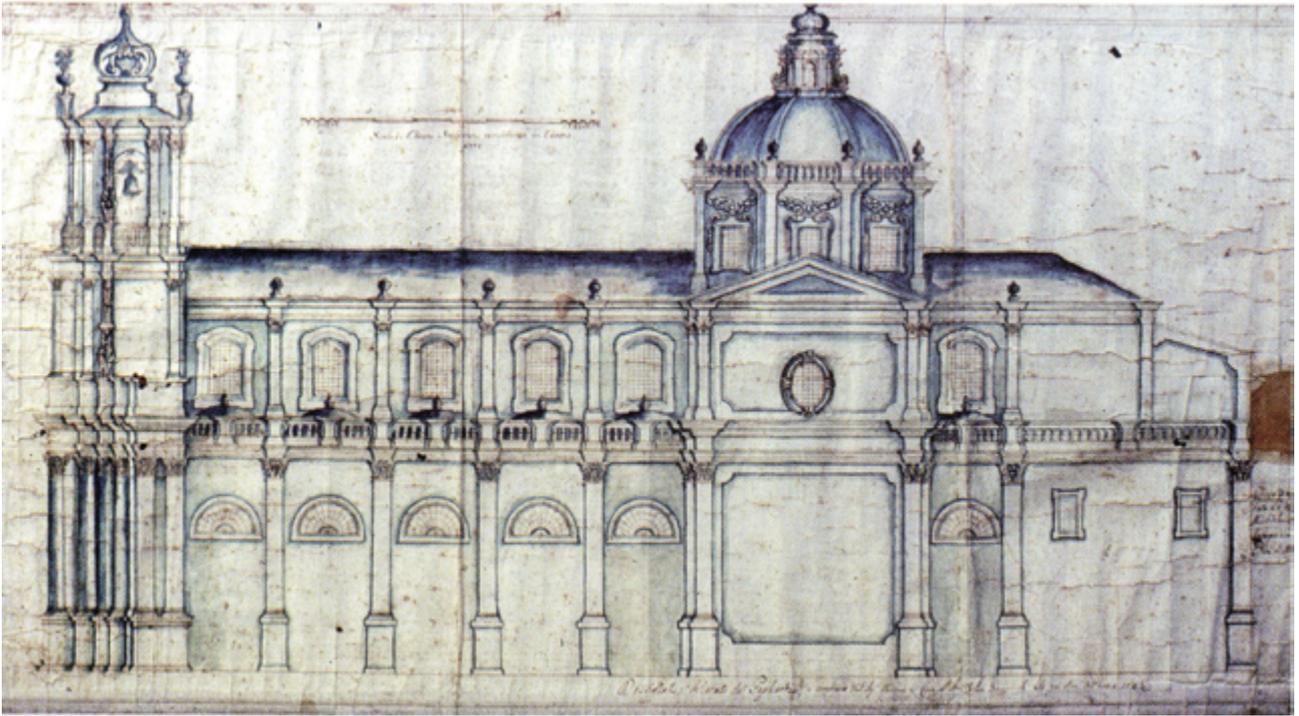
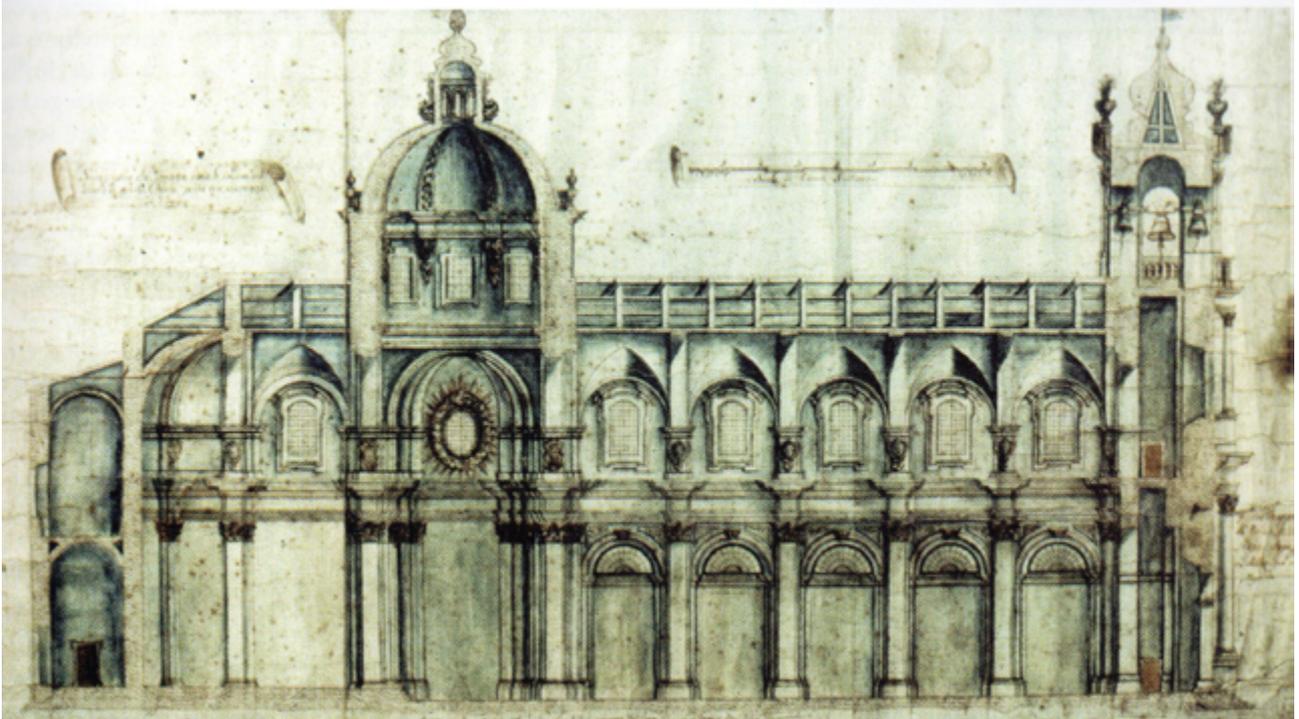


Fig. 105: sopra: Disegno originale di Rosario Gagliardi per il prospetto laterale del Duomo di San Giorgio, Ragusa

Fig. 106: sotto: Disegno originale di Rosario Gagliardi, sezione, Duomo di San Giorgio, Ragusa

Fonte: M.R. Nobile, *Disegni di Architettura nella Diocesi di Noto*, Palermo: Caracol 2005



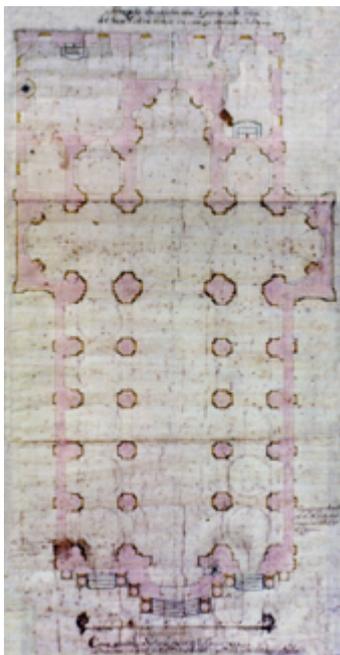


Fig. 107: Disegno originale di Rosario Gagliardi per la pianta del Duomo di San Giorgio, Ragusa

Fonte: M.R. Nobile, *Disegni di Architettura nella Diocesi di Noto*, Palermo: Caracol 2005

All'interno il Duomo ragusano si presenta ad impianto basilicale a tre navate. Nell'abside, come al fondo delle braccia del transetto, sono presenti delle esedre semicircolari.

Per quanto riguarda la cupola, si imposta su quattro piloni smussati agli angoli, così formando una pianta ottagonona irregolare. Il disegno per la cupola del Gagliardi, presente nel progetto autografo già citato, doveva bilanciare il rapporto altimetrico e dimensionale con la facciata a torre, in modo da non predominare visivamente sul prospetto, infatti si presentava con un profilo esterno ribassato. Sulla calotta erano presenti dei costoloni in corrispondenza delle paraste sottostanti, il tamburo esternamente era scandito da aperture intervallate da paraste, tra queste si trovavano dei festoni floreali. Sopra le finestre si ergeva una balaustra che divideva il tamburo dalla calotta. Si può ipotizzare, analizzando il disegno, che il progetto di questa cupola potesse somigliare a quella di San Giorgio a Modica o a quella di San Giovanni a Ragusa.

