



POLITECNICO
MILANO 1863

Facoltà di Ingegneria

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE
AMBIENTALE E TERRITORIALE

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile – Civil Engineering

**INDAGINE SULLE CAUSE DEI
DISSESTI IN UNA SALA DI
PALAZZO MAGIO GRASSELLI A
CREMONA MEDIANTE ANALISI
AD ELEMENTI FINITI**

Relatore: Prof. Alberto Taliercio

Co-relatore: Prof.ssa Paola Condoleo

Tesi di laurea di:

Samuele Tommaso Damiano Pecora

Matricola 945049

Anno Accademico 2020/2021

“It's not always gonna be this grey”

All Things Must Pass, GEORGE HARRISON

Abstract

The work presented here consists in the assessment of an important hall of Palazzo Magio Grasselli in Cremona. Peculiarity of the hall is the presence of a masonry vault of irregular shape, which cannot be idealized by any typical vault typology. The main objective of this study is to understand the causes of the crack pattern highlighted throughout the entire structural system. The procedure to achieve this goal has been subdivided in multiple phases. First, a detailed study has been carried out to achieve an in-depth knowledge of the entire building and the hall in particular, in terms of history, geometry and instabilities. This step has been followed by the geometrical and mechanical definition of a Finite Element model of the structure, on which a series of linear and non-linear analyses has been carried out using the software *Abaqus CAE*. The results obtained by the analysis demonstrate that the different load types can explain the origin of different cracks. More precisely, a good part of the more superficial cracks is caused by gravity, whereas many deep, localized cracks are either of thermal origin, because of the heat flow in the flues, or were induced by settlements of the ground below one of the main external walls. The study allowed a deeper understanding of the structural behaviour of the hall to be achieved, not only because majority of the cracks has been motivated, but also because the structural importance of several steel and masonry reinforcements added to the vault was explained.

Sommario

Il lavoro qui presentato consiste nell'analisi di un importante salone di Palazzo Magio Grasselli in Cremona. La peculiarità del salone è la presenza di una volta irregolare in muratura, che non può essere idealizzata da nessuna delle tipologie classiche di volta. L'obiettivo principale di questo studio è stato quello di comprendere le cause del quadro fessurativo dell'intero sistema strutturale. A questo scopo è stata definita una procedura su più fasi. Nella prima di queste, è stato eseguito uno studio volto a aggiungere una profonda conoscenza dell'edificio e del salone, dal punto di vista storico, geometrico e del dissesto. Si è poi definito geometricamente e numericamente un modello a Elementi Finiti della struttura, sul quale sono state eseguite analisi di tipo lineare e non lineare, attraverso il software *Abaqus CAE*.

I risultati ottenuti da queste analisi hanno dimostrato diverse tipologie di carico spiegano l'origine dei diversi dissesti. Più precisamente, una buona parte delle fessure più superficiali è causata dal peso proprio mentre molti dei dissesti più gravi e localizzati, sono generati come conseguenza di carichi termici all'interno delle canne fumarie e di cedimenti del terreno alla base di uno dei due muri principali.

Lo studio ha permesso una profonda conoscenza del comportamento strutturale della stanza, dimostrando le cause della maggior parte del quadro fessurativo ma anche spiegando l'importanza strutturale dei rinforzi in acciaio e muratura di cui la volta beneficia.

Indice

| | |
|--|-----|
| Abstract | II |
| Sommario | III |
| Indice | IV |
| Indice delle Figure | VI |
| Indice delle Tabelle..... | X |
| 1 Introduzione | 1 |
| 2 Stato dell'arte..... | 3 |
| 3 Inquadramento del caso studio | 4 |
| 3.1 Materiale a disposizione | 5 |
| 3.2 Palazzo Magio Grasselli: Analisi Storica..... | 6 |
| 3.3 Stanza 3.27: Descrizione Geometrica | 13 |
| 3.4 Stanza 3.27: descrizione delle tecniche costruttive..... | 17 |
| 3.5 Salone 3.27: descrizione del quadro fessurativo..... | 22 |
| 4 Modellazione geometrica | 31 |
| 4.1 Procedura di modellazione | 32 |
| 5 Modellazione numerica | 42 |
| 5.1 Importazione delle parti da modello geometrico | 42 |
| 5.2 Definizione delle proprietà meccaniche | 48 |
| 5.2.1 Muratura | 48 |
| 5.2.1.1 MODELLO ELASTICO LINEARE ISOTROPO | 49 |
| 5.2.1.2 MODELLO ELASTICO LINEARE ORTOTROPO | 50 |
| 5.2.1.3 MODELLO ELASTOPLASTICO CON DANNO (CDP)..... | 52 |
| 5.2.2 Catene | 59 |
| 5.3 Definizione dei vincoli | 60 |
| 5.4 Definizione dei Carichi | 62 |
| 5.4.1 Peso proprio | 62 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.4.2 | Peso delle porzioni di muratura gravante sulle pareti nord e sud | 62 |
| 5.4.3 | Peso della copertura | 64 |
| 5.4.4 | Contributo del solaio | 68 |
| 5.5 | Definizione delle Interazioni | 73 |
| 5.6 | Definizione della Mesh | 75 |
| 6 | Risultati delle analisi | 78 |
| 6.1 | Analisi elastica lineare | 79 |
| 6.1.1 | Analisi elastica lineare con materiale isotropo | 79 |
| 6.1.2 | Analisi elastica lineare con materiale ortotropo | 85 |
| 6.1.3 | Valutazione del contributo resistente di catene e frenelli | 90 |
| 6.2 | Analisi non lineari | 93 |
| 6.2.1 | Analisi non lineare con peso proprio | 95 |
| 6.2.2 | Analisi non lineare con cedimento | 99 |
| 6.2.3 | Analisi non lineare con carico termico | 102 |
| 7 | Conclusioni | 107 |
| 8 | Bibliografia | 110 |
| | Ringraziamenti | 112 |

Indice delle Figure

| | |
|---|----|
| Figura 3-1: Planimetria di Palazzo Magio Grasselli - nel riquadro il salone 3.27..... | 4 |
| Figura 3-2: Vista aerea di Palazzo Magio Grasselli..... | 5 |
| Figura 3-3: Pianta della regia città di Cremona, anno 1852 | 6 |
| Figura 3-4: A sinistra: planimetria di Cremona, anno 1587 - a destra: estensione del palazzo nella planimetria della città | 7 |
| Figura 3-5: Fotografie della facciata di Palazzo Magio Grasselli | 9 |
| Figura 3-6: Schema cronologico delle riforme edilizie cui il palazzo è stato sottoposto | 12 |
| Figura 3-7: Salone 3.27 - Pianta del piano terra | 13 |
| Figura 3-8: Salone 3.27 - Pianta del primo piano | 14 |
| Figura 3-9: Salone 3.27 - Pianta con evidenza di archi, frenelli e catene | 14 |
| Figura 3-10: Salone 3.27 - Nuvola di punti intradossale della volta..... | 15 |
| Figura 3-11: Termografia all'intradosso della volta - Stanza 3.27 | 17 |
| Figura 3-12. Due conformazioni ad arco comuni (A e B) e una conformazione a tas de charge (C)..... | 18 |
| Figura 3-13: Termografia all'intradosso della volta - Stanza 3.14 | 19 |
| Figura 3-14: Schema di una tipica catena estradossale | 20 |
| Figura 3-15: Fotopiano del solaio ligneo | 21 |
| Figura 3-16: Fotopiano della parete ovest - cerchiati in rosso, i capochiave a livello del solaio..... | 21 |
| Figura 3-17: Quadro fessurativo - volta | 23 |
| Figura 3-18: Fessurazione diagonale nel frenello | 24 |
| Figura 3-19: Quadro fessurativo - prospetto nord..... | 25 |
| Figura 3-20: Quadro fessurativo - prospetto ovest | 26 |
| Figura 3-21: Quadro fessurativo - prospetto sud..... | 27 |
| Figura 3-22: Quadro fessurativo - prospetto est..... | 28 |
| Figura 3-23: Sezione EST-OVEST | 29 |
| Figura 3-24: Sezione NORD-SUD | 29 |
| Figura 3-25: Confronto tra sezioni all'intradosso (rossa) e all'estradosso (blu)..... | 30 |
| Figura 4-1: Sezioni nella direzione longitudinale..... | 33 |
| Figura 4-2: Sezioni nella direzione trasversale..... | 33 |
| Figura 4-3: Sezioni sulle diagonali..... | 34 |
| Figura 4-4: Dettaglio in uno spigolo della griglia di sezioni | 34 |
| Figura 4-5: Piani di riferimento: in blu il piano di divisione tra volta e imposte, in rosso il piano di taglio delle isolinee regolarizzate, in magenta il piano per la regolarizzazione a sinistra, in azzurro quello per la regolarizzazione a destra..... | 35 |
| Figura 4-6: Confronto tra una sezione non regolarizzata e la corrispondente isolinea, derivata dalla regolarizzazione..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-7: intero set delle isolinee regolarizzate comprendente: quelle nelle direzioni longitudinali e trasversali, le diagonali e l'anello di chiusura della volta alla base | 37 |
| Figura 4-8: Modello solido comprendente la volta e gli archi in spessore..... | 38 |
| Figura 4-9: Termografia all'intradosso con dettaglio della catena estradossale..... | 40 |
| Figura 4-10: Modello geometrico completo | 41 |
| Figura 5-1: Insieme delle parti rappresentanti le catene | 44 |
| Figura 5-2: Parte "MURI" | 44 |
| Figura 5-3: Parte "FRENELLI" | 45 |
| Figura 5-4: Parte "VOLTA" | 45 |
| Figura 5-5: Parte "VOLTA" al momento dell'importazione, prima della modifica della topologia..... | 46 |
| Figura 5-6: Modello assemblato | 47 |
| Figura 5-7: Orientamento del materiale ortotropo - sistema di riferimento cilindrico | 51 |
| Figura 5-8: Orientamento del materiale ortotropo - sistema di riferimento sferico 1. | 52 |
| Figura 5-9: Orientamento del materiale ortotropo - sistema di riferimento sferico 2. | 52 |
| Figura 5-10: Relazioni sforzo-deformazione a trazione (a) e compressione (b)..... | 54 |
| Figura 5-11: Dominio plastico su piano deviatorico | 57 |
| Figura 5-12: Dominio plastico su piano biassiale | 58 |
| Figura 5-13: Regioni soggette ad ammorsamenti con i muri esterni: in rosso le interazioni estese per tutta l'altezza dell'edificio, in verde un'interazione che si estende da quota terra fino a quota di calpestio del primo piano..... | 60 |
| Figura 5-14: Condizioni al contorno inserite sul modello assemblato..... | 61 |
| Figura 5-15: Pesì delle porzioni di muro sorrette dalle pareti nord e sud (in rosso), inseriti in Abaqus CAE | 63 |
| Figura 5-16: Fotografia di parte di una delle capriate del sistema strutturale del tetto | 64 |
| Figura 5-17: schema della copertura lignea..... | 65 |
| Figura 5-18: Aree di influenza di ciascuna trave..... | 66 |
| Figura 5-19: Schema statico per il calcolo delle reazioni agli appoggi delle capriate.. | 66 |
| Figura 5-20: Peso della copertura (in rosso), inserito in Abaqus CAE..... | 67 |
| Figura 5-21: Schema grafico del solaio | 68 |
| Figura 5-22: Schematizzazione delle sezioni delle quattro travi (quote in mm) | 69 |
| Figura 5-23: Molle di simulazione delle travi come presidio passivo, inserite in Abaqus CAE..... | 70 |
| Figura 5-24: Schema della sezione del solaio nella direzione delle travi | 70 |
| Figura 5-25: Peso del solaio (in rosso), inserito in Abaqus CAE..... | 72 |
| Figura 5-26: Libreria degli elementi finiti disponibile in ABAQUS CAE..... | 75 |
| Figura 5-27: Da sinistra a destra: controllo Hex, controllo Hex-dominated, controllo Tet, Controllo Wedge..... | 76 |
| Figura 5-28: Modello dopo la definizione della mesh..... | 77 |
| Figura 6-1: Sforzi lungo la direzione z - modello con elementi lineari..... | 80 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6-2: Sforzi lungo la direzione z - modello con elementi quadratici..... | 80 |
| Figura 6-3: Sforzi principali massimi (panoramica) - Analisi elastica lineare con materiale isotropo..... | 82 |
| Figura 6-4: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi elastica lineare con materiale isotropo..... | 82 |
| Figura 6-5: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi elastica lineare con materiale isotropo..... | 83 |
| Figura 6-6: Sforzi principali minimi - Analisi elastica lineare con materiale isotropo | 84 |
| Figura 6-7: Sforzi principali massimi (panoramica) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo..... | 85 |
| Figura 6-8: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo..... | 86 |
| Figura 6-9: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo..... | 86 |
| Figura 6-10: Sforzi principali minimi - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo | 87 |
| Figura 6-11: Sforzi principali massimi (panoramica catene) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo..... | 88 |
| Figura 6-12: Sforzi principali massimi (catena 3) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo..... | 89 |
| Figura 6-13: Sforzi principali massimi (catena 2) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo..... | 89 |
| Figura 6-14: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi elastica lineare in assenza di catene | 90 |
| Figura 6-15: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi elastica lineare in assenza di catene | 91 |
| Figura 6-16: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi E-L in assenza di catene e frenelli..... | 92 |
| Figura 6-17: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi E-L in assenza di catene e frenelli..... | 92 |
| Figura 6-18: Schematizzazione di incrementi e iterazioni come eseguite dal software ABAQUS CAE..... | 94 |
| Figura 6-19: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi non lineare con peso proprio..... | 96 |
| Figura 6-20: Sforzi principali massimi (panoramica) - Analisi non lineare con peso proprio..... | 96 |
| Figura 6-21: Deformazioni plastiche (vista panoramica) - Analisi non lineare con peso proprio..... | 97 |
| Figura 6-22: Deformazioni plastiche (intradosso) - Analisi non lineare con peso proprio | 98 |
| Figura 6-23: Sforzi principali massimi - Analisi non lineare con cedimento..... | 100 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6-24: Deformazioni plastiche (esterno) - Analisi non lineare con cedimento. | 101 |
| Figura 6-25: Deformazioni plastiche (interno) - Analisi non lineare con cedimento. | 101 |
| Figura 6-26: Deformazioni plastiche (panoramica interna) - Analisi non lineare con carico termico | 103 |
| Figura 6-27: Deformazioni plastiche (panoramica esterna) - Analisi non lineare con carico termico | 103 |
| Figura 6-28: Deformazioni plastiche (dettaglio esterno) - Analisi non lineare con carico termico..... | 104 |
| Figura 6-29: Deformazioni plastiche (dettaglio interno) - Analisi non lineare con carico termico..... | 105 |
| Figura 6-30: Deformazioni plastiche (intradosso) - Analisi non lineare con carico termico..... | 106 |

Indice delle Tabelle

| | |
|--|-----|
| Tabella 5-1: Proprietà assegnate al modello elastico lineare isotropo - MURATURA | 49 |
| Tabella 5-2: Proprietà assegnate al modello elastico lineare isotropo - TAMPONAMENTI..... | 50 |
| Tabella 5-3: Proprietà assegnate al modello elastico lineare ortotropo - MURI e FRENELLI (1, 2 e 3 si riferiscono agli assi del sistema di riferimento globale)..... | 51 |
| Tabella 5-4: Proprietà assegnate al modello elastico lineare ortotropo – TAMPONAMENTI (1, 2 e 3 si riferiscono agli assi del sistema di riferimento globale) | 51 |
| Tabella 5-5: Proprietà assegnate al modello elastico lineare ortotropo - VOLTA..... | 51 |
| Tabella 5-6: Definizione del comportamento plastico uniassiale a compressione..... | 56 |
| Tabella 5-7: Definizione del comportamento plastico uniassiale a trazione..... | 56 |
| Tabella 5-8: Parametri per la definizione del modello CDP..... | 59 |
| Tabella 5-9: Parametri di interpolazione per la definizione del danno a trazione..... | 59 |
| Tabella 5-10: Calcoli relativi al peso delle porzioni di muro sorrette dalle pareti nord e sud..... | 63 |
| Tabella 5-11: calcolo del peso della copertura..... | 65 |
| Tabella 5-12: Calcoli di redistribuzione del peso della copertura..... | 67 |
| Tabella 5-13: Calcolo delle rigidezze assegnate alle molle..... | 69 |
| Tabella 5-14: Definizione del peso per unità di superficie del solaio..... | 71 |
| Tabella 5-15: Calcoli di redistribuzione del carico da solaio..... | 72 |
| Tabella 6-1: Parametri di definizione dello step di applicazione del peso proprio..... | 95 |
| Tabella 6-2: Parametri di definizione dello step di applicazione del peso proprio e del cedimento..... | 99 |
| Tabella 6-3: Parametri di definizione dello step di applicazione del peso proprio e del carico termico..... | 102 |

1 Introduzione

Il lavoro presentato in questo elaborato tecnico tratta l'analisi strutturale di una stanza (indicata come 3.27 nelle planimetrie) di Palazzo Magio Grasselli in Cremona. Si tratta di un edificio storico, costruito prevalentemente in muratura, che nel corso dei secoli ha subito numerose riforme edilizie fino ad ottenere la configurazione geometrica e costruttiva che si presenta al momento delle analisi svolte.

Il salone 3.27 è composto da un sistema murario a sorreggere una volta in muratura, questa caratterizzata dalla presenza di catene e rinforzi in muratura (frenelli) all'estradosso. Dal punto di vista geometrico si tratta di una struttura molto particolare, caratterizzata da irregolarità in pianta e soprattutto nella volta da cui derivano particolarità anche nelle caratteristiche costruttive. Si tratta dunque di un sistema strutturale poco idealizzabile in quanto differente dalle classiche tipologie di volta. L'interesse di questo studio è stato infatti anche quello di comprenderne il comportamento strutturale, che non poteva essere noto a priori.

Al momento dell'analisi, il salone analizzato (come anche la totalità dell'immobile) presenta un particolare stato di dissesto, caratterizzato da fessure superficiali e fessure passanti. Il quadro fessurativo è stato dunque oggetto di studio e analisi durante il lavoro qui presentato.

L'obiettivo principale di questa analisi è stato quello di comprendere le cause dei dissesti evidenziati nell'intero sistema strutturale. Sono state dunque formulate delle ipotesi riguardo le sollecitazioni e le tipologie di carico che possono aver dato origine ai dissesti, per poi verificarne l'esattezza. A tale scopo è stato definito un modello numerico a elementi finiti, passando da una preliminare fase di modellazione puramente geometrica, nell'intento di simulare il comportamento dell'intera struttura del salone. Esso è stato poi oggetto di diverse analisi di tipo lineare e non lineare, nelle quali sono state applicate diverse tipologie di carico, nell'obiettivo di verificare le ipotesi sulle cause delle fessurazioni, formulate preventivamente.

Nei seguenti capitoli è illustrato prima uno studio conoscitivo dell'immobile e del salone 3.27 e a seguire viene trattata la definizione del modello geometrico da cui è poi stato ricavato il modello numerico. Infine sono descritte le diverse analisi eseguite sul modello con annessa una discussione dei risultati in output dalle stesse.

Il lavoro è stato svolto utilizzando tre software, due di modellazione tridimensionale (*Rhinoceros 3D* e *AutoCAD 3D*) e uno implementato per il metodo di analisi a elementi finiti, ovvero *ABAQUS CAE* di *Dassault Systèmes*. È bene specificare che in una trattazione come quella qui illustrata, ciascuna fase di modellazione e lavoro è propedeutica alla successiva e quindi ogni scelta presa lavorando su un determinato software è compiuta in modo che essa sia quella più compatibile e che possa portare i maggiori benefici nelle fasi di lavoro successive. Per questo, nei diversi capitoli di questo trattato, nel motivare alcune semplificazioni geometriche, si farà riferimento alle successive fasi di modellazione.

2 Stato dell'arte

Il caso studio di Palazzo Magio Grasselli è già stato soggetto a diverse analisi, sia dal punto di vista storico che da quello strutturale.

Landi [1] nel 2012 ha effettuato uno studio molto approfondito della storia del palazzo in cui descrive sia la successione familiare della proprietà dell'immobile, sia, in modo cronologico, le riforme edilizie portate a termine sulle varie parti dell'edificio, nel corso dei secoli.

In un articolo di Brumana et al. del 2008 [2] vengono prese alcune delle principali volte (tra cui anche la stanza 3.27 trattata in questo studio) presenti nel palazzo come casi studio, esempio di volte dalla conformazione irregolare, varianti della classica tipologia a padiglione. In questa pubblicazione ne vengono discusse le modalità costruttive e la geometria.

Un piano di conservazione dell'edificio è stato definito da Alberto Dusi et al. (2008) [3], in tale contesto sono stati eseguiti calcoli strutturali, riportati in una relazione di progetto. Tra di questi, una parte riguarda i solai lignei del palazzo, presenti in grande quantità e soprattutto in tipologie molto differenti tra loro.

Una tesi di laurea magistrale del Politecnico di Milano, eseguita da Giorgio Montagnani nel 2019 [4], tratta l'analisi strutturale con metodo a elementi finiti del salone 3.14, nel contesto di una valutazione della sicurezza in cui si sono ricercate le cause dei dissesti presenti.

Infine, durante perizie eseguite in sito, sono stati eseguiti rilievi topografici, fotografici e termografici [5]. Il risultato è un'ampia documentazione, che oltre a includere i report dei rilievi, comprende elaborati grafici rappresentanti la geometria [6], i particolari costruttivi e il quadro fessurativo.

3 Inquadramento del caso studio

L'oggetto dello studio qui presentato, è stato un salone di Palazzo Magio Grasselli in Cremona, città situata in Regione Lombardia.

Nello specifico si tratta del salone 3.27, situato al primo piano del palazzo, la cui posizione è specificata dalla planimetria riportata in Figura 3-1. Si tratta di un salone costruito in epoca tardo medievale in cui è stata inserita, nel XVIII secolo, una volta in sostituzione del solaio ligneo precedentemente in opera.

La sala 3.27 presenta diverse particolarità geometriche. Nello specifico, oltre alla non regolarità delle pareti in pianta, la volta non è riconducibile a nessuno schema idealizzato. Una descrizione geometrica dettagliata è riportata nel capitolo relativo.

Il sistema strutturale è inoltre caratterizzato da un quadro dei dissesti molto esteso, anch'esso illustrato in modo approfondito successivamente.

La particolarità geometrica e l'avanzato stato di dissesto sono stati la motivazione principale che ha portato all'esecuzione di analisi su questo sistema.



Figura 3-1: Planimetria di Palazzo Magio Grasselli - nel riquadro il salone 3.27



Figura 3-2: Vista aerea di Palazzo Maggio Grasselli

3.1 Materiale a disposizione

L'inquadramento del caso studio e le fasi di modellazione sono state eseguite sulla base della documentazione esistente riguardante il palazzo e il salone analizzato. Il materiale disponibile consisteva in:

- Documentazione storica (storia del palazzo e cronologia delle riforme edilizie);
- Elaborati grafici (piante, prospetti e sezioni) riportanti anche informazioni riguardo il quadro fessurativo;
- Articoli descrittivi della geometria, delle tecniche costruttive e dello stato di degrado, fessurazione e deformazione della stanza;
- Nuvole di punti intradosale ed estradosale;
- Documentazione fotografica;
- Prospetti fotometrici;
- Analisi termografica.

Per maggiori informazioni riguardo i documenti citati confrontare la bibliografia al termine di questo volume.

3.2 Palazzo Magio Grasselli: Analisi Storica

Conoscere la storia di un edificio è fondamentale in quanto permette, prima di tutto, di analizzare lo stesso, prendendo in considerazione le tecniche costruttive utilizzate nel periodo di costruzione ex novo ma anche durante le riforme edilizie applicategli. Il processo di raccolta delle informazioni storiche di una struttura che è oggetto d'esame, è dunque propedeutico alla migliore comprensione delle caratteristiche costruttive e delle motivazioni delle soluzioni strutturali, che possono essere riscontrate nell'ambito di una perizia conoscitiva dell'opera. Le riforme edilizie cui un edificio può essere sottoposto durante la sua vita utile possono interessare l'ampliamento dello stesso ma anche la sostituzione o la sovrapposizione di diversi elementi: tutto questo porta a un'evoluzione dello stato sollecitativo delle diverse parti dell'opera, non trascurabile in un contesto di analisi strutturale come quello descritto in questo trattato. In definitiva, maggiore è la conoscenza in termini di storia dell'opera architettonica, più accurata sarà la modellazione geometrica e numerica e, di conseguenza, più attendibili saranno i risultati dell'analisi di quest'ultima.

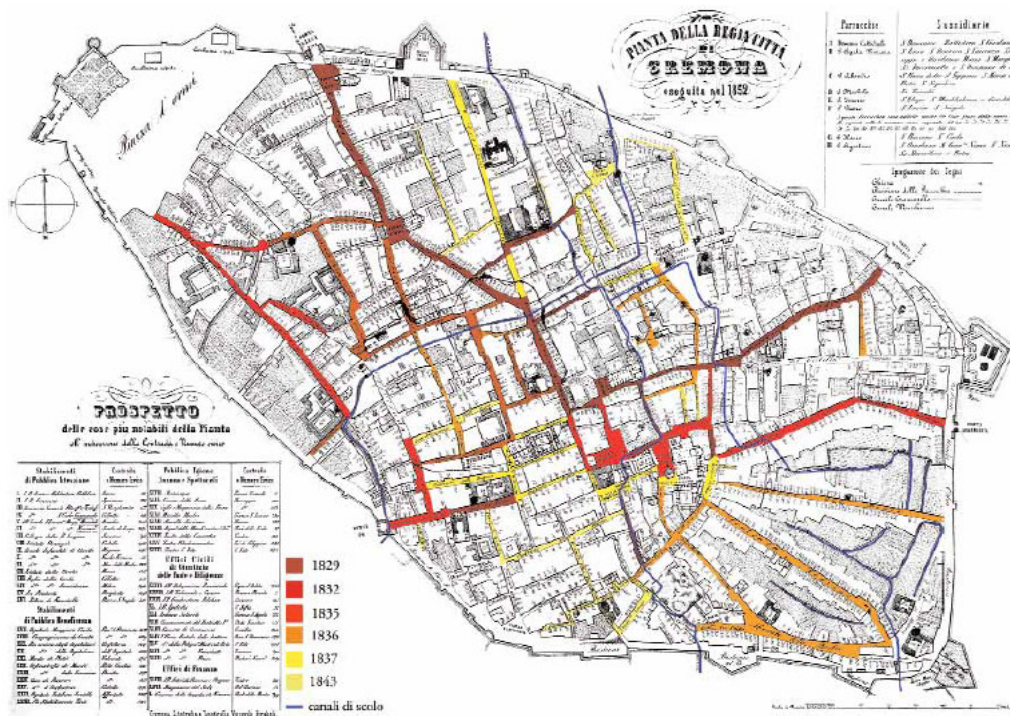


Figura 3-3: Pianta della regia città di Cremona, anno 1852

La storia costruttiva di un edificio storico come Palazzo Magio Grasselli in Cremona è qualcosa che va di pari passo con le vicissitudini istituzionali e patrimoniali delle famiglie proprietarie. Nel caso specifico, stiamo parlando della famiglia Magio, in proprietà fino al 1873, e della famiglia Grasselli, a seguire. La famiglia Magio è stata un'importante famiglia nello scenario di Cremona, cittadina che nel periodo successivo al basso medioevo è stata seconda solo a Milano nella regione geografica attualmente ricadente nei confini lombardi. Si tratta di una famiglia che nel corso dei secoli è stata soggetta a una crescita importante, sia in termini di espansione del nucleo familiare, sia in termini di importanza politica e sociale all'interno della città di Cremona. Le riforme edilizie cui Palazzo Magio è stato progressivamente sottoposto, tra cui ampliamenti attraverso l'acquisizione di proprietà limitrofe e complete ristrutturazioni e riorganizzazioni degli spazi interni, sono infatti lo specchio dell'evoluzione che la famiglia ha subito nel corso degli anni.

È quindi di interesse riassumere in parallelo la storia della famiglia e quella del palazzo, facendo anche riferimento alla stanza 3.27 che è il principale oggetto di studio di questo elaborato tecnico. Una minuziosa ricerca documentaria iniziata dal professor Angelo Landi nel 2007 [1], dopo l'acquisizione del palazzo da parte del comune di Cremona e pubblicata nel 2011 dallo stesso, nel testo "Fabbrica e tutela di palazzo Magio Grasselli a Cremona", ha ripercorso le vicende costruttive e d'uso dell'edificio. Di seguito viene riportato un sunto dei momenti storici salienti che si ritiene abbiano peso su come il palazzo si presenta oggi giorno.

Sebbene i primi documenti sulla famiglia Magio risalgano al XIII secolo, la prima attestazione non accertata riguardo la loro residenza risale al notaio Bresciani secondo cui, nel 1170, Gneo Magio «fece fabricare la torre al suo palaggio a S.



Figura 3-4: A sinistra: planimetria di Cremona, anno 1587 - a destra: estensione del palazzo nella planimetria della città

Gallo»: bisogna però specificare che ad oggi non è stata rilevata alcuna traccia della suddetta torre ne delle sue fondazioni. Appare più probabile che la casa dei Magio si collocasse a ridosso dal centro cittadino nei pressi della chiesa di San Gallo, all'interno del nuovo perimetro murario costruito tra il 1169 e il 1187. La prima indicazione ufficiale riguardo la dimora di residenza dei Magio risale all'anno 1362, quando risulta che Pietro del fu Franceschino dimorava nella vicinia di San Gallo: si ipotizza che la sua residenza corrispondesse alla porzione a sinistra dell'attuale portone d'ingresso del palazzo, dove i documenti relativi l'edificio, risalenti al XVI secolo, indicavano la collocazione della domus magna. Sul finire del XV secolo tale residenza non era sufficientemente capiente per ospitare i numerosi componenti della famiglia e venne dunque acquistava un'altra casa situata sulla contrada di San Gallo. Il complesso era quindi suddiviso in due lotti e la seconda casa, di dimensioni più ridotte, si attestava tra il palazzo dei Regazzi a est e la domus dei Magio a ovest.

