



dicea | EEAR

*Radici e continuità dell'architetto «vulgo ingegniero»  
nel Mezzogiorno all'insegna di Leonardo.*

*L'opera di Antonio Marchesi  
per Santa Caterina a Formiello.*

Relatore

Ch.mo Prof. Alfredo Buccaro

Correlatore

Ch.mo Prof. Antonio Formisano

Candidato

Riccardo Maria Polidoro – N52/712



## Sommario

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>Contesto storico e culturale</b>	<b>4</b>
<b>Il caso studio: la Chiesa di Santa Caterina a Formiello</b>	<b>8</b>
<b>Le influenze vinciane nei secoli: passaggi chiave</b>	<b>26</b>
<b>Conclusioni</b>	<b>29</b>



## Introduzione

Il presente lavoro di tesi magistrale in Ingegneria Edile-Architettura esplora l'influenza di Leonardo da Vinci sull'evoluzione della figura professionale dell'architetto «vulgo ingegnere» nel Mezzogiorno, con particolare attenzione al contesto napoletano. Partendo dagli studi di Alfredo Buccaro, la ricerca approfondisce come le idee vinciane abbiano influenzato l'evoluzione dell'ingegnere-architetto, attraverso figure chiave come Theti, Nigrone, Stigliola, Fontana e Picchiatti (attivi durante il vicereame spagnolo).

Si esamina anche la figura di Matteo Zaccolini e il suo contributo alla rappresentazione prospettica, esplorando la diffusione della lezione di Leonardo a Napoli tra Sei e Settecento attraverso il Codice Corazza. Il contesto post-vanvitelliano vede una sperimentazione stilistica e concettuale, con la fondazione della Scuola di Ponti e Strade che segna un momento cruciale per l'interdisciplinarietà tra scienza e architettura.

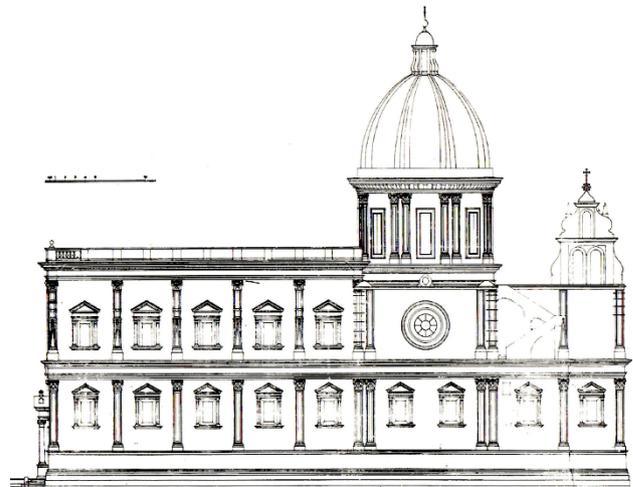
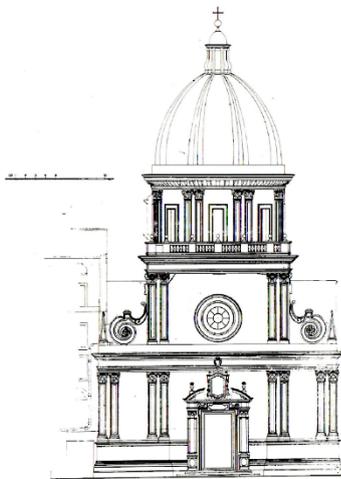
In età contemporanea, l'opera di Roberto Marcolongo e della Real Commissione Vinciana consolida i legami tra Leonardo e le moderne discipline scientifiche e ingegneristiche. La figura del scienziato-artista, originata da Leonardo, continua a svilupparsi nella scuola napoletana di ingegneria, con ingegneri-architetti come Antonio Marchesi, Bartolomeo Picchiatti, Luigi Vanvitelli, Vincenzo Lamberti, Luigi Giura e Luigi Cosenza che ne incarnano l'eredità.

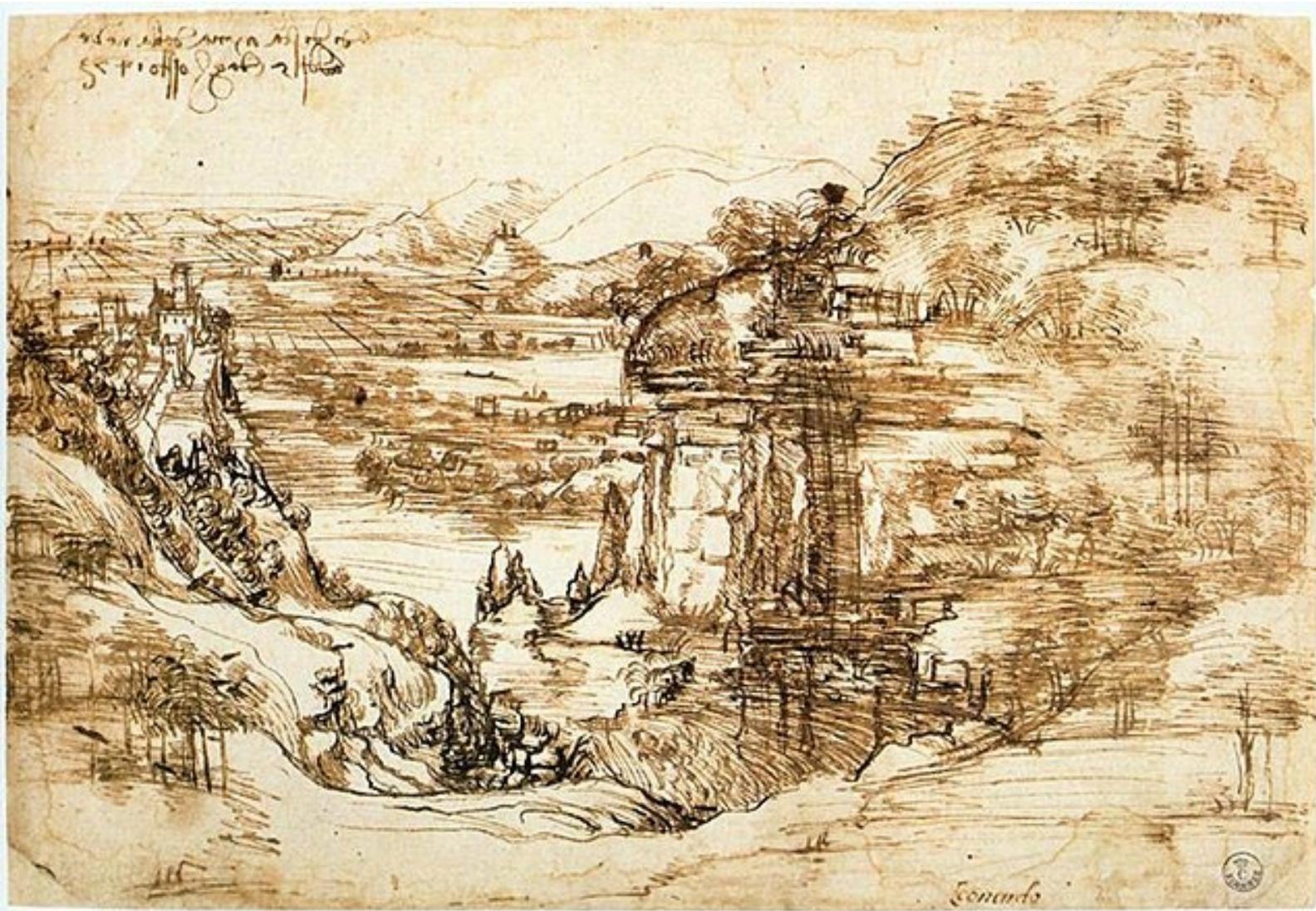
Il viaggio nel tempo appena delineato include l'analisi dell'opera di Francesco di Giorgio Martini e Antonio Marchesi da Settignano, con un approfondimento sulla Chiesa di Santa Caterina a Formiello a Napoli. L'analisi si estende alla vulnerabilità sismica dell'edificio, utilizzando la modellazione agli

elementi finiti condotta per macroelementi (FME) per elaborare una proposta di miglioramento sismico conforme alle N.T.C. 2018 e rispettosa del patrimonio architettonico.