Questa cupola a fine Settecento crollò, purtroppo non si conoscono le ragioni dell'avvenimento, perciò bisognò ricostruirne un'altra, ovvero l'attuale, datata 1820 ad opera

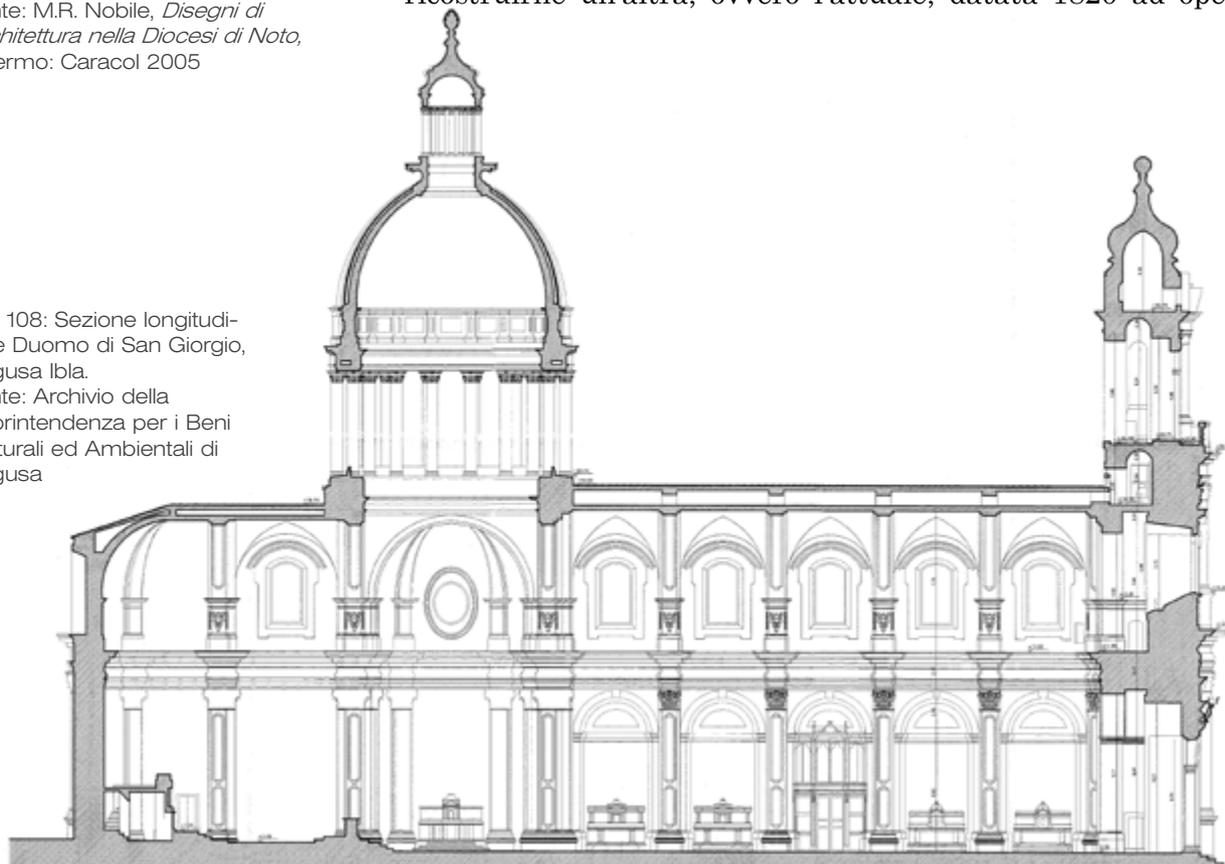


Fig. 108: Sezione longitudinale Duomo di San Giorgio, Ragusa Ibla.

Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa

del Capomastro Ragusano Carmelo Cultraro, anche se alcuni documenti mettono in dubbio la sua paternità e l'affidano a Sebastiano Ittar, ma di questo non si hanno notizie certe.

La cupola esistente, per la sua ardita composizione di ispirazione europea, potrebbe ulteriormente essere paragonata al tempietto di San Pietro in Montorio, pensata quasi come una struttura autosufficiente, anche se posta sui piloni della navata centrale. Ha dimensioni in altezza quasi doppie rispetto a quella originale del Gagliardi, presenta un tamburo composto da sedici colonne binate a disposizione radiale, di ordine corinzio, dove quelle interne hanno una diametro minore rispetto a quelle esterne. Su di esse si impostano le nervature della calotta che hanno il compito di portare il peso. Sui costoloni, inoltre, si imposta una doppia calotta, una interna in muratura e l'altra esterna di copertura in lastre di pietra pece che le conferiscono un colore scuro. La cupola è coronata da una lanterna slanciata, anch'essa formata da colonnine portanti coperta da una copertura a calotta sferica internamente e con profilo a bulbo esternamente. Inoltre la cupola presenta delle cerchiature atte a contrastare le spinte, indirizzando le forze in basso.⁴

⁴ S.Tobriner, Rosario Gagliardi and the development of the sicilian Tower Facade, in L. Trigilia (a cura di), *Rosario Gagliardi, I disegni di architettura della collezione Mazza*, Roma: Gangemi Editore 2014 (pag 117)
D. Germanò, op. cit. alla nota 2, pag 112
M.R. Nobile, op. cit. alla nota 1, pag 112



Fig. 109: Prospetto laterale del Duomo di San Giorgio, Ragusa Ibla.
Fonte: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa



4.2 La Cupola

La cupola del duomo di San Giorgio, si presenta come singolare esempio senza precedenti nel panorama architettonico siciliano. Dopo il crollo della settecentesca cupola del Gagliardi, il Cultraro ne progettò una totalmente diversa, di 43 metri dal livello del pavimento della chiesa, quindi molto più alta e visibile della precedente. Questa si imposta su un anello sorretto a 20 metri d'altezza dai quattro pennacchi sferici dei quattro piloni del transetto, il diametro interno è di 11,25 metri e alto 1,85 metri. Il tamburo alto 5,84 metri è formato da sedici colonne binate disposte in senso radiale. Queste sono realizzate in conci circolari di calcare ragusano, con giunti a squadra.

Sulle colonne poggia la trabeazione di 1,42 metri d'altezza. Su questa si erge un attico di 2,25 metri diviso in corrispondenza delle colonne sottostanti da pilastri semicircolari decorati da ghirlande floreali, intervallati da cassettoni con bassorilievi riportanti delle foglie di palma e una corona simbolo del martirio di San Giorgio. Sull'attico si erge la cupola vera e propria con raggio interno all'imposta di 5,63 metri. Questa si presenta formata da una doppia calotta: quella interna costruita con conci di calcare disposti secondo i paralleli e quella esterna da lastre in pietra asfaltica. Fra esse si forma un'intercapedine che va dai 16 cm alla base ai 12 cm in prossimità dell'occhio. Questi strati sono retti da una costolonatura visibile esternamente e posti in corrispondenza dei pilastri dell'attico e delle colonne sottostanti del tamburo. I costoloni sono rastremati verso l'occhio della cupola, in modo da innestarsi con l'anello di chiusura, sul quale si erge la lanterna.

La lanterna si compone di una parte notevolmente aggettante, formando quasi un ambulacro dove si poggiano le colonnine portanti un anello, su cui si imposta la copertura a bulbo, scolpita a foglie d'acanto. Questa è completata da una grande pigna di coronamento che conclude l'apparato della cupola.

La cupola dall'anello d'imposta alla pigna di chiusura ha un peso stimato che si aggira attorno alle 1300 tonnellate, retta dai quattro piloni quadrangolari, ognuno di circa 4 mq di base. I restauri del 1928⁵ necessari per le condizioni in cui versava la struttura, dovuti dall'azione delle acque e del vento, vede la sostituzione delle vetrate, una superficie totale di 224 mq ormai gravemente deteriorate, sostituite con delle nuove

⁵ C. Arezzo Di Trifiletti, Cenni sulla cupola della Basilica di S.Giorgio in Ragusa Ibla, restauri del 1928, Catania, Tipografia Strano F., 1931

più resistenti che si discostavano leggermente dal modello precedente. Nonostante le ottime condizioni statiche registrate, si inserirono cerchiature nella muratura della cupola invisibili analizzandola ad occhio nudo⁶.

Con i lavori di recupero e conservazione del 1991\97 si agì sulla totalità della cupola: internamente con interventi di pulitura e sigillatura delle parti lapidee e intonacate, invece, esternamente si intervenne con pulitura, consolidamento, ricostruzione, risarcitura di parti mancanti, protezione delle superfici della lanterna, dei costoloni degli spicchi della cupola, delle colonne del tamburo, delle parti lisce e modanate. Tra questi gli interventi più importanti furono: 1. La manutenzione delle cerchiature metalliche 2. La sigillatura dei giunti tra le lastre di pietra pece e i costoloni della calotta esterna mediante sigillante elastico 3. Asportazione dell'intonaco ammalorato e distaccato dalle infiltrazione delle acque con il conseguente rifacimento e successiva tinteggiatura delle superfici interne.