Nel 1644 Niccolò Magio ottiene l'investitura ufficiale della Regia Camera consolidando così il suo ruolo di preminenza nella nobiltà Cremonese; contestualmente, nel biennio 1645-1646 esso decide di acquistare le case confinanti con la propria dimora: quella a levante da Margherita Roncadelli (vedova del cugino Ferrante Magio) e quella a occidente (un tempo appartenuta ai Lottici e ai Superti) da Margherita Malombra. Con questi acquisti otteneva la disponibilità dei corpi di fabbrica oggi unificati dietro al prospetto su strada, tra il palazzo Regazzi-Sommi e la risega verso la casa Ramonda.

Successivamente all'acquisto di queste proprietà limitrofe, l'architetto Cremonese Francesco Pescaroli progetta una riforma edilizia che prevede l'unificazione del corpo di fabbrica su strada, che fino a quel momento risultavano essere corpi isolati. Con tutta probabilità tale riforma non venne applicata prima del 1658, anno della morte di Niccolò Magio, come deducibile dal suo testamento. È quindi sotto Camillo Magio che questo importante intervento venne iniziato per fermarsi alla morte del committente nel 1681, dopo numerosi lavori, tra cui un radicale riassetto della domus (di cui probabilmente in elevato rimase solo parte della facciata su strada) e l'inserimento di volte in muratura a sostituire alcuni solai lignei: sicuramente la più rilevante delle volte inserite in questo periodo risulta essere quella del salone su strada (3.14). Si noti che questa riforma edilizia ha inoltre previsto la costruzione del sistema scalone/loggia, contestualmente al completamento dell'acquisto di casa Ramonda da parte di Camillo Magio, nell'anno 1666.

Nell'ultimo quarto del XVII secolo viene poi costruita la volta sovrastante lo scalone, avente caratteristiche geometriche molto insolite (Fig. 3-5): l'imposta è

molto alta e su di essa poggia la volta vera e propria, formata da quattro cuffie, ai quattro angoli. Il vuoto centrale che risulta tra le quattro cuffie è riempito con un quadrato quadrilobato di mattoni in foglio, quasi piano.

Dopo la riforma sotto Camillo Magio, è con il figlio Giovan Clemente, ereditario del palazzo (assieme a Nicolò Alessio), che i lavori proseguirono, dal completamento degli appartamenti al piano nobile su strada sino alla costruzione del salone verso la corte. Nel 1699 egli permutava i due casini confinanti, allora di proprietà del Capitolo della Cattedrale, per estendere il palazzo verso ovest. Nel 1703, l'inventario dei beni di Nicolò Alessio Magio descrive una sequenza di appartamenti nobili conclusi nel solo corpo di fabbrica verso strada, con tutti gli ambienti soffittati da solai lignei. Il salone (3.27) che si affaccia sul cortile interno, risultava da tale documentazione come ancora incompleto, sia nelle rifiniture che nella realizzazione della volta. È al decennio successivo che si attesta la conclusione dei lavori in esso, con la realizzazione della volta, avente anch'essa una conformazione geometrica particolare. Le caratteristiche costruttive di tale sala, come già affermato, sono oggetto di studio in questo elaborato e vengono descritte in modo dettagliato nel capitolo successivo.

Solo verso il 1760 Camillo II Magio riprese la costruzione delle ali interne, demolendo o sopralzando edifici preesistenti, come oggi riconoscibile i giunti strutturali, influenzando così la distribuzione degli ambienti. Tra il 1768 ed il



Figura 3-5: Fotografie della facciata di Palazzo Magio Grasselli

1772 le nuove sale al piano nobile, a sud del salone (3.27) che si affaccia sul cortile, furono coperte da volte a padiglione, andando a sostituire i solai lignei di cui però sono ancora oggi visibili le tracce agli estradossi delle stesse volte. Si noti che la presenza di queste nuove stanze (e quindi delle volte) consiste in un significativo cambiamento nell'assetto strutturale dell'area di palazzo in cui rimane coinvolto il salone che si affaccia sul cortile interno.

Entro il 1780 Giuseppe Magio, figlio di Camillo II, concluse il cantiere. Anche nell'appartamento nobile verso strada ad est, le volte a padiglione sostituirono i solai lignei: non è ben chiara la data di conclusione di tali lavori, che potrebbe attestarsi a poco prima del 1785 (anno in cui viene firmata la decorazione di questo salone) o a una fase precedente, non prima però della metà del secolo.

Nell'ambito della riforma edilizia appena descritta compiuta da Camillo II e proseguita dal figlio, vengono inoltre realizzate le rimesse e le scuderie nella corte secondaria (il braccio ovest del palazzo).

Nel 1811 Giuseppe cede la proprietà dei casini del Capitolo (che come riportato erano stati acquisiti nel 1699) e pone termine al programma edilizio avviato nel secolo precedente da Camillo Magio e Francesco Pescaroli.

Proseguendo poi nel XIX secolo, Ippolita Araldi-Magio, vedova di Giuseppe, e la figlia Fulvia adattarono gli appartamenti del piano nobile su strada. Fu inoltre realizzata la finta-loggia all'estremo in testa al braccio est del palazzo.

Tra il 1846 e il 1847 alla morte di Muzio Pallavicino-Clavello, di Fulvia Magio e Ippolita Araldi i rispettivi patrimoni vengono uniti in un unico asse ereditario, da dividere tra i figli Uberto, Ippolita e Francesca, legati tramite matrimoni a famiglie di tutto rilievo dell'aristocrazia milanese: il trasferimento a Milano dei tre fratelli comportava dunque la cessione del palazzo Magio. La proprietà dell'edificio, inclusa la contigua casa Ramonda, passava all'avvocato Giuseppe Antonio Saini per la cifra di 71.000 lire austriache da pagarsi in otto anni. La manica interna fu scelta dalla famiglia Saini come propria residenza mentre gli appartamenti su strada furono affittati a esponenti della aristocrazia e della borghesia cremonese.

Nel 1854 morì Giuseppe Antonio e nel 1858 per successione ereditaria il palazzo andò alla Vedova Carolina e ai figli Eugenio e Antonia.

Proseguì per poco più di un decennio l'affitto degli appartamenti, ma i proventi erano troppo bassi, tanto che i proprietari furono costretti a vendere il palazzo. Fu così che nel 1873 i fratelli Grasselli completarono l'acquisto di Palazzo Magio alla cifra di 50.000 lire italiane.

A partire dal 1876 nel corso dei decenni, per permetterne la locazione, gli appartamenti interni su strada furono adattati e trasformati; gli accessi agli

appartamenti furono separati, la distribuzione interna subì stravolgimenti, gli ampi saloni furono tramezzati e servizi igienici aggiunti. Nel 1942 i Grasselli, che già nel 1876 avevano terminato la riforma della facciata su strada iniziata dalla famiglia Saini, realizzarono un nuovo corpo-scale per svincolare la distribuzione della manica interna dallo scalone secentesco. Le riforme edilizie attuate dei Grasselli nel corso dei decenni rispecchiano alla perfezione la differenza tra le necessità di una famiglia aristocratica, i Magio, e quelle di una appartenente all'alta borghesia come i Grasselli.

Si noti che nel contesto delle riforme attuate dai Grasselli vennero inseriti impianti di riscaldamento che includevano canne fumarie locate in diverse regioni del palazzo. Tale dato risulta importante perché le temperature provenienti dalle canne possono essere la causa del quadro fessurativo che oggi si presenta nelle volte dei saloni principali del palazzo e che è oggetto di studio dell'elaborato.

A metà del 900' gli appartamenti verso strada furono in parte locati e in parte abbandonati mentre la famiglia di Ippolito Grasselli continuava ad abitare l'appartamento al piano nobile verso la manica orientale.

Nel 1958 il palazzo Magio, incluse le corti e il giardino, fu sottoposto a decreto di vincolo ambientale 82 da parte della Soprintendenza ai Monumenti allora competente (quella di Verona) per il notevole interesse del «giardino dai cospicui caratteri di bellezza naturale, per le belle piante disposte armonicamente e per il movimento del terreno»: il palazzo Magio Grasselli e le sue preziose finiture, al più celate dietro controsoffittature, vernici o intonaci, passavano quindi in secondo piano rispetto all'armonioso giardino romantico. Solo nel giugno 1959 la soprintendenza pubblicava un decreto di vincolo specifico anche per il palazzo, riconoscendo il valore testimoniale delle finiture e delle decorazioni proprie di una più ampia schiera di dimore aristocratiche cremonesi.

Quanto appena illustrato, è riportato in maniera riassuntiva nella Figura 3-6, in cui la storia del palazzo è divisa in periodi e a ciascuno di essi corrisponde una pianta (che è sempre quella relativa alla conformazione attuale dell'edificio) in cui con tonalità blu sono individuate le regioni inserite o modificate in quello specifico lasso di tempo mentre in azzurro sono segnalate le regioni edificate nei periodi antecedenti.

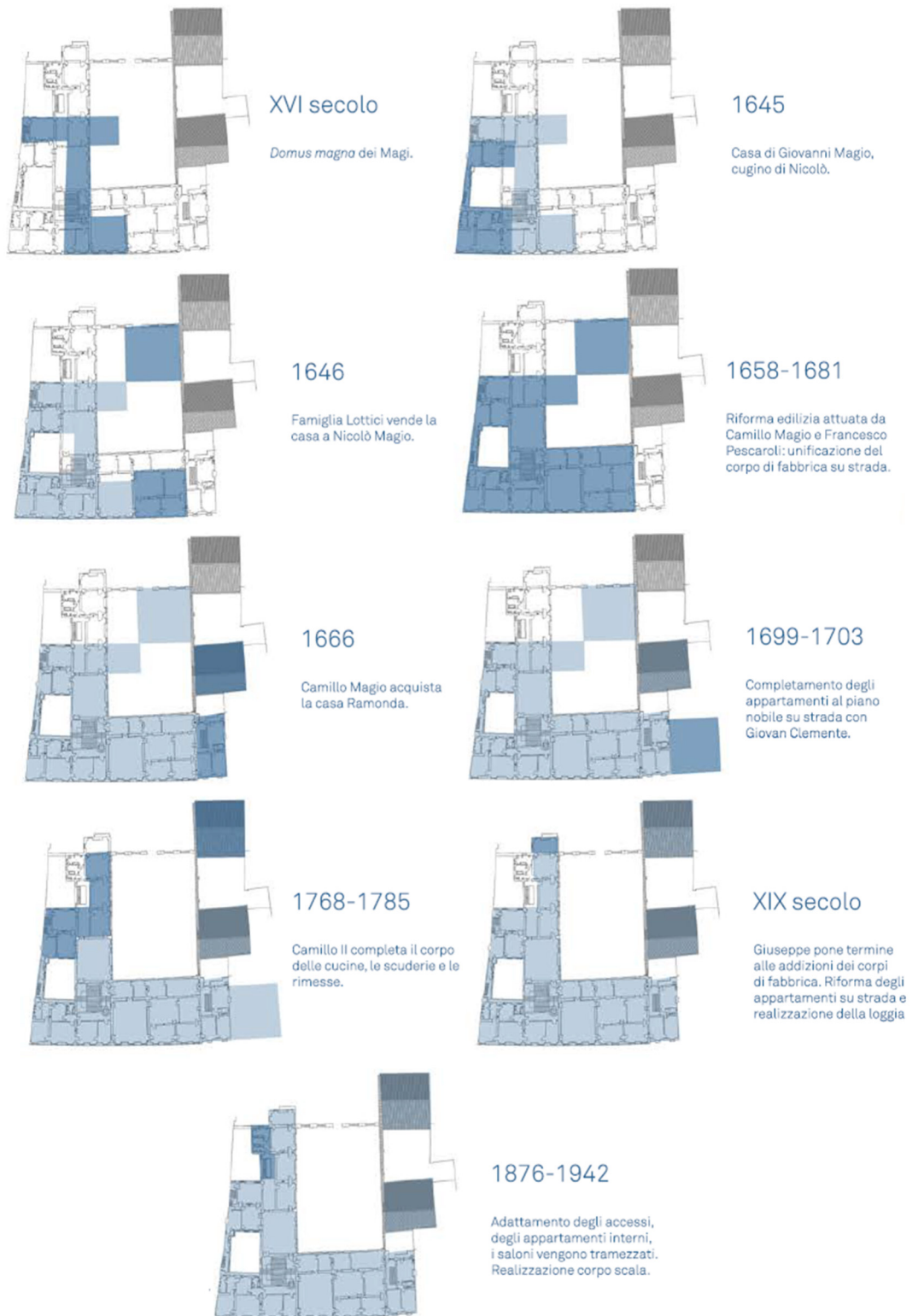


Figura 3-6: Schema cronologico delle riforme edilizie cui il palazzo è stato sottoposto

3.3 Stanza 3.27: Descrizione Geometrica

Innanzitutto è possibile idealizzare la struttura come distinta in differenti parti quali i muri perimetrali, la volta rinforzata attraverso archi in spessore, i frenelli e le catene in acciaio.

Il salone è caratterizzato da numerose irregolarità dal punto di vista geometrico. In primo luogo, la pianta (Fig. 3-7 e 3-8) non consiste in un poligono regolare; si tratta piuttosto di un trapezio scaleno, tendente a un rettangolo. Le conseguenze di questa irregolarità si possono riscontrare nella mancanza di ortogonalità tra i muri e in una conformazione geometrica della volta anch'essa irregolare, in pianta ma anche in elevazione, confrontando i diversi quadranti. Si noti comunque che la geometria della volta oggi rilevabile, è caratterizzata da mancanze di regolarità che sono sì strettamente legate alla sua fase di costruzione, ma anche derivanti da deformazioni avvenute nel corso della vita della struttura stessa.

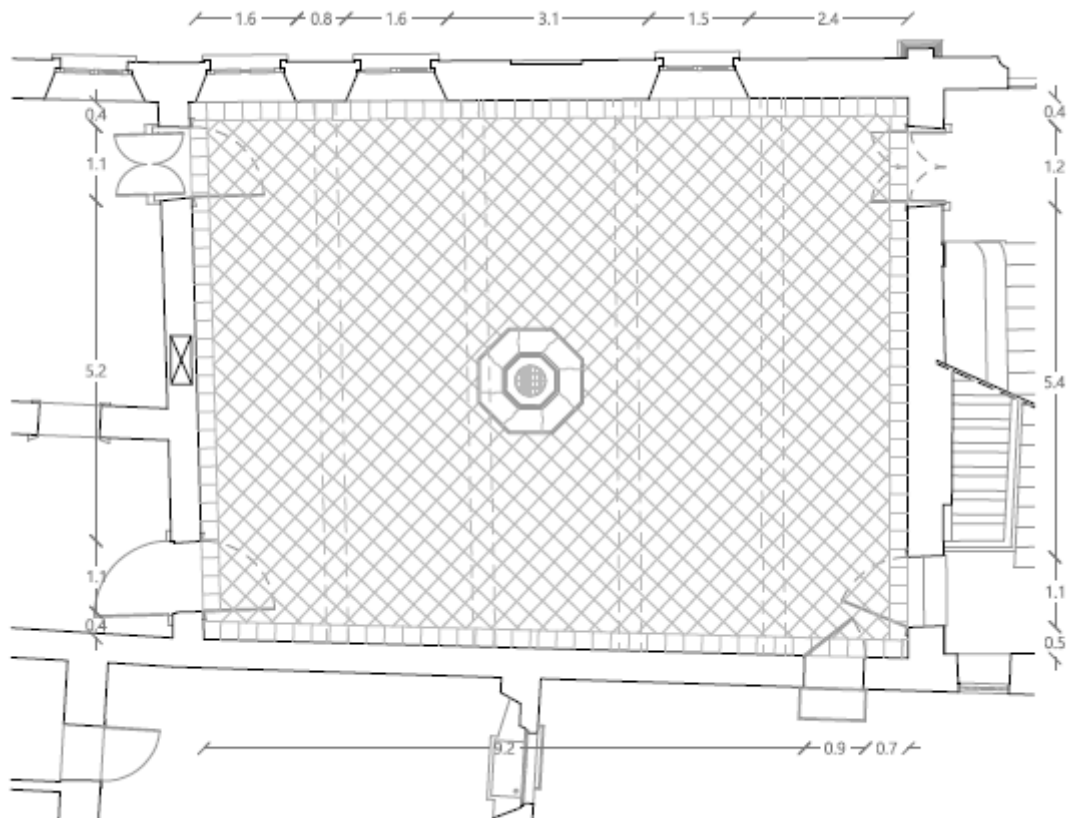


Figura 3-7: Salone 3.27 - Pianta del piano terra

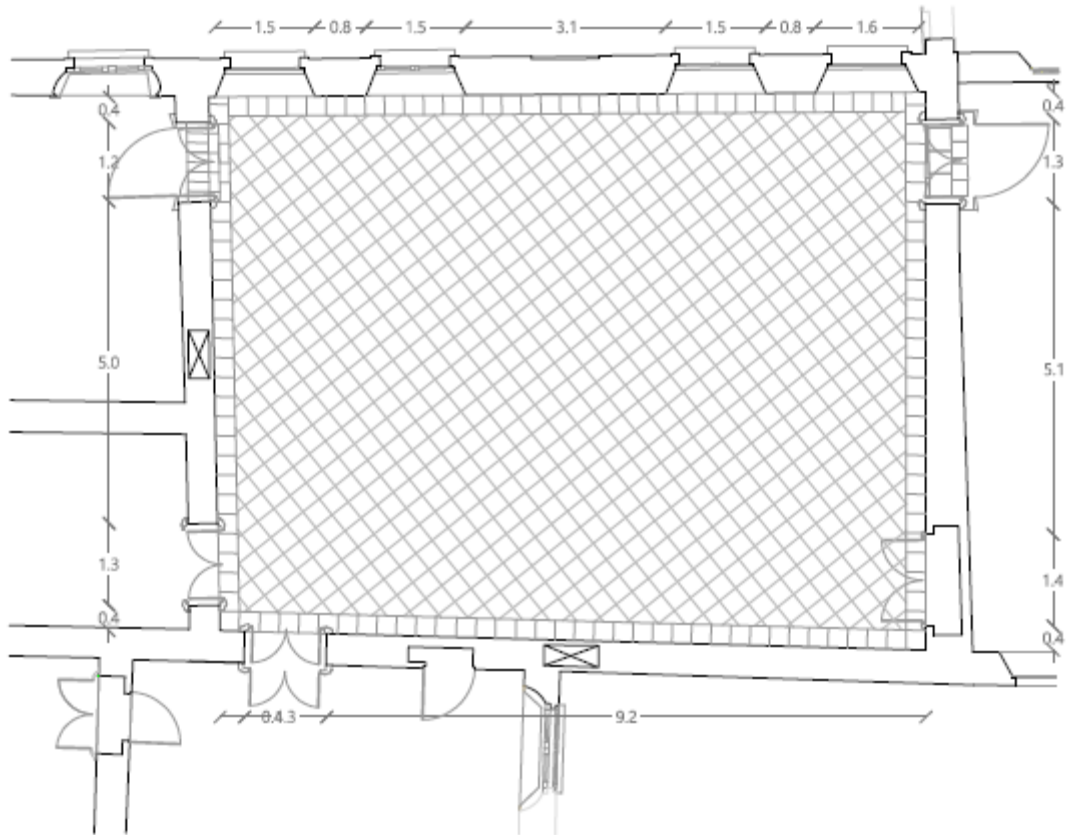


Figura 3-8: Salone 3.27 - Pianta del primo piano

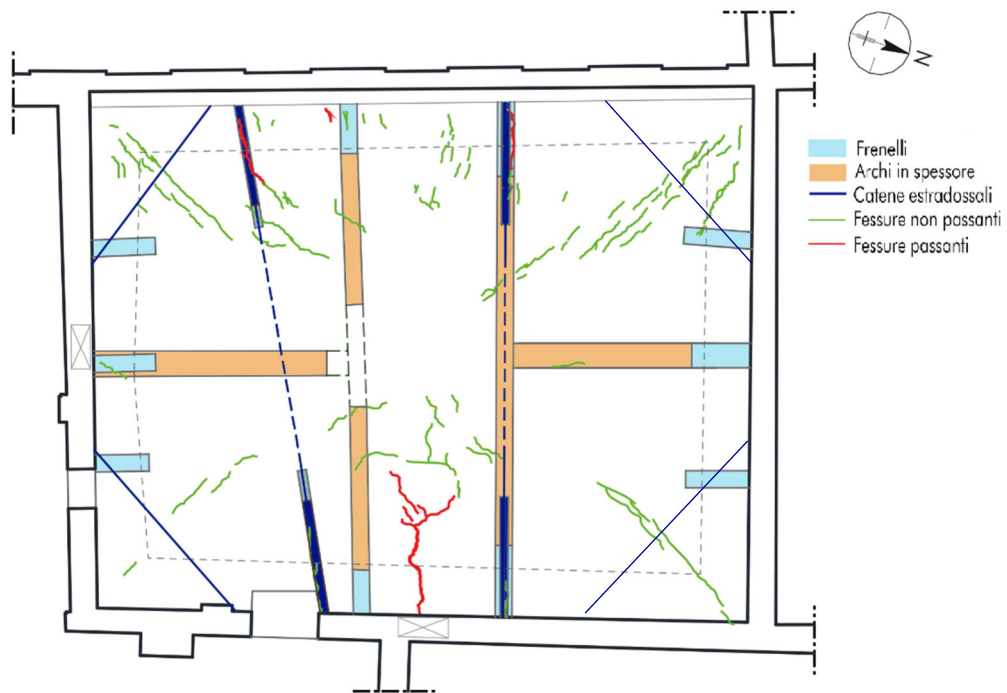


Figura 3-9: Salone 3.27 - Pianta con evidenza di archi, frenelli e catene

La volta ha uno spessore di 140 mm e, come già accennato, è caratterizzata dalla presenza di archi in spessore, fuoriuscenti di 70 mm dalla superficie di estradosso, il cui posizionamento è riportato nella pianta in Figura 3-9.

Dal punto di vista della forma, come si può notare dalla nuvola di punti (Fig. 3-10), la volta è caratterizzata dalla presenza di imposte alla sua base, sopra le quali poggiano regioni con concavità accentuata verso l'alto; sono inoltre presenti diagonali aventi origine nei vertici perimetrali e termine nei pressi della regione centrale della volta, che invece tendente a una conformazione piana. Se si volesse fare un'idealizzazione molto forzata, quanto appena descritto potrebbe essere assimilato a una *volta a schifo*. Le regioni prossime alla base possono infatti essere concepite come porzioni di volta a botte che si intersecano a formare le diagonali tranciate, mentre la regione centrale potrebbe essere idealizzata come un cervello piano. L'idealizzazione appena ipotizzata per l'intera geometria della volta risulta però essere molto grossolana, in quanto presenta differenze sostanziali con la volta reale: nelle tecniche costruttive, nel trascurare la presenza delle numerose irregolarità cui si è fatto riferimento in precedenza e soprattutto nel comportamento meccanico. Nella volta oggetto d'esame infatti la parte centrale risulta portante, mentre il cervello di una classica volta a schifo non ha questo tipo di funzione. Per questi motivi, durante la fase di analisi strutturale, non si è potuto prendere in considerazione la volta come un *sistema a schifo* idealizzato. L'obiettivo dello studio infatti è stato proprio quello di allontanarsi da un modello molto approssimato, a favore di uno più vicino alla realtà geometrica esistente.

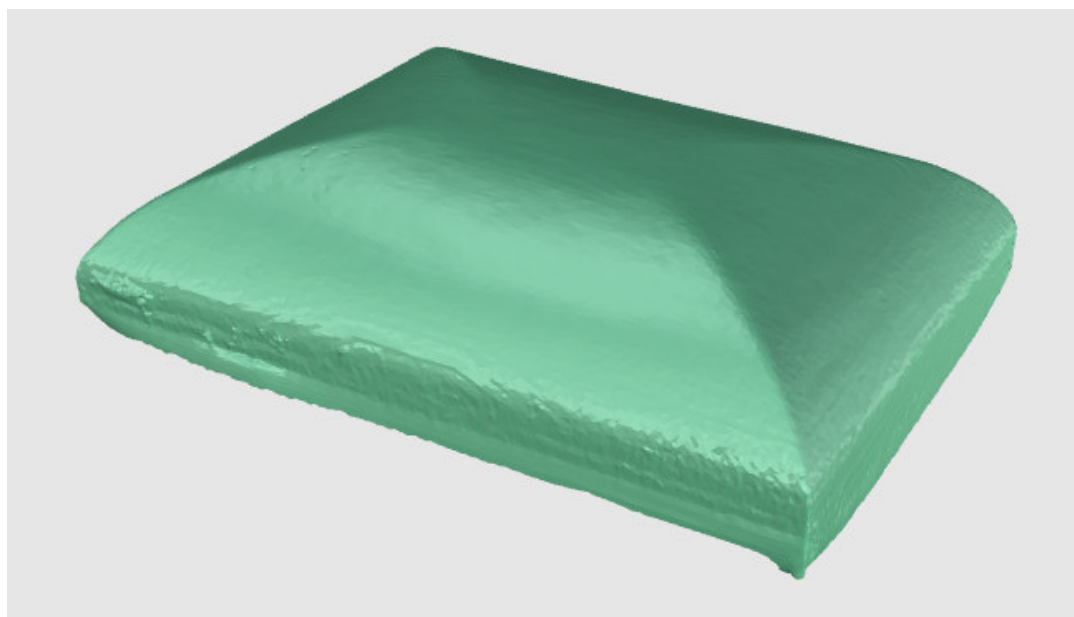


Figura 3-10: Salone 3.27 - Nuvola di punti intradosale della volta

Osservando le piante di Palazzo Magio è possibile notare che al piano terra, esattamente al di sotto del salone 3.27, esiste un altro salone avente la medesima pianta di quello oggetto di studio. Questo significa che i quattro muri si sviluppano in altezza dal piano terra fino al sottotetto. Come già affermato, essi non sono ortogonali fra loro mentre lo spessore non risulta costante tra i diversi muri. Inoltre, se si prende in considerazione la parete a nord, si può notare, in pianta (Fig. 3-8), che il suo spessore è variabile.

Numerose aperture caratterizzano il sistema murario: come possibile notare dalle planimetrie, la facciata che dà sul cortile interno del palazzo presenta tre finestre al piano terra e quattro al primo piano; è evidente inoltre la presenza di aperture tamponate, queste risalenti alle precedenti conformazioni del palazzo e chiuse durante le riforme edilizie. Il muro parallelo a quello appena descritto presenta aperture e tamponamenti ma in minor numero mentre le altre due pareti sono caratterizzate a ogni piano due porte equidistanti dai due spigoli opposti. È interessante notare come una di queste quattro aperture, nel salone 3.27 non sia effettivamente un accesso a un'altra stanza del palazzo ma semplicemente un incavo nel muro. Questa particolarità deriva dalla volontà, in fase di progettazione a livello architettonico, di creare una simmetria visiva tra queste due pareti opposte, che risultano uguali.

Un'altra particolarità dei muri è la presenza di due canne fumarie, la cui posizione approssimativa è visibile sia in pianta sia come traccia nei prospetti già illustrati.

Il posizionamento dei 13 frenelli, già riportato in Figura 3-9, è stato individuato sfruttando la disponibilità di un consistente report fotografico e della nuvola di punti all'estradosso. Si noti che alcuni di essi sono posizionati in corrispondenza degli archi mentre i restanti collaborano direttamente con l'estradosso della volta.

La documentazione utilizzata per i frenelli è stata fondamentale per comprendere anche la localizzazione in pianta delle catene estradosali: nello specifico sono presenti 2 catene a connettere i due muri paralleli di maggiore lunghezza e quattro catene agli angoli.

3.4 Stanza 3.27: descrizione delle tecniche costruttive

Un'analisi preliminare delle tecniche costruttive è fondamentale in un contesto di lavoro come quello qui illustrato in quanto permette una comprensione più profonda del caso studio, quindi delle sue caratteristiche in termini geometrici ma anche e soprattutto di comportamento meccanico. Quindi tale analisi è stata fondamentale anche per orientare le diverse scelte eseguite in fase di modellazione geometrica e meccanica, nonché nella lettura e discussione dei risultati delle analisi a elementi finiti eseguite sul modello.

Lo studio delle tecniche costruttive riguardanti il salone 3.27 è stato eseguito consultando la documentazione disponibile, in particolare le informazioni più importanti si sono potute ricavare dalle termografie, dal report fotografico e dall'articolo ANANKE redatto da Brumana et al. [2], riguardante le volte a padiglione e con forme analoghe, il quale prende come casi di riferimento per lo studio le tre volte settecentesche di Palazzo Magio Grasselli.