Tramite il caso studio, si è tentato di offrire una possibile declinazione pratica della profonda tradizione ricostruita nel corso degli studi storici, recuperando ed applicando la metodologia d'indagine vinciana sia nella redazione di un progetto di miglioramento sismico conforme alle normative vigenti che nell'utilizzo di strumenti di studio di antica origine, la cui evoluzione nei secoli ha determinato metodi di analisi delle strutture tramite procedimenti di statica grafica, ancora oggi all'avanguardia per lo studio di edifici in muratura.

Questo lavoro evidenzia come le idee di Leonardo abbiano resistito nel tempo, influenzando le metodologie e tecniche contemporanee della progettazione. Si propone di gettare nuova luce sul continuum metodologico, scientifico e artistico che collega Leonardo da Vinci alla formazione e all'evoluzione dell'ingegnere-architetto nel Mezzogiorno, preparando il terreno per la formazione di una nuova generazione di scienziati-artisti radicati in questa tradizione.





Leonardo da Vinci, Paesaggio del Valdarno.

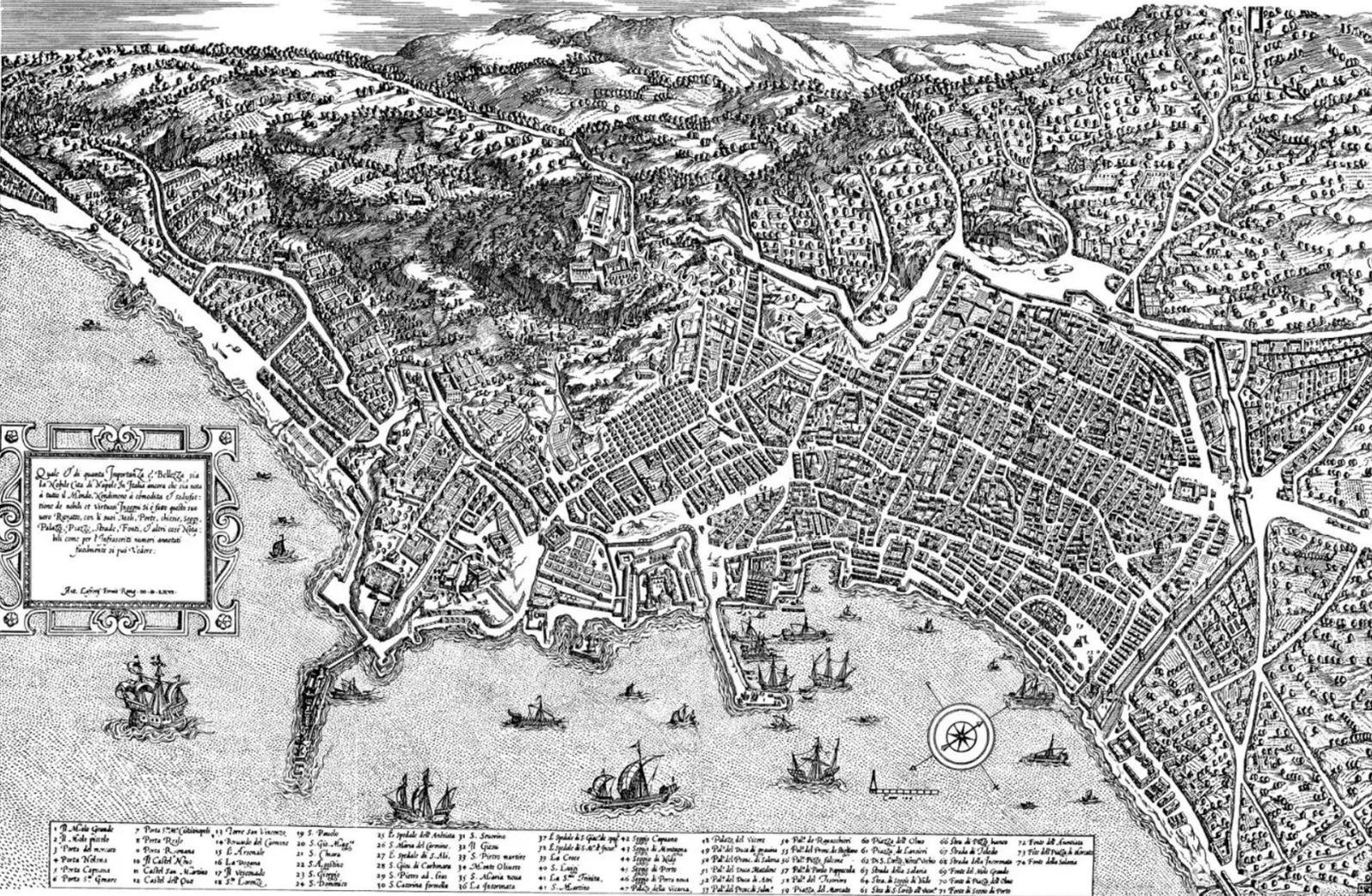
## **Contesto storico e culturale**

Per consentire una più agevole lettura dell'impatto della lezione vinciana sulla maturazione della figura professionale a Napoli e nel Mezzogiorno, è stato analizzato il substrato culturale precedente all'intersezione tra il metodo vinciano e la pratica professionale nella Capitale aragonese.

### **Leonardo da Vinci *scienziato-artista***

Leonardo da Vinci, nato nel 1452, si formò nel clima culturale fiorentino, distinguendosi presto per la sua eccezionale curiosità e versatilità. Formatosi nella bottega di Andrea del Verrocchio a Firenze, Leonardo esplorò le arti e l'ingegneria, entrando presto in contatto con le principali figure culturali del suo tempo. Nel 1482, Leonardo si trasferì a Milano, dove divenne celebre per opere come la "Vergine delle Rocce" e il "Cenacolo" di Santa Maria delle Grazie. Durante questo periodo, sviluppò anche i suoi famosi codici, un ricco corpus di appunti e studi su un'ampia gamma di argomenti scientifici e tecnologici.

Leonardo fu pioniere di un nuovo metodo scientifico basato sull'osservazione diretta e sperimentazione. Integrò conoscenze classiche con scoperte più recenti, tra cui studi matematici e geometrici tratti da autori come Euclide e Archimede, nonché traduzioni di testi arabi che influenzarono la sua comprensione delle macchine e dell'ottica. Il metodo vinciano, caratterizzato da un'incessante indagine e un approccio interdisciplinare, ebbe un impatto profondo sulle generazioni successive di artisti e scienziati. La sua capacità di integrare teoria e pratica, come testimoniato nei suoi numerosi studi e progetti, definì nuove prospettive nel campo dell'ingegneria e dell'architettura.



Antoine Lafréry, Étienne Dupérac, Carta di Napoli (1566).

## **Napoli nel Rinascimento**

Nel 1442, l'ascesa di Alfonso d'Aragona segnò un punto di svolta per Napoli, culminando in una stagione di rinnovamento culturale e architettonico. Questo periodo fu caratterizzato da una serie di interventi strategici e urbanistici mirati a consolidare il potere reale e a rispondere alle esigenze di una città in rapida crescita demografica.

Nel 1443 ebbe inizio la ricostruzione di Castel Nuovo, epicentro del potere reale napoletano. La struttura, originariamente pensata per controllare il principale polo marittimo della città, vide la collaborazione di maestranze catalane e locali, nonché di interpreti degli influssi settentrionali, particolarmente del Rinascimento fiorentino.