Fig. 111: Cupola di San Giorgio: foto dell'autore

⁶C. Arezzo Di Trifiletti, op. cit. alla nota 5, pag.119
D. Germanò, op. cit. alla nota 2, pag 112
M.R. Nobile, op. cit. alla nota 1, pag 112

4.2.1 Aspetti costruttivi



Pietra calcarea, "Fondazione Ragusa"



Pietra asfaltica

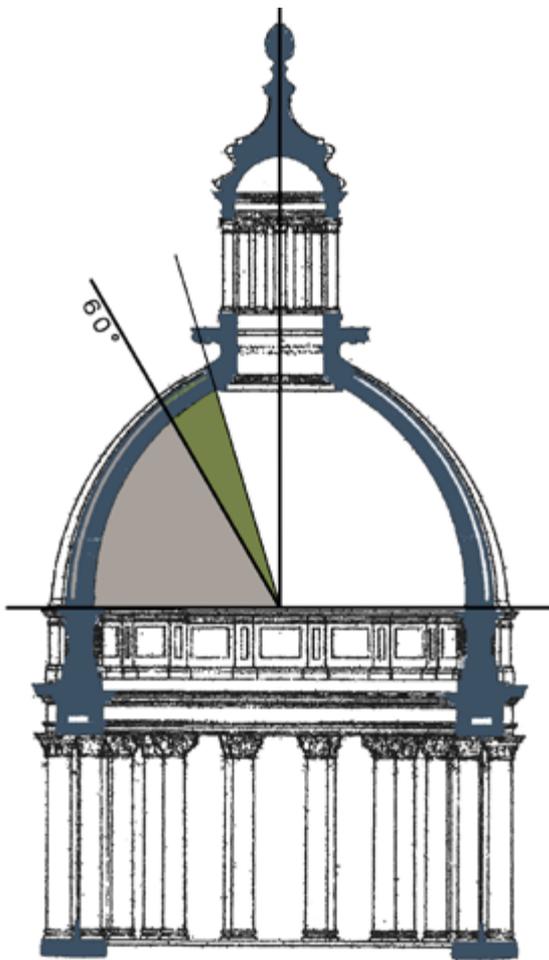


I materiali adoperati per la costruzione della cupola tipici del territorio ragusano, largamente usati per la ricostruzione edilizia del post terremoto, perché immediatamente disponibili ed economici, furono due. Per l'edificazione della Chiesa e della cupola venne principalmente usata una pietra calcarea di colore chiaro, di cui la zona del ragusano è molto ricca e da cui la cupola prende il suo colore caratteristico. Questa viene chiamata "Formazione Ragusa" o "membro Leonardo" prendendo il nome dal torrente che scorre a valle di Ragusa Ibla ovvero il San Leonardo. Il secondo materiale usato per la costruzione e adoperato per la calotta di copertura della cupola è una pietra asfaltica di origine vulcanica di colore scuro, anch'essa largamente diffusa e usata nel territorio ibleo, soprattutto per i pavimenti delle chiese o dei palazzi nobiliari. Per quanto riguarda la pietra calcarea, il suo utilizzo è stato considerato adatto per le esigenze costruttive del tempo, nonostante presentasse caratteristiche meccaniche diverse date dalla sua composizione stratificata. E' proprio in base a queste caratteristiche che il calcare viene suddiviso in due tipologie diverse: calcare duro e calcare tenero. Quello duro presenta una notevole resistenza, infatti, è usato principalmente per le opere costruttive più importanti di un edificio, come le fondazioni o i muri portanti, mentre quello tenero facilmente lavorabile e meno resistente veniva usato maggiormente per gli apparati decorativi.⁷

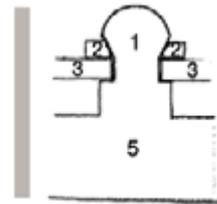
Per l'apparecchiatura dei conci in pietra calcarea, tra un costolone e l'altro della calotta principale si potrebbe ipotizzare, date le dimensioni abbastanza contenute della cupola stessa, una disposizione a conci a filari anulari con assise conica radiale. I Costoloni presenti che portano il peso della cupola vera e propria sono 16 e si impostano, in linea con le colonne sottostanti del tamburo.

⁷ Arezzo Di Trifiletti, op. cit. alla nota 5, pag.119

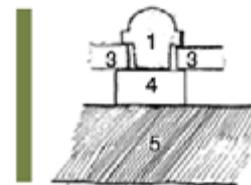
I costoloni presentano una particolarità perché questi fanno parte della muratura innestandosi con essa fino a 60° al di sopra dell'imposta, dopodiché (al di sopra dei 60°) l'unica funzione che ricoprono è quella di reggere le lastre di pietra asfaltica del guscio esterno di protezione appoggiandosi semplicemente alla calotta principale attraverso un concio in gesso. Quindi, al di sopra di suddetta quota, i costoloni non rivestono più un ruolo strutturale. sicuramente questa scelta progettuale è da giustificare per l'alleggerimento della parte superiore della calotta.



sezione dall'imposta fino a 60°



sezione sopra i 60°



- 1: Costolone
- 2: Conci di ancoraggio delle lastre di copertura
- 3: Lastre di pece
- 4: Zoccolo in gesso
- 5: Cupola interna

Fig. 113: fonte disegni: Archivio della Soprintendenza per i Beni Culturali ed Ambientali di Ragusa, Lavori di recupero e conservazione del Duomo di San Giorgio 1991\1997



Cupola di San Giorgio:
foto dell'autore

4.2.2 Analisi strutturali sulla cupola

L'analisi statica effettuata sulla Cupola Di San Giorgio si basa su quella fatta dai tre Matematici per San Pietro, anche se il motivo dello studio è differente, perché per quanto riguarda San Pietro gli studi furono eseguiti per accertarsi sulle condizioni statiche della cupola danneggiata da gravi lesioni dovute al suo stesso peso. Per San Giorgio la motivazione è legata principalmente alla conoscenza della cupola e come questa si comporti se sollecitata da una forza esterna come quella del sisma.

Per la cupola di San Giorgio, grazie alla conoscenza delle parti che compongono la struttura, si sono ricercati come nel caso di San Pietro, dei meccanismi probabili con cui si sarebbe innescato il cinematismo di rottura che farebbe crollare la cupola in caso di sisma. Per il caso specifico della cupola ragusana si è effettuata un'analisi cinematica lineare, definita dalla Circolare della NTC 08 "(punto C8A.4.2.3), consiste nel calcolo del moltiplicatore orizzontale dei carichi che attiva il meccanismo di collasso e nella valutazione della corrispondente azione sismica."¹

Per poter analizzare al meglio la struttura della cupola si sono individuati tre differenti meccanismi cinematici che potrebbero innescarsi, (come possiamo veder in figura) sapendo che quello che si innescherà con più probabilità sarà il sistema che risulterà collassare con l'applicazione della forza più bassa (nel nostro caso l'azione del terremoto).

Seguendo ancora l'esempio dei tre matematici si è deciso di individuare due dei tre meccanismi suddividendo la cupola in sedici spicchi (tanti quante le colonne del tamburo) e analizzando quindi un sedicesimo, anche se come accade nel Parere, i pesi considerati si riferiscono alla totalità della cupola e non soltanto a una porzione, perchè il contributo delle catene si mette in conto per tutta la cupola. I due meccanismi si considerano formati da 4 macro elementi. Il primo comprende le colonne considerate come due elementi a se per via del differente diametro, dalla porzione inferiore dell'attico e dalla calotta alla quale viene associata la parte superiore dell'attico come se queste ruotassero insieme. Il secondo comprende

¹ NTC2008 - "Norme tecniche per le costruzioni" D.M. 14 Gennaio 2008

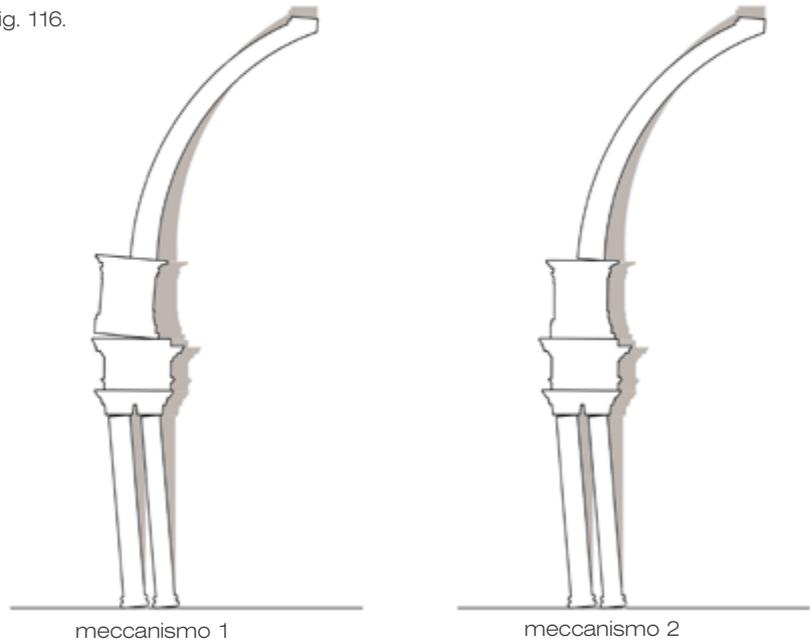
-Per approfondire: Ministero dei beni e delle attività culturali, Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (d.m. 14 gennaio 2008). Pag 61

meccanismo 1



Fig. 115.