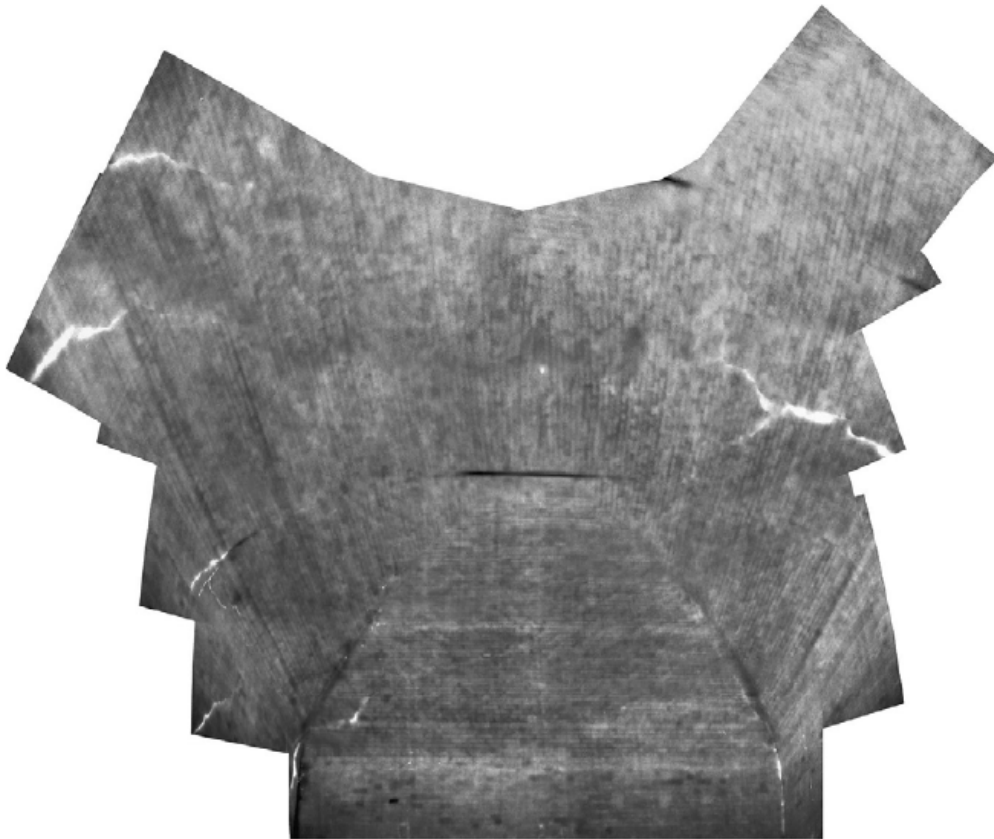


Figura 3-11: Termografia all'intradosso della volta – Stanza 3.27

Per quanto riguarda l'orditura muraria, se per i muri e i frenelli è di tipo ordinario e deducibile osservando i prospetti fotometrici delle facciate esterne e le fotografie dell'estradosso, per quanto riguarda la volta, essa è rilevabile solamente mediante la termografia, qui riportata in Figura 3-11. Si può da essa notare come le imposte siano costituite da una prima fila di mattoni in foglio che precedono sei file di mattoni in parte di testa e in parte di coltello, conclusi infine da un altro corso regolare di mattoni in foglio. Si noti come questa regione sia stata ricavata da un muro già costruito e possa essere vista come una sorta di grossa cornice *en tas-de-charge*, a partire da cui si imposta la volta vera e propria. Con l'espressione *en tas-de-charge* ci si riferisce, in generale, alle soluzioni architettoniche in cui i corsi inferiori delle nervature di una volta si posano su corsi orizzontali di laterizi legati al muro, a formare un corpo solido (Fig 3-12). Considerando la volta del salone 3.27, come già affermato, ci si può riferire a una soluzione simile a quella appena descritta, ma ampliata all'intera altezza della cornice d'imposta.

Al di sopra della cornice, la volta vera e propria è caratterizzata da un'orditura simile a quella adottabile per una volta a padiglione. Come infatti visibile dalla termografia (Fig. 3-11), nei quattro fusi i mattoni sono stati disposti a formare archi segmentati nelle direzioni parallele ai muri sottostanti. Gli archi segmentati, che sono pseudo-ortogonali tra loro, tendono ad intersecarsi in prossimità degli angoli della volta, andando a generare le diagonali. Infine, nella zona centrale della volta, i laterizi sono sagomati a definire un'orditura che va a riempire lo spazio irregolare tra i quattro fusi.

All'interno dell'orditura appena descritta, si inseriscono anche gli archi di rinforzo (in arancio nella Figura 3-9).

La comprensione dell'orditura muraria è stata fondamentale nell'intento di riprodurre in modo realistico le tre direzioni di ortotropia nella fase di modellazione delle proprietà meccaniche del sistema strutturale. Questa sarà descritta in modo dettagliato nei capitoli successivi.

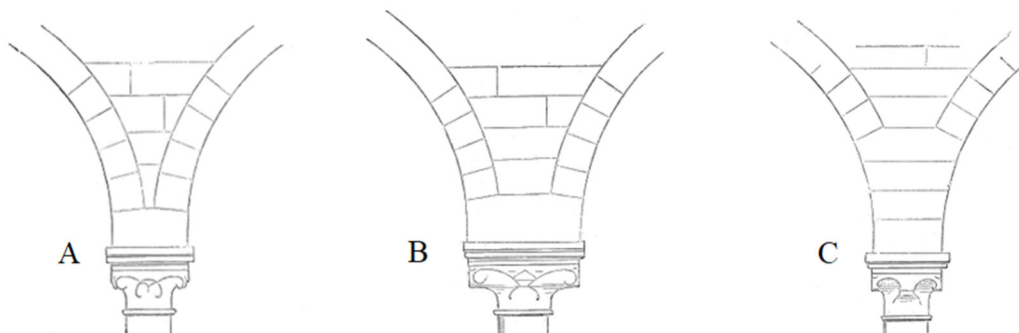


Figura 3-12. Due conformazioni ad arco comuni (A e B) e una conformazione a *tas de charge* (C)

Andando ad analizzare il sistema oggetto d'esame da un punto di vista meccanico, è possibile comprendere come lo spessore di 140mm, conferitole in fase di costruzione, la renda la volta un elemento resistente e in grado di portare, almeno in gran parte, il peso proprio. Si deduce quindi che gli archi in spessore hanno prettamente una funzione di rinforzo, in contrapposizione con quanto accade per esempio nel salone 3.14 (Fig. 3-13 e [4]), in cui la volta ha uno spessore decisamente inferiore che la renderebbe incapace di portare il proprio peso, conferendo quindi agli archi l'intera funzione portante all'interno del sistema voltato. Nel contesto del salone 3.27 si ha comunque che la funzione portante della volta e degli archi è supportata dalla presenza dei frenelli e delle catene che permettono la stabilizzazione del sistema, come anche il riempimento delle reni attraverso rottami murari e malta.

Riguardo le catene, è bene specificare che si tratta di elementi che sono stati inseriti nella struttura in fase di edificazione della volta stessa, quindi non inserite durante un intervento di ristrutturazione. Le due catene che connettono i muri paralleli più lunghi sono catene estradossali saettate. Tale elemento strutturale è distinguibile in due componenti: una catena principale, pseudo-orizzontale, che poggia su un'estensione verticale dei frenelli e va ad immergersi, per un tratto di lunghezza considerevole, all'interno della volta; l'altro diagonale, completamente immersa, prima nel frenello, poi nella volta e infine nel muro. Uno schema della struttura della catena estradossale, come appena descritta, è riportato in Figura 3-14. Si noti comunque come, a differenza di questo schema,

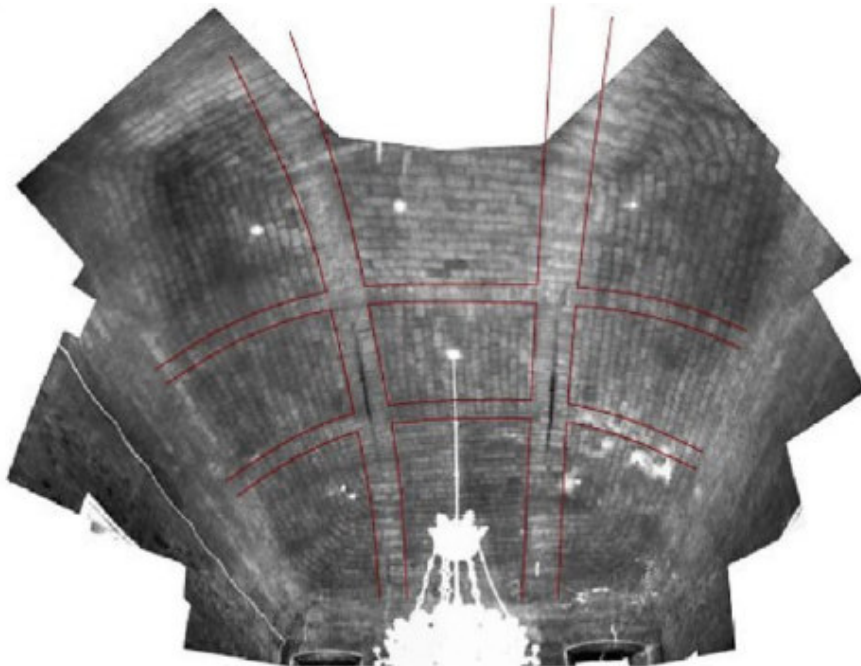


Figura 3-13: Termografia all'intradosso della volta – Stanza 3.14

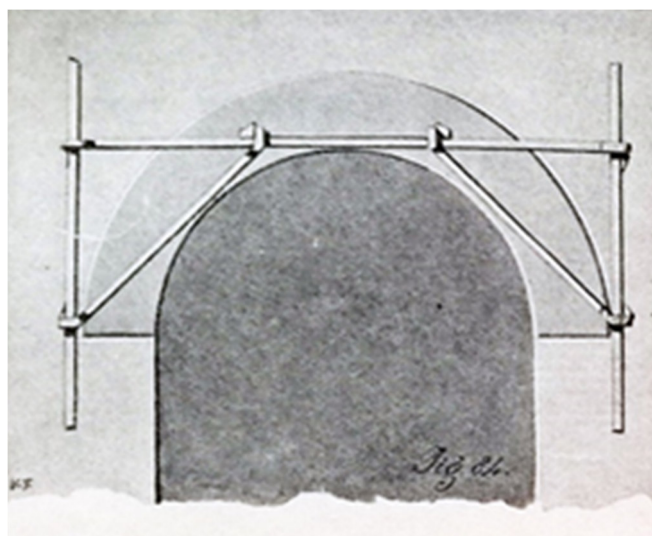


Figura 3-14: Schema di una tipica catena estradossale

le catene estradossali della stanza 3.27 siano dotate anche di una terza componente che è diagonale e lignea.

Per quanto riguarda le catene agli angoli, esse connettono i muri perpendicolari e per un breve tratto entrano nella volta nelle regioni in cui si sviluppano le diagonali.

In conclusione di questo capitolo sulle tecniche costruttive, si vuole prestare attenzione anche al solaio tra piano terra e primo piano (Fig. 3-15). Si tratta di un solaio composto da una parte inferiore lignea e un riempimento superiore, chiuso con un pavimento in cotto. Nello specifico la struttura lignea è composta da travi a sezione rettangolare $400 \times 350 \text{ mm}^2$, nella direzione minore, sopra cui poggiano, in perpendicolare, travetti di sezione molto inferiore ($135 \times 90 \text{ mm}^2$), che reggono uno strato di 30 mm, in assito. Illustrazioni schematizzate del solaio sono presentate nelle Figure 5-21 e 5-24, nel capitolo relativo al calcolo del suo peso: carico considerato in fase di modellazione.

Dal prospetto fotometrico della facciata ovest (Fig 3-16) è possibile notare la presenza di tre capochiave poco sotto l'altezza di calpestio del primo piano. Le travi di legno del solaio sono infatti afferrate, nelle loro parti terminali, da catene in acciaio. Dato questo particolare costruttivo, le travi possono essere considerate ammorsate alla muratura e di conseguenza esse forniscono un contributo irrigidente all'intero sistema murario. Si noti infatti che le travi funzionano effettivamente come delle catene in cui sono presenti "in serie" elementi lignei e metallici. Questi ultimi conferiscono un ulteriore incremento alla rigidità assiale.



Figura 3-16: Fotopiano del solaio ligneo



Figura 3-15: Fotopiano della parete ovest - cerchiati in rosso, i capochiave a livello del solaio

3.5 Salone 3.27: descrizione del quadro fessurativo

L'analisi del quadro fessurativo è stata svolta ai fini di identificare le regioni più danneggiate della stanza. Esse sono le regioni caratterizzate da una maggiore debolezza (dovuta alla presenza di irregolarità di diverso tipo) oppure dalla presenza di sollecitazioni maggiori, causate da come i carichi applicati sulla struttura risultano ridistribuiti all'interno della stessa.

L'obiettivo già dichiarato, del lavoro descritto in questo elaborato, è stato quello di indagare le cause dei dissesti presenti ed evidenziati all'interno del salone oggetto d'esame. La conoscenza acquisita riguardo il quadro fessurativo, è stata fondamentale per poter elaborare ipotesi proprio sulle cause degli stessi dissesti. Si tratta dunque di una fase preliminare fondamentale in quanto tali ipotesi sono state prima un fondamento per una modellazione geometrica e numerica adatta, poi oggetto di verifica durante le analisi ad elementi finiti svolte sul modello definito, queste descritte nei capitoli successivi dell'elaborato.

Lo studio dei dissesti è stato eseguito sulla base della documentazione disponibile a riguardo. Tra questi, fondamentali sono stati, in primis gli elaborati grafici del quadro fessurativo, eseguito nella classe di laboratorio di architettura tenuta dalla professoressa Paola Condoleo, poi i report fotografico e termografico ma anche le nuvole di punti intradossale ed estradossale.

Nelle Figure 3-17 e da 3-19 a 3-22 sono riportati la pianta e i prospetti che evidenziano la presenza di fessure passanti (in rosso) e non passanti (in verde) sulle quattro pareti del salone.

Sulla parete ovest si evidenzia la presenza di fessure passanti diagonali in prossimità delle finestre al piano primo. Inoltre è ben visibile una propagazione di fessure non passanti, comunque negli intorni di quelle più gravi appena segnalate. È possibile fare delle ipotesi riguardo i fenomeni che possono avere causato il quadro fessurativo di questa parete. Esclusa l'origine sismica delle fessure, sia per l'assenza di eventi significativi documentati negli ultimi secoli, sia per la geometria delle fessure, propagate in diagonale al di sotto delle finestre e simmetriche rispetto un asse verticale posizionato nella mezzeria del prospetto, si può ipotizzare con maggiore credibilità un cedimento centrale alla base della muratura. Questa ipotesi, come tutte quelle formulate in seguito, è stata oggetto di verifica nella fase di analisi. Nel dettaglio, in questo caso è stata fatta un'ipotesi riguardo l'entità del cedimento e sulla porzione di muratura soggetta ad esso.

Il prospetto est è caratterizzato principalmente dalla presenza di fessure passanti pseudo-verticali di cui, come ben visibile dalla pianta in Figura 3-17, quella maggiormente estesa in altezza va a propagarsi anche all'interno della volta.

In questa parete sono presenti due elementi di grande rilevanza ovvero una canna fumaria interna alla muratura stessa e il contatto con un muro perpendicolare, facente parte della regione di edificio a est del salone, che risulta essere ammorsato solo fino alla quota di calpestio del primo piano. Questi sono elementi che vanno a generare discontinuità di tipo strutturale al sistema della stanza e quindi una regione caratterizzata da debolezza, che va quindi considerata come critica e ispezionata. La canna fumaria non solo consiste in un assottigliamento della parete e dunque a una discontinuità vuoto-pieno ma anche in una zona in cui si può ipotizzare, in fase di analisi, un incremento localizzato delle temperature.

Si è ipotizzato dunque che la presenza di una tale discontinuità, combinata con il carico termico proveniente dalla fruizione dei camini, possa essere stata la causa delle fessure sopra segnalate, anche alla luce dei risultati ottenuti in precedenza con riferimento a un altro salone del Palazzo [4].

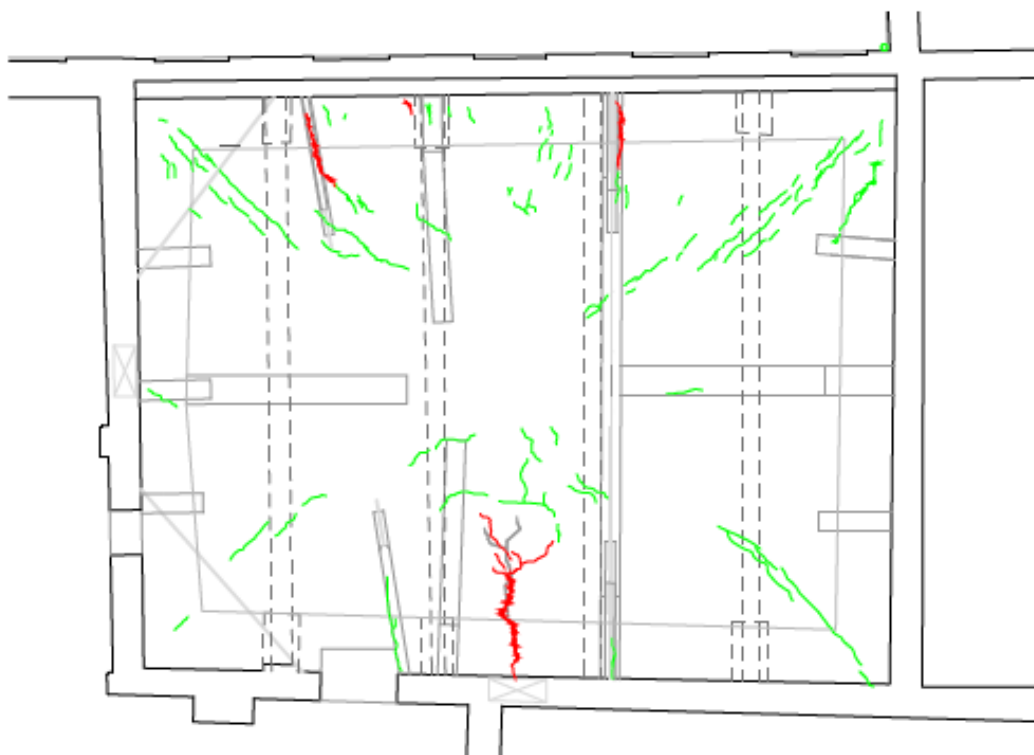


Figura 3-17: Quadro fessurativo - volta

Le due pareti corte sono sicuramente quelle meno danneggiate, presentano infatti numerose fessure non passanti ma un numero minore di danni più ingenti. Nello specifico, la parete sud presenta due fessure passanti al di sopra delle aperture. Tale parete è caratterizzata dalla presenza di una canna fumaria che si estende per tutta l'altezza dell'edificio, a partire dalla mezzeria del piano terra, però, a differenza di quanto descritto per la parete est, qui non vi sono evidenti dissesti gravi associabili a discontinuità o carico termico.

Per quanto riguarda la volta, oltre alla fessura già individuata come un prolungamento di quella verticale che taglia la parete est, sono presenti tre fessure passanti nella regione al disopra del muro a ovest, in prossimità dei contatti volta-frenelli. È interessante inoltre notare la presenza di quelli che sono i dissesti più comuni nelle casistiche di volte a padiglione, ovvero quelli all'intradosso, in corrispondenza delle diagonali.

Infine, come possibile notare dalla foto in Figura 3-18, si ha che i frenelli sono soggetti a dissesto e in particolari quelli su cui poggiano le catene estradosali, presentano fessurazioni che sembrano seguire l'andamento della componente diagonale della catena. Si ipotizza che quanto appena segnalato sia causato dal comportamento della volta sotto il carico del peso proprio, che tende a spostarsi verso il basso e quindi a esercitare una trazione sui frenelli.



Figura 3-18: Fessurazione diagonale nel frenello

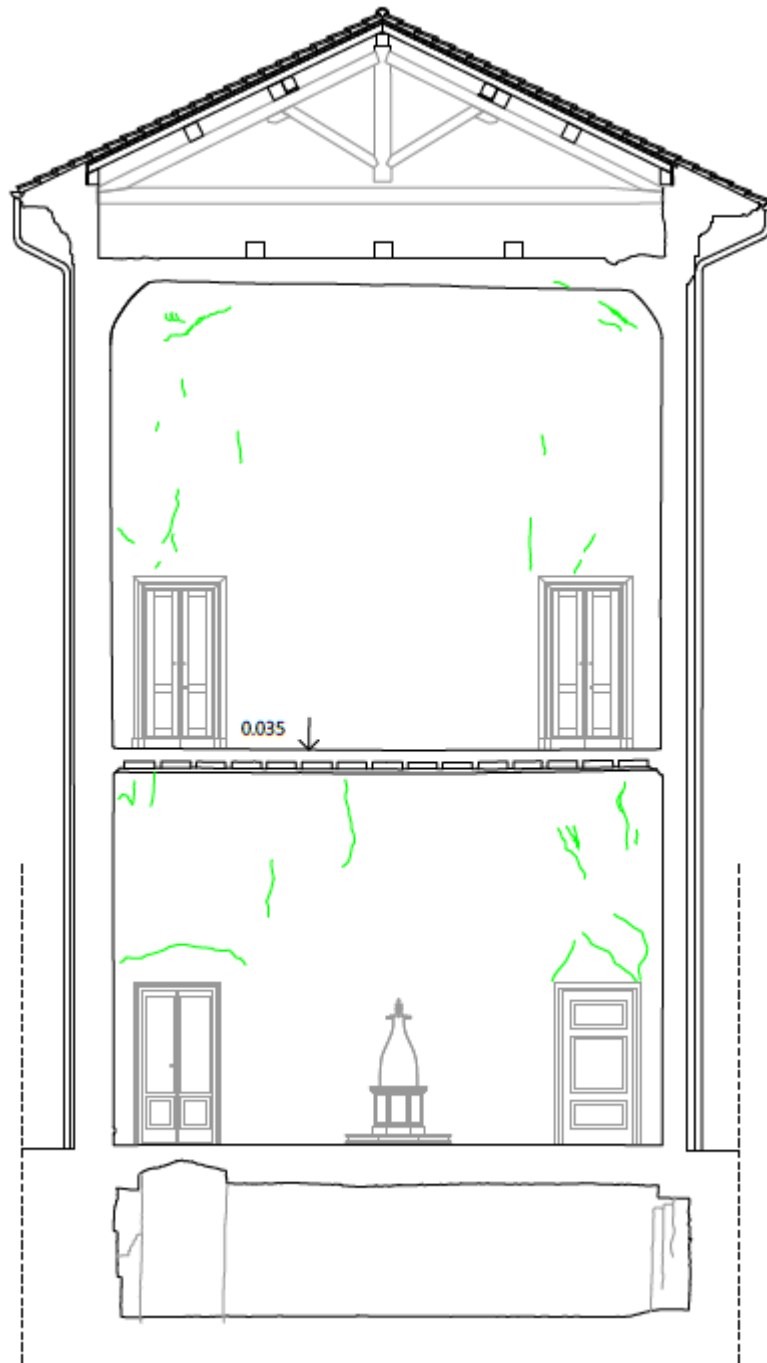


Figura 3-19: Quadro fessurativo - prospetto nord

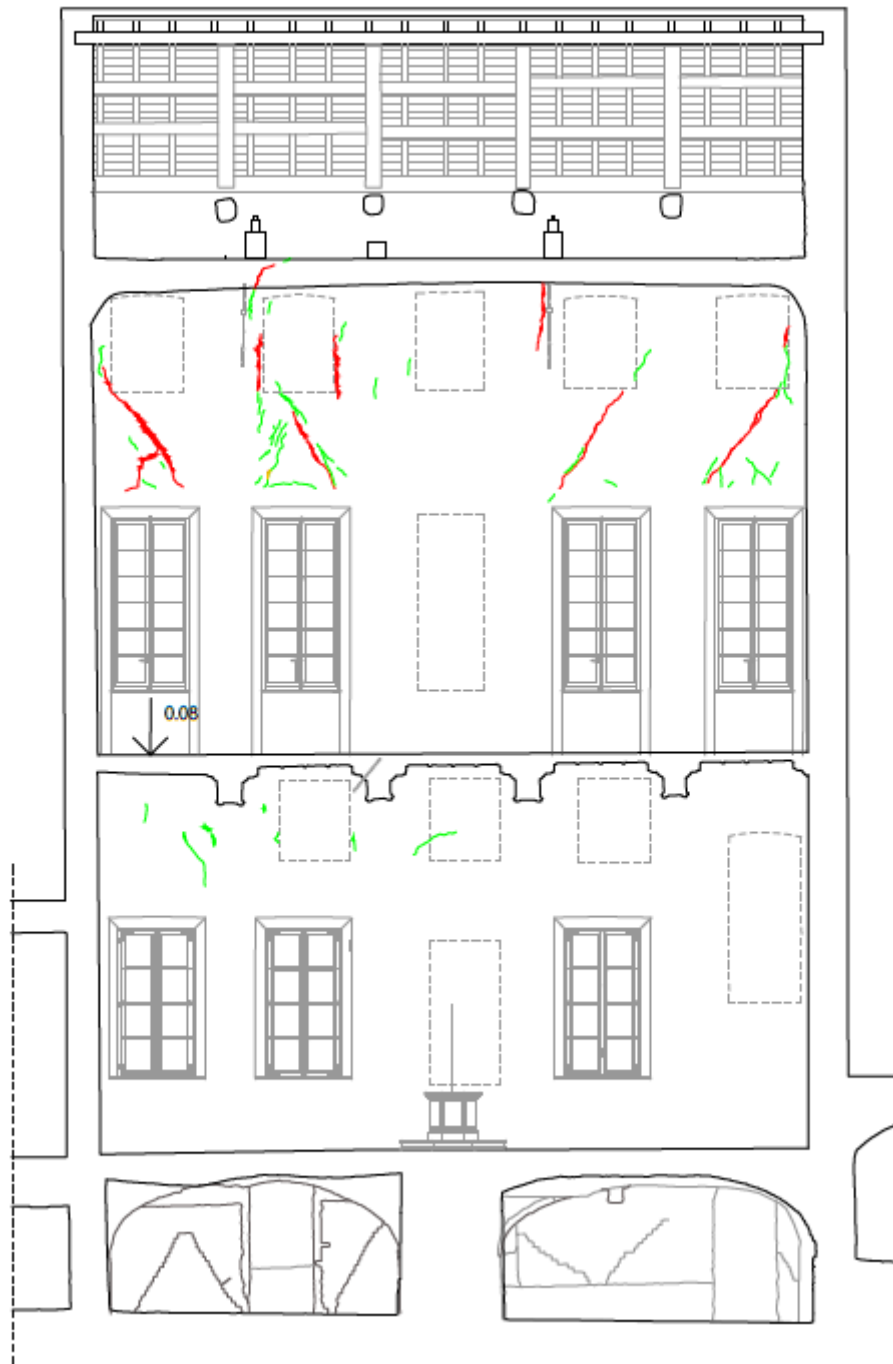


Figura 3-26: Quadro fessurativo - prospetto ovest

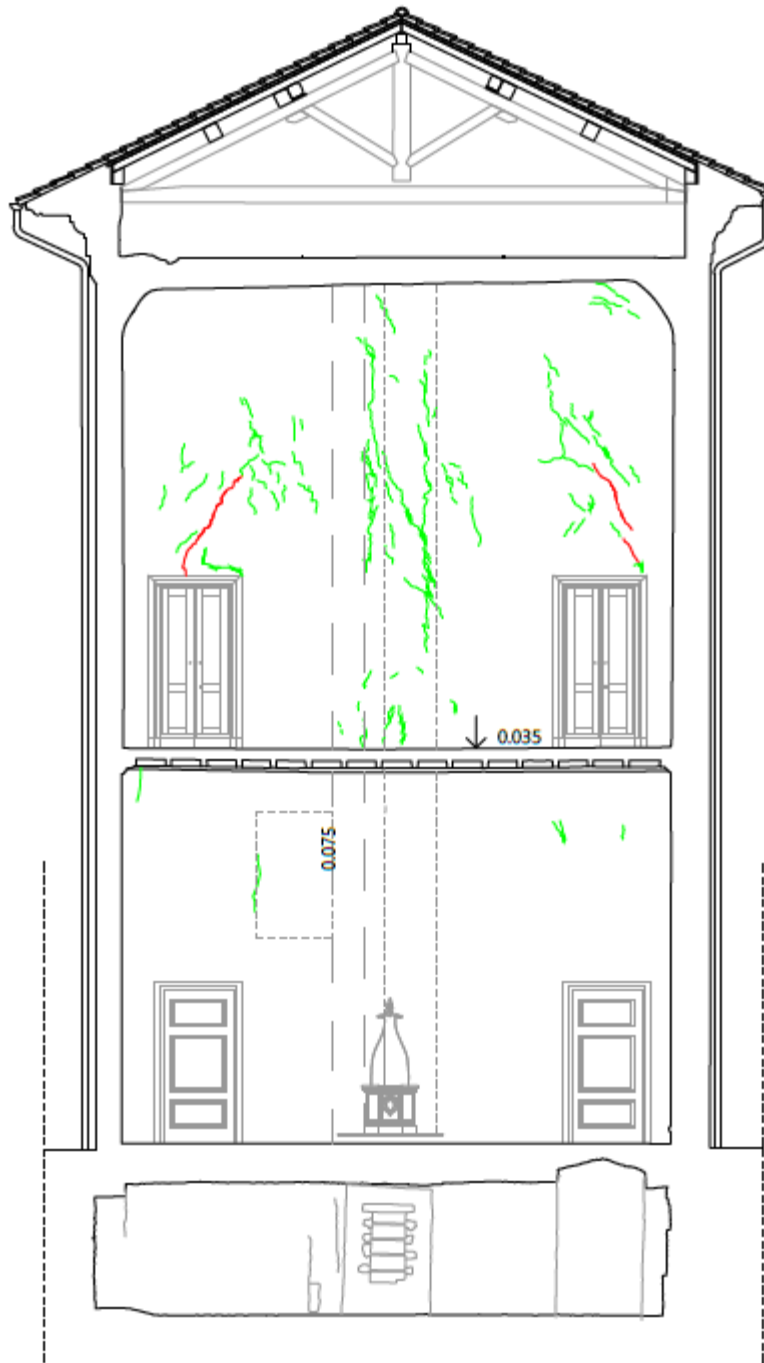


Figura 3-21: Quadro fessurativo - prospetto sud



Figura 3-22: Quadro fessurativo - prospetto est

Se si esegue un'analisi più globale sullo stato di dissesto della stanza è possibile andare ad individuare l'angolo sud-est della stanza come regione maggiormente soggetta a fessurazioni sia di tipo passante che non. La concentrazione di dissesti in una regione specifica di un corpo strutturale, potrebbe essere causata dal cedimento del terreno alla base delle pareti al quale può corrispondere un abbassamento della parte sovrastante e dunque da un ribassamento della volta, ovviamente limitato alla regione critica interessata. Questa è un'ipotesi che è stata oggetto di verifica mediante un'analisi sulla geometria. Si ha infatti che la nuvola di punti dell'intradosso, che è stata l'oggetto di questa analisi, non è il rilievo della geometria originale della volta ma dello stato geometrico della stessa, al momento della cattura. Uno stato che è il frutto delle deformazioni subite dalla struttura nel corso della sua vita, a partire dalla sua conformazione originale.