Le mura aragonesi, inizialmente progettate da Giuliano da Maiano con torri cilindriche rivestite in piperno, furono ampliate nel XVI secolo da Antonio Marchesi da Settignano e Francesco di Giorgio Martini, introducendo un nuovo sistema a bastioni. Questi interventi non solo rinforzarono le difese, ma segnarono anche il primo bastione alla moderna di Castel Nuovo, necessario per estendere l'area di protezione della cittadella interna.

Importanti interventi urbanistici includono l'apertura di nuove strade e l'allargamento di quelle esistenti, nonché la creazione di piazze per ridurre la densità residenziale e migliorare la viabilità urbana. Queste misure furono cruciali per disciplinare lo sviluppo edilizio spontaneo che caratterizzava il periodo angioino, trasformando il tessuto urbano del centro antico.



*Pasquale Mattei, Mercato a Porta Capuana con Chiesa di Santa Caterina, 1845, collezione privata.*

## **Il caso studio: la Chiesa di Santa Caterina a Formiello**

La chiesa di Santa Caterina a Formiello è strutturata secondo una pianta a croce latina, con una navata unica affiancata da cinque cappelle laterali su ciascun lato. Il transetto ospita due altari laterali e l'abside è di forma rettangolare, sovrastata da una cupola a sesto rialzato.

Internamente, la navata e le cappelle sono coperte da volte a botte e decorate con paraste corinzie su alti piedistalli che si alternano agli archi. Le finestre delle cappelle presentano un disegno uniforme, con decorazioni barocche all'interno, mentre le finestre superiori a tutto sesto si integrano nelle lunette della volta a botte. Gli archi, inclusi quelli che sorreggono la cupola, sono sormontati da mensole ornamentali.

Il prospetto laterale è caratterizzato da un doppio ordine di lesene con capitelli corinzi su un basamento in piperno, intervallate da finestre a tabernacolo. La facciata principale, dominata da un portale seicentesco e una finestra circolare, è inquadrata da lesene in piperno che sostengono un cornicione con balaustra.

La cupola estradossata, a sesto rialzato, è stata una delle prime nel suo genere a Napoli, rappresentando un'innovazione stilistica. Un campanile a vela, aggiunto nel 1593, è diventato un elemento distintivo delle chiese napoletane del Cinquecento.

La pianta della chiesa riflette una stretta aderenza ai canoni proporzionali di Francesco di Giorgio Martini, con una precisa corrispondenza modulare che richiama le opere ecclesiastiche del rinascimento toscano.



*La Chiesa di Santa Caterina a Formiello oggi (foto del 3 marzo 2024).*

## **Interventi previsti**

Gli interventi previsti per il miglioramento sismico dell'aggregato strutturale sono di diverse tipologie. Tra questi, l'applicazione di FRCM in intonaco a base di calce sui campi intonacati esterni della Chiesa ha lo scopo di aumentare la rigidezza dei maschi murari. Inoltre, il rinforzo delle aperture, come l'accesso al chiostro piccolo, è stato progettato per irrigidire significativamente i pannelli murari. Un altro intervento prevede l'iniezione di nuove miscele leganti nelle pareti dell'ospedale e della *infirmaria nova* per migliorare il comportamento monolitico dei pannelli murari ed incrementarne la rigidezza. Anche i solai lignei della sacrestia sono stati oggetto di interventi di irrigidimento, con l'applicazione di una soletta in calcestruzzo all'estradosso. Infine, è stato previsto un miglioramento del comportamento dei solai a putrelle e tavelloni attraverso un migliore collegamento tra le travi e tra trave e muratura.

## **Normativa di riferimento**

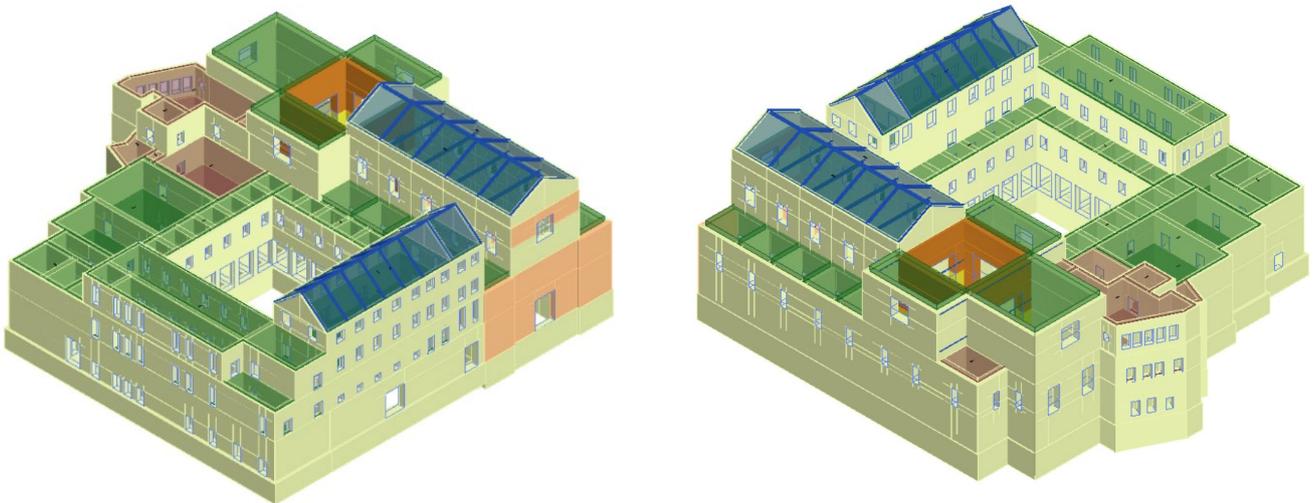
Le analisi e verifiche sono state condotte in conformità con diverse normative, tra cui le istruzioni CNR 10028/86 per l'analisi di strutture mediante elaboratore e il D.P.C.M. del 9 febbraio 2011, che fornisce direttive per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale. Inoltre, si è fatto riferimento al Decreto Ministeriale Infrastrutture Trasporti del 17 gennaio 2018, che aggiorna le Norme Tecniche per le Costruzioni, e alla Circolare del 21 gennaio 2019, n. 7, che offre istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme Tecniche delle Costruzioni.

## **Materiali considerati nel modello di calcolo**

Per quanto riguarda i materiali impiegati, le caratteristiche meccaniche delle strutture portanti esistenti sono state determinate tramite verifiche visive, analisi di fonti d'archivio, rilievi e progetti precedenti. Il livello di conoscenza raggiunto consente di applicare un fattore di confidenza  $FC=1.21$ . Le proprietà

meccaniche della muratura sono state desunte dal programma di calcolo, riferito alla tabella 8.5.I della Circolare 2019, che considera una muratura a conci regolari di pietra tenera, con malta di calce scadente e altre caratteristiche specifiche. Le resistenze meccaniche dei materiali di progetto sono state determinate in base ai valori medi di norma, con un coefficiente parziale di sicurezza  $\gamma_M$  pari a 3 per carichi verticali e 2.4 per condizioni sismiche.

Per massimizzare la compatibilità in opera, sono stati utilizzati materiali nuovi analoghi a quelli esistenti. In particolare, le iniezioni di miscele leganti e gli interventi di finitura con intonaco armato su alcuni maschi murari hanno aggiornato i parametri meccanici dei materiali post-intervento.



*Modello 3D ai macroelementi dell'aggregato allo stato attuale.*

## **Analisi dei carichi**

L'analisi dei carichi delle componenti strutturali orizzontali è stata effettuata sia con calcoli manuali che con programmi di calcolo specifici. Per strutture complesse come il tamburo, la cupola e la lanterna, gli effetti sono stati modellati come carichi applicati agli arconi della crociera. Ad esempio, la muratura portante della cupola è stata calcolata come volume risultante dalla rotazione attorno ad un asse di simmetria di diverse sezioni, con carichi distribuiti uniformemente sugli arconi. Anche i contrafforti a voluta sono stati valutati come carichi applicati alla struttura.