Fig. 116.



sempre le colonne considerate separatamente, ma l'attico in questo caso non viene più diviso in due ma forma un elemento unico, così facendo la calotta verrà separata dall'attico.

Decisi questi meccanismi di rottura si sono calcolati i lavori virtuali² dei due casi per verificare gli spostamenti della struttura in base ai pesi propri, a questi si è associata la forza esterna del sisma e quella stabilizzante delle catene che da analisi dei documenti storici pare siano presenti nella cupola, una all'imposta e l'altra leggermente più in alto prima della metà della calotta. Anche in questo caso per calcolare il lavoro virtuale delle catene ci si è basati sul metodo sviluppato da Boscovich per San Pietro, ovvero "il lavoro virtuale L di una catena sollecitata da una forza costante di trazione N , soggetta a una variazione Δr del suo raggio, è fornita dalla relazione $L = 2\pi N \Delta r$ "³

Per procedere con l'individuazione dei lavori dei vari elementi

meccanismo 2

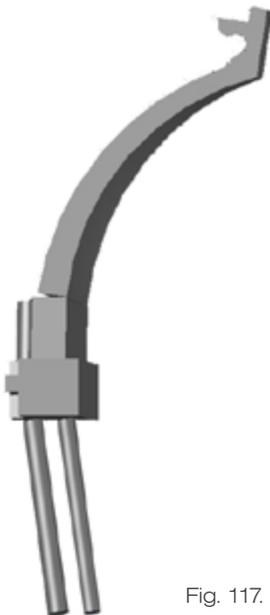


Fig. 117.

²"Nel calcolo dei lavori virtuali bisogna considerare il prodotto dei pesi per gli spostamenti virtuali verticali dei loro baricentri e il prodotto delle forze delle catene per lo spostamento orizzontale del punto in cui sono applicate. Gli spostamenti orizzontali dei punti dei diversi corpi sono proporzionali alle ordinate e quelli verticali alle ascisse di sistemi di coordinate con origine nel centro istantaneo di rotazione di ciascun corpo." Da: Danilo Capecchi, Cesare Tocci, le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquiere e Boscovich, rivista Palladio n° 47 ,2011,

³D. Capecchi, C.Tocci, le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquiere e Boscovich, rivista Palladio n° 47 ,2011, pag 47

meccanismo 1

	Volume (m ³)	Peso (kN)
(corpo 4) Lanterna	31,31	626,2
(corpo 4) Calotta + porz. Sup. attico	303,63	6072,5
(corpo 3) Attico (parte inferiore)	142,80	2856,08
(corpo 2) Colonne interne	28	560
(corpo 1) Colonne esterne	35,20	704

Tabella dei pesi dei componenti della cupola considerati nel primo meccanismo

meccanismo 2

	Volume (m ³)	Peso (kN)
(corpo 4) Lanterna	31,31	626,2
(corpo 4) Calotta	209,42	4188,4
(corpo 3) Attico (intero)	237,00	4740
(corpo 2) Colonne interne	28	560
(corpo 1) Colonne esterne	35,20	704

Tabella dei pesi dei componenti della cupola considerati nel secondo meccanismo

delle dei due meccanismi si sono analizzati i carichi (vedi tabella) ottenuti dalla moltiplicazione del peso specifico del materiale di 20 kN/m³ per il volume di ogni macro elemento ricavato da una modellazione 3D di un rilievo del 1991.

Di seguito verranno analizzati i meccanismi separatamente, con i relativi risultati ottenuti dal calcolo dei lavori virtuali. Di ogni caso sono stati analizzati in particolare quattro condizioni differenti della cupola:

1. quando su di questa agiscono le forze delle catene e la sollecitazione del sisma.
2. quando agiscono soltanto la forza delle catene tralasciando la spinta del terremoto.
3. quando sulla cupola si trova ad agisce solo il sisma senza considerare la stretta apportata dalle catene.
4. quando la cupola si trova in una condizione di equilibrio senza l'azione delle catene né del terremoto.

Se osserviamo la figura relativa al primo meccanismo notiamo che sono presenti i baricentri dei diversi corpi e i rispettivi centri assoluti di rotazione determinati con le leggi della cinematica dei corpi rigidi. Dall'analisi dei lavori virtuali analizzati da questo meccanismo si è visto come la cupola in assenza delle cerchiature e dell'azione del sisma risulti essere stabile, la stabilità della struttura è garantita quando la somma dei suoi

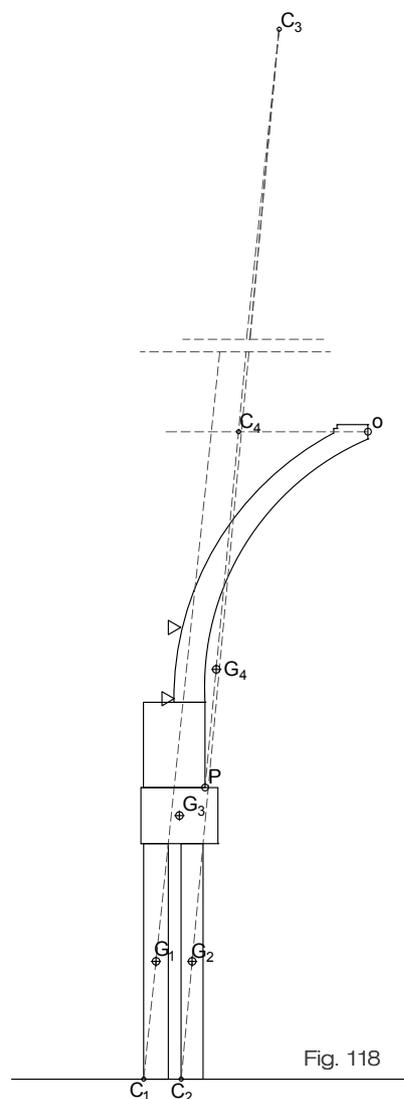
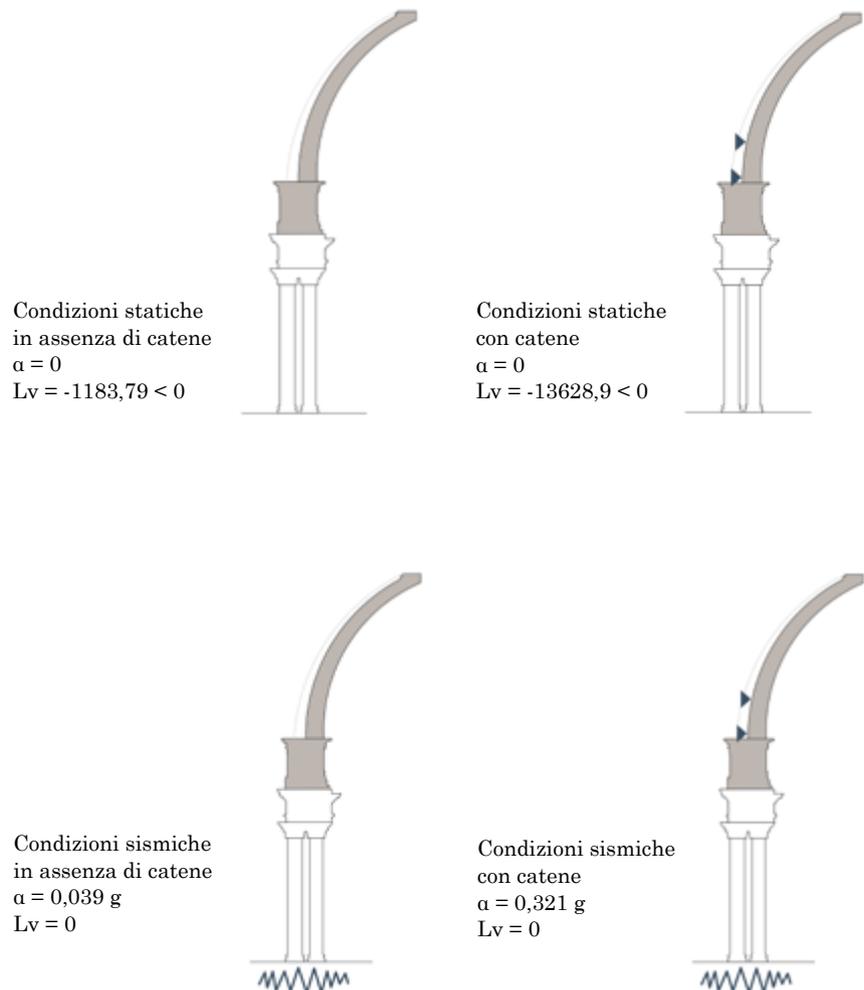