Dalle Figure 3-23 e 3-24 si nota come in queste sezioni si ha effettivamente un abbassamento della volta nella regione a sud-est, a dimostrazione di come ci sia una continuità tra il quadro fessurativo delle due pareti immediatamente al di sotto di questa porzione di volta e la deformazione subita dalla volta stessa.

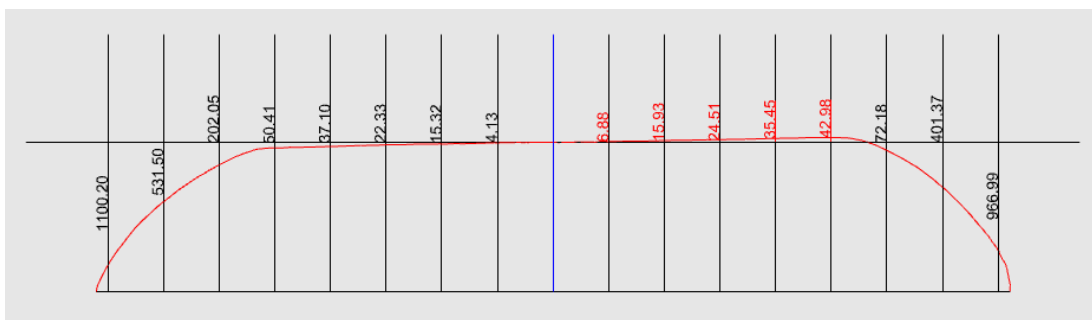


Figura 3-24: Sezione EST-OVEST

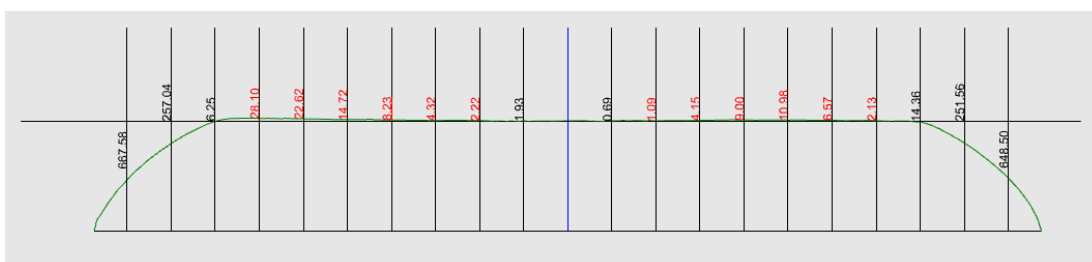


Figura 3-23: Sezione NORD-SUD

Nel contesto dell'analisi geometrica appena descritta, da un'attenta osservazione delle sezioni trasversali e soprattutto di quelle longitudinali si è potuto notare come esistano regioni della volta caratterizzate da una leggera concavità verso l'alto. Si può affermare che l'evidenza appena descritta è inaspettata in quanto una conformazione di questo tipo risulta sfavorevole nei confronti della funzione portante della struttura¹. È fondamentale indagare riguardo il motivo per cui tali concavità assumono questa conformazione nelle sezioni. Si noti che la freccia a cui ci stiamo riferendo è mediamente dell'ordine dei 3 cm quindi la causa potrebbe essere attribuita a deformazioni causate dal carico cui la struttura è soggetta oppure alla presenza di uno strato irregolare di intonaco. Ai fini di indagine, nel software *Rhino* sono state inserite le nuvole di intradosso ed estradosso, già sovrapposte correttamente nel medesimo sistema di riferimento, per eseguire una comparazione. Sono state dunque realizzare sezioni del blocco in modo da poter confrontare in determinate regioni critiche, i profili delle due nuvole.

Al netto dei disturbi presenti alla nuvola estradosso, che vanno a inficiare l'accuratezza di questa valutazione, si può affermare che la concavità, se presente, risulta molto meno evidente all'estradosso (Fig. 3-25). Si attribuisce dunque la causa al distaccamento di intonaco. In fase di analisi verranno comunque verificati l'entità e l'andamento delle distorsioni nelle regioni in cui si presentano queste evidenze.

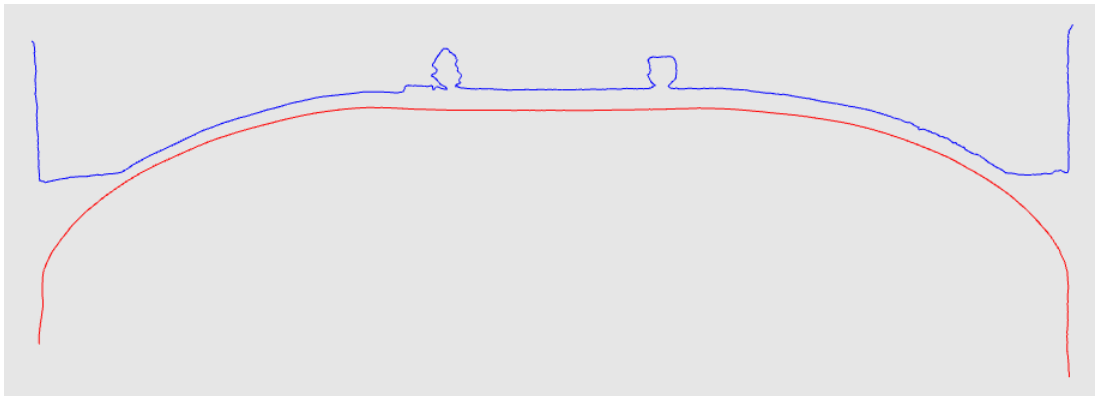


Figura 3-25: Confronto tra sezioni all'intradosso (rossa) e all'estradosso (blu)

¹ *Le volta è soggetta, in questo caso, al solo peso proprio: considerando la leggera concavità verso l'alto, si ipotizza lo svilupparsi di sforzi prevalentemente di trazione all'interno della struttura dove generalmente gli sforzi dovrebbero essere di compressione. Considerando le scarse capacità dei materiali da costruzione in tensione, tali trazioni risulterebbero molto sfavorevoli.*

4 Modellazione geometrica

Allo scopo di analizzare dal punto di vista statico la stanza 3.27 è stato svolto un lavoro preliminare di modellazione geometrica, prima della volta e poi degli elementi di rinforzo ad essa, nonché dei muri.

Questo fondamentale passaggio ha lo scopo principale di ottenere un modello geometrico che sia una rappresentazione realistica e precisa, da un punto di vista dimensionale e geometrico, del soffitto voltato e delle murature. Questo risulta importante in quanto il modello geometrico è il punto di partenza per l'esecuzione dell'analisi statica e dunque avere un modello raffinato e realistico può portare a ottenere risultati di analisi più precisi e affidabili rispetto a quelli che si possono ottenere adottando un modello più idealizzato, che sarebbe un'approssimazione grezza e semplificata della realtà. In questo caso specifico, tale ragionamento risulta preponderante, in quanto la volta oggetto d'esame ha caratteristiche geometriche non convenzionali; non è dunque possibile ricondursi a una casistica generale di volta.

È importante inoltre specificare che questa procedura, avendo come base i risultati dei rilievi fatti su campo, porterà ad avere un modello conclusivo caratterizzato dall'attuale geometria della volta e del salone che è una geometria frutto delle deformazioni che il sistema stesso ha subito nel corso del tempo. È fondamentale dunque considerare in fase di analisi che il modello su cui si stanno eseguendo test strutturali riporta già, al suo tempo 0, le deformazioni esistenti sulla struttura.

Questa fase di lavoro, oltre ad avere lo scopo teorico appena descritto, è utile anche per ragioni pratiche. La modellazione infatti, come sarà approfondito successivamente, è stata eseguita sulla base di nuvole di punti ottenute mediante rilievi in sito. Esse sono soggette a diverse irregolarità e distorsioni che non rispecchiano la realtà e inoltre rendono geometricamente troppo complesso il modello tridimensionale. L'utilizzo della nuvola di punti in uno stato vergine, priva dunque di regolarizzazioni, porterebbe a gravi problematiche nella fase di analisi statica. In primis per quanto riguarda la generazione della mesh del solido tridimensionale: essa risulterebbe infatti troppo irregolare, andando ad

aumentare esageratamente l'onere di calcolo e portando a risultati falsati dalla presenza di elementi molto piccoli o distorti.

La fase di modellazione geometrica consiste, in poche parole, nella riproduzione geometrico-digitale della struttura oggetto di analisi ed è volta a ottenere un modello il più possibile simile alla realtà ma anche a portare benefici in termini di fluidità e precisione nella fase di analisi statica.

4.1 Procedura di modellazione

La procedura può essere distinta in due macro-fasi: la fase di regolarizzazione delle isolinee estrapolate dalla nuvola di punti della volta e la fase di modellazione solida, riferita all'intera geometria del salone. La prima è stata eseguita mediante il software di modellazione 3D *Rhinoceros* mentre per la modellazione solida è stato impiegato *AutoCAD*, nelle sue funzionalità 3D.

Come già affermato in precedenza, la prima fase della modellazione geometrica è stata eseguita sulla base di dati iniziali, forniti sotto forma di nuvole di punti. Nello specifico, da rilievo in sito ne sono state generate due: una comprendente l'intradosso della volta e le imposte della stessa e l'altra relativa alla parte estradossale della copertura voltata.

Si noti che la nuvola di punti dell'estradosso risulta soggetta a ingenti impurità e distorsioni, dovute alla presenza di sporcizia (polvere e ragnatele) e di elementi non facenti parte della volta, fattori che ostacolano il corretto rilievo dei dati da parte dello strumento di misura. Questo ha impedito l'utilizzo della stessa nella fase di regolarizzazione che verrà descritta successivamente e che ha interessato fondamentalmente la nuvola intradossale. Il rilievo dell'estradosso ha avuto comunque un'importante funzione in questa fase del progetto in quanto ha permesso una più corretta comprensione geometrica dell'elemento volta.

La procedura ha avuto il suo inizio con l'importazione della nuvola di punti dell'intradosso nel software *Rhinoceros 3D*. Essa già riportata nella Figura 3-10: si può ben notare che, soprattutto la regione delle imposte, risulta soggetta a irregolarità molto accentuate che si possono ipotizzare non attinenti alle caratteristiche geometriche reali della stanza. Tale ipotesi è facilmente verificabile attraverso un confronto tra la nuvola di punti e il report fotografico degli interni della stanza 3.27, il quale mette in evidenza una regolarità maggiore delle regioni critiche precedentemente individuate. Si deduce che la riscontrata presenza di distorsioni evidenti nella regione delle imposte è dovuta alla presenza di elementi fisici che hanno impedito l'esecuzione di misure accurate: nello

specifico si attribuisce la causa ai distaccamenti superficiali dell'intonaco e agli accumuli di ragnatele e polvere sulle pareti della stanza.

Si è constatato quindi che la nuvola di punti è particolarmente soggetta a distorsioni, in modo prevalente nella regione delle imposte, mentre in quella relativa alla volta vera e propria, le irregolarità irrealistiche risultano limitate. Sulla base di queste osservazioni si è definita una procedura di regolarizzazione volta dunque alla generazione di una superficie allo stesso tempo più regolare e più vicina alla geometria reale.

Sono state quindi catturate numerose sezioni della nuvola di punti, fondamentalmente distinguibili in:

- Sezioni longitudinali/sul lato lungo (Fig. 4-1)
- Sezioni trasversali/sul lato corto (Fig. 4-2)
- Sezioni sulle diagonali reali (Fig. 4-3)

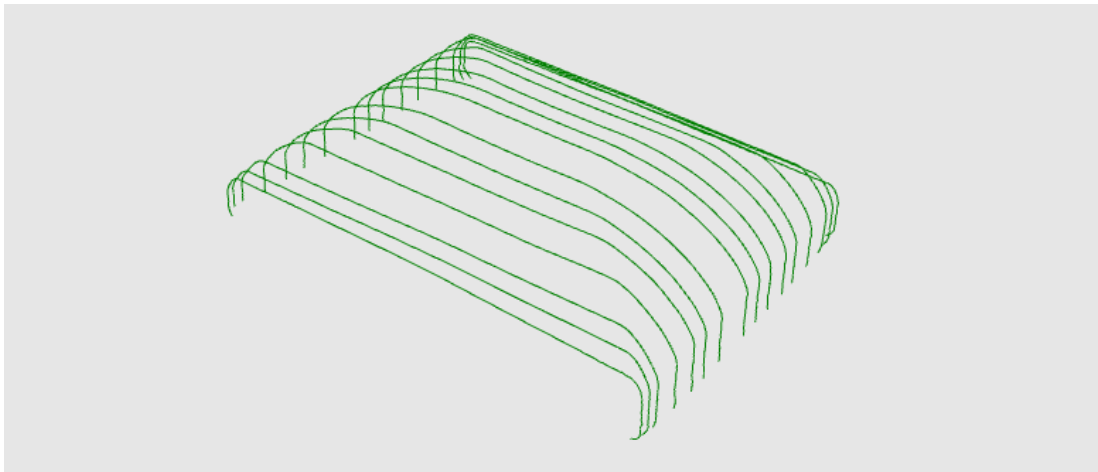


Figura 4-1: Sezioni nella direzione longitudinale

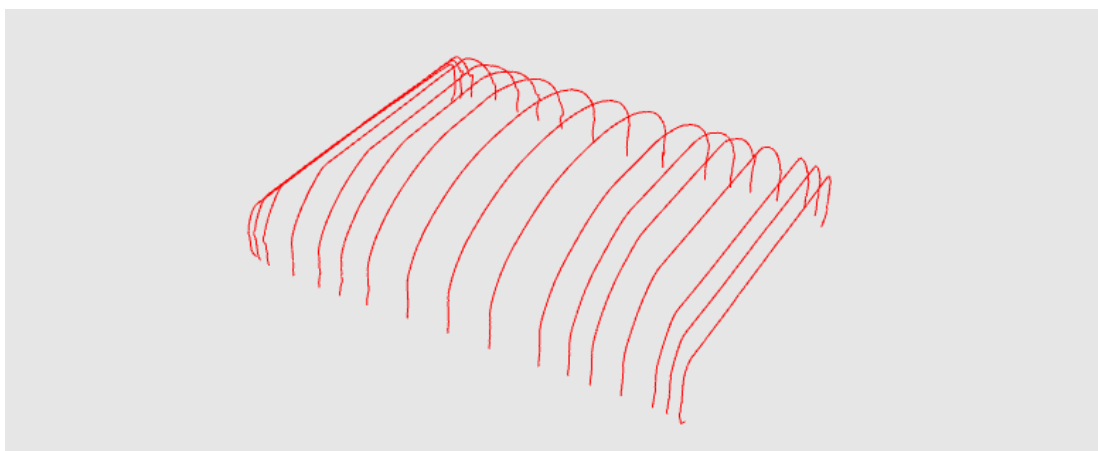


Figura 4-2: Sezioni nella direzione trasversale

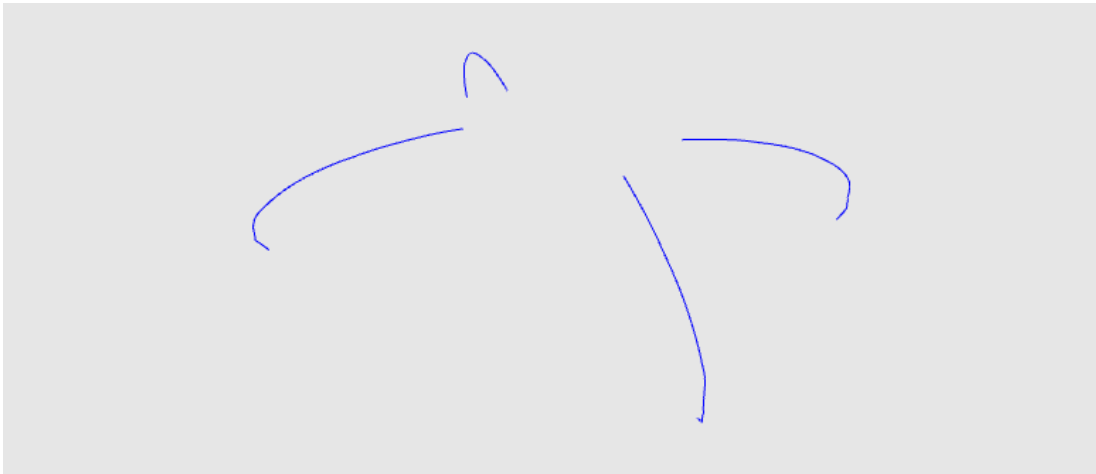


Figura 4-3: Sezioni sulle diagonali

È importante specificare che le tre tipologie di sezioni non sono state catturate indipendentemente l'una dall'altra ma considerando che nelle regioni agli angoli della stanza si avesse intersezione nello stesso punto di tre di esse (una per ogni tipologia), come meglio comprensibile osservando la Figura 4-4. Tale accorgimento è stato fondamentale in previsione della generazione della superficie regolarizzata: come sarà spiegato successivamente infatti, tale superficie è stata generata come combinazione di superfici tridimensionali incluse fra 3 o 4 porzioni di isoipse.

Si noti che, soprattutto per quanto riguarda le prime due tipologie, le sezioni sono state catturate con un raffittimento maggiore nei punti di maggior curvatura/pendenza della volta e con minor frequenza nelle parti più tendenti al piano, della stessa. Questo è un accorgimento necessario in quanto infittendo nei punti indicati è possibile catturare al meglio la concavità della struttura.

Il passaggio successivo è stato quello, più consistente in termini quantitativi, della regolarizzazione di ogni singola sezione.

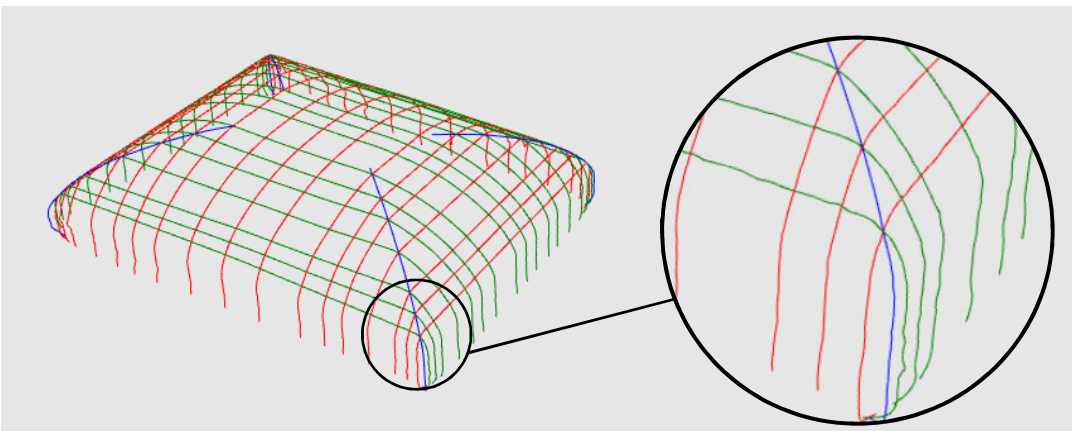


Figura 4-4: Dettaglio in uno spigolo della griglia di sezioni

Questa importante fase della modellazione geometrica è stata svolta prima di tutto andando a individuare dei piani orizzontali caratteristici. Essi sono mostrati in Figura 4-5: il piano superiore è stato posizionato alla quota nella quale si individua la fine della parte più concava della volta e l'inizio dell'anello di imposta, mentre i piani inferiori sono stati posizionati in modo che tra di essi e il piano superiore fossero delimitati tratti regolari delle imposte.

Per posizionare questi ultimi è stato necessario osservare il profilo corto della nuvola di punti, esaminando l'insieme di tutte le sezioni trasversali sovrapposte, in modo da individuare dei nodi nei quali mediamente si osserva l'inizio di forti irregolarità nelle sezioni.

È interessante notare come i piani appena descritti, come posizionati, vadano a evidenziare in modo abbastanza preciso la distinzione del "sistema volta" come definita con dettaglio nel capitolo riguardante la descrizione delle tecniche costruttive: una cornice di base e la volta vera e propria poggiata su di essa.

Successivamente al posizionamento dei piani appena descritti, le diverse sezioni sono state analizzate e regolarizzate singolarmente. Per andare a ridisegnare la parte di sezione facente parte dell'elemento volta, è stato utilizzato il comando *curva per interpolazione di punti*; in questo caso la finalità è stata principalmente quella di ottenere una curva continua, quindi priva dei punti angolosi, che invece si presentavano nella sezione originale, dovuti probabilmente alla sensibilità di misura dello strumento, a distaccamenti di intonaco o a strati di polvere presenti sull'intradosso della volta e rappresentanti elemento di disturbo alla precisione di misura. Per quanto riguarda invece la regolarizzazione delle imposte, si è deciso di utilizzare semplicemente il comando *linea* unendo i punti in cui la sezione corrente andasse a intersecarsi con i vari piani caratteristici. Come precedentemente affermato, le irregolarità presenti nella regione delle imposte sono dovute a elementi di disturbo quali ingenti

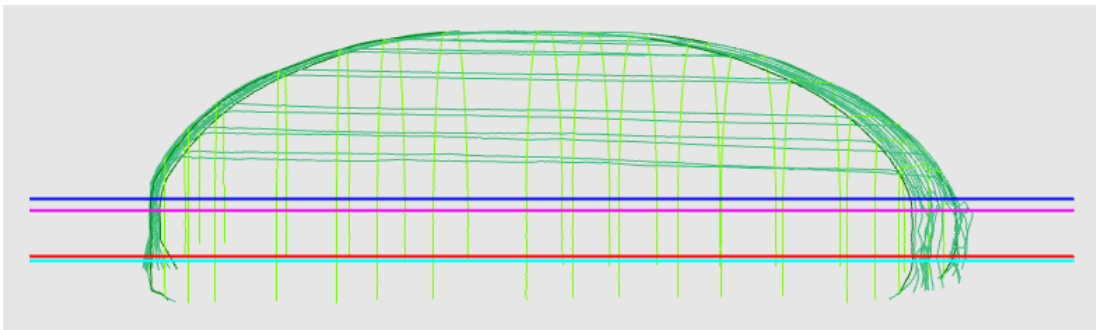


Figura 4-5: Piani di riferimento: in blu il piano di divisione tra volta e imposte, in rosso il piano di taglio delle isolinee regolarizzate, in magenta il piano per la regolarizzazione a sinistra, in azzurro quello per la regolarizzazione a destra

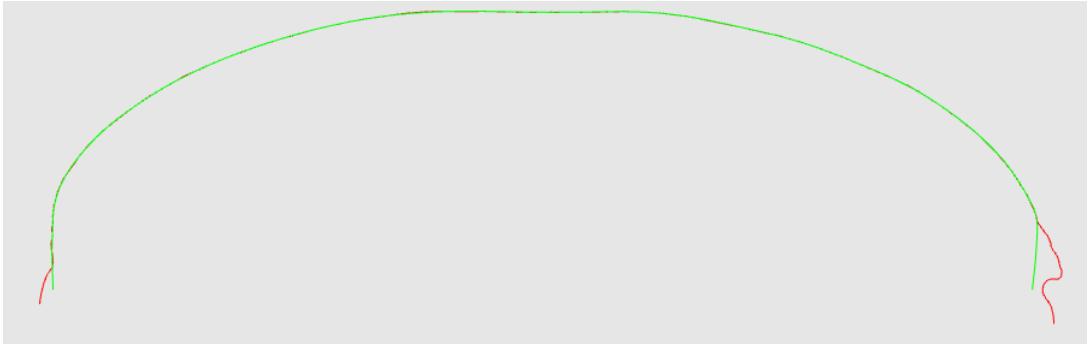


Figura 4-6: Confronto tra una sezione non regolarizzata e la corrispondente isolina, derivata dalla regolarizzazione

accumuli di polvere e ragnatele, dunque si è ritenuta appropriata la loro completa eliminazione a favore di un profilo definito da un segmento retto.

In Figura 4-6 è riportato un confronto tra una sezione vergine da nuvola di punti e una sezione regolarizzata, in cui si possono osservare le differenze appena descritte: è nettamente visibile la regolarizzazione eseguita sulle imposte (che erano globalmente l'elemento più distorto), le irregolarità della nuvola nella parte superiore della volta erano di ordine molto inferiore quindi sono di difficile osservazione.

La procedura appena descritta è stata eseguita sulle sezioni di tipo trasversale e longitudinale e sulle quattro sezioni diagonali. Si noti come queste ultime siano state troncate nel loro sviluppo in quanto si è voluto riprodurre il reale andamento delle diagonali della volta: essendo la volta caratterizzata da irregolarità geometriche di diverso tipo, le diagonali non si intersecano e tendono a concludersi in prossimità della parte centrale piatta della volta.

Successivamente a questa prima fase, è stata eseguita una correzione di tutte le isolinee regolarizzate, in modo che esistesse contatto perfetto tra le isolinee, in ogni punto di intersezione. Questo ha permesso di spezzare le stesse in modo da generare i contorni esatti di ogni singola porzione di superficie che successivamente è stata generata.

Il risultato finale di queste operazioni è un set di nuove sezioni descrittive l'intradosso della volta, caratterizzate da una maggiore regolarità e quindi dall'assenza di distorsioni irrealistiche. Osservando la reale geometria dal report fotografico e confrontandola con l'andamento delle imposte messo in evidenza dalle nuove sezioni in Figura 4-7 si può notare come il lavoro appena descritto sia stato il primo passo per ottenere un modello geometrico attinente alla realtà e in particolare, molto più accurato della nuvola di punti.

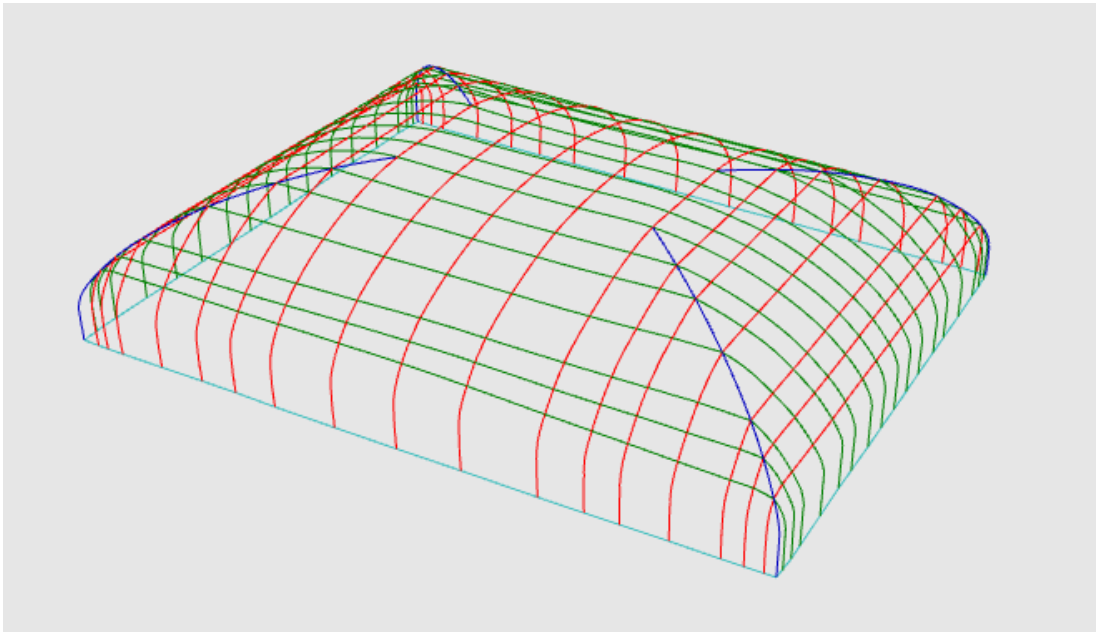


Figura 4-7: intero set delle isolinee regolarizzate comprendente: quelle nelle direzioni longitudinali e trasversali, le diagonali e l'anello di chiusura della volta alla base

Il passo successivo è stato quello della generazione delle isolinee relative alla superficie estradossale della volta. Non disponendo, come già affermato, di una nuvola di punti accurata dell'estradosso, non è stato possibile eseguire una procedura analoga a quella appena descritta per la generazione di queste altre isolinee. È stato deciso quindi di generare le sezioni della superficie estradossale andando a scalare quelle dell'intradosso, in modo da ottenere, al termine della procedura, due superfici che descrivessero un modello geometrico della volta avente spessore uguale a quello dell'elemento reale, che è noto e pari a 140 mm. Con la generazione delle isolinee relative a intradosso ed estradosso si può considerare conclusa la prima macro-fase di generazione del modello geometrico.

Il prodotto del lavoro descritto precedentemente è stato dunque importato in *AutoCAD* per procedere nella fase di modellazione solita.

Sono state quindi generate le superfici intradosso ed estradosso. Il comando *SUPCOON* permette di definire una mesh tra quattro spigoli contigui: è stato dunque utilizzato per riempire indipendentemente tutti gli interspazi tra le isolinee. Nello specifico è stato preventivamente deciso che la mesh creata fosse caratterizzata da 10 divisioni in ciascuna delle due direzioni. Gli elementi generati sono dunque stati convertiti in superfici levigate mediante il comando *CONVINSUPER*: si noti che AutoCAD permette di convertire in superfici levigate di tipo *ottimizzato* e *non ottimizzato*; malgrado la prima delle due

opzioni sia più favorevole dal punto di vista dello spazio occupato in memoria, la scelta per la tipologia *levigata, non ottimizzata* è stata costretta in quanto l'unica che non compromette la contiguità tra le diverse porzioni di superficie generate separatamente. Le singole porzioni sono dunque state unite nelle due superfici di intradosso e di estradosso.

A questo punto è stata definita la volta come solido 3D andando a tagliare, attraverso il comando *Trancia*, un parallelepipedo con le due superfici.