## **Analisi pushover**

Un aspetto fondamentale dell'analisi strutturale è l'analisi pushover, una analisi non lineare abitualmente utilizzata per valutare le prestazioni sismiche di un edificio. Questa analisi consiste nell'applicare un carico crescente fino al collasso della struttura, permettendo di identificare le zone critiche e i potenziali punti di cedimento. Attraverso l'analisi pushover, è possibile progettare interventi di rinforzo mirati ed efficaci, migliorando significativamente la sicurezza sismica dell'edificio.

## **Valutazione delle azioni sismiche**

La valutazione delle azioni sismiche, come anticipato, può essere condotta seguendo le indicazioni delle NTC 2018. Dopo aver definito la categoria del terreno soggiacente l'opera, è significativo definire anche le condizioni topografiche del sito, ricavabili dalla tabella 3.2.III delle NTC. Poiché la Chiesa sorge su un dislivello di 4.17 m con uno sviluppo longitudinale di 25.0 m, si ottiene un'inclinazione media entro i 10°, implicando una categoria topografica T1.

L'azione sismica nelle NTC è caratterizzata da tre componenti traslazionali: due orizzontali (X e Y) e una verticale (Z). Queste componenti sono considerate indipendenti tra loro; quella verticale è significativa per le opere edili solo in siti con  $a_g \geq 0.15$  g. Le due componenti ortogonali orizzontali sono caratterizzate dallo stesso spettro di risposta. Lo spettro di risposta elastico in termini di accelerazione è un grafico che mostra l'accelerazione massima subita da una costruzione con comportamento indefinitamente elastico durante un evento sismico. La forma dello spettro di risposta e i valori delle accelerazioni sismiche dipendono da vari parametri, tra cui la pericolosità del sito, la categoria di sottosuolo, le condizioni topografiche, la probabilità di accadimento dell'evento sismico, la vita nominale dell'opera, la classe d'uso dell'opera e il valore dello smorzamento della costruzione.

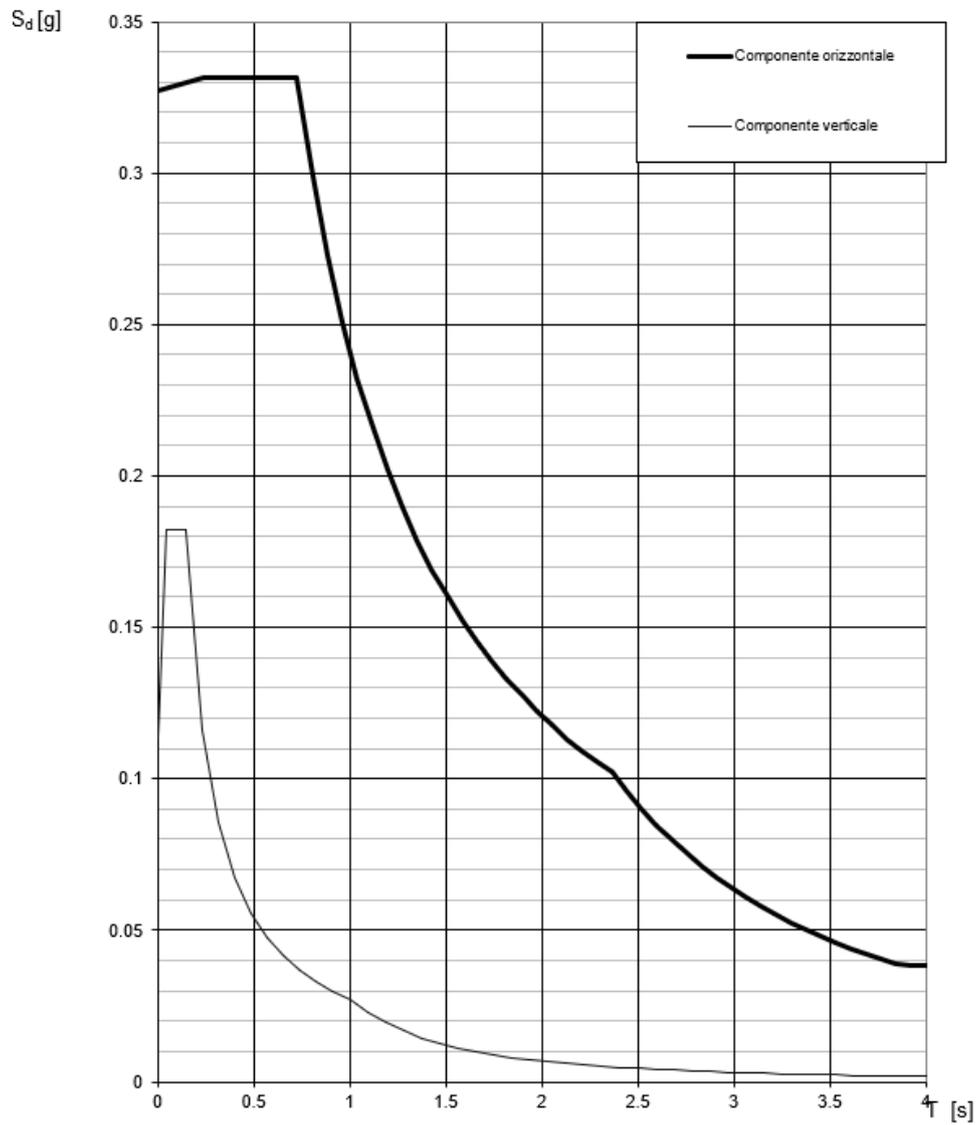
Una volta noti tutti questi parametri, è possibile utilizzare le formule delle Normative Tecniche per calcolare lo spettro di risposta elastico. La definizione degli spettri di risposta di riferimento è stata condotta tramite il foglio di calcolo Spettri NTC, che applica le prescrizioni normative interpolando gli spettri in base a un reticolo a maglie quadre di apertura 5 km. Inserendo le coordinate del sito in esame, è stato possibile ottenere gli spettri elastici di riferimento per il progetto.

Il foglio di calcolo Spettri NTC consente il calcolo degli spettri di risposta rappresentativi delle componenti orizzontali e verticali delle azioni sismiche di progetto, articolandosi in tre fasi: individuazione della pericolosità del sito, scelta della strategia di progettazione e determinazione dell'azione di progetto. Gli spettri di risposta sono fondamentali per valutare l'effetto massimo in termini di accelerazione subito dalla struttura durante un evento sismico. Da essi si ricavano i valori di riferimento di accelerazione basati sul periodo di oscillazione della struttura e sullo smorzamento, che aumenta con la duttilità della struttura e consente di attenuare l'effetto della forza sismica.

Nel definire le azioni sismiche di progetto agenti sulla struttura, è necessario stabilire il periodo di riferimento della struttura, che dipende dalla vita nominale e dalla classe d'uso della costruzione. Per la Chiesa di Santa Caterina a Formiello, è stata adottata una vita nominale di 50 anni e una classe d'uso III, relativa a costruzioni con affollamenti significativi, portando a un periodo di riferimento di 75 anni. Il periodo di ritorno di riferimento per la definizione dell'azione sismica ai vari stati limite viene calcolato con una formula che considera il periodo di ritorno di riferimento  $T_R$ , il periodo di riferimento della struttura  $V_R$  e la probabilità di accadimento di un terremoto  $P_{VR}$ .

Per determinare le azioni di progetto, è necessario definire il fattore di comportamento  $q$ , che dipende dalla tipologia strutturale, dal grado di iperstaticità e dai criteri di progettazione adottati. Per strutture a comportamento dissipativo, come quelle in muratura ordinaria, il fattore di comportamento viene definito dalla norma e può essere calcolato in base a un rapporto tra il primo evento plastico e il collasso della struttura in un'analisi pushover. Data l'elevata variabilità in termini di massa e rigidezza lungo l'altezza della Chiesa di Santa Caterina a Formiello e la limitata continuità dei sistemi sismoresistenti verticali, l'edificio è considerato non regolare in altezza.