Fig. 118

lavori virtuali risulterà minore o uguale a 0, in caso contrario sarà instabile. Quando a questa condizione viene aggiunta l'azione stabilizzante di due catene di sezione trasversale 2 x 5 cm, vediamo come (ovviamente) la sua stabilità aumenti, ma se inseriamo l'azione del sisma e togliamo quella delle catene la cupola risulta collassare con una minima forza applicata di $\alpha 0 = 0,039$, dove α è il moltiplicatore dei carichi, ovvero una misura adimensionale (rapportata all'accelerazione di gravità) dell'accelerazione di innesco del moto. Ulteriormente se a quest'ultima condizione si aggiunge la forza delle catene vedremo che la cupola acquisterà stabilità collassando con un $\alpha 0 = 0,321$.



α è il moltiplicatore dei carichi, ovvero una misura adimensionale (rapportata all'accelerazione di gravità) della accelerazione di innesco del moto.

Nel secondo meccanismo come nel precedente si sono individuati i centri di rotazione. I dati ottenuti dalle analisi dei lavori virtuali su questo caso rivelano come la prima condizione, ovvero quella che non considera le forze delle cerchiature né del terremoto sia in questo sistema più stabile del precedente. La seconda condizione analizzata vede l'aggiunta delle catene che come nel primo caso accresce la stabilità della cupola, ma quando a questo viene inserita l'azione del terremoto (togliendo le catene) il sistema risulta essere più debole del primo perché la cupola crollerà con un'accelerazione minore di $\alpha_0 = 0,029$ (precedente $\alpha_0 = 0,039$). Nell'ultima condizione analizzata in cui partecipano sia l'azione delle catene che quella del sisma la cupola risulterà crollare con un'accelerazione di α_0 pari a 0,327 praticamente simile al primo sistema, la differenza è così attenuata per la presenza di cerchiature uguali in entrambi i sistemi.

Se confrontiamo i risultati ottenuti dai due sistemi considerati, notiamo che quando sul secondo meccanismo non sussistono le forze apportate dalle catene, ma è soggetto all'azione orizzontale del terremoto, questo risulterà più debole rispetto al primo. Perché il meccanismo si attiverà con una minore forza applicata ($\alpha_0 = 0,029 < \alpha_0 = 0,039$). Quindi si può desumere che sarà il cinematismo più probabile che si attiverà in caso di sisma, facendo crollare la cupola.

Il terzo meccanismo deriva da uno studio svolto per un lavoro di tesi nel 2003 da uno studente dell'università Mediterranea di Reggio Calabria, la tematica di base è la stessa di quella affrontata in questa tesi, ovvero lo studio della stabilità della cupola di San Giorgio a Ragusa Ibla. Il candidato allora ipotizzava un meccanismo diverso da quelli fin qui affrontati che si sarebbe attivato in caso di sisma, le analisi su questo modello furono fatte attraverso studi sperimentali su piano inclinato di un modellino della cupola.

Il meccanismo che propone è formato prevalentemente da tre macro elementi, dove ritroviamo anche in questo caso, le colonne separate, ma qui tutti gli elementi sopra al tamburo vengono considerati monolitici non c'è la distinzione tra attico e calotta, troviamo un solo unico corpo che insiste sulle colonne del tamburo.

Dai risultati ottenuti da questa prova sperimentale il candidato deduceva che: *“la cupola si comporta come una struttura a piani paralleli di cui i due estremi scivolano allontanandosi,*

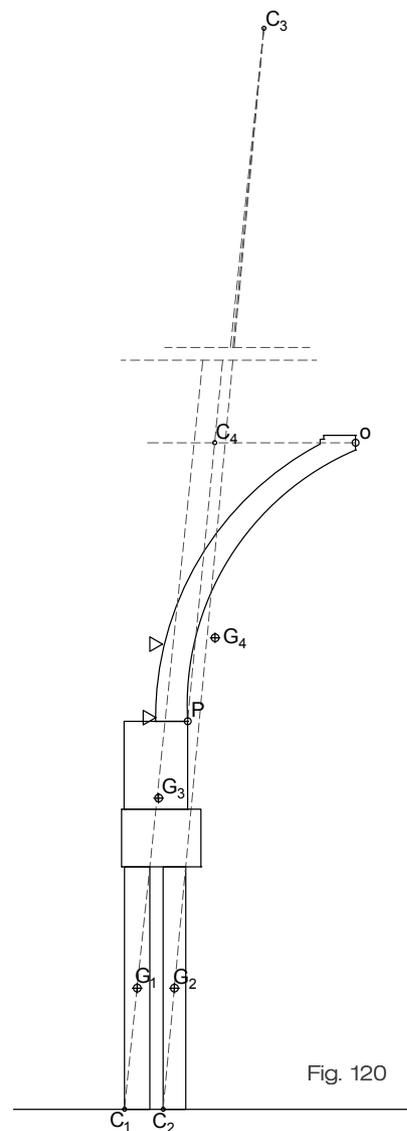
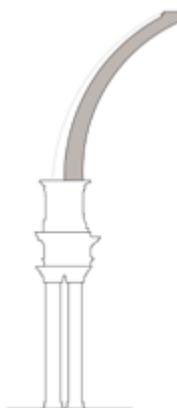
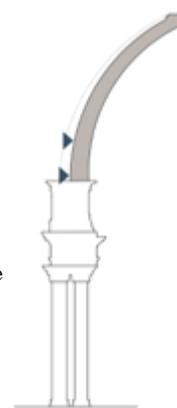


Fig. 120

Condizioni statiche
in assenza di catene
 $\alpha = 0$
 $L_v = -1588,79 < 0$



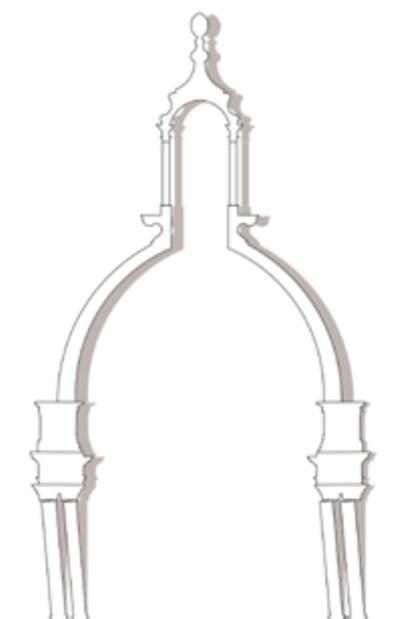
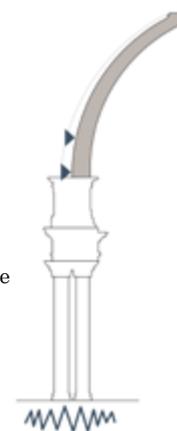
Condizioni statiche
con catene
 $\alpha = 0$
 $L_v = -17469,3 < 0$



Condizioni sismiche
in assenza di catene
 $\alpha = 0,029 \text{ g}$
 $L_v = 0$



Condizioni sismiche
con catene
 $\alpha = 0,327 \text{ g}$
 $L_v = 0$



Sistema 3

Fig. 122

favoriti dal modello traslatorio delle colonne. La conseguenza quindi è un collasso dovuto ad un movimento di traslazione del modello lungo l'asse d'inclinazione del piano, ossia a seguito dell'applicazione del movimento sismico”⁴