La procedura appena descritta ha portato a un risultato molto dettagliato dal punto di vista geometrico. La diretta conseguenza della precisione raggiunta e dell'utilizzo di superfici non ottimizzate, ha portato a dover gestire, nei passaggi successivi dello studio, un modello numerico molto pesante, che ha comportato lunghe tempistiche di calcolo e modellazione nell'uso del software *ABAQUS CAE*.

Completata la generazione del solido principale descrivente la geometria della volta, sono stati definiti prima gli archi e i frenelli e successivamente il sistema murario sottostante.

Per quanto riguarda gli archi, è stato possibile definirne il posizionamento in pianta, sfruttando la disponibilità della nuvola di punti estradosale. Mediante una procedura di estrusione dalla pianta e successiva tranciatura di solidi, gli elementi arco sono dunque stati inseriti all'interno del solido volta precedentemente creato, conferendogli uno spessore aggiuntivo di 70mm fuoriuscente dalla estradosso (Fig. 4-8). Essi sono infatti archi in spessore che così modellati migliorano le capacità portanti del sistema volta modellato, riproducendo la funzione reale che è stata specificata in precedenza, nel capitolo relativo alla descrizione geometrica del sistema esaminato (Cap. 3.3).

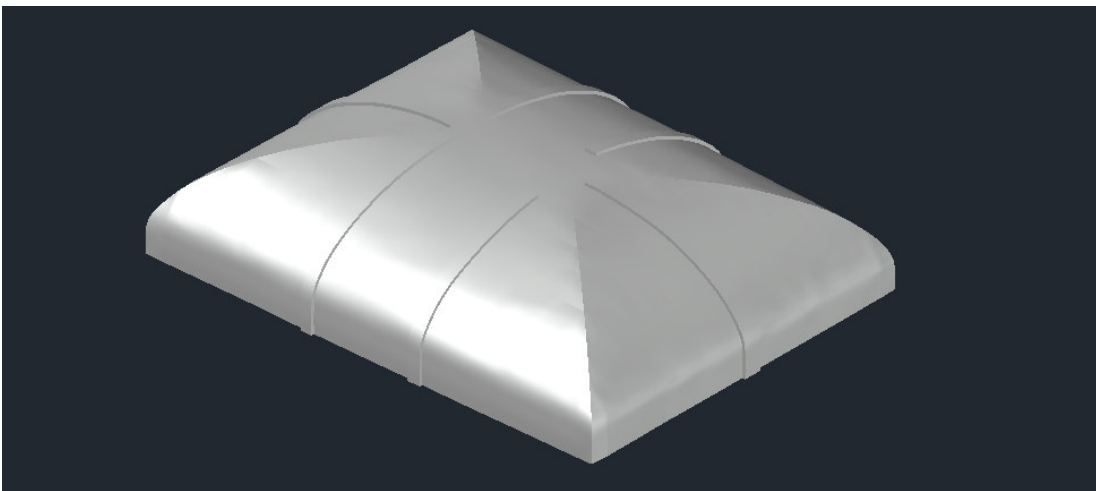


Figura 4-8: Modello solido comprendente la volta e gli archi in spessore

I frenelli sono stati modellati seguendo una procedura molto simile a quella appena descritta sinteticamente per gli archi: sono dunque stati riportati in pianta partendo dalla nuvola all'estradosso e poi ricostruiti come solidi 3D. Nella definizione di questi elementi, ai fini di migliorare la successiva modellazione geometrica, si è fatto in modo che le superfici dei frenelli su cui si stabiliva l'interazione con la volta, fossero perfettamente combacianti con l'estradosso della stessa; a questo scopo, tali superfici sono state definite per sottrazione della volta dai solidi rappresentanti i frenelli.

È stato poi generato il sistema murario basandosi sulla documentazione grafica tecnica di cui si disponeva: piante, prospetti interni, prospetti esterni e documentazione fotografica. Operativamente sono stati prima definiti i quattro muri principali estesi dal piano terra, fino al piano di appoggio della volta. Successivamente è stata aggiunta la parte di muratura all'estradosso della volta, che come descritto nel capitolo riguardanti la tecnologia costruttiva, è caratterizzata da uno spessore inferiore rispetto a quello del resto del sistema murario. Sono poi state inserite tutte le aperture esistenti, quali finestre e porte, ma anche aperture tamponate. Si noti come i solidi rappresentanti i tamponamenti non sono stati uniti al resto del sistema murario, in questa fase. Tale unione è avvenuta durante la fase di modellazione numerica con software *Abaqus CAE*, a seguito dell'assegnazione di proprietà materiche differenti alle diverse parti, come illustrato nel Capitolo 5.1.

Sono infine state inserite le due canne fumarie, passanti nei muri est e sud dell'edificio: elementi non trascurabili, perché come già affermato, la loro presenza consiste in una discontinuità di tipo meccanico all'interno della muratura, ma anche in un punto di forte concentrazione di un possibile carico termico, che è stato infatti considerato durante la fase di analisi.

Alla geometria solida dei muri è poi stata sottratta quella della volta andando così a riprodurre la particolare tecnica costruttiva, assimilabile al *tas-de-charge* che è stata adottata nella regione alla base della volta.

Nella definizione geometrica del sistema murario, si è prestata particolare attenzione al grado di interazione, sia reciproco tra i quattro muri della stanza, sia tra la stanza e il resto dell'edificio. I quattro muri sono stati considerati perfettamente ammorsati tra loro, il che ha comportato, in questa fase, l'unione degli stessi in un unico solido. Le interazioni tra stanza ed edificio sono invece state modellate nella fase successiva, attraverso il software *Abaqus CAE*, imponendo vincoli a carrello nelle regioni di interazione: questa operazione sarà descritta con maggiore dettaglio nel capitolo relativo alla modellazione delle condizioni al contorno.

L'ultima fase della modellazione eseguita in *AutoCAD* è stata quella relativa all'inserimento delle catene. Come già specificato nei capitoli precedenti, la volta è stata rinforzata attraverso 6 catene: 2 maggiori a connettere i due muri paralleli aventi maggiore estensione e 4 posizionate agli angoli della stanza. Il posizionamento all'interno del sistema è stato eseguito facendo riferimento, in un primo momento, alla nuvola di punti dell'estradosso. Se per le due catene maggiori si è potuto contare su una maggiore chiarezza nell'individuazione delle stesse, per le catene agli angoli questa è venuta meno a causa di ingenti distorsioni nelle regioni analizzate. In modo supplementare, si è fatto riferimento quindi alla documentazione fotografica. In questa fase, soprattutto per le due catene maggiori, è stata prestata particolare attenzione nel riprodurre realisticamente un sistema di catene che fosse inglobato all'interno di muri e volta; a questo fine è stato fondamentale fare documento al report dell'analisi termografica. Come possibile vedere in Figura 4-9, infatti, le termografie mettono bene in evidenza le porzioni di catena "imbevute" nella muratura.

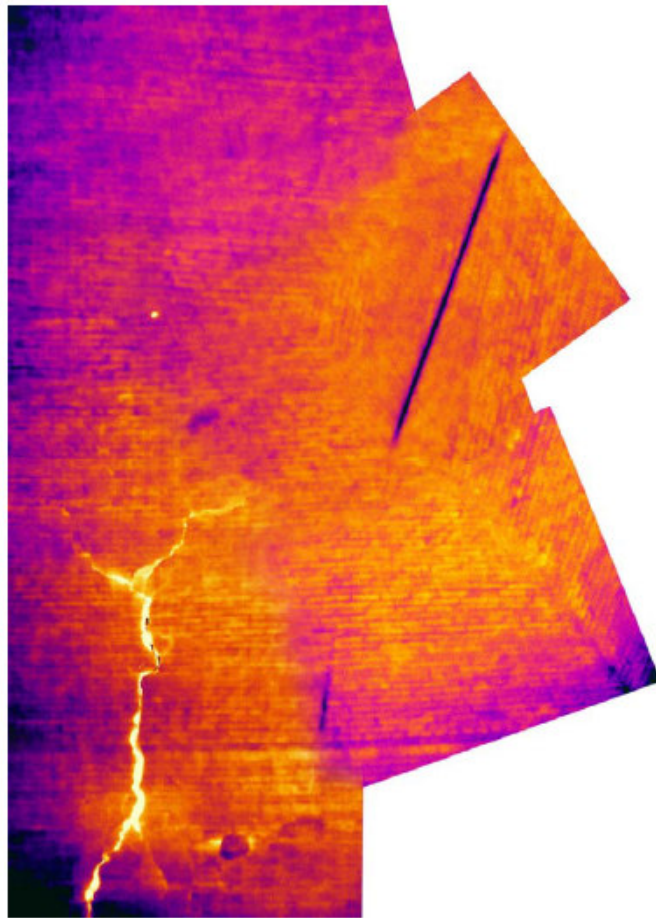


Figura 4-9: Termografia all'intradosso con dettaglio della catena estradosale

Il risultato finale della modellazione solida (Fig 4-10) si può dunque riassumere in queste parti distinte:

- Sistema volta comprendente la volta di spessore 140 mm e archi in spessore
- Frenelli
- Sistema murario privo di tamponamenti
- Tamponamenti
- Catene

Tali elementi non sono stati uniti all'interno dell'ambiente di lavoro Autocad ma importati indipendentemente in *Abaqus CAE* e poi li uniti o assoggettati a diversi tipi di interazioni reciproche. Le motivazioni di questa scelta sono legate alla necessità di attribuire diverse proprietà meccaniche a diversi componenti e ai problemi che il software di modellazione a elementi finiti avrebbe riscontrato, nella generazione della mesh di un corpo unico così complesso.

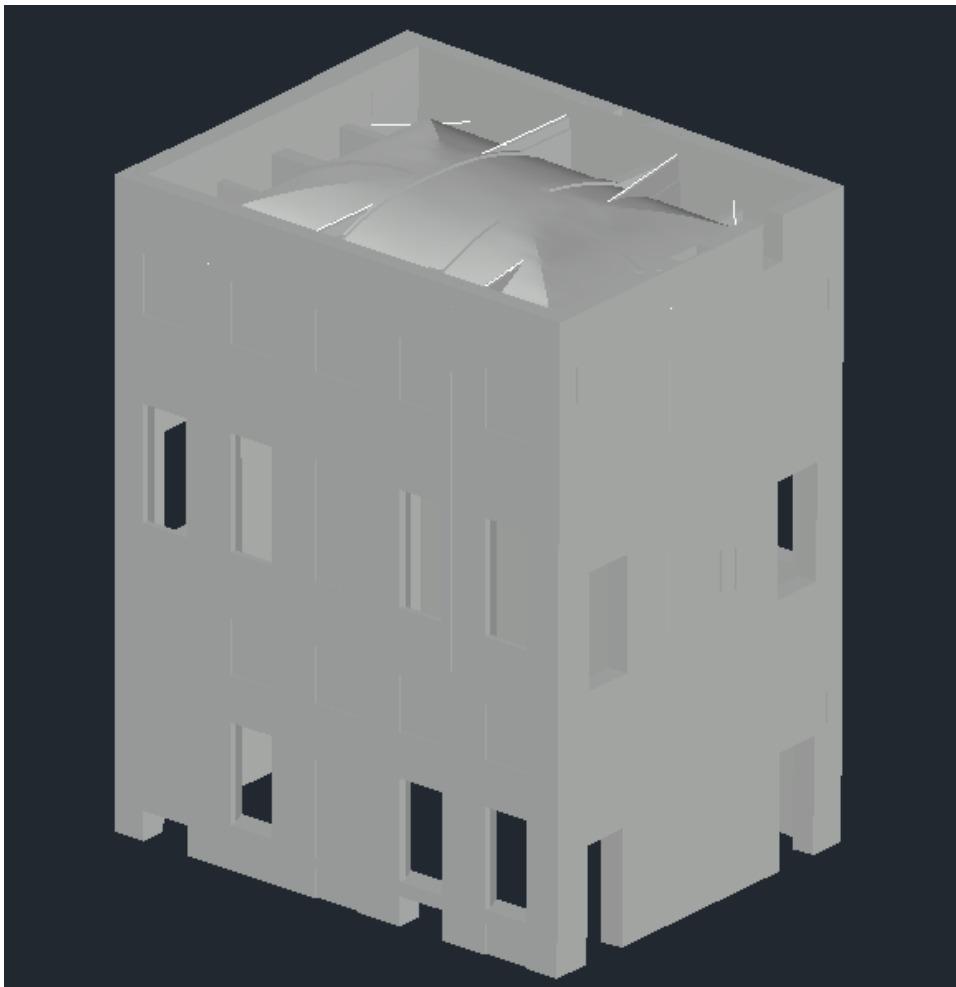


Figura 4-10: Modello geometrico completo

5 MODELLAZIONE NUMERICA

Questa fase è stata fondamentale per passare da un modello puramente geometrico del salone a uno dotato di una caratterizzazione meccanica, dal punto di vista delle proprietà materiche di ogni parte della struttura, da quello delle interazioni che intercorrono tra queste e infine dal punto di vista dei vincoli e dei carichi cui il sistema è sottoposto.

Si tratta dunque del passaggio conclusivo del processo, propedeutico alle analisi di diverso tipo cui il modello è stato sottoposto, nell'obiettivo di verificare le ipotesi formulate riguardo i dissesti osservati nella realtà del costruito. Si tratta di analisi svolte secondo il Metodo a Elementi Finiti attraverso il software *Abaqus CAE*. Per questo motivo, in questa fase è inclusa la generazione della mesh delle singole parti in cui il modello è stato distinto.

5.1 Importazione delle parti da modello geometrico

Il software *Abaqus CAE* permette di definire il modello in parti distinte, modificabili indipendentemente l'una dall'altra sia nella geometria che nelle proprietà meccaniche. Le parti poi possono essere assemblate come istances nel modulo "Assembly". È sul modello assemblato che possono successivamente essere definiti i carichi agenti, i vincoli esterni e le interazioni tra le varie istances.

È possibile definire le diverse parti importando la geometria modellata come diversi tipi di formato grafico. In questo caso specifico si è scelto di importare nel formato .sat tutte le geometriche solide e con estensione .iges tutte quelle monodimensionali (le catene). Sono stati scelti questi tipi di formato in quanto compatibili con l'esportazione da AutoCAD.

Nello specifico, nella fase di importazione sono state inserite come parti indipendenti:

- Sistema volta comprendente la volta di spessore 140 mm e archi in spessore (1 parte)
- Insieme dei frenelli (1 parte)
- Sistema murario privo di tamponamenti (1parte)
- Tamponamenti (8 parti)
- Catene (6 parti)

Attraverso il modulo “Assembly” è stato possibile assemblare i muri e i tamponamenti per poi unirli in una singola parte attraverso il comando merge. Nel compiere questa operazione, il software permette all’utente di scegliere di cancellare i contorni delle intersezioni tra le istances unite, nella parte creata o di mantenerle. Si è scelto di mantenerli: questo ha permesso di assegnare proprietà materiche differenti ai muri e ai tamponamenti malgrado appartenenti alla stessa parte.

Il risultato di questa operazione è stato dunque una nuova parte dotata di perfetta collaborazione tra le singole partizioni in essa, ma con la possibilità di una caratterizzazione meccanico-materica differenziata tra esse. Si noti che questo sarebbe stato impossibile se muri e tamponamenti fossero stati importati come una parte unica in quanto il software non sarebbe stato in grado di distinguere le differenti partizioni, nel momento dell’assegnazione delle proprietà.

In definitiva il modello numerico è stato dunque distinto in 9 parti, illustrate nelle Figure da 5-1 a 5-4, così nominate:

- CATENA 1: catena estradossale posta in diagonale
- CATENA 2: catena estradossale
- CATENA ANGOLARE 1
- CATENA ANGOLARE 1
- CATENA ANGOLARE 1
- CATENA ANGOLARE 1
- MURI
- FRENELLI
- VOLTA



Figura 5-1: Insieme delle parti rappresentanti le catene

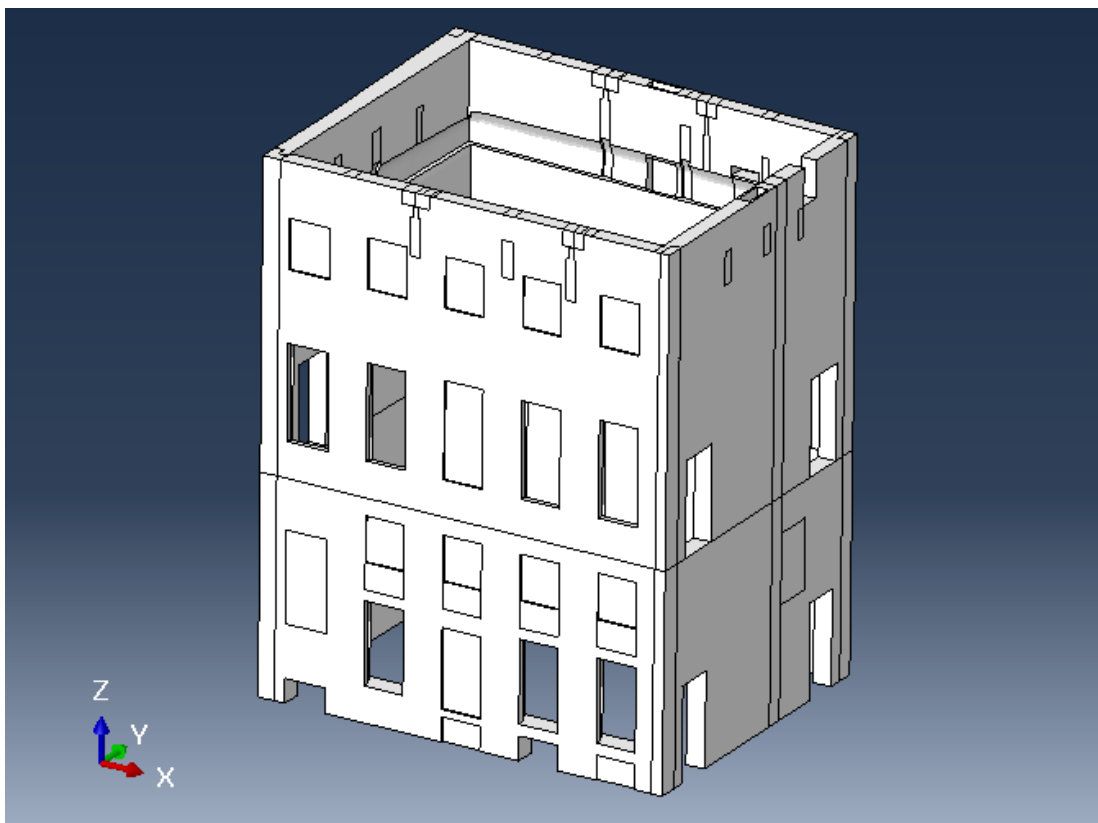


Figura 5-2: Parte 'MURI'

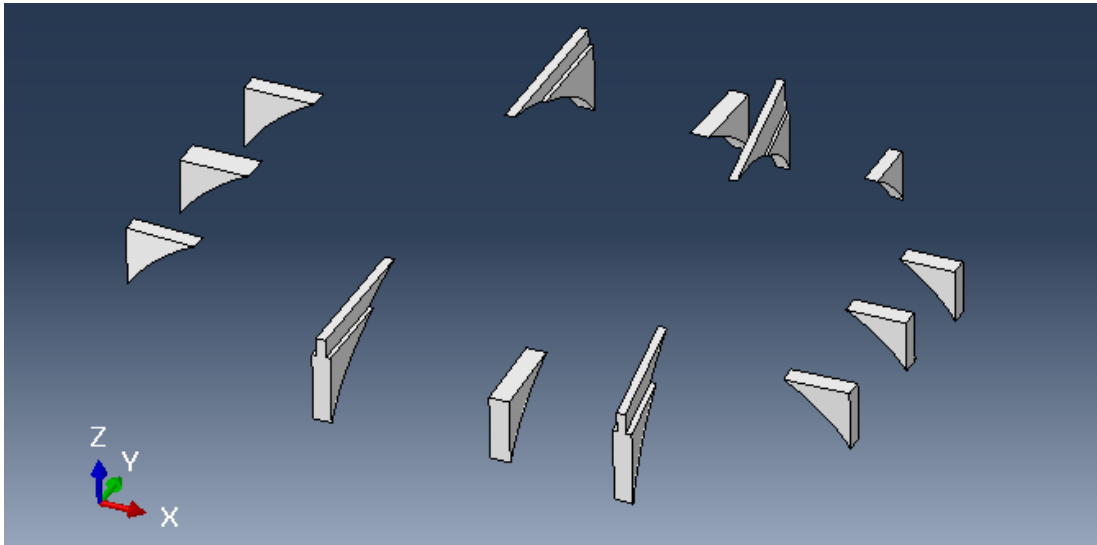


Figura 5-4: Parte 'FRENELLI'

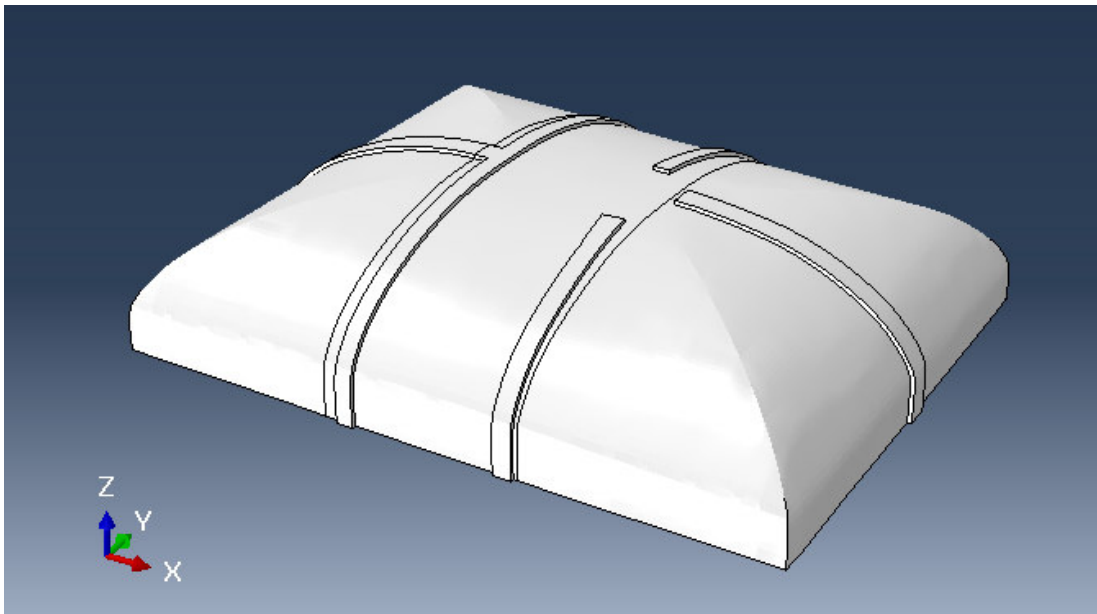


Figura 5-3: Parte 'VOLTA'

Come già affermato in precedenza, le parti rappresentanti le catene (Fig. 5-1) sono state importate attraverso file di estensione .iges, unica estensione supportata sia da *AutoCAD* che *Abaqus CAE* che permette di gestire elementi monodimensionali. Le parti sono poi state generate come elementi *Wire 3D*. La parte "VOLTA" (Fig. 5-4) è di tipologia solido deformabile. Successivamente all'importazione questa è stata oggetto di diverse operazioni di adattamento della geometria. In primo luogo è stata eseguita un'operazione di conversione attraverso il comando *convert to analytical*, il quale applica cambiamenti infinitesimi a spigoli e facce del solido, in modo che sia possibile una

rappresentazione di tipo analitico al software. La validità della della geometria convertita è stata poi verificata attraverso il comando *Update Validity*.

Infine è stata eseguita un'operazione di modifica della topologia dell'elemento. Il solido volta, per come importato da formato .sat, era caratterizzato da centinaia di migliaia di sfaccettature con la conseguenza di avere le superfici intradossale ed estradossale tappezzate da una griglia molto fitta (Fig. 5-5). La causa di quanto appena descritto è da ricercare nella generazione delle due superfici mediante AutoCAD: Come già specificato, le superfici intradossale ed estradossale sono state generate, in AutoCAD, dalla conversione di elementi mesh in elementi superficie levigata, non ottimizzata. Tale conversione è la causa della caratterizzazione topologica dell'elemento, al momento dell'importazione in *Abaqus CAE*.

Attraverso il comando Edit Topology è stato possibile rimuovere la griglia alle due superfici, mantenendo comunque inalterata la geometria dell'elemento.

Anche le parti "MURI" (Fig. 5-2) e "FRENELLI" (Fig. 5-3) sono state importate come elementi solidi deformabili e anch'esse erano soggette alla presenza di una griglia, nelle regioni in cui, nella fase di modellazione geometrica, sono state troncate attraverso la volta. La stessa procedura di modifica della topologia è stata eseguita su questi elementi.

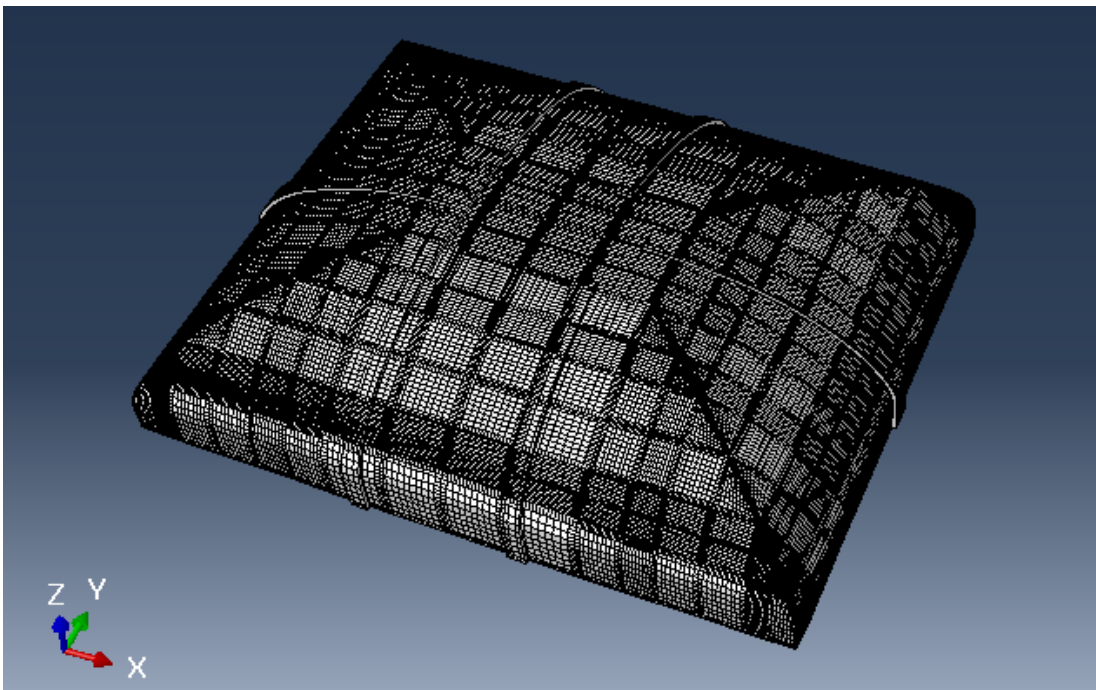


Figura 5-5: Parte "VOLTA" al momento dell'importazione, prima della modifica della topologia

Come possibile notare dalla relativa illustrazione, i muri sono caratterizzati dalla presenza di diverse partizioni. La loro presenza è dovuta alla necessità di inserire interazioni tra le diverse parti, successivamente all'assemblaggio. La procedura di definizione delle interazioni è trattata nel dettaglio nel capitolo ad esse specificamente dedicato.

Le parti appena illustrate sono poi state assemblate e il risultato di questa procedura è riportato nella Figura 5-6.

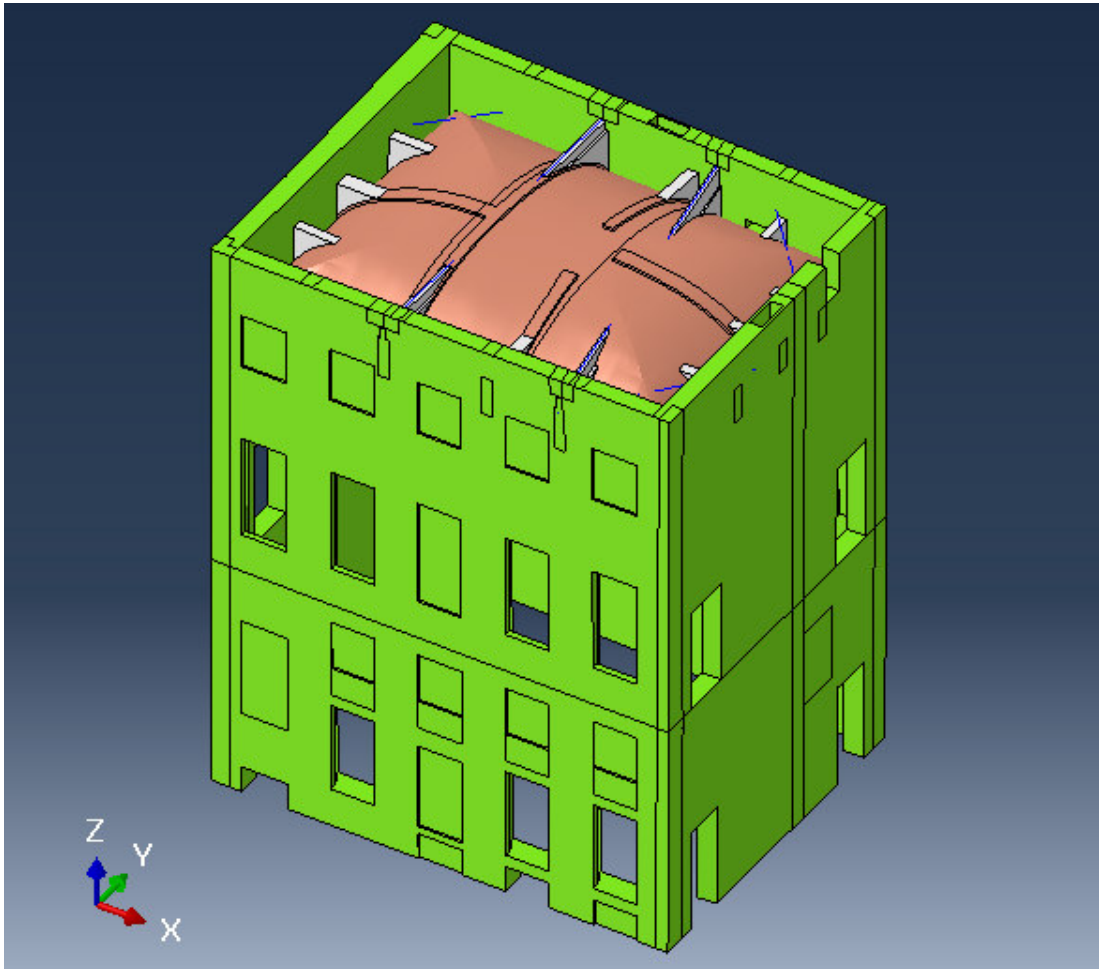


Figura 5-6: Modello assemblato

5.2 Definizione delle proprietà meccaniche

Ultimata la definizione delle parti, sono state assegnate le proprietà meccaniche. È bene specificare che, per quanto riguarda il materiale a descrivere la muratura, sono stati definiti differenti modelli di comportamento elastico e plastico, alternativi tra loro. Questi sono stati impiegati per eseguire differenti analisi in cui è stata valutata la loro differente capacità di simulare correttamente il comportamento del materiale reale.