Infine, per riferire le azioni sismiche alle condizioni specifiche del sito, si definisce un coefficiente di amplificazione di sito, basato sulla categoria di sottosuolo e topografica. Questo coefficiente è il prodotto tra il coefficiente di amplificazione stratigrafica e il coefficiente di amplificazione topografica, entrambi definiti nelle tabelle delle NTC 2018. Con queste informazioni, è possibile definire le azioni di progetto agenti sulla Chiesa e presentare i diagrammi degli spettri di risposta sismica di progetto per i vari stati limite di riferimento.



Spettro di risposta (componente verticale e orizzontale) di progetto a SLV.

## **Stati limite**

Gli stati limite considerati per la verifica della struttura sono diversi. Lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) prevede che, a seguito di un terremoto, la costruzione subisca rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni significativi ai componenti strutturali, con una conseguente perdita di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali. Tuttavia, la costruzione conserva una parte della resistenza e rigidezza per le azioni verticali e mantiene un margine di sicurezza contro il collasso per azioni sismiche orizzontali. Lo Stato Limite di Danno (SLD) è considerato solo in relazione alla perdita di funzionalità (agibilità) del manufatto, poiché la danneggiabilità di una costruzione storica in muratura, specie per azioni sismiche frequenti, è ritenuta accettabile e inevitabile. Lo Stato Limite di Salvaguardia delle Opere d'Arte (SLA) riguarda la protezione dei beni artistici presenti nell'edificio. In caso di terremoto con intensità tipicamente pari a quella considerata per lo SLD, i beni artistici devono subire solo danni di modesta entità, tali da poter essere restaurati senza una significativa perdita di valore culturale. La valutazione dello SLA si richiede a livello locale, nelle parti dell'edificio con elementi di particolare valore storico-artistico, e gli organi di tutela possono prescrivere livelli di protezione differenti basati sulla rilevanza culturale dei singoli elementi.

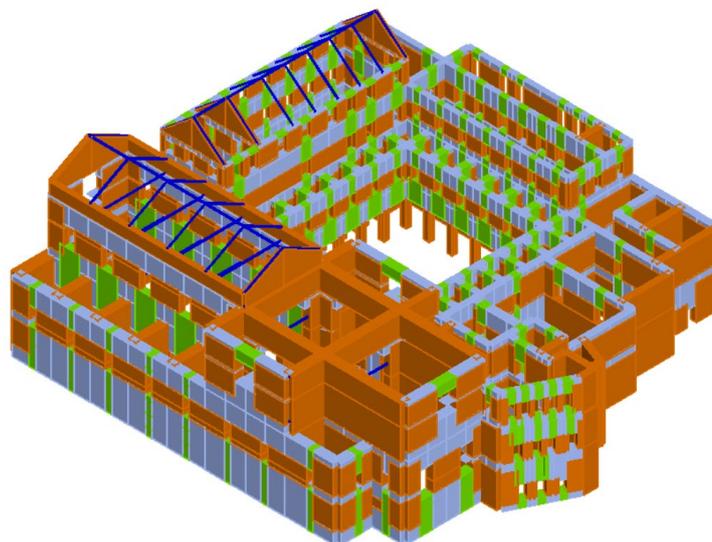
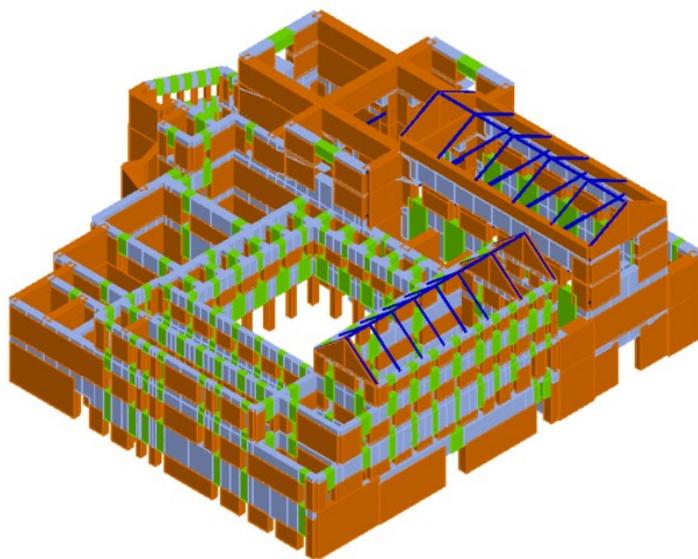
## **Software di calcolo**

Gli interventi su beni di interesse culturale, secondo il paragrafo 8.4 delle NTC 2018 e l'Art. 29, comma 4 del d.lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, si limitano al miglioramento sismico e alla relativa valutazione della sicurezza. Sono stati riportati nel corpo della Tesi i risultati delle analisi strutturali e l'evoluzione delle strategie d'intervento conseguenti. L'analisi strutturale è stata condotta utilizzando il software

3muri versione 14, che consente l'analisi statica non lineare e dinamica modale di strutture in muratura, nuove o esistenti, conformemente alle NTC 2018 e alla circolare integrativa del 2019. Il programma utilizza il metodo Frame by Macro Element (FME), in grado di schematizzare l'edificio mediante macroelementi strutturali, permettendo un'analisi dettagliata del comportamento sismico degli edifici in muratura.

### **Modelli di calcolo**

La modellazione dell'edificio è realizzata mediante l'inserimento di pareti discretizzate in macroelementi, rappresentativi di maschi murari e fasce di piano deformabili. Le porzioni murarie che collegano maschi e fasce sono detti pannelli nodali, meno soggetti al danneggiamento sismico. Il programma dispone di un modulo grafico per l'introduzione della struttura, un solutore per la creazione e soluzione del



*Modello mesh 3D ai macroelementi dell'aggregato.*

modello di calcolo e un post-processore per la presentazione dei risultati e la creazione della relazione di calcolo.

Con il programma 3muri sono stati implementati due modelli di calcolo: uno rappresentante lo stato di fatto (modello *ante operam*) e uno rappresentante lo stato di progetto, che mira a incrementare la sicurezza sismica della struttura (modello *post operam*). Dal confronto dei risultati emerge che gli interventi previsti consentono il miglioramento sismico del fabbricato.

La struttura originaria della Chiesa, costituita da muratura di mattoni in tufo con giunti di malta di calce a corsi regolari, si articola su due livelli, di 11 e 7.90 m di altezza, con un'altezza complessiva di 18.90 m al netto del colmo della copertura a falde. Divisa nel modello in quattro livelli complessivi per le diverse giaciture degli orizzontamenti della sagrestia rispetto alle volte dell'aula, l'area dell'edificio è rettangolare, di dimensioni 57,5 m per 25,0 m. Le strutture orizzontali sono volte a botte nell'aula e solai con travetti in legno e tavolato doppio negli ambienti della sacrestia. La copertura della navata è a due falde, costituita da solai a putrelle e tavelloni, raggiungendo una quota massima di 23.80 m.

In base al rilievo pubblicato da Marco Petreschi e ai documenti d'archivio rinvenuti a seguito di diversi sopralluoghi in Soprintendenza, sono stati elaborati disegni tecnici per la costruzione del modello strutturale. A partire da un ridisegno della planimetria, sono stati creati file DXF per il supporto alla costruzione del modello, includendo linee medie delle murature portanti e la posizione e dimensione delle aperture. Sono state attuate semplificazioni rispetto ai disegni di rilievo: allineamento di pareti con rotazione relativa inferiore agli  $8^\circ$ , determinazione di uno spessore medio per pareti a spessore variabile, definizione di pareti equivalenti per pareti adiacenti con scarto di spessore inferiore ai 20 cm, larghezza delle aperture strombate pari alla somma tra la larghezza netta dell'infisso e la larghezza della strombatura, definizione delle finestre murate come aperture, approssimazione delle

finestre circolari con aperture quadrate, assenza di pareti non collegate, scale e rampe, sostituzione di elementi architettonici complessi con carichi equivalenti applicati al modello strutturale.