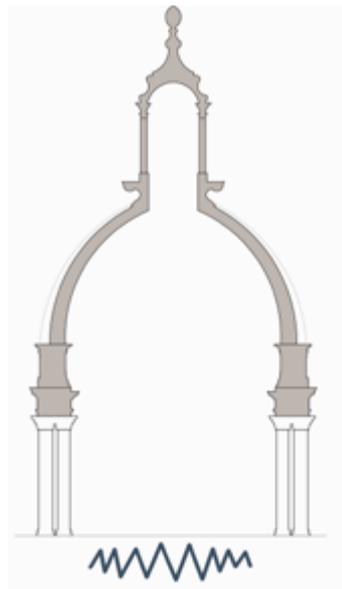
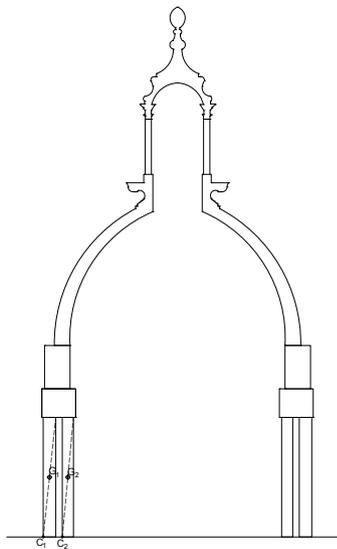
Dall'esperienza registrata da questa tesi, si è pensato di usare lo stesso meccanismo proposto per un'ulteriore analisi, calcolando anche per questo caso i lavori virtuali che il sistema poteva compiere. Dai risultati ottenuti da questo studio si è registrato come la cupola, considerando monolitica la parte composta da attico, calotta e lanterna quindi un unico peso che insiste sulle

⁴Tesi di laurea: Salvatore Guastella, *il Duomo e il suo degrado: analisi e progetto di miglioramento sismico della cupola su colonne*. Relatore Prof. M. Candela, Facoltà di architettura, Università degli studi "Mediterranea" di Reggio Calabria A.A 2003/2004

colonne, risulti essere più debole dei due precedenti sistemi studiati. Perché in questo caso si è ottenuto che il meccanismo di collasso si attiverà con un'accelerazione del terremoto pari ad $\alpha_0 = 0,114$ minore rispetto sia al primo caso che al secondo perciò fra i tre analizzati l'ultimo sistema sarà quello che si attiverà con maggiore probabilità in caso di sisma.

	Volume (m ³)	Peso (kN)
(corpo 3) Attico + Cupola + lanterna	477,73	9554,6
(corpo 2) Colonne interne	28	560
(corpo 1) Colonne esterne	35,20	704

Tabella dei pesi dei componenti della cupola considerati nel terzo meccanismo



Condizioni sismiche
 $\alpha = 0,114 \text{ g}$
 $L_v = 0$

Sistemi

1	sismico senza catene	$\alpha = 0,039 \text{ g}$
	sismico con catene	$\alpha = 0,321 \text{ g}$
2	sismico senza catene	$\alpha = 0,029 \text{ g}$
	sismico con catene	$\alpha = 0,327 \text{ g}$
3	sismico con catene	$\alpha = 0,114 \text{ g}$

Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dal calcolo dei lavori virtuali dei tre meccanismi analizzati, con evidenziati i quelli che si attiveranno con più probabilità, avendo la minore accelerazione sismica. il primo, relativo al secondo meccanismo è senza catene, mentre il secondo (terzo meccanismo) ha le catene.



Fig. 125: Interno cupola di San Giorgio
Foto dell'autore

4.2.3 Sforzi nei paralleli e meridiani della cupola

Sulla cupola in oggetto sono stati fatti anche, analizzati gli sforzi paralleli e quelli meridiani, usando la teoria della membrana. Per ricavare i valori di tali sforzi si sono applicate due formule fornite da Giuffrè nel suo testo la meccanica nell'architettura. Dato che la cupola non è sferica ma ha un sesto rialzato per individuare gli sforzi nei meridiani si è applicato:

$$S_m = Q / (2\pi R_p \sin^2\theta \text{ kN/m})$$

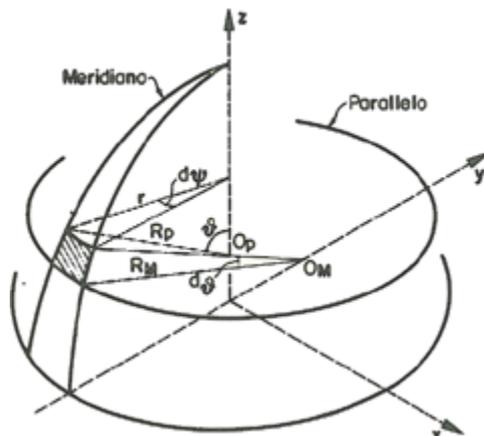


Fig. 126: fonte: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, pag 239

Se immaginiamo di sezionare la cupola in due parti con un piano orizzontale, si individuerà una circonferenza parallela che separerà la cupola in due, Q è il carico che agisce sulla circonferenza appena citata, derivante dalla parte di cupola superiore, che si trasmette alla sottostante, R_p è il raggio del parallelo considerato e theta l'angolo di inclinazione del raggio rispetto all'asse.

Per gli sforzi nei paralleli si è applicata:

$$S_p = R_p (q \cos\theta - (S_m/R_m))$$

dove q è il peso per m² di superficie e R_m il raggio del parallelo.⁵

I dati ottenuti dall'applicazione di queste formule sono stati elaborati per valutare le tensioni agenti all'imposta della cupola sia lungo i meridiani sia lungo i paralleli. Come indicato da Giuffrè, le tensioni paralleli diminuisce dalla chiave fino ad un angolo theta leggermente maggiore di 50° dove risulterà assente, dopo quest'angolo i paralleli saranno tesi, bilanciando le spinte derivanti dai meridiani fungendo quasi da catene.

⁵Per approfondire: Antonio Giuffrè, La meccanica nell'architettura, la statica, Roma, La Nuova Italia scientifica, 1986 (pag 239)

Sforzi nei meridiani:

$$S_m = \frac{Q}{2\pi R_p \sin^2 \theta} = \frac{4814,6}{6,28 * 6,39 * \sin^2 90} = 119,9775$$

$$\sigma_m = \frac{S_m}{0,87} = \frac{119,9775}{0,87} = 137,9051 \frac{kN}{m^2} = 0,1379051 N/mm^2$$

0,87 è lo spessore della cupola all'imposta

Sforzi nei paralleli :

$$S_p = R_p \left(q \cos \theta - \frac{S_m}{R_m} \right) = 6,39 \left(14 \cos 90 - \frac{119,9775}{7,58} \right) = -101,300$$

$$\sigma_p = \frac{S_p * 4,35}{2} = -220,328 kN (F_{tot})$$

$$tensione = \frac{F_{tot}}{2 * A} = -0,110$$

Dove 4,35 è l'altezza della porzione di cupola compresa tra l'imposta e il punto in cui gli sforzi di compressione si annullano (individuato dall'angolo di 50° su detto). Mentre A è l'area dei cerchi inseriti.

Dai calcoli effettuati abbiamo rilevato che le dimensioni delle cerchiature inserite sulla cupola sono adeguate, con delle tensioni ragionevoli.

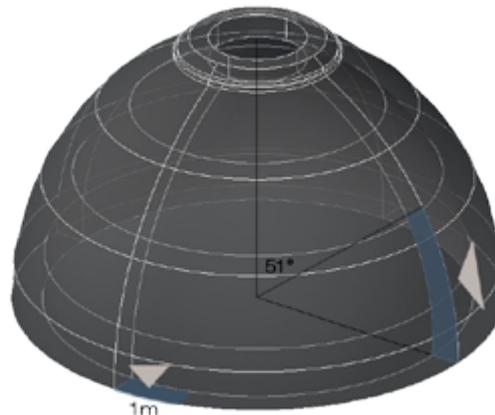


Fig. 127

4.3 Proposta di miglioramento sismico

In seguito alle analisi strutturali sulla cupola, si è convenuto che la porzione di cupola più debole sulla quale è più efficace intervenire con un'azione consolidante è il tamburo. Come evidenziato precedentemente, il meccanismo che si attiva con maggiore probabilità è il terzo analizzato, dove il crollo della cupola in caso di sisma si verifica in seguito al movimento delle colonne che compongono il tamburo, su cui grava il peso di tutta la cupola.

Pertanto si è deciso di intervenire per contrastare il momento delle colonne generato dal sisma inserendo nel tamburo dei nuovi infissi che abbiano una funzione strutturale e stabilizzante, questi si sostituiranno agli infissi già presenti, che hanno essenzialmente una funzione di partizione trasparente. Questa nuova struttura che si andrà ad inserire sarà di ausilio al colonnato presente, in modo tale da assorbire insieme alle colonne la forza del sisma, così da ridurre la possibilità che il tamburo si inclini facendo crollare la cupola.