Di seguito sono dunque descritti in dettaglio i diversi modelli di materiale assegnati a catene e parti in muratura.

5.2.1 Muratura

La muratura è un materiale di tipo composito, generalmente composta da malta e pietre, artificiali (mattoni) o naturali (pietrame). Il suo comportamento meccanico deriva dunque da quello delle sue componenti. In breve si può affermare che:

- i mattoni hanno un modulo elastico (E) e una resistenza a compressione (σ_c) maggiori della malta;
- i mattoni hanno un comportamento fragile (collasso per deformazioni non elevate) mentre la malta ha un comportamento duttile (collasso per deformazioni maggiori);
- la muratura ha proprietà intermedie tra quelle delle sue due componenti.

Esistono diversi metodi per arrivare a costruire un modello che descriva il comportamento del materiale muratura. Fondamentalmente si possono seguire due approcci: il primo, micromeccanico, in cui mattoni e giunti sono modellati separatamente, assegnando a ogni materiale le rispettive proprietà che sono note. Il secondo è di tipo macro-meccanico e consiste nel definire un legame costitutivo della muratura, come materiale omogeneo, media delle proprietà delle sue componenti.

In un contesto di analisi come quello qui descritto, l'approccio microscopico richiede un livello di raffinatezza della mesh tale da rendere il modello estremamente pesante e perciò inutilizzabile, a causa di tempi di calcolo troppo lunghi. Il metodo macroscopico dell'omogeneizzazione permette invece di utilizzare griglie di elementi finiti meno dense e quindi è più appropriato per

modelli a larga scala. Per questo motivo la modellazione è stata eseguita seguendo questa seconda via.

Diversi modelli sono stati definiti per descrivere le proprietà della muratura come materiale omogeneo. Innanzitutto, come già accennato, va specificato che le proprietà del materiale definiscono la tipologia di analisi. Infatti se il materiale è modellato come puramente elastico lineare, ne deriverà che le analisi eseguite sul modello saranno di tipo lineare. Se invece nelle assegnazioni delle proprietà vien descritto anche il comportamento plastico e quindi un criterio di rottura, le analisi eseguite saranno di tipo non lineare.

Nell'intento di eseguire analisi sia di tipo lineare che non lineare, sono state definite tre tipologie di modelli:

- MODELLO ELASTICO LINEARE ISOTROPO
- MODELLO ELASTICO LINEARE ORTOTROPO
- MODELLO ELASTOPLASTICO CON DANNO (Concrete Damage Plasticity)

5.2.1.1 MODELLO ELASTICO LINEARE ISOTROPO

Si tratta del modello più semplice tra quelli utilizzati. Nelle tre direzioni principali il materiale mantiene le stesse proprietà. Sono stati adottati dunque valori unici per il modulo di Young e il coefficiente di Poisson, qui riportati nella Tabella 5-1, assieme al valore della densità. La scelta di tali valori è giustificata nel seguito

| ρ [kg/mm ³] | E [MPa] | ν |
|---------------------------------|------------|-------|
| $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 3800 | 0.2 |

Tabella 5-1: Proprietà assegnate al modello elastico lineare isotropo - MURATURA

Si noti che il valore adottato per il modulo elastico è pari a 3800 MPa, tale valore è stato definito come la media dei valori di modulo di Young nelle tre direzioni, nel caso di materiale ortotropo, che sono definiti nel paragrafo successivo.

I muri, come precedentemente descritto, presentano tamponamenti. È stato introdotto un legame costitutivo con modulo elastico ridotto del 20%, assegnato a questi elementi al fine di descrivere una discontinuità nelle proprietà meccaniche e dunque la presenza di piani indeboliti nel contatto tra muri e temponamenti. La Tabella 5-2 riporta le caratteristiche di questo secondo modello isotropo.

| ρ [kg/mm ³] | E [MPa] | ν |
|---------------------------------|------------|-------|
| $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 3040 | 0.2 |

Tabella 5-2: Proprietà assegnate al modello elastico lineare isotropo - TAMPONAMENTI

5.2.1.2 MODELLO ELASTICO LINEARE ORTOTROPO

È un modello più complesso rispetto a quello isotropo e, di conseguenza, in grado di rappresentare meglio il comportamento macroscopico del materiale. In questo caso non si ha più lo stesso comportamento in tutte le direzioni; si ha invece che esistono tre piani in cui le proprietà meccaniche del materiale rimangono invariate. I valori inseriti nel modello, relativi a modulo elastico, modulo di taglio e coefficiente di Poisson, nelle diverse direzioni, derivano da una procedura di omogeneizzazione. Essa, a partire da una cella unitaria (RVE) rappresentativa della muratura come materiale periodico e caratterizzata dalla presenza distinta di mattoni e giunti, permette di ottenere le proprietà meccaniche macroscopiche di un materiale equivalente, omogeneo, ortotropo.

Nello specifico la procedura di omogeneizzazione (riportata per intero in [8] e [9]) è stata eseguita a partire dai seguenti valori di modulo elastico e coefficiente di Poisson, relativi a mattoni (b) e malta (m): $E_b = 5155 \text{ MPa}$, $E_m = 581 \text{ MPa}$, $\nu_b = 0,15$, $\nu_m = 0,2$.

Come conseguenza della procedura di omogeneizzazione, il comportamento nelle tre direzioni risulta strettamente legato all'orientamento dell'orditura muraria. Come già illustrato nella sezione relativa le tecniche costruttive, si ha che le orditure sono differenti passando da muri a volta. È necessario dunque poter assegnare diversamente le proprietà del materiale ortotropo, in ogni elemento del modello. *Abaqus CAE*, in tal senso, permette di definire l'orientazione del materiale in ogni parte: in termini pratici, questo significa che permette di definire dei sistemi di riferimento locali, per l'assegnazione delle proprietà meccaniche nelle diverse direzioni, all'interno di ogni elemento. Si è prestata grande attenzione quindi alla definizione dei sistemi di riferimento locali di ogni parte, in modo che il comportamento globale del modello fosse il più possibile vicino a quello reale.

Nello specifico, per quanto riguarda le murature, come sistema di riferimento è stato assegnato quello globale, mentre per la volta è stata necessaria una procedura di assegnazione di molteplici sistemi di riferimento locali. Innanzitutto la parte "VOLTA" è stata partizionata in 3 celle attraverso piani trasversali: una cella centrale e due laterali, ben distinguibili in (Fig. 5-4, già inserita). Sono stati poi assegnati, un sistema di riferimento cilindrico alla cella media e due

differenti sistemi sferici nelle celle laterali. Le Figure da 5-7 a 5-9 sono esplicative di come tali orientazioni sono state definite nelle differenti celle.

Avendo orientazioni differenti nelle distinte parti, è stato necessario definire diverse sezioni per il materiale ortotropo, che si distinguono solamente per le direzioni in cui i valori dei parametri meccanici sono stati assegnati. Nelle Tabelle da 5-3 a 5-5 sono riportati dunque i dati, per ogni sezione di materiale ortotropo definita: si noti che, anche in questo caso, è stato considerato un secondo legame costitutivo a considerare le proprietà ridotte nei tamponamenti, nella parte “MURI”.

| ρ [kg/mm ³] | E_1 [MPa] | E_2 [MPa] | E_3 [MPa] | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} | G_{12} [MPa] | G_{13} [MPa] | G_{23} [MPa] |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 4501.49 | 4501.49 | 2475 | 0.65 | 0.16 | 0.09 | 1362.32 | 1028.29 | 1028.29 |

Tabella 5-3: Proprietà assegnate al modello elastico lineare ortotropo - MURI e FRENELLI (1, 2 e 3 si riferiscono agli assi del sistema di riferimento globale)

| ρ [kg/mm ³] | E_1 [MPa] | E_2 [MPa] | E_3 [MPa] | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} | G_{12} [MPa] | G_{13} [MPa] | G_{23} [MPa] |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 3601.2 | 3601.2 | 1980 | 0.65 | 0.16 | 0.09 | 1089.86 | 822.64 | 822.64 |

Tabella 5-4: Proprietà assegnate al modello elastico lineare ortotropo - TAMPONAMENTI (1, 2 e 3 si riferiscono agli assi del sistema di riferimento globale)

| ρ [kg/mm ³] | E_1 [MPa] | E_2 [MPa] | E_3 [MPa] | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} | G_{12} [MPa] | G_{13} [MPa] | G_{23} [MPa] |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 4501.49 | 2475 | 4501.49 | 0.16 | 0.65 | 0.09 | 1028.29 | 1362.32 | 1028.29 |

Tabella 5-5: Proprietà assegnate al modello elastico lineare ortotropo - VOLTA

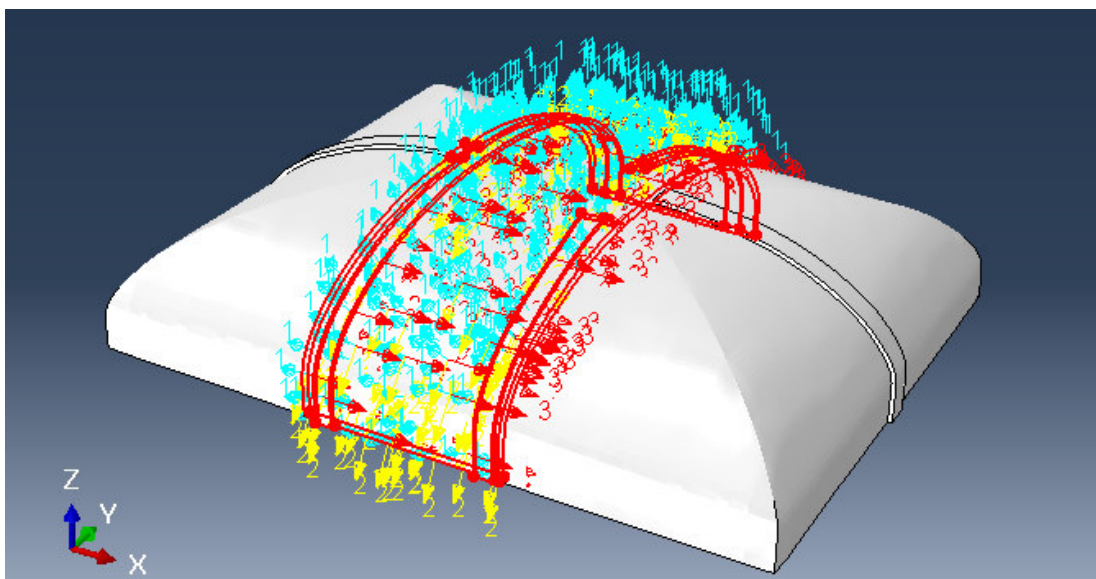


Figura 5-7: Orientamento del materiale ortotropo - sistema di riferimento cilindrico

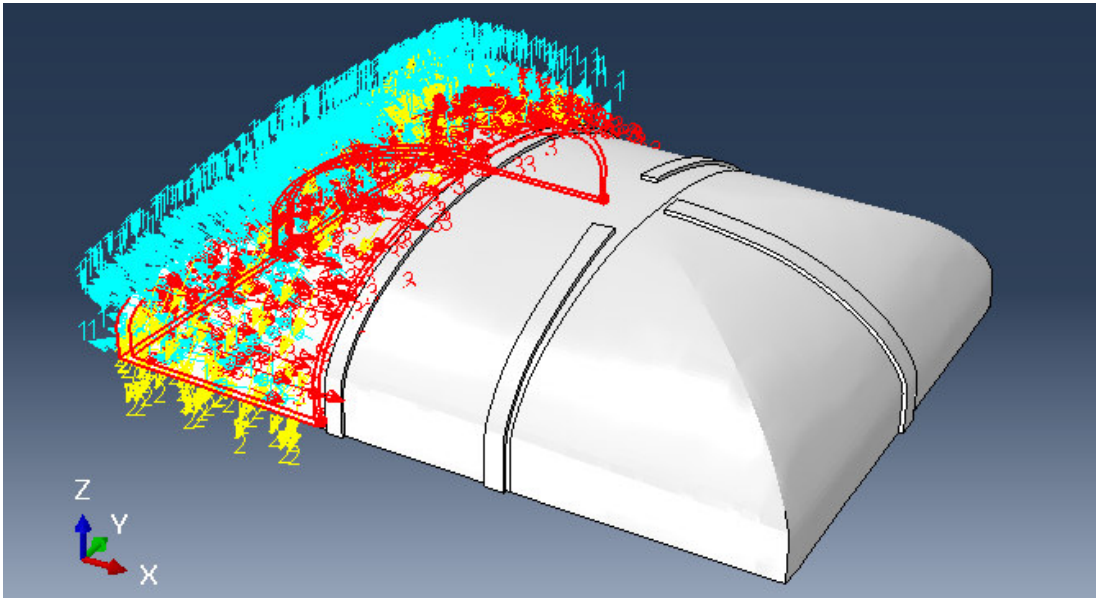


Figura 5-9: Orientamento del materiale ortotropo - sistema di riferimento sferico 1

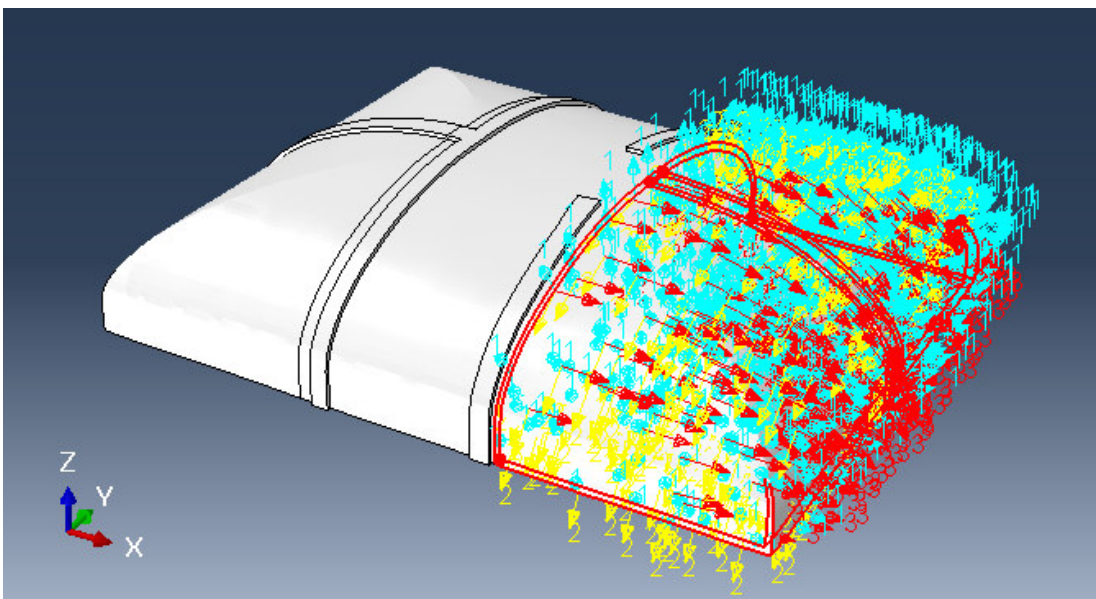


Figura 5-8: Orientamento del materiale ortotropo - sistema di riferimento sferico 2

5.2.1.3 MODELLO ELASTOPLASTICO CON DANNO (CDP)

Generalmente, gli edifici in muratura lavorano al di fuori del campo elastico in alcune delle loro regioni soggette a trazione. Le analisi non lineari permettono di studiare questo comportamento e sono dunque fondamentali per eseguire indagini più approfondite riguardo il comportamento della struttura.

Per poter eseguire questo tipo di analisi è stato necessario definire il comportamento inelastico della muratura, e quindi un criterio di rottura e i parametri di duttilità.

Il software *Abaqus CAE* mette a disposizione un modello elastoplastico chiamato *Concrete Damage Plasticity* (CDP) che originariamente era stato ideato per descrivere il comportamento del calcestruzzo ma si è rivelato efficace anche nel descrivere quello di tutti i materiali quasi fragili, tra cui comprese anche le murature. Di seguito è riportata una descrizione del modello, nella teoria alla sua base e nella definizione dei parametri ad esso associati.

Il CDP è un modello continuo, elastoplastico con danno. Esso utilizza i concetti dell'elasticità isotropa danneggiata in combinazione con la plasticità isotropa a trazione e compressione per descrivere il comportamento inelastico del materiale. Innanzitutto si considera che le principali tipologie di collasso nel materiale modellato siano la fessurazione a trazione e lo schiacciamento a compressione. Viene poi definito che la superficie di snervamento sia controllata da due variabili di incrudimento:

- ε_t^{pl} : deformazione plastica equivalente a tensione;
- ε_c^{pl} : deformazione plastica equivalente a compressione.

Esse sono riconoscibili all'interno dei diagrammi in Figura 5-10 che definiscono il comportamento uniassiale del materiale descritto. Come si può notare, la risposta è caratterizzata da una plasticità con danno, sia a trazione che a compressione.

Nello specifico, il comportamento uniassiale a trazione presenta un primo tratto elastico lineare che si conclude quando la tensione raggiunge il valore σ_{t0} , che è lo sforzo massimo a trazione. Il raggiungimento di questo valore corrisponde con l'instaurarsi di micro-fratture all'interno del materiale. Successivamente si ha un tratto di softening della risposta deformazione-sforzo, che rappresenta la propagazione delle micro-fratture e che induce alla localizzazione delle deformazioni nella struttura.

Anche il comportamento uniassiale a compressione presenta un primo tratto elastico lineare che termina con il raggiungimento dello sforzo σ_{c0} . Superato questo valore di sforzo il materiale entra in campo plastico, in cui si ha una prima fase di incrudimento fino al valore di sforzo ultimo, σ_{cu} , cui segue un tratto di softening.

Dai due diagrammi si può notare anche come, entrando in campo plastico, il materiale subisce un danneggiamento in termini di rigidità elastica, che si nota in fase di scarico. Questo danno può essere descritto attraverso due variabili:

- $d_t = d_t(\varepsilon_t^{pl})$: variabile del danno a trazione;
- $d_c = d_c(\varepsilon_c^{pl})$: variabile del danno a compressione.

Esse sono in grado di definire il materiale in ogni suo stato di deterioramento: dall'assenza di danno, se il loro valore è nullo, alla totale perdita di resistenza se il valore è unitario. Considerando quanto appena descritto, e indicando il modulo elastico del materiale non danneggiato con E_0 , è possibile definire il legame sforzo-deformazione sotto sforzo uniaassiale (Eq. 5-1 e 5-2):

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl}) \quad (5-1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl}) \quad (5-2)$$

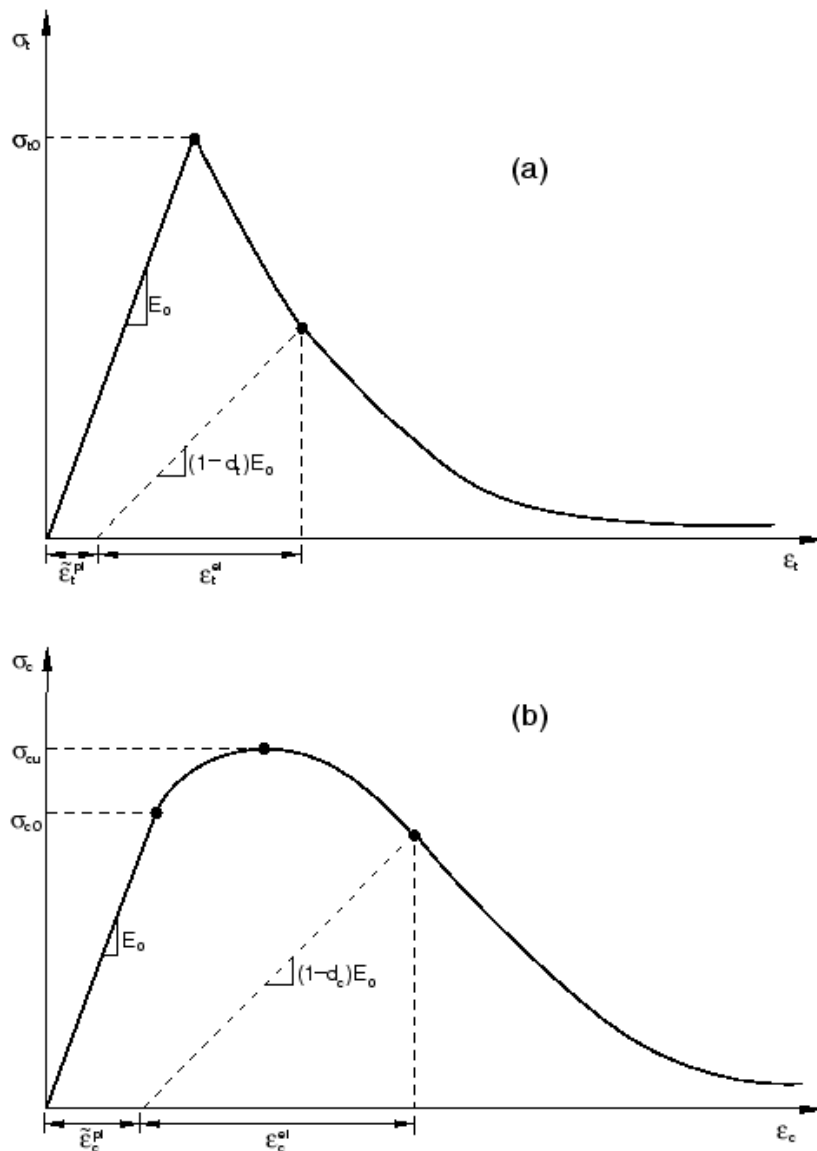


Figura 5-10: Relazioni sforzo-deformazione a trazione (a) e compressione (b)

Per quanto riguarda invece le deformazioni di fessurazione, che si instaurano a seguito del raggiungimento dello sforzo massimo, esse sono definiti secondo la seguente fomulazione:

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_t^{el} \quad (5-3)$$

Dove ε_t è la deformazione totale a trazione mentre $\varepsilon_t^{el} = \sigma_{t0}/E_0$ è la componente di deformazione elastica a trazione.

Invertendo la formula (5-1), si ha che la deformazione plastica si può ottenere secondo l'equazione (5-4):

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} = \frac{d_t}{(1 - d_t)} \cdot \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (5-4)$$

Il comportamento successivo alla rottura a compressione dipende invece dalla deformazione inelastica (Eq. 5-5):

$$\varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{c0}^{el} \quad (5-5)$$

Dove ε_c è la deformazione totale a compressione, mentre $\varepsilon_{c0}^{el} = \sigma_{c0}/E_0$ è la componente di deformazione elastica di compressione.

La deformazione plastica di compressione, non corrisponde a quella inelastica, ma dipende da essa secondo l'equazione (5-6):

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \cdot \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (5-6)$$

Sulla base di quanto esposto fino ad ora in un registro prettamente teorico, *Abaqus CAE* richiede, a livello pratico, l'inserimento delle curve di comportamento monoassiale, per punti. Più correttamente, viene richiesto di inserire per punti il tratto plastico delle curve, mentre il comportamento elastico isotropo è definito a priori, inserendo i valori di modulo elastico e coefficiente di Poisson. In quanto a questi ultimi, sono stati adottati i valori già utilizzati per la definizione del modello elastico isotropo (Tab. 5-1 e 5-2).

Nelle Tabelle 5-6 e 5-7 sono presentati i valori inseriti per la definizione dei tratti plastici del comportamento a compressione e trazione (Ghiassi e Milani [10]). Si noti che i valori di defomazione richiesti corrispondono alla sola componente plastica. Questo giustifica l'assegnazione di deformazioni nulle in corrispondenza dei valori massimi di sforzo, infatti al momento del raggiungimento di tali valori di sforzo, la deformazione è non nulla, ma puramente elastica. Ne risulta quindi che in tali punti la deformazione plastica non è ancora stata innescata e quindi è pari a 0.

| Yield Stress [MPa] | Inelastic Strain |
|-----------------------|------------------|
| 2.4 | 0 |
| 2.1 | 0.005 |
| 2.1 | 0.01 |
| 1.8 | 0.1 |

Tabella 5-6: Definizione del comportamento plastico uniassiale a compressione

| Yield Stress [MPa] | Cracking Strain |
|-----------------------|-----------------|
| 0.08 | 0 |
| 0.0005 | 0.005 |
| 0.0005 | 0.01 |

Tabella 5-7: Definizione del comportamento plastico uniassiale a trazione

Il software, nella definizione del modello CDP, richiede l'inserimento di altri parametri in input. In primo luogo, quelli necessari alla definizione del potenziale plastico.

Viene assunto un flusso di potenziale elastico non associato, G . Esso è definito mediante la funzione Drucker-Prager (Eq. 5-7):

$$G = \sqrt{(\epsilon\sigma_{t0}\tan\psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p}\tan\psi \quad (5-7)$$

Dove:

- \bar{q} e \bar{p} sono rispettivamente lo sforzo equivalente di Mises e la pressione idrostatica.
- ψ è l'angolo di dilatanza, misurato nel piano $p - q$, per pressione di confinamento alta. Esprime la variazione di volume a seguito dell'applicazione di sforzi di taglio. È assunto pari a 10° , come consigliato da letteratura.
- σ_{t0} è la tensione uniassiale di collasso a trazione, precedentemente definita.
- ϵ è un parametro indicato come eccentricità. Esso indica la velocità a cui il potenziale converge al suo asintoto. La funzione iperbolica è definita in modo tale che per valori di eccentricità tendenti a 0, il potenziale tende a una linea retta. Il valore di default indicato dal software è 0.1, il che implica un angolo di dilatanza costante, per un ampio spettro di valori di pressione di confinamento. Aumentando questo valore di eccentricità, si ottiene una maggiore curvatura del potenziale, e di conseguenza una

maggiore rapidità di crescita dell'angolo di dilatanza, al diminuire della pressione di confinamento. Se invece si utilizzano valori significativamente minori, rispetto a quello definito di default, si potrebbero incontrare problemi di convergenza, quando il materiale è soggetto a livelli di pressione di confinamento molto ridotti. Si è deciso dunque di mantenere il valore di eccentricità pari a 0.1.

Nella definizione del modello Concrete Damage Plasticity, il software richiede di assegnare un valore al parametro K_c . Si tratta di una quantità legata alla definizione del dominio plastico. Quest'ultimo si basa sul criterio di plasticizzazione di Drucker-Prager modificato, ed è riportato sul piano deviatorico nella Figura 5-11. Nello specifico, il parametro K_c è definito come il rapporto tra l'invariante secondo di sforzo, sul meridiano a trazione e uno dei meridiani a compressione.