Dopo aver definito il modello DXF di riferimento, sono state create piante del modello strutturale con la definizione dei vari elementi murari, degli orizzontamenti e delle volte, insieme a schermate che evidenziano la posizione dei nodi di riferimento per il calcolo strutturale.

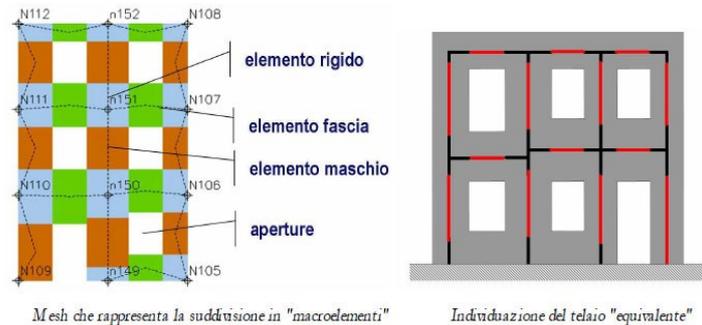
In base alle evidenze documentali, corroborate da immagini satellitari e restituzioni tridimensionali, l'aggregato risulta costituito da muratura di mattoni in tufo a conci regolari e giunti di malta di calce a corsi regolari. L'area di impronta dell'aggregato è all'incirca quadrata, con dimensioni di 64.8 m per 62.9 m. Le strutture orizzontali degli ambienti non religiosi sono costituite da solai a putrelle e tavelloni, con volte a crociera a copertura del portico del chiostro piccolo. La copertura del corpo Ovest, a due falde, è anch'essa costituita da solai a putrelle e tavelloni, raggiungendo una quota massima di 22.80 metri.

### **Analisi e verifiche strutturali**

L'analisi globale della struttura muraria è stata eseguita con il software 3muri, noto per le sue capacità di analisi statiche lineari e non lineari su edifici esistenti. Il metodo utilizzato, chiamato "Frame by Macro Element" (FME), sfrutta una suddivisione della muratura in elementi chiamati maschi, fasce e nodi rigidi, modellati per rappresentare accuratamente il comportamento sismico dell'edificio. Questi macroelementi consentono di valutare la vulnerabilità strutturale considerando le deformazioni e le capacità di resistenza agli eventi sismici.

Le analisi sono state condotte tramite simulazioni 3D dettagliate dell'aggregato pre-intervento, suddividendo le pareti in elementi maschio (arancione), fasce (verde) e nodi rigidi (azzurro). I calcoli

sono stati integrati con analisi statiche non lineari, considerando diverse combinazioni di carico sismico in accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018).



I risultati delle analisi modali hanno identificato i primi modi di vibrazione significativi in entrambe le direzioni principali dell'edificio, influenzando il progetto delle analisi pushover successive. Tali analisi, necessarie per verificare gli stati limite di collasso, salvaguardia della vita, danno ed operatività, hanno richiesto un approfondimento dettagliato delle curve di capacità e dei carichi sismici applicati.

Ogni stato limite è stato valutato confrontando la capacità resistente della struttura con i requisiti normativi di spostamento e di resistenza. Gli indici di rischio calcolati ( $\alpha$  SLC,  $\alpha$  SLV,  $\alpha$  SLD,  $\alpha$  SLO) hanno fornito una valutazione chiara delle performance strutturali sotto carichi sismici significativi.

Complessivamente, le 24 analisi pushover effettuate hanno evidenziato che la struttura, nella sua configurazione pre-intervento, non ha soddisfatto i requisiti di sicurezza in nessuno degli stati limite considerati, con peggiori condizioni di sicurezza in corrispondenza del raggiungimento dello stato limite di salvaguardia della vita.

## **Risultati delle analisi e interventi**

I risultati delle analisi evidenziano una criticità maggiore nella direzione Y, dove gli indici di rischio risultano più bassi rispetto agli standard accettabili. Per mitigare questa vulnerabilità, sono stati progettati interventi mirati. Questi includono iniezioni di malta nei corpi settentrionale e occidentale, con l'inserimento di cerchiature per rinforzare aperture critiche. La facciata sud è stata particolarmente trattata, con intonacature armate per migliorare la sua resistenza sismica.

Altri interventi significativi hanno riguardato il rinforzo delle finestre e delle pareti estradossate del transetto, nonché il consolidamento dei solai con calcestruzzo armato e l'aggiunta di bandelle in acciaio per migliorare la connessione tra le travi.

La metodologia di modellazione strutturale, basata su modelli FEM, ha permesso di valutare con precisione l'efficacia di tali interventi, assicurando che fossero adeguati alle specifiche condizioni della Chiesa e conformi alle normative vigenti.

In conclusione, le analisi pushover sul modello post-intervento hanno mostrato un miglioramento significativo rispetto alla situazione precedente, anche se le verifiche ai diversi stati limite non sono ancora completamente soddisfatte. Questo sottolinea l'importanza di continue valutazioni e monitoraggi per garantire la stabilità a lungo termine della struttura.

## **Classe di rischio sismica: PAM e IS-V**

La valutazione della classe di rischio strutturale, nel contesto trattato, si basa sul metodo convenzionale, che considera due parametri fondamentali: la Perdita Annuale Media attesa (PAM) e l'Indice di Sicurezza (IS-V). La PAM rappresenta le perdite economiche annuali previste per danni strutturali,

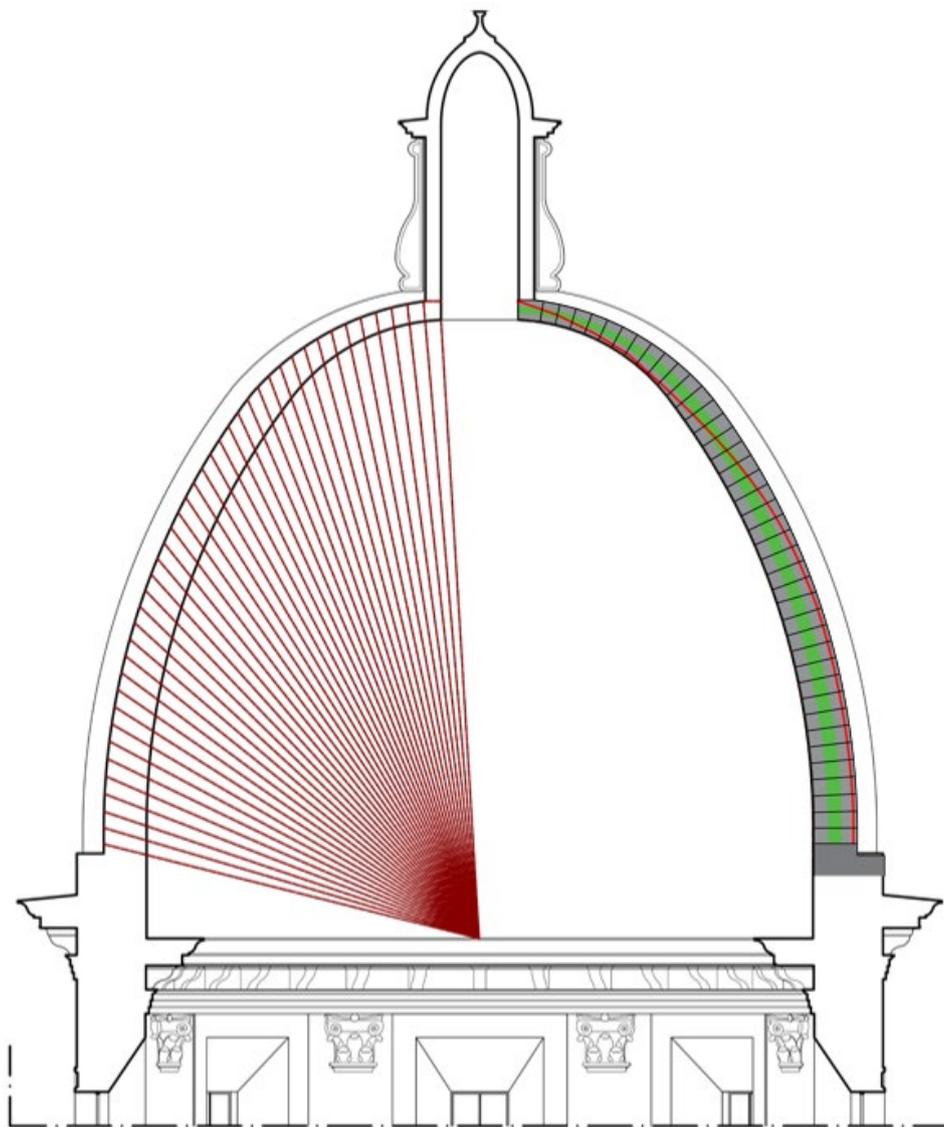
espressa come percentuale del costo di ricostruzione dell'edificio. L'IS-V, invece, è il rapporto tra l'accelerazione di picco al suolo (PGA) che induce lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e quella di progetto (PGAD).