Fig. 128: Tamburo della cupola di San Giorgio: Foto dell'autore

4.4 Descrizione del progetto

Le nuove vetrate portanti saranno inserite nello spazio tra le colonne interne ed esterne. Queste saranno composte da 16 moduli. Ogni modulo sarà formato da una struttura intelaiata di tubolari a sezione quadrata in acciaio che si compone di 4 montanti verticali e di 7 montanti orizzontali. Tra quelli orizzontali solo 4 avranno funzione strutturale, mentre gli altri avranno una sezione più sottile e inseriti esclusivamente per una funzione compositiva dell'infisso, che corrisponda formalmente con quello che si andrà ad eliminare. Per non alterare la forma dell'attuale vetrata, e non snaturare la rotondità del tamburo, i moduli saranno centinati. Ogni modulo sarà dotato di giunti

maschio\ femmina, ovvero all'estremità destra di ogni montante orizzontale ci sarà una porzione sporgente che si andrà ad ancorare in dei fori del modulo precedente, questi verranno ulteriormente fissati tra loro attraverso dei bulloni. Per la messa in opera del nuovo infisso, i moduli verranno ancorati alla struttura lapidea della cupola attraverso delle guide che verranno a sua volta fissate alla cupola grazie a dei dentelli che si inseriranno in delle sedi preticate precedentemente nella

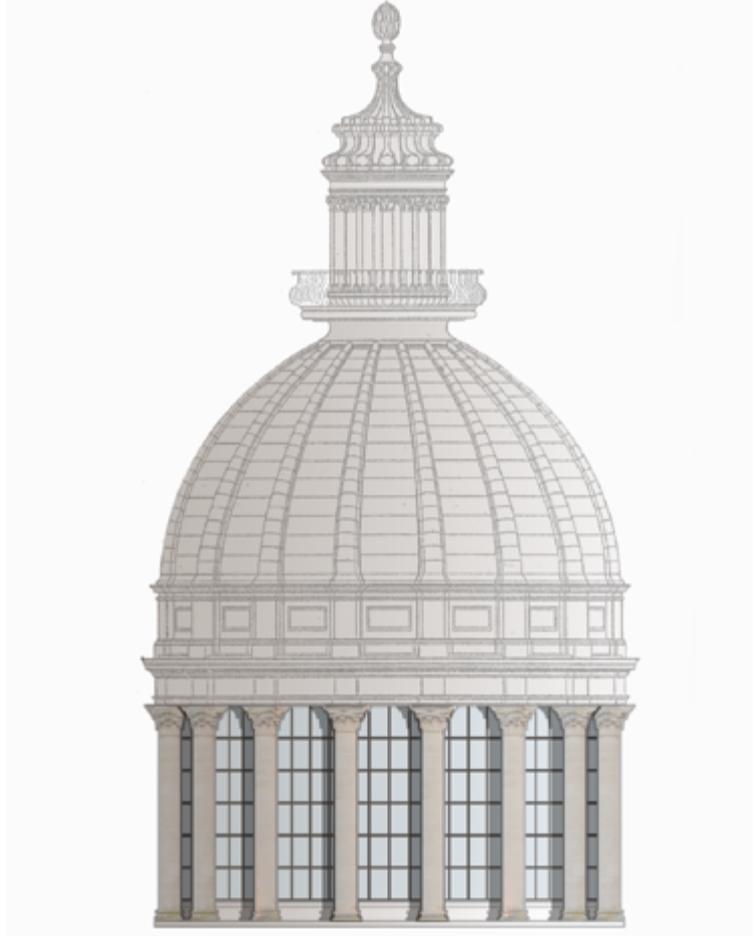


Fig. 129: Prospetto cupola con inserimento delle nuove vetrate.

pietra, questi dentelli impediranno il movimento della struttura nelle due direzioni ortogonali x,y (vedi tav N.1). Questa guida si troverà sia alla base dove si impostano le colonne ma anche nella parte superiore della struttura ancorata sotto la trabeazione. In corrispondenza dei dentelli su detti verranno posizionati i montanti verticali dei moduli per rendere più efficace l'ancoraggio alla cupola.

4.5 Predimensionamento delle strutture

La forza sismica agente sulla struttura viene sopportata dagli elementi grossomodo paralleli alla direzione del sisma (fig.130-1) i quali possono reagire secondo un funzionamento a taglio nel proprio piano (fig.130-2) realizzando due robuste strutture intelaiate simmetriche rispetto all'asse della cupola.

Tale coppia di strutture si può dimensionare ipotizzando per ciascuna di essa un classico comportamento shear-type (fig.130-3). La forza orizzontale F si valuta ipotizzando che le strutture di rinforzo debbano poter resistere almeno all'80% dell'azione sismica di progetto⁶ ($\alpha = 0,212$) e facendo conto della resistenza intrinseca della cupola ($\alpha = 0,114$), si ottiene:

$$F = P * ((0,8 * 0,212) - 0,114) = 26,56 \text{ kN}$$

essendo P il peso totale di lanterna più calotta più attico.

Nell'ipotesi di un funzionamento congiunto di tutti i montanti (che solo un'analisi strutturale completa consentirebbe di giustificare adeguatamente), la forza agente sul singolo tubolare verticale è:

$$F_{pil} = \frac{F}{N_{pil}} = \frac{26,56}{32} = 0,830056 \text{ kN}$$

Il momento flettente è:

$$M_{pil} = F_{pil} * \frac{H_{pil}}{2} = 2,490168 \text{ kN} * m = 2490168 \text{ N} * mm$$

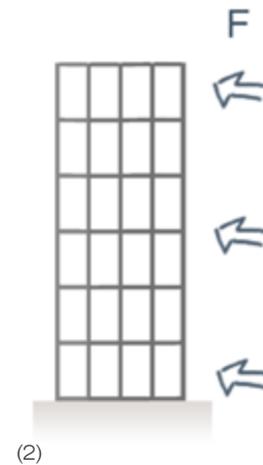
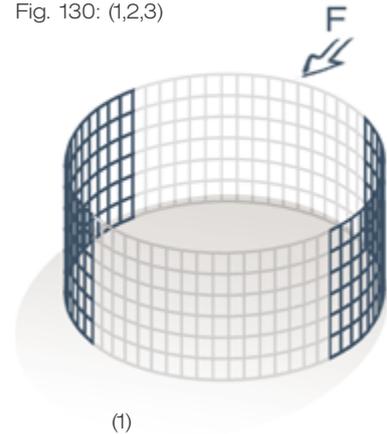
Ipotizzando l'uso di un acciaio S355 con snervamento:

$$\sigma_{snervamento \text{ acciaio}} = 510 \frac{N}{mm^2}$$

è necessario un modulo di resistenza :

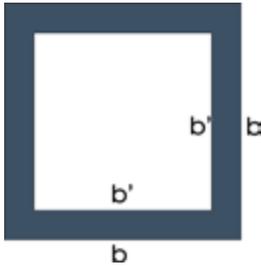
$$W = \frac{M_{pil}}{\sigma_{snerv.}} = 4882,682 \text{ mm}^3 = 48,82682 \text{ cm}^3$$

Fig. 130: (1,2,3)



⁶ Miglioramento statico consentito dalla NTC 2008

Sezione tubolare



che si può ottenere adottando un tubolare di sezione 8 x 8 cm e spesso 1 cm

$$W = \left(\frac{b^3}{6} - \frac{b'^3}{6} \right) = \left(\frac{8^3}{6} - \frac{6^3}{6} \right) = 49,33333 \text{ cm}^3$$

Si è preferito utilizzare un tubolare di piccole dimensioni ma con spessore di 1 cm, perchè rispettasse le dimensioni dei montanti delle vetrate attuali.



Fig. 131: Intervento: veduta d'insieme

Fig. 132: Intervento: veduta superiore dell'inserimento della nuova struttura tra le colonne



Fig. 133: Intervento: veduta inferiore dell'inserimento della nuova struttura tra le colonne

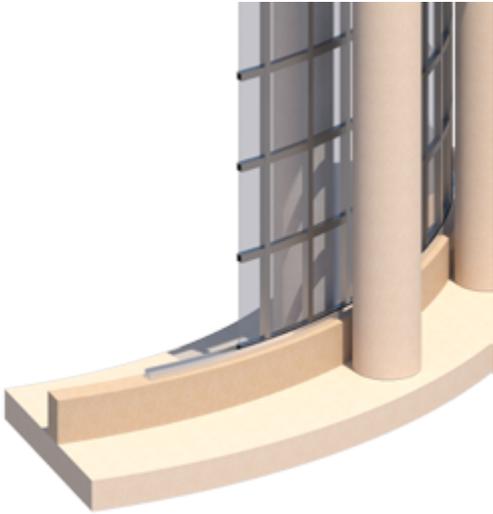
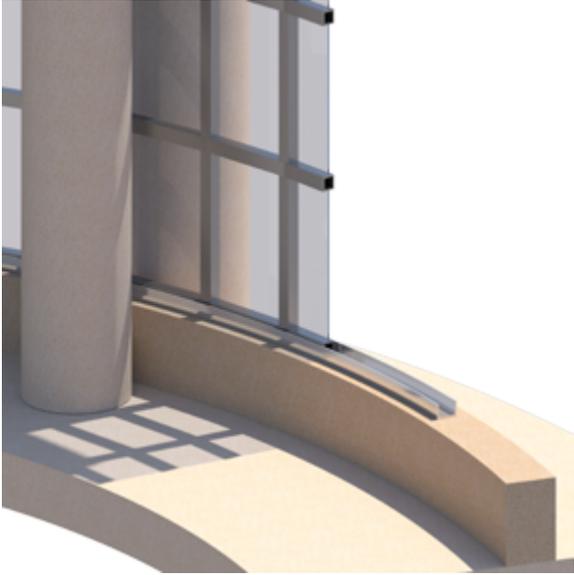