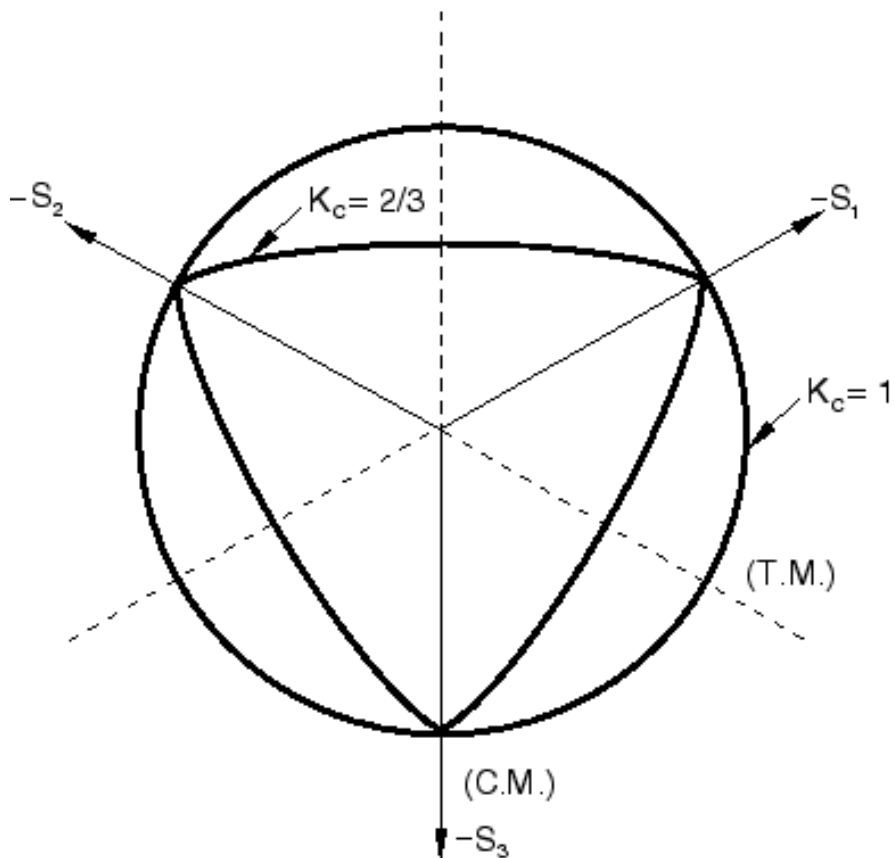


Figura 5-11: Dominio plastico su piano deviatorico

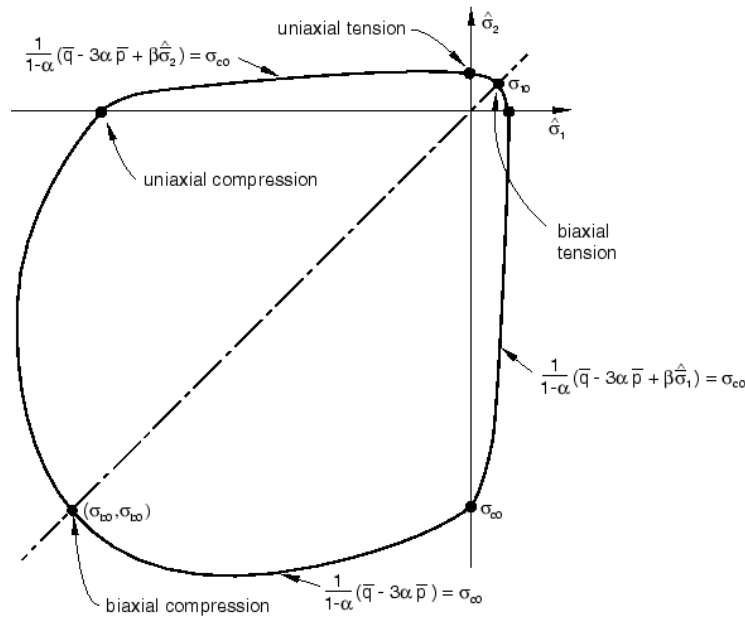


Figura 5-12: Dominio plastico su piano biassiale

L'illustrazione del dominio, sul piano deviatorico, mostra come la sua frontiera cambi al variare del parametro K_c . In questo caso specifico si è deciso di mantenere un valore pari a $2/3$, come suggerito dal manuale *Abaqus CAE* per gli utenti.

È stato ipotizzato per default anche il valore di $f_{b0}/f_{c0} = 1.16$, ovvero il rapporto tra la resistenza equibiassiale iniziale e la resistenza a compressione iniziale. Infine è stato necessario definire il comportamento viscoso del materiale. Come descritto in precedenza, le risposte a sforzo uniassiale sono caratterizzate, in entrambe le direzioni, da rami di softening e riduzione della rigidità. Tale caratteristica può causare problemi alla convergenza, se il comportamento viscoso del materiale è trascurato, nello specifico, se non viene fatto uso di regolarizzatori viscoplastici delle equazioni di legame. In letteratura sono sconsigliati valori superiori a 0.002 per il parametro di viscosità, in quanto potrebbero portare a una non veridicità dei risultati. È stato assegnato dunque un valore di viscosità diverso da 0, ma comunque molto basso, pari a 10^{-6} , tale da migliorare il tasso di convergenza, senza comunque compromettere la realistica e accuratezza dei risultati.

Nella Tabella 5-8 vengono dunque riepilogati i parametri inseriti per la definizione del modello CDP.

| ψ | ϵ | f_{b0}/f_{c0} | K_c | Parametro di viscosità |
|--------|------------|-----------------|-------|------------------------|
| 10° | 0.1 | 1.16 | 2/3 | 10 ⁻⁶ |

Tabella 5-8: Parametri per la definizione del modello CDP

| Damage parameter | Cracking Strain |
|------------------|-----------------|
| 0 | 0 |
| 0.95 | 0.005 |

Tabella 5-9: Parametri di interpolazione per la definizione del danno a trazione

È stata inoltre definita una scala del danno in funzione delle deformazioni di fessurazione. La relazione è di tipo lineare, definita per interpolazione, secondo i valori illustrati nella Tabella 5-9.

Infine, nella finalità di eseguire analisi con carico termico, è stato assegnato anche un valore al coefficiente di dilatazione termica, pari a $6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$, esso cade nell'intervallo suggerito dall'Eurocodice 6 [11] per murature in mattoni e malta (da 4 a $8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$).

5.2.2 Catene

Per quanto riguarda le catene, esse sono realizzate in acciaio. È stato quindi assegnato, in tutte le analisi, un materiale di tipo lineare elastico, dotato di un modulo di Young pari a quello dell'acciaio, di valore *210000 MPa*.

Si noti che tale valore di modulo elastico è relativo ad acciai attualmente in uso. Si ritiene esista la possibilità che l'acciaio, utilizzato per la realizzazione delle catene, possa avere un modulo di Young inferiore a quello utilizzato, non avendo però abbastanza informazioni riguardo le proprietà del materiale, si è preferito considerare questo valore.

In *Abaqus CAE*, la definizione delle proprietà degli elementi Wire 3D non si limita solo all'assegnazione dei parametri meccanici del materiale ma anche quella delle dimensioni geometriche della sezione nella finestra *profiles*. Nello specifico, è stata definita una sezione di geometria rettangolare avente altezza *50mm* e base *10mm*, secondo le misurazioni effettuate in situ. È stato infine assegnato l'orientamento degli elementi catena come da software default.

Come già affermato, questa caratterizzazione del materiale è stata considerata per tutti i tipi di analisi. Non è stato infatti inserito un valore di sforzo di snervamento: questa scelta è giustificata dall'ipotesi, poi verificata in fase di analisi, che le catene rimangano in campo elastico per tutta la durata delle analisi, considerando i carichi realmente agenti sulla struttura.

5.3 Definizione dei vincoli

La applicazione dei vincoli esterni, avviene sul modello assemblato, nel modulo “load”. Le scelte nella definizione delle condizioni al contorno sono state eseguite basandosi sull’osservazione delle collaborazioni dei muri del salone con il resto dell’edificio.

Per quanto riguarda il vincolo a terra, è stato inserita una condizione “pinned”, la quale blocca le traslazioni in ogni direzione. Si noti che non è stato necessario vincolare le rotazioni, in quanto il modello consiste di elementi solidi tridimensionali.

È stato poi analizzato il grado di ammassamento tra le quattro pareti e ogni altro elemento murario esterno alla stanza 3.27. Nelle regioni di contatto in cui esisteva una connessione salda, sono stati inseriti vincoli a carrello, nella direzione del muro proveniente dall’esterno. Dove gli elementi non risultavano ammassati, non è stato imposto alcun tipo di vincolo. Questo ha permesso di

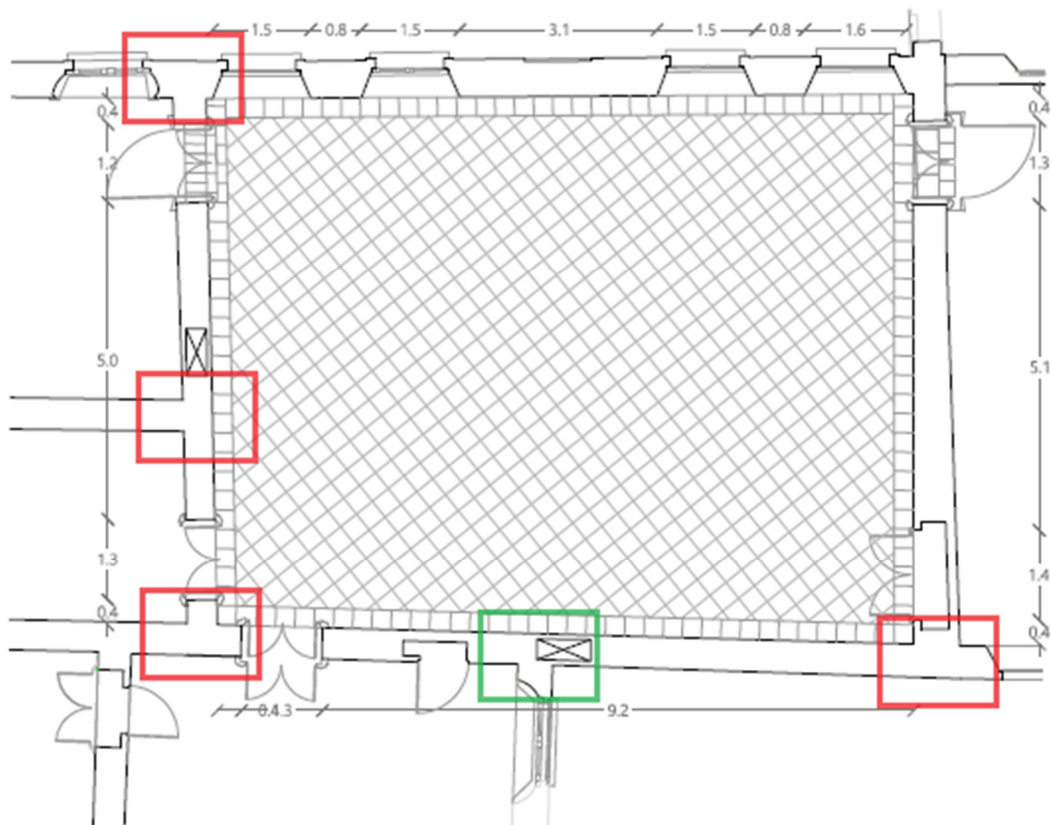


Figura 5-13: Regioni soggette ad ammassamenti con i muri esterni: in rosso le interazioni estese per tutta l'altezza dell'edificio, in verde un'interazione che si estende da quota terra fino a quota di calpestio del primo piano

simulare ragionevolmente le interazioni del salone con le parti del palazzo che lo circondano. Nella pianta in Figura 5-13 sono evidenziate le regioni in cui sono stati imposti i vincoli, evitando però l'introduzione di vincoli di contatto nonlineare che avrebbero appesantito ulteriormente le analisi. Sono poi presentate queste condizioni al contorno, in Figura 5-14, per come imposte nel software di calcolo.

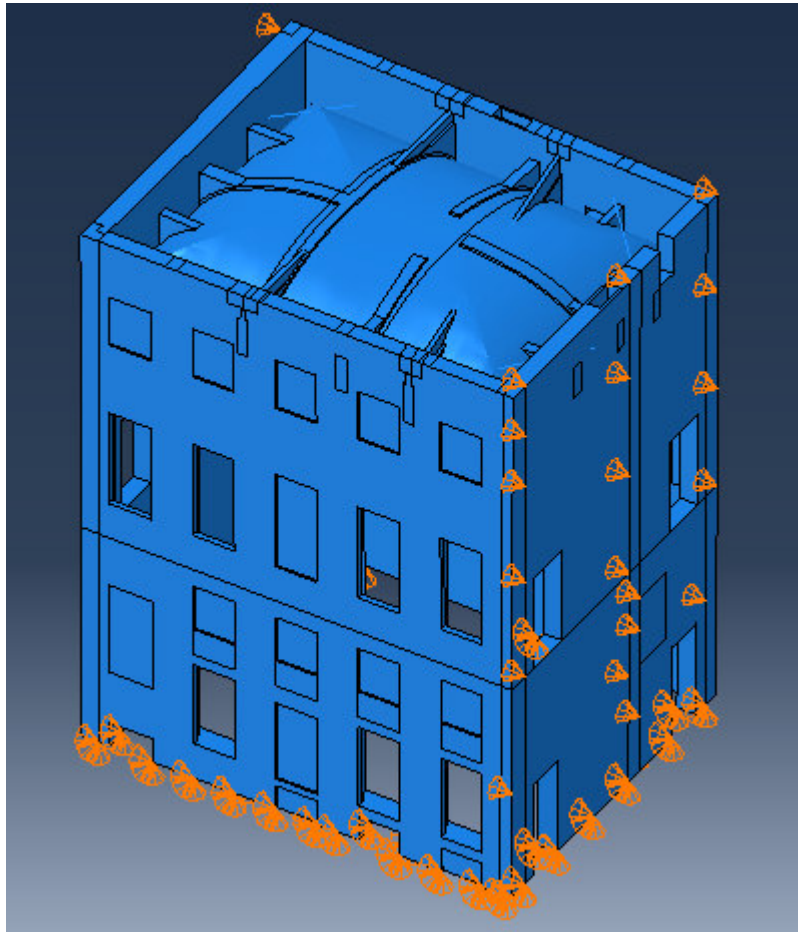


Figura 5-14: Condizioni al contorno inserite sul modello assemblato

5.4 Definizione dei Carichi

Successivamente alla definizione delle condizioni al contorno, sono stati imposti tutti i carichi agenti. Da un'attenta analisi si è potuto constatare che il modello, per come definito, è soggetto alle seguenti sollecitazioni:

- Peso proprio;
- Peso delle porzioni di muratura al di sopra delle pareti nord e sud;
- Peso della copertura;
- Peso del solaio.

A seguire, una esposizione dettagliata di come tali carichi sono stati calcolati e definiti a livello pratico in *Abaqus CAE*.

5.4.1 Peso proprio

Nel caso della sala 3.27, il peso proprio è il carico più ingente cui il sistema strutturale è sottoposto. Esso è stato definito come carico gravitazionale all'interno del software. Questa tipologia di carico, in *Abaqus CAE*, definisce automaticamente il peso di ogni elemento, sulla base dei seguenti dati:

- *Volume*: noto in quanto nota la geometria
- *Densità*: definita per ogni elemento dal momento in cui a ciascuno di essi sono state assegnate le proprietà materiche;
- *Magnitudo*: pari al valore dell'accelerazione di gravità, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

5.4.2 Peso delle porzioni di muratura gravante sulle pareti nord e sud

Osservando prospetti e report fotografico, si può notare come, a differenza di come modellato, i muri nord e sud del salone, all'estradosso, non terminano orizzontalmente come gli altri due, di lunghezza maggiore. Essi infatti si estendono maggiormente in altezza e si chiudono formando una sagoma a due falde, per permettere l'appoggio della copertura. La scelta di non includere queste porzioni sommitali dei muri nel modello, è giustificata dall'evidenza che in fase di analisi la loro presenza non avrebbe influenzato i risultati, se non per il carico proveniente dal loro stesso peso.

Non avendo potuto inserire il contributo di queste porzioni all'interno del peso proprio, esso è stato inserito a posteriori come carico distribuito sulle due pareti.

Esso è stato calcolato, per ciascuno dei due muri, dapprima come carico concentrato, mediante l'equazione (5-8):

$$P = \rho \cdot g \cdot V \quad (5-8)$$

Dove ρ è la densità della muratura, che moltiplicata per l'accelerazione di gravità (g) fornisce il peso specifico, mentre V è il volume dell'intera porzione sovrastante il muro modellato. Il volume è stato definito a partire dalla geometria, come da planimetrie e prospetti.

Successivamente il carico è stato distribuito sulla superficie di sezione del muro ($p = P/As$), in modo da poterlo inserire come "surface traction" nel software (Fig 5-15). Nella Tabella 5-10 sono inseriti i dati relativi alla procedura appena descritta.

| MURO | ρ [kg/mm ³] | V [m ³] | P [kN] | As [mm ²] | p [MPa] |
|------|---------------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------|--------------|
| Nord | $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 5.3098 | 93.7605 | 5.5670 | 0.02446 |
| Sud | $1.8 \cdot 10^{-6}$ | 7.7103 | 136.1478 | 3.8338 | 0.02446 |

Tabella 5-10: Calcoli relativi al peso delle porzioni di muro sorrette dalle pareti nord e sud

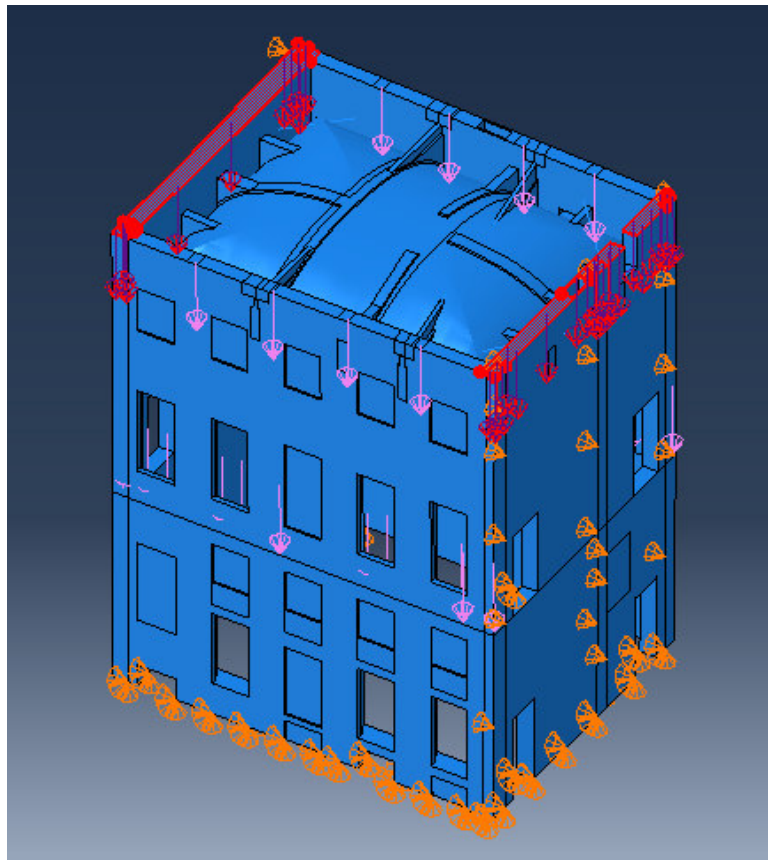


Figura 5-15: Pesì delle porzioni di muro sorrette dalle pareti nord e sud (in rosso), inseriti in Abaqus CAE

5.4.3 Peso della copertura

L'ala est di palazzo Magio Grasselli, dove si trova il salone 3.27, è caratterizzata da una copertura a doppia falda. Viene qui approfondito come il carico proveniente dal tetto è stato considerato in fase di modellazione, successivamente a un'analisi volta a comprendere la struttura della copertura stessa.

La documentazione fotografica e la nuvola di punti estradossale, in questa fase di lavoro, sono state fondamentali per comprendere il sistema strutturale in copertura del salone. Si tratta di un tetto in legno, con rivestimento esterno in coppi di laterizio, sorretto da un sistema strutturale formato da 4 capriate lignee (Fig. 5-16). Nella documentazione relativa il palazzo è presente la "Relazione tecnica con calcoli esecutivi delle strutture" redatta dall'Ing. Alberto Dusi [3], in cui vengono riportati i calcoli eseguiti su una buona parte delle coperture delle stanze dell'edificio. Purtroppo il tetto del salone 3.27 non è compreso tra le strutture studiate, ma la relazione risulta comunque fondamentale in quanto fornisce importanti dati riguardo il peso della copertura. Essi sono ovviamente riferiti ad altre stanze ma si ritiene comunque affidabile, ipotizzando una continuità delle coperture, quanto meno nei materiali utilizzati per la costruzione.



Figura 5-16: Fotografia di parte di una delle capriate del sistema strutturale del tetto

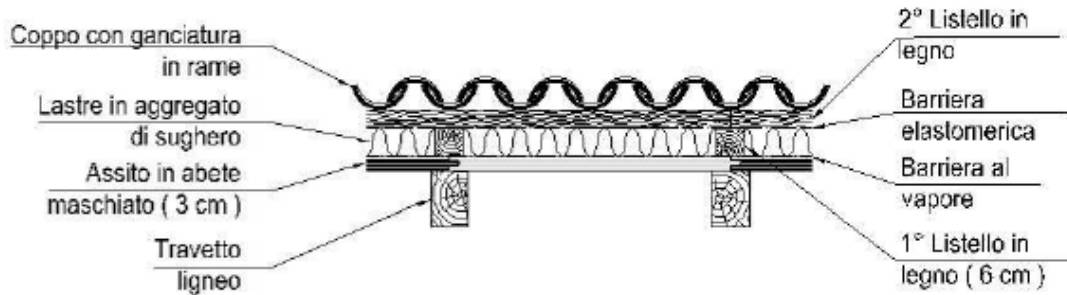


Figura 5-17: schema della copertura lignea

| Elemento | Peso [N/mm ²] |
|--|------------------------------|
| Coppi ed embrici | $0.60 \cdot 10^{-3}$ |
| Lastre in sughero | $0.04 \cdot 10^{-3}$ |
| Barriera elastomerica e barriera al vapore | $0.01 \cdot 10^{-3}$ |
| Cantinelle e travetti | $0.12 \cdot 10^{-3}$ |
| 2° strato cantinelle | $0.12 \cdot 10^{-3}$ |
| Tavolato | $0.38 \cdot 10^{-3}$ |
| Travi | $0.33 \cdot 10^{-3}$ |
| Totale | $1.60 \cdot 10^{-3}$ |

Tabella 5-11: calcolo del peso della copertura

In Figura 5-17 è riportato un estratto della relazione, raffigurante uno schema della copertura, e nella Tabella 5-11 il calcolo eseguito per ottenere il peso in kg/m^2 della copertura.

Il dato di peso appena riportato non include il contributo derivante dal peso proprio delle 4 capriate. Allo scopo di prendere in considerazione quest'ultimo, non essendo in possesso di alcun dato o documentazione relativa, è stato applicato un incremento del 20% al peso della copertura. Il peso per unità di superficie dell'intero sistema strutturale considerato, è stato il seguente:

$$p_{sup} = 1.92 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$$

A questo punto, si è proseguito considerando l'ipotesi che il carico derivante dalla totalità della copertura, fosse sorretto, nella sua totalità, dal sistema di capriate. Sono state definite dunque 4 superfici di influenza, qui riportate in Figura 5-18, mediante le quali è stato definito il carico assegnato a ciascuna delle capriate.

Considerando come esempio, la generica area di influenza i , il carico superficiale p_{sup} è stato moltiplicato per il suo spessore b_i ad ottenere un valore di carico lineare p_{lin} , applicato poi sulla relativa capriata come in Figura 5-19. Attraverso questo semplice schema statico è stato possibile ottenere le reazioni vincolari verticali (Eq. 5-9), ai due estremi della capriata:

$$R_A = R_B = \frac{p_{lin} \cdot l_i}{2} \quad (5-9)$$

Dove l_i è la somma delle lunghezze delle due travi diagonali che compongono la capriata, e non la loro proiezione in orizzontale.

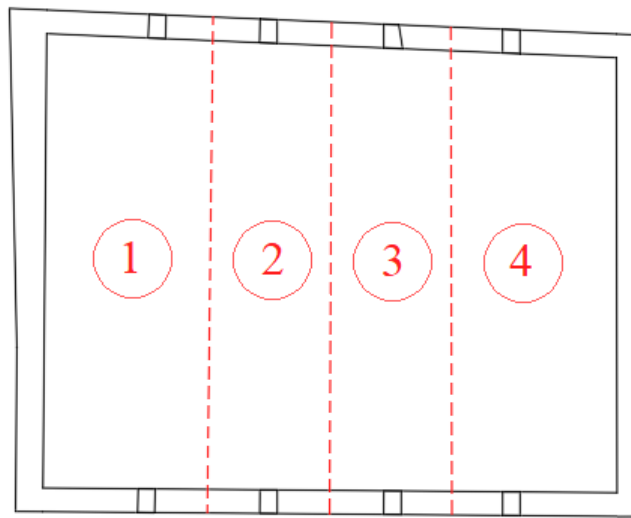


Figura 5-19: Aree di influenza di ciascuna trave

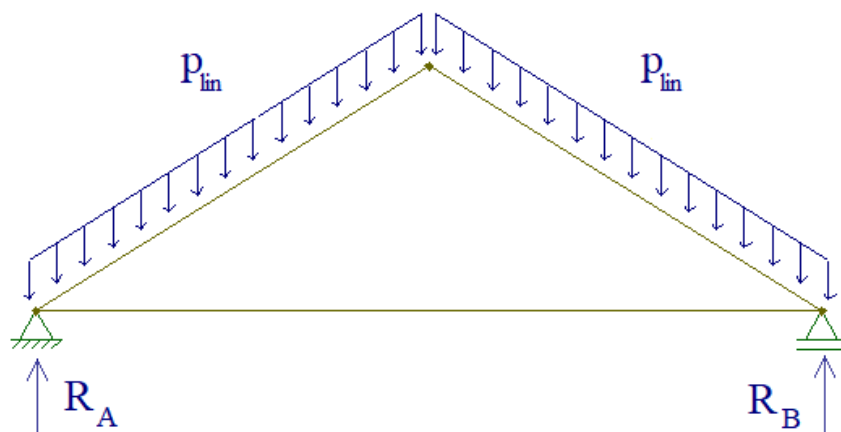


Figura 5-18: Schema statico per il calcolo delle reazioni agli appoggi delle capriate

Tali reazioni vincolari rappresentano il carico del sistema copertura, che le capriate scaricano sui muri mediante il vincolo di appoggio.

Nella definizione del modello in *Abaqus CAE*, questo carico è stato definito con delle forze uguali ma di verso opposto alle reazioni vincolari, applicate nei punti di appoggio delle travi orizzontali facenti parte della capriata. Tali sollecitazioni non sono state inserite come forze concentrate: il valore ottenuto dal calcolo sullo schema statico è stato distribuito sulla superficie dell'impronta delle capriate sui muri. Nella Tabella 5-12, i calcoli completi sono riportati, in Figura 5-20, un'illustrazione del carico copertura applicato sul modello come descritto.

| Capriata | b [m] | l [mm] | p_{lin} [kN/m] | R_A $= R_B$ [kN] | As_A [mm ²] | As_B [mm ²] | p_A [MPa] | p_B [MPa] |
|----------|------------|-------------|---------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|
| 1 | 3.714 | 10.970 | 7,13 | 39.113 | 0.1472 | 0.1460 | 0.2657 | 0.2678 |
| 2 | 2.290 | 10.907 | 4,40 | 23.977 | 0.1489 | 0.1489 | 0.1611 | 0.1610 |
| 3 | 2.310 | 10.838 | 4,44 | 24.034 | 0.1457 | 0.1494 | 0.1650 | 0.1609 |
| 4 | 2.586 | 10.771 | 6,89 | 37.083 | 0.1486 | 0.1481 | 0.2495 | 0.2505 |

Tabella 5-12: Calcoli di redistribuzione del peso della copertura

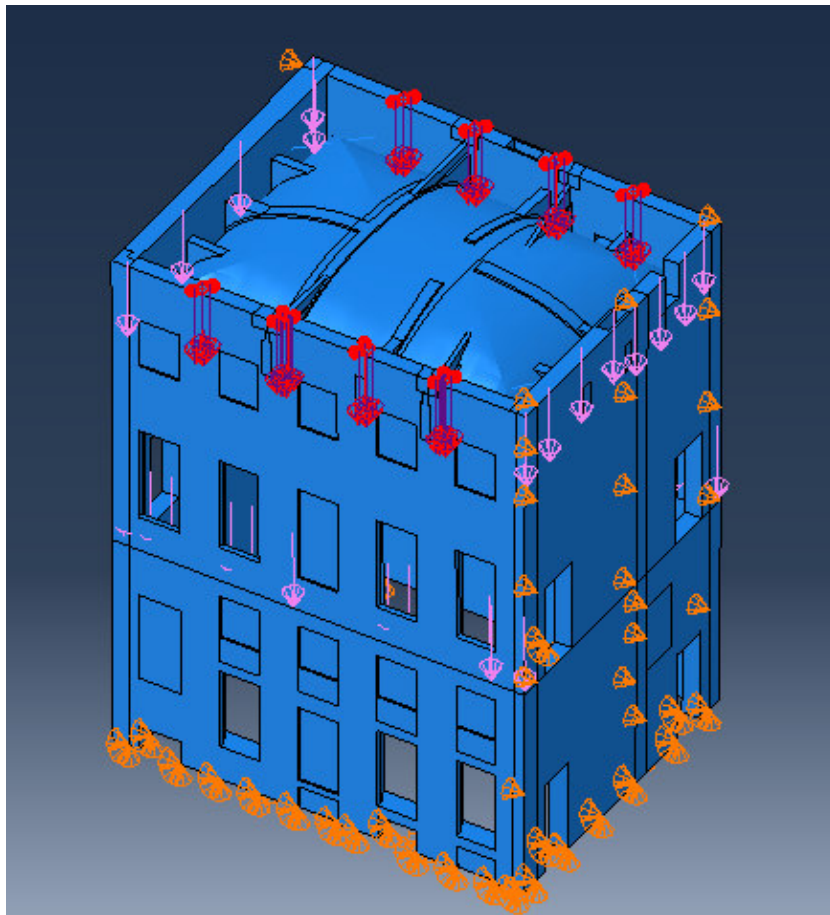


Figura 5-20: Peso della copertura (in rosso), inserito in Abaqus CAE

5.4.4 Contributo del solaio

Come bene noto, il modello del salone è stato definito con i muri aventi uno sviluppo da quota terra fino al soffitto. Questa scelta comporta la necessità di considerare, in fase di modellazione, la presenza del solaio di interpiano.