Per determinare la classe di rischio, si valutano le accelerazioni di capacità ( $PGAc$ ) per gli stati limite considerati (SLC, SLV, SLD, SLO), calcolando i corrispondenti periodi di ritorno. La PAM viene ottenuta dall'area sottesa alla curva delle perdite economiche annuali in funzione della frequenza di superamento degli eventi sismici. L'IS-V, invece, definisce la sicurezza della struttura rispetto alla vita umana.

Sia per lo stato *ante operam* che *post operam*, i risultati sono stati ottenuti attraverso analisi pushover, che hanno evidenziato una significativa riduzione della PAM nella configurazione post intervento, pur mantenendo l'IS-V nella classe D per le configurazioni più sfavorevoli. Questi risultati sono fondamentali per determinare l'efficacia delle strategie di intervento e miglioramento della struttura nella riduzione del rischio sismico complessivo.

### **Analisi statica grafica della cupola**

La sezione del lavoro di Tesi dedicata all'analisi statica grafica della cupola si focalizza sul funzionamento e la metodologia applicata per comprendere il comportamento strutturale dell'elemento. La teoria membranale, fondamentale per questo tipo di analisi, considera la cupola come un insieme di macroelementi, scomposti lungo meridiani e paralleli, dove gli sforzi interni sono trasferiti attraverso archi e anelli. Questo approccio consente di valutare le tensioni e le compressioni lungo la struttura, essenziali per comprendere la distribuzione delle forze e la stabilità complessiva.

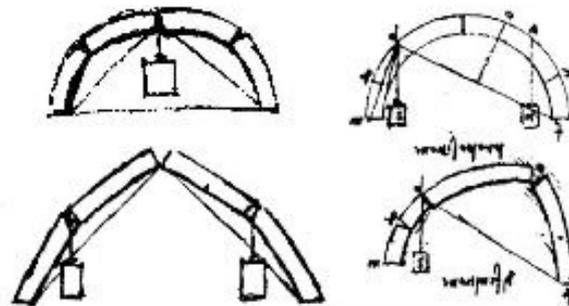


*Slicing della cupola, suddivisione in conci e identificazione della curva delle pressioni.*

La metodologia si basa sull'analisi di equilibrio e sulle interazioni tra le parti della cupola, considerando anche le fessurazioni tipiche delle strutture in muratura che possono compromettere la loro integrità. Importante è l'applicazione della teoria di Heyman, che esamina il collasso potenziale delle strutture a causa di cerniere interne, evidenziando come la distribuzione delle pressioni e la forma stessa dell'arco influenzino la stabilità strutturale.

Studi rinascimentali, come quelli di Leonardo da Vinci e Francesco di Giorgio Martini, hanno influenzato le prime teorie sulle cupole, considerandole come prodotti della rotazione di archi attorno ad un asse verticale. Questi studi sono stati precursori dell'approccio moderno alla statica grafica, che combina modellizzazione strutturale con considerazioni geometriche ed empiriche.

L'applicazione pratica alla cupola di Santa Caterina a Formiello illustra come tali teorie siano ancora utilizzate per analizzare problemi specifici di stabilità e fessurazione nelle strutture storiche. L'approccio include la scomposizione della cupola in elementi gestibili, adatti all'analisi agli elementi finiti e alla valutazione delle condizioni di carico. Questo metodo consente di comprendere meglio le dinamiche strutturali e di proporre interventi appropriati per il ripristino e il mantenimento dell'integrità delle strutture storiche.

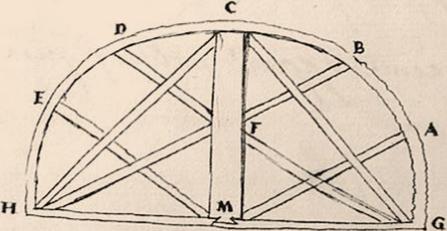


*Studi vinciani sul meccanismo di collasso di archi in muratura estratti dal Manoscritto di Madrid I.*



*ffo mag: a' hoig flou, una gaja nel behadea  
a' il lupo del re' Leonardo de' Luca flou e  
dell'op: uel'op: d'ur' hui-  
leho in folio in carta prima de' gofj.  
que' ma' non teniva a' d'op:ar per il  
re' tradava d'aque e d' d'ho d'op:er  
d'ade de  
de' d'ade fu' uiccedio del behadeo  
de' uiccedio d'op:er. Ho per  
100 uiccedio d'ade  
d'ade d'ade de' d'ade d'ade d'ade  
de' d'ade d'ade d'ade d'ade d'ade*

*Le ragioni questo Arco e' forte  
impossibile che un corpo maggiore pos-  
sare in un minore, stando così la linea  
e' molto maggiore, de' D. H. adunque il B  
magior*



STATICA DEGLI EDIFICI  
DI  
VINCENZO LAMBERTI  
INGEGNERE NAPOLETANO  
In cui si espongono i precetti Teorici pratici, che si  
debbono osservar nella costruzione degli Edifici  
per la durata di essi.  
DEDICATA  
A S. E.  
IL SIGNOR  
D. GIUSEPPE BECCADELLI  
DI BOLOGNA  
MARCHESE DELLA SAMBUCA, DE' PRINCIPI DI CAMPOREALE,  
MARCHESE DI ALTAVILLA &c.  
CAVALIERE DELL' INSIGNE REALE ORDINE DI S. GENNARO,  
GENTILUOMO DI CAMERA CON ESERCIZIO DI S. M.,  
CONSIGLIERE, E PRIMO SEGRETARIO DI STATO,  
DI CASA REALE, ED AFFARI ESTERI, E SO-  
PRINTENDENTE GENERALE DELLE  
REGIE POSTE.  
IN NAPOLI MDCCLXXXI  
PRESSO GIUSEPPE CAMPO.  
Con Licenza de' Superiori.