Foto a pagina precedente: panoramica
su Ragusa Ibla
Fonte: [https://www.focus.it/cultura/
curiosita/il-meglio-del-mese-da-ifocus](https://www.focus.it/cultura/curiosita/il-meglio-del-mese-da-ifocus)
consultazione: 31 Gennaio 2018

Bibliografia

ALBERTI L.B., *L'Architettura, De Re Aedificatoria*, a cura di G. Orlandi, Milano, Edizioni Il Polifilo, 1966

AREZZO DI TRIFILETTI Carmelo, *Cenni sulla cupola della Basilica di S.Giorgio in Ragusa Ibla. Restauri del 1928*, Catania, Tipografia Strano F., 1931

BELIDOR B., *La scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e di architettura civile*, Mantova, 1729.

BENVENUTO E., *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo*, Firenze, Sansoni, 1981

BOUGUER P., *Sur les lignes courbes qui sont propres à former les voutes en domes*, Accadémie Royale des Sciences, Paris, 1734

BORRA G.B., *Trattato della cognizione pratica delle resistenze geometricamente dimostrato dall'architetto Giambatista Borra ad uso d'ogni sorta d'edifizi*, Torino, 1748

BREYMANN G.A., *Costruzioni in pietra e Strutture Murari*, Milano, Editrice Vallardi, 1885

CAPECCHI Danilo, TOCCI Cesare, *Le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquiere e Boscovich*, rivista Palladio

CAPRETTI Elena, *Brunelleschi*, Milano, Giunti Editore, 2003

CAROCCI Caterina.F, TOCCI Cesare (a cura di) *Leggendo il libro delle antiche architetture, aspetti statici del restauro, saggi 1985-1997*, Roma, Gangemi Editore, 2010

CASAMENTO A., GUIDONI E., *Le città ricostruite dopo il terremoto siciliano del 1693*, Roma, Edizioni Kappa, 1997

CENTRO INTERNAZIONALE DI STUDI SUL BAROCCO IN SICILIA, *Annali del barocco in Sicilia*, Roma, Gangemi, 1988

CENTRO INTERNAZIONALE DI STUDI SUL BAROCCO IN SICILIA, *Rosario Gagliardi e l'architettura barocca in Italia e in Europa*, Roma, Gangemi, 1996

CENTRO INTERNAZIONALE DI STUDI SUL BAROCCO IN SICILIA, *Studi sulla ricostruzione del Val di Noto dopo il terremoto del 1693*, Roma, Gangemi, 1994

COUPLET A., *La poussée des voutes, e Seconde partie de l'examen de la poussé des voutes*, Académie Royale des Sciences, Paris, 1729-1730

CONFORTI C. (a cura di) *Lo specchio del cielo*, Milano, Electa, 1997

CRICCO G., Di Teodoro F.P., *Il Cricco Di Teodoro, Itinerario nell'arte*, vol 3, Bologna, Zanichelli, 2014

CURCIO G. (a cura di) *Il Tempio Vaticano 1694, Carlo Fontana, Milano, Electa, 2003*

DE BENEDICTIS R. TRINGALI S., *La ricostruzione della cattedrale di Noto*, Modica, L.C.T edizioni, 2007

DE LA HIRE P., *Traité de mecanique ou l'on explique tout ce qui est necessaire dans la pratique des arts*, Impremérie Royale, Paris, 1695.

DE LA HIRE P., *Sur la construction des voutes dans les edifices*, Academié Royale des Sciences, Paris ,1712

DI STEFANO R., PANE R., *La cupola di S.Pietro, storia della costruzione e dei restauri*, Napoli, ed. scientifiche italiane, 1980

FIORE F.P., *Storia dell'architettura italiana, quattrocento*, Milano, Electa, 1998

FONTANA C., *Templum Vaticanum et ipsius erigo*. Roma, G.F. Buagni, 1694.

GERMANÒ D., *Barocco in Sicilia*, Firenze ,1986

GIOVANNONI G., *La Tecnica delle Costruzioni Romane a Volta*, Atti della Società Italiana per il Progresso delle Scienze, 1929

GIUFFRÈ Antonio, *La meccanica nell'architettura*. La statica,

GUASTELLA Salvatore, *il Duomo e il suo degrado: analisi e progetto di miglioramento sismico della cupola su colonne.*, tesi di laurea, Relatore Prof. M. Candela, Facoltà di architettura, Università degli studi "Mediterranea" di Reggio Calabria, A.A 2003/2004

HEYMAN J., *Lo scheletro di pietra*, traduzione di Paolo Rugarli, Roma, EPC, 2014

HEYMAN J., *The stone skeleton : structural engineering of masonry architecture*, Cambridge, Cambridge University Press, 1995

HUERTA S., *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometria y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*, Madrid, Instituto Juan De Herrera, Escuela Tecnica Superior de Arquitectura, 2004

MANDOLESI E., *Edilizia*, 4°volume, Torino, UTET editori, 1991

MARGANI L., *Archi e volte in muratura*, Caltanissetta, Lussografica edizioni, 2009

MASCHERONI L. , *Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte*, Bergamo, 1785.

MICELI Biagio, *Comiso Viva*, Ragusa, S.I, 1976

MORANA G., NIFOSÌ P. *La Chiesa di San Giorgio di Modica*, Modica, Stampa La Grafica, 1993

MOSELEY H., *On a new principle in statics called the principle of least pressure*, Phil. Mag., 1833.

NOBILE M.R., *Disegni di Architettura nella Diocesi di Noto*, Palermo, Caracol 2005

NOBILE M.R., *Architettura religiosa negli Iblei: dal Rinascimento al Barocco*, Siracusa, 1990

NOBILE M.R., *Barocco e tardobarocco negli Iblei occidentali*, Palermo, Caracol 1997

NTC2008 -"Norme tecniche per le costruzioni" D.M. 14 Gennaio 2008

- OTTONI F., *Delle cupole e del loro tranello*, Roma, Aracne, 2012
- PALLADIO A. *I Quattro libri dell'architettura : ne' quali, dopo un breve trattato, de' cinque ordini, & di quelli avvertimenti, che sono piu necessari nel fabricare, si tratta delle case private, delle vie, de i ponti, delle piazze, de i xisti, et de' tempii*, Venezia, Franceschi, Domenico de', 1570
- PEVSNER N., *Storia e caratteri degli edifici*, Roma, Fratelli Palombi Editori, 1986
- PINI E., *Dell'Architettura-Dialogi*, Milano, 1770
- POLENI G. *Memorie Storiche Della Gran Cupola del Tempio Vaticano, e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque. Alla Santità di Nostro Signore Papa Benedetto XIV*. Padova, nella Stamperia del Seminario, 1748
- RONDELET J.B., *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, Mantova, 1833
- SUMMERSON J., *Il linguaggio classico dell' architettura*, Torino, Einaudi, 1990
- SCAMOZZI V., *Dell'idea dell'Architettura Universale*, Venezia, 1615
- SCAMOZZI V., *L'idea della architettura universale*, Vol 2, Ridgewood, Gregg ,1964 (Ristampa anastatica dell'ed.: Venezia, 1615)
- TERRIN J.-J., *Cupole, simbolo tecniche storia*, Milano, Jaca Book, 2006
- TRIGILIA L., *Annali del Barocco in Sicilia*, Vol 1, Roma, Gangemi Editore, 1994
- TRIGILIA L., *1693 Iliade Funesta*, Venezia, Arnaldo Lombardi Editore, 1994
- TRIGILIA L. (a cura di), Rosario Gagliardi, *I disegni di architettura della collezione Mazza*, Roma, Gangemi Editore 2014
- TRINGALI S., LA ROSA R., *Chiesa SS. Annunziata, lavori di restauro*, Modica, L.C.T edizioni, 2006
- VENTURIOLI G. , *Elementi di meccanica e d'idraulica*, Milano, 1806

VITTONI B. A., *Istruzioni elementari per l'indirizzo dei giovani allo studio dell'architettura civile*, Lugano, presso gli Agnelli, stampatori della Suprema Superiorità elvetica nelle prefetture italiane 1760

WINKLER E., *Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit*, Praga, 1867