Simulare la presenza del solaio alla quota di calpestio del primo piano comporta il dover considerare il carico derivante dal suo peso ma anche considerare la funzione strutturale che esso ricopre. Come già descritto nel capitolo riguardante le tecniche costruttive, il solaio è infatti sostenuto da un sistema di 4 travi (Fig. 5-21), le cui teste alle due estremità sono legate con la muratura. Questo comporta che questi elementi strutturali, oltre a scaricare il peso del solaio sulle murature, fungono da presidio passivo che entra in azione solo se sollecitato, in questo caso specifico da azioni orizzontali nella loro direzione assiale. Fungono dunque da elementi che danno un contributo di rigidità alla struttura. Quanto descritto può essere schematizzato andando a connettere i due estremi di

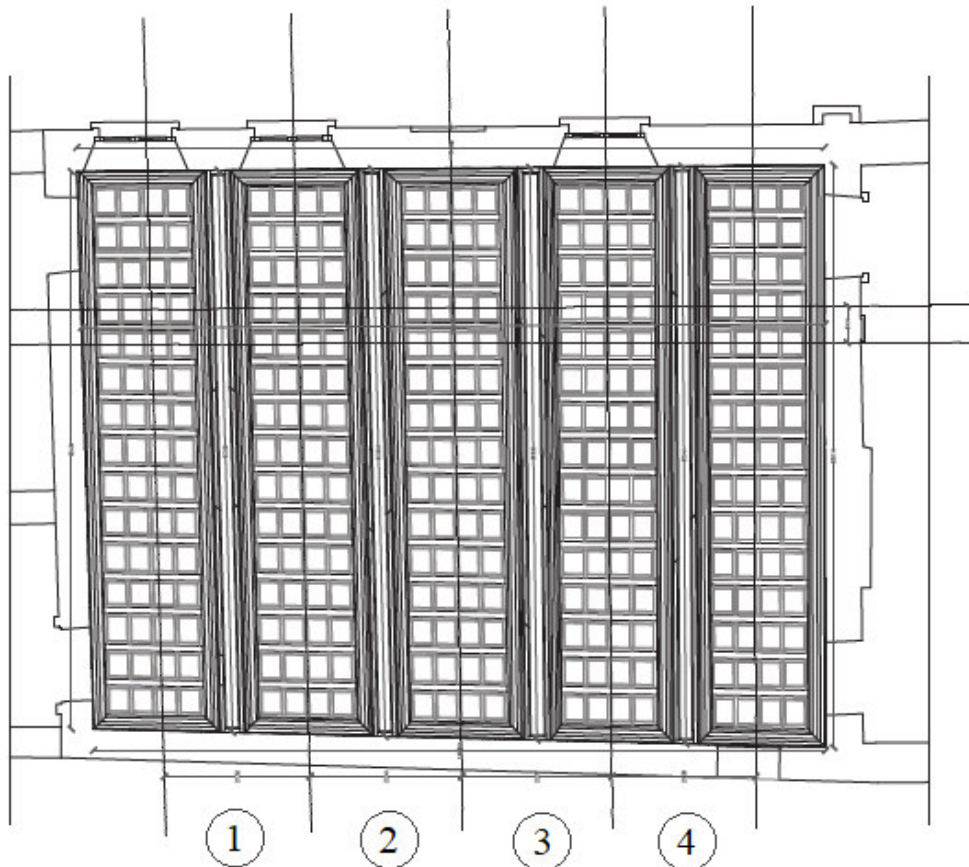


Figura 5-21: Schema grafico del solaio

appoggio di ogni trave attraverso molle lineari, dotate di una rigidezza così definita:

$$k_i = \frac{E \cdot A_i}{l_i} \quad (5-10)$$

Dove:

- k_i è la rigidezza riferita alla i -esima molla, a simulare l' i -esima trave;
- $E = 12500 \text{ MPa}$ è il modulo elastico del legno;
- A_i è l'area della sezione dell' i -esima trave;
- l_i è la lunghezza dell' i -esima trave.

In Figura 5-22 sono riportate le sezioni schematizzate e quotate di ogni trave, mentre nella Tabella 5-13 sono indicati i valori di rigidezza assegnati a ciascuna molla e i relativi calcoli. Si noti che per le travi 1, 2 e 3, il valore di k calcolato è stato incrementato del 10%, in quanto si è considerata la presenza, in loro prossimità, di catene in acciaio, elementi che apportano un contributo di rigidezza aggiuntivo al sistema del solaio.

Le molle sono quindi state inserite in *Abaqus CAE* (Fig. 5-23) nel modulo “properties” attraverso il percorso *Special>Springs/Dashpots>Create*.

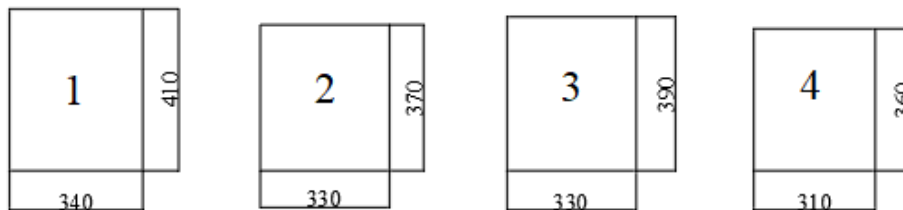


Figura 5-22: Schematizzazione delle sezioni delle quattro travi (quote in mm)

| Trave/Molla | A [m ²] | l [m] | k [kN/m] |
|-------------|--------------------------|------------|---------------|
| 1 | 0.1394 | 8.967 | 213755,99 |
| 2 | 0.1221 | 8.893 | 188786,12 |
| 3 | 0.1287 | 8.810 | 200876,89 |
| 4 | 0.1116 | 8.726 | 159876,22 |

Tabella 5-13: Calcolo delle rigidezze assegnate alle molle

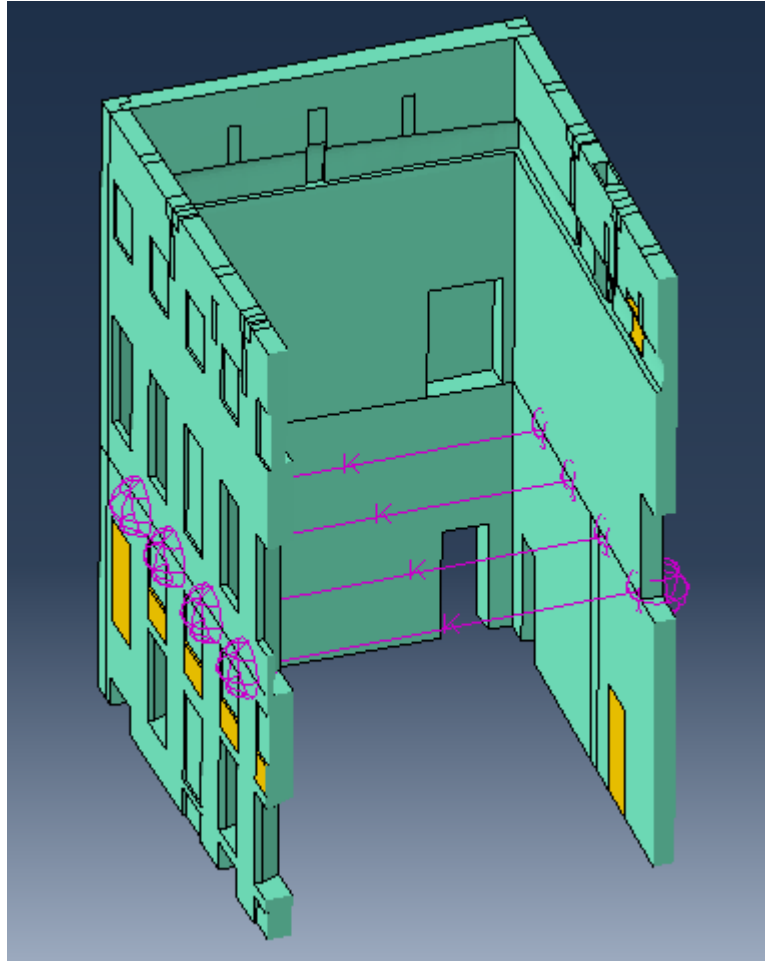


Figura 5-23: Molle di simulazione delle travi come presidio passivo, inserite in Abaqus CAE

Per quanto riguarda invece il calcolo del peso del solaio, si è potuto ottenere i dati riguardanti i pesi per unità di superficie delle sue diverse componenti da una relazione tecnica di calcolo, presente nella documentazione. In Figura 5-24, uno schema della stratificazione degli elementi nel solaio e nella Tabella 5-14 il calcolo del suo peso per unità di superficie.

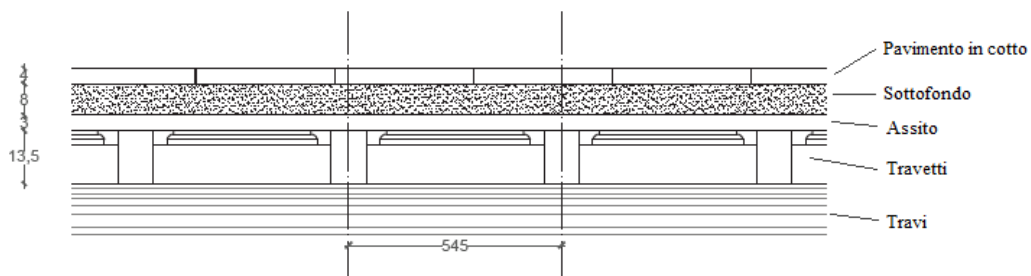


Figura 5-24: Schema della sezione del solaio nella direzione delle travi

| Elemento | Peso [N/mm ²] |
|--------------------|------------------------------|
| Pavimento in cotto | $0.68 \cdot 10^{-3}$ |
| Sottofondo | $1.60 \cdot 10^{-3}$ |
| Assito | $0.18 \cdot 10^{-3}$ |
| Travetti | $0.12 \cdot 10^{-3}$ |
| Travi | $0.23 \cdot 10^{-3}$ |
| Totale | $2.81 \cdot 10^{-3}$ |

Tabella 5-14: Definizione del peso per unità di superficie del solaio

Come già visto per il peso della copertura, per fare in modo che il carico da peso del solaio fosse concorde alle unità di misura utilizzate nel modello, è stato convertito in *MPa*. Ne è risultato dunque:

$$p_{sup} = 2,81 \cdot 10^{-3} MPa$$

Se per il carico della copertura, si è ipotizzato che le 4 capriate avessero in carico tutto il peso della copertura per poi scaricarlo ai muri attraverso un vincolo di appoggio, in questo caso come ipotesi si è considerato che il sistema solaio scaricasse tutto il peso sull'intera superficie di sezione dei due muri perpendicolari alle trave. È stata fatta questa ipotesi perché le travi non sono le uniche parti del solaio che comunicano con i muri: avendo dunque un'incertezza, riguardo la reale distribuzione del carico si è preferito optare per la soluzione di seguito descritta.

Una volta ottenuto il carico per unità di superficie, a partire da esso è stato ottenuto il carico lineare applicato sulle due pareti perpendicolari alle travi, mediante l'equazione (5-11):

$$p_{lin} = \frac{p_{sup} \cdot \bar{l}_t}{2} \quad (5-11)$$

Dove $\bar{l}_t = 8427.5 \text{ mm}$ è la media delle lunghezze delle travi.

Successivamente, per ogni parete, il carico è stato ridistribuito come carico superficiale, secondo la(5-12):

$$p_i = \frac{p_{lin} \cdot l_i}{As_i} \quad (5-12)$$

Dove:

- p_i è il carico distribuito sulla superficie di sezione della *i*-esima parete, con indice $i = 1,2$;
- l_i è la lunghezza dell'*i*-esima parete;
- As_i è l'area della superficie di sezione della *i*-esima parete.

Nella Tabella 5-15 sono riportati i calcoli e i risultati dell'intera procedura descritta. I risultati, in termini di carichi distribuiti, sono stati inseriti come *surface tractions* in input nel modello *Abaqus CAE* (Fig 5-25).

| Parete | p_{lin} [kN/m] | l [m] | A_s [m ²] | p_i [N/mm ²] |
|--------|---------------------|------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 11.82 | 11.843 | 7.1562 | 0.0196 |
| 2 | 11.82 | 11.952 | 5.7227 | 0.02469 |

Tabella 5-15: Calcoli di redistribuzione del carico da solaio

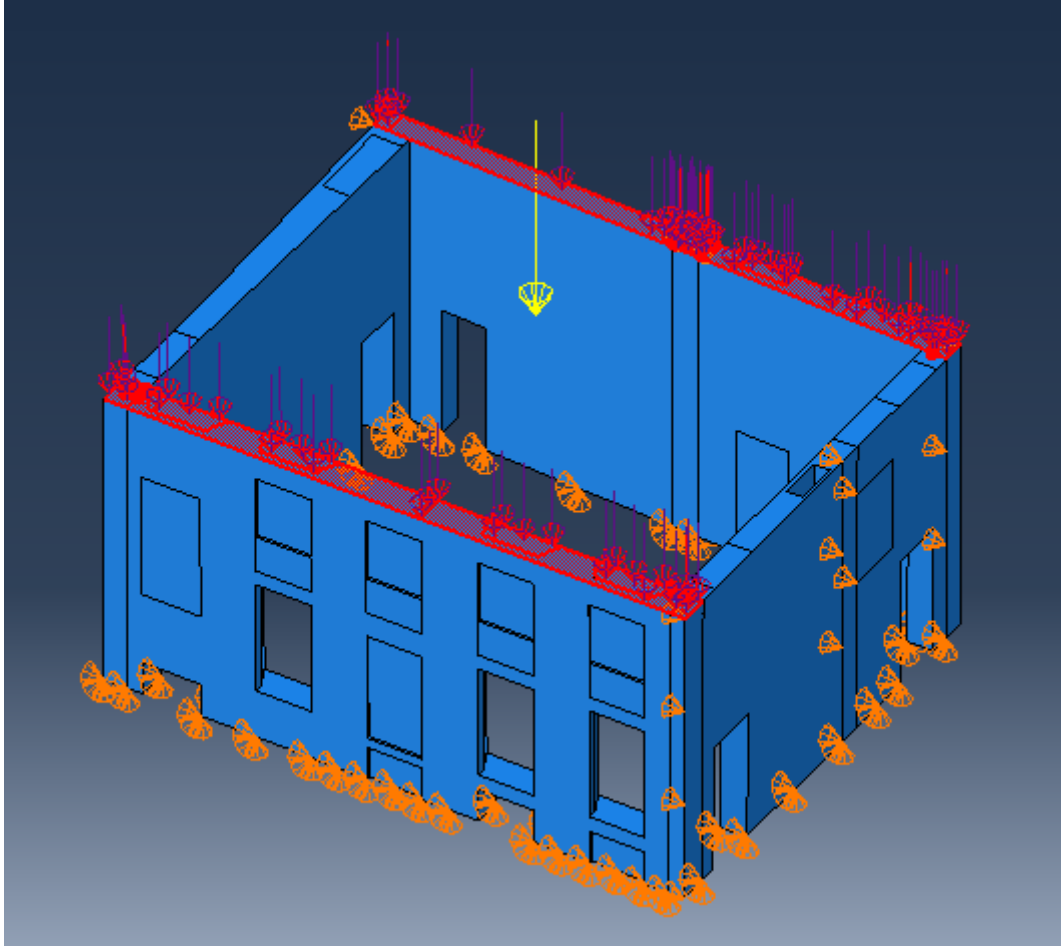


Figura 5-25: Peso del solaio (in rosso), inserito in Abaqus CAE

5.5 Definizione delle Interazioni

La definizione delle interazioni è stata fondamentale in quanto esse descrivono la collaborazione di tipo meccanico che esiste tra i diversi elementi, facenti parte del modello. Inoltre, se le interazioni non fossero inserite, ne risulterebbe un sistema con delle parti labili: la volta, i frenelli e le catene non sono direttamente vincolate a terra e quindi devono essere necessariamente inseriti dei vincoli interni, per impedire ogni tipo di moto rigido, che renderebbe impossibile l'esecuzione delle analisi.

Il software *Abaqus CAE* mette a disposizione diverse tipologie di interazioni. Per questa modellazione se ne sono usate due:

Interazione tie. È un tipo di vincolo interno che lega due superfici separate, in modo da impedire qualsiasi tipo di movimento relativo tra di esse. Esso permette di “fondere” assieme due regioni anche se le loro mesh sono state create indipendentemente l'una dall'altra e quindi la griglia presente sulle due superfici risulta differente. Quanto appena descritto è possibile perché ogni tipo di interazione in *Abaqus CAE* è definita tra i nodi delle mesh dei diversi elementi e al momento dell'inserimento del vincolo *tie*, è possibile definire una tolleranza per la distanza entro cui i due nodi interagiscono. Se la tolleranza è posta uguale a 0 i due nodi saranno legati solamente se coincidenti, mentre se essa è maggiore di 0 si avrà che due nodi a una distanza minore del limite imposto saranno ritenuti legati. Inserire valori di tolleranza troppo elevati può essere rischioso in quanto il software potrebbe identificare legami tra nodi che nella realtà sono distanti tra loro e dunque non effettivamente interagenti. È necessario dunque generare, sulle diverse parti, delle mesh aventi lo stesso ordine di grandezza: in tal modo i nodi delle superfici interagenti saranno abbastanza vicini da permettere l'utilizzo di tolleranze molto ridotte, evitando dunque la problematica sopra descritta.

Nello specifico, questo tipo di vincolo è stato inserito tra le seguenti superfici:

- Base della volta e piano di appoggio della stessa sui muri
- Superficie estradossale della volta e impronta della volta scavata nei muri
- Superfici di contatto tra muri e frenelli
- Superfici di contatto tra volta e frenelli

Si noti che alternativamente alle interazioni *tie* si sarebbe potuto pensare di eseguire una unione mediante comando *merge* delle diverse parti in una unica

parte. È stato fatto un tentativo di esecuzione di questa procedura ma due problematiche non hanno permesso la sua applicazione: in primo luogo, il software non permette di eseguire il comando *merge* tra parti la cui topologia è stata modificata, come nel caso qui descritto; eseguendo un tentativo sulle parti, precedentemente alla modifica della topologia, il software ha riscontrato degli errori che si presuppone siano dovuti all'eccessivo infittimento della griglia che gli elementi presentano al momento dell'importazione (Fig. 5-5)

Interazione embedded region. Questo tipo di vincolo è utilizzato per inserire un elemento all'interno di una regione ospite, andando a creare un'interazione tra le porzioni interessate. Si tratta di una funzione più comunemente utilizzata per inserire le armature all'interno di elementi in calcestruzzo armato, in questo caso è stata utilizzata invece per definire la collaborazione tra le catene e tutti gli elementi in muratura in cui esse sono immerse.

Nella definizione di queste interazioni è fondamentale che la *embedded region* sia completamente inglobata nel volume delle regioni ospiti. Le catene presenti nel salone presentano però delle porzioni libere, dunque non immerse in alcun elemento murario. È stata eseguita dunque una partizione degli elementi catena a differenziare le regioni interagenti e quelle libere; il vincolo di *embedded region* è stato poi inserito solamente sulle partizioni opportune, definendo invece come regione ospite i muri, i frenelli e la volta.

5.6 Definizione della Mesh

La scelta della tipologia di elementi mesh è stata eseguita a seconda della tipologia di oggetto considerato. Nella Figura 5-26 sono riportate le famiglie di elementi presenti in *Abaqus CAE*.

Nel caso specifico del modello qui descritto, alle parti solide quali muri, volta e frenelli, sono stati assegnati *Continuum Elements*. Questo tipo di elementi ha una vasta possibilità di caratterizzazione, a partire dalla distinzione in elementi di tipo lineare o quadratico. Nel Metodo a Elementi Finiti la variabile fondamentale calcolata durante le analisi sono i gradi di libertà, ovvero gli spostamenti, dai quali è possibile ricavare sforzi e deformazioni o altre variabili dipendenti. Esse sono calcolate ai nodi o nei punti di integrazione degli elementi finiti mentre in ogni altro punto dell'elemento gli spostamenti vengono ricavati mediante interpolazione. Generalmente l'ordine di interpolazione, da cui deriva anche l'accuratezza dei risultati complessivi dell'analisi, dipende dal numero di nodi in ogni elemento, che varia a seconda che esso sia lineare o quadratico. Gli elementi lineari hanno nodi solamente nei loro vertici e su di esse è possibile effettuare solamente un'interpolazione del campo di spostamenti mentre gli elementi quadratici sono caratterizzati anche da nodi nei punti medi dei loro spigoli e usano un'interpolazione del secondo ordine. È chiaro dunque come l'accuratezza dei risultati ottenuti su modelli a elementi quadratici sia assolutamente superiore rispetto a quella ottenuta con elementi lineari.

Per quanto riguarda le analisi di tipo elastico-lineare sono stati scelti dunque elementi di tipo quadratico, mentre per le analisi non lineari, che hanno dato problemi di lentezza nella convergenza, come sarà spiegato nel dettaglio nel capitolo relativo, si è dovuto optare per l'utilizzo di elementi lineari.

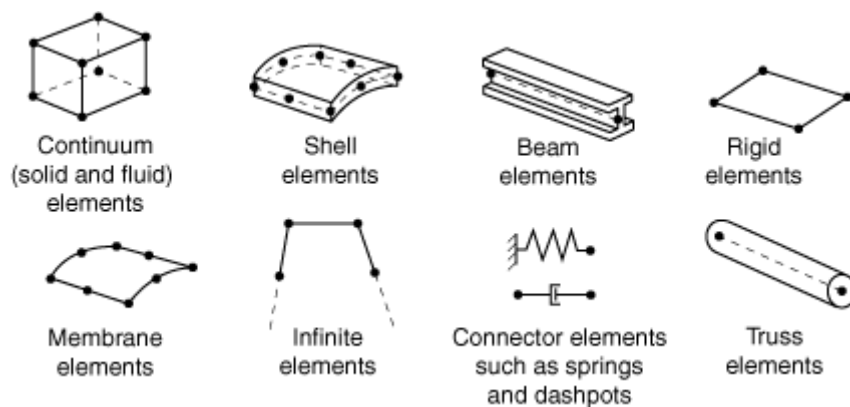


Figura 5-26: Libreria degli elementi finiti disponibile in ABAQUS CAE

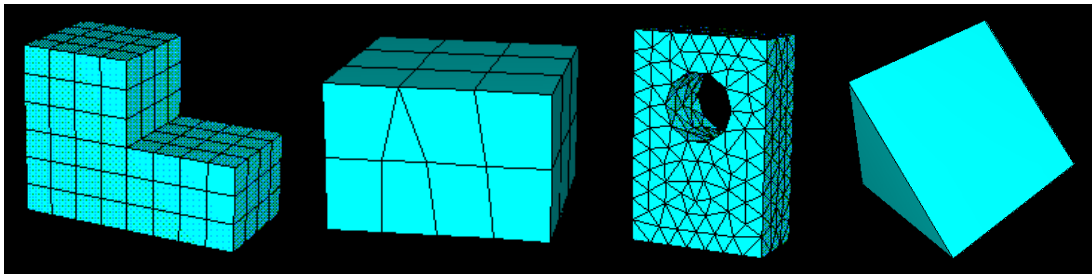


Figura 5-27: Da sinistra a destra: controllo Hex, controllo Hex-dominated, controllo Tet, Controllo Wedge

La geometria degli elementi continuum può essere fondamentalmente di due tipi: esaedrico o tetraedrico. Sono però disponibili diverse metodologie di controllo della geometria della mesh (Fig. 5-27):

- *Hex*: usa esclusivamente elementi di tipo esaedrico;
- *Hex-dominated*: utilizza come elementi primari quelli esaedrici ma permette anche l'inserimento di tetraedri nelle regioni di transizione del solido;
- *Tet*: usa esclusivamente elementi di tipo tetraedrico;
- *Wedge*: usa elementi di tipo cuneo;

L'irregolarità delle geometrie caratterizzanti le diverse parti del modello ha fatto ricadere la scelta su una mesh composta esclusivamente da tetraedri.

Per le parti monodimensionali, quali le catene, si è deciso di utilizzare invece elementi di tipo *Beam*. Si sarebbe potuto optare per degli elementi di tipo *Truss*: essi vengono definiti tra i due nodi di estremità e si comportano come delle molle lineari, dunque in essi, seguendo la legge di Hooke, si può ricavare l'azione assiale come $F = k \cdot u$ in cui k e u sono rispettivamente rigidità e spostamento del nodo. Le catene risultano però, per lunghi tratti, immerse nella muratura e questo può far sì che esse siano sottoposte a spostamenti ortogonali al loro asse e di conseguenza a sollecitazioni derivanti tra cui la flessione. Gli elementi *Truss* risultano, in tal senso, limitati in quanto essi trascurano il comportamento flessionale.

La scelta è dunque ricaduta sugli elementi *Beam*, essi in grado di riprodurre comportamenti flessionale, torsionale e assiale. In fase di analisi si è comunque verificato che il contributo flessionale delle catene non fosse sovrastimato, in quanto questo avrebbe potuto portare a un'invalidazione dei risultati. Si è dunque controllato che i momenti flettenti negli elementi *Beam* fossero molto inferiori rispetto all'azione assiale.

In Figura 5-28, una rappresentazione dell'intero modello successivamente alla procedura di definizione della mesh.

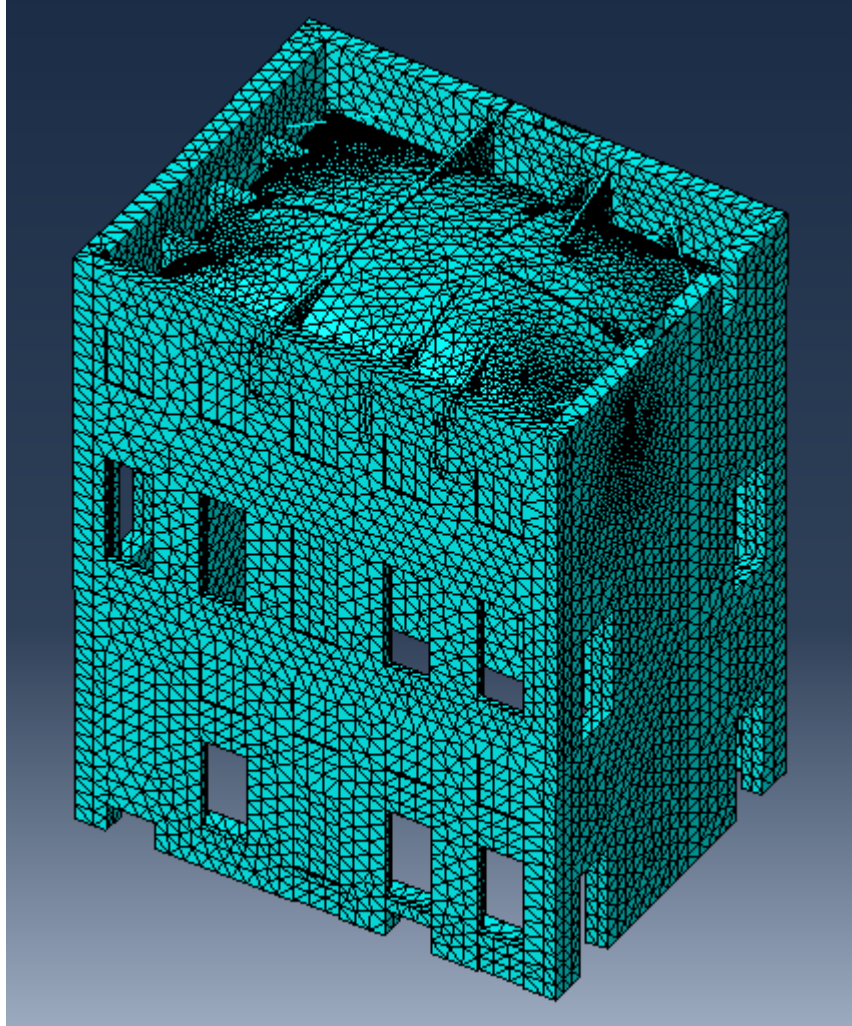


Figura 5-28: Modello dopo la definizione della mesh

6 Risultati delle analisi

Sono qui discussi i risultati delle analisi eseguite sul modello, definito come nei capitoli precedenti è stato dettagliatamente descritto.

Come già anticipato, le analisi si possono distinguere in due macro-tipologie: analisi elastiche lineari, in cui il comportamento meccanico delle murature è descritto come puramente elastico, in ogni direzione di sollecitazione; analisi non lineari, in cui le proprietà del materiale sono modellate a considerare il comportamento elasto-plastico con danneggiamento, delle murature.

Nei contesti delle due macro-tipologie sono state eseguite multiple analisi a considerare variazioni nelle proprietà meccaniche, delle tipologie di carico ma anche nella composizione del modello stesso.

6.1 Analisi elastica lineare

Questa tipologia di analisi è stata eseguita su modello le cui proprietà dei materiali sono state definite elastiche, in tutte le sue componenti.

Il software *Abaqus CAE* effettua le analisi definendo diversi step, in cui vengono inseriti nel modello i vincoli e le diverse tipologie di carico. Esiste di default lo step “Initial”, in cui generalmente vengono inserite le condizioni al contorno iniziali, nel caso specifico qui descritto, si attesta a questo step l’inserimento di tutti i vincoli esterni ovvero quello a terra e quelli inseriti sulle pareti a simulare la presenza delle stanze adiacenti. L’utente ha poi la possibilità di inserire ulteriori step nei quali definire l’applicazione dei diversi carichi o altre condizioni al contorno: se questi si considerano applicati contemporaneamente sul sistema, saranno inseriti nello stesso step mentre se l’applicazione è sequenziale, possono essere definiti step multipli ai quali sono applicati i relativi carichi e condizioni, nell’ordine ipotizzato.

Il software permette di dividere ogni step in un numero di incrementi, che può essere definito dall’utente o automaticamente controllato dal software. Questa funzionalità permette un’applicazione progressiva di frazioni dei carichi, fino al raggiungimento del 100% dell’intensità. Nel caso specifico delle analisi lineari è comunque sufficiente la definizione di un singolo incremento in cui il carico viene applicato nella sua totalità. Questo è possibile in quanto si è definito un comportamento elastico lineare, senza un valore ultimo di sforzo, e quindi carichi di qualsiasi intensità possono essere sottoposti al modello senza andare incontro a plasticizzazioni del materiale. La definizione di step suddivisi in incrementi multipli è stata fondamentale comunque per l’esecuzione delle analisi non lineari, come sarà dettagliatamente spiegato nel relativo capitolo.

Vengono ora descritti e discussi i risultati delle diverse analisi elastiche lineari cui il modello è stato sottoposto.

6.1.1 Analisi elastica lineare con materiale isotropo

Questa analisi è stata eseguita due volte, la prima con elementi di tipo lineare e la seconda con elementi