ROBERTO MARCOLONGO  
LEONARDO DA VINCI  
ARTISTA-SCIENZIATO  
sedici figure e ventitrè tavole fuori testo  
TERZA EDIZIONE  
ESIAE  
EDITORE ULRICO HOEPLI MILANO  
1950

## Le influenze vinciane nei secoli: passaggi chiave

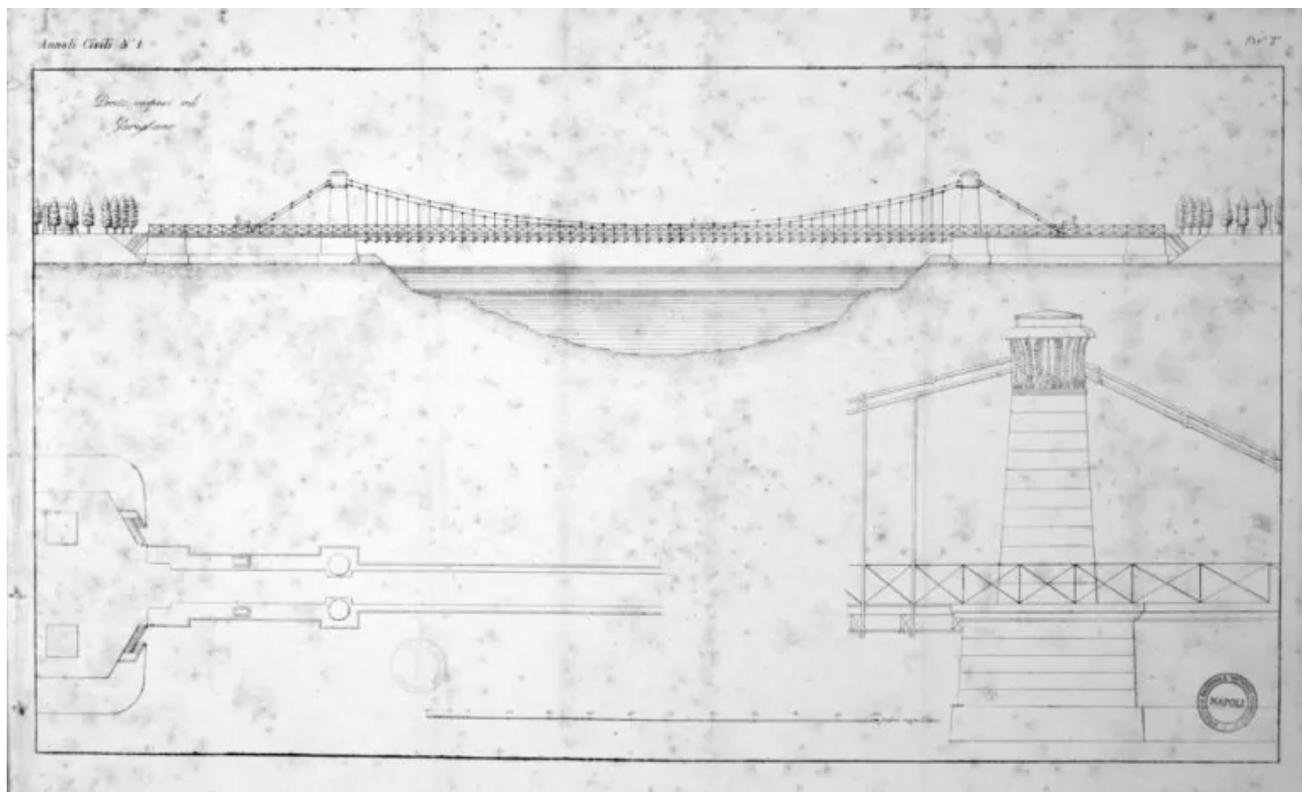
L'esplorazione dell'evoluzione della figura dell'ingegnere-architetto nel Mezzogiorno italiano attraverso i secoli rivela sfide, cambiamenti e continuità, seguendo il filo rosso delle idee vinciane. Leonardo da Vinci rappresenta la sintesi tra arte e scienza, promuovendo un approccio basato sulla sperimentazione e l'osservazione della natura, influenzando figure come Martini, Marchesi, Nigrone, Stigliola e Zaccolini. Questi successori hanno trasmesso la visione vinciana attraverso la loro pratica progettuale, oltre alla produzione di trattati che combinano teoria e pratica, definendo l'identità dell'ingegnere-architetto e plasmando l'architettura meridionale.

Il tardobarocco introduce un cambio di rotta con Vanvitelli, la cui opposizione alle moderne scienze costruttive contrasta con l'approccio scientifico di Vincenzo Lamberti, autore del primo trattato di statica degli edifici in ambito napoletano. Nel periodo post-napoleonico, Giuliano de Fazio applica la teoria di archeologia idraulica ai porti flegrei, nonostante le sperimentazioni fallite, segnalando un importante passo nell'evoluzione della figura professionale.

Il XIX secolo vede l'introduzione dell'approccio scientifico-analitico con la Scuola di Ponti e Strade, formando ingegneri-architetti come Luigi Giura, autore del Ponte sul Garigliano. Napoli diventa un centro di diffusione delle teorie vinciane, influenzando figure come Albini e Marcolongo, e suscitando un vivo interesse in Carlo Pedretti, fautore di una corrente di studi incentrato sul recupero delle tracce e delle influenze vinciane che da oltre vent'anni vede un'importante scuola a Napoli, con l'operato di studiosi come Alfredo Buccaro e Carlo Vecce.

*Alla pagina a fianco, da sinistra a destra: il diario di Antonio de Beatis; il Foglietto di Belvedere; studi vinciani sulla stabilità degli archi nel Codice Corazza; frontespizio della Statica degli Edifici di Vincenzo Lamberti; Frontespizio di 'Leonardo da Vinci Artista-Scienziato' di Roberto Marcolongo.*

Luigi Cosenza, progettista del Politecnico di Piazzale Tecchio, rappresenta uno dei professionisti di riferimento nell'età contemporanea per quanto riguarda la continuità con l'eredità vinciana. La sua filosofia progettuale di sintesi tra ingegneria e architettura si riflette nei suoi contributi teorici e pratici.



*Luigi Giura, progetto del Ponte Real Ferdinando.*

me deliberare, et confute, ac ex gratia  
speciali matris, tam in Supremo Cont  
ly auctoritate declarari. Tam dicitur off.  
Architecti majoris, Vulgo Ingeniero, In  
cibus in hinc Regno modo ut supra  
viam dicitur per Bar. Picciati dum  
verna mera, et libera voluntate pro:

Nomina di Bartolomeo Picchiatti «Architecti majoris (Vulgo Ingeniero)», del 1628.

## Conclusioni

L'esplorazione dell'evoluzione della figura dell'ingegnere-architetto nel Mezzogiorno italiano attraverso i secoli ci ha accompagnati in un percorso intriso di sfide, cambiamenti e continuità, seguendo il filo rosso delle idee vinciane. Nell'analizzare questo lungo arco temporale, emergono connessioni significative tra le metodologie di indagine scientifica proposte da Leonardo da Vinci e la formazione tecnica, le pratiche professionali e gli sviluppi architettonici nel Mezzogiorno.

Tramite il caso studio della Chiesa monumentale di Santa Caterina a Formiello – testimonianza fisica del momento storico *a quo* si ritiene che la scienza vinciana si intreccia con l'evoluzione della figura professionale a Napoli e nel Mezzogiorno – si è tentato di offrire una possibile declinazione pratica di questa profonda tradizione, recuperando ed applicando la metodologia d'indagine vinciana sia nella redazione di un progetto di miglioramento sismico conforme alle normative vigenti che nell'utilizzo di strumenti di studio di antica origine, la cui evoluzione nei secoli ha determinato metodi ancora oggi all'avanguardia per lo studio di edifici in muratura.

Si auspica che il percorso delineato possa contribuire alla piena rinascita di una figura professionale consapevole della propria storicità e padrona delle proprie competenze, nuovamente unificate, così da consentire la prosecuzione di un percorso radicato e persistente, adatto a raccogliere le sfide progettuali della società odierna in cui la necessità di integrazione tra forma e funzione, tra struttura e arte, tra bellezza e esigenze di comfort, connessa a nuove esigenze di sostenibilità ed efficienza, ha determinato una frammentazione delle competenze e una moltiplicazione dei professionisti coinvolti in un progetto, richiedendo una figura di riferimento che sappia coordinare sinergicamente i contributi di ognuno e sintetizzarli in opere complete, in cui nessun aspetto della progettazione è trascurato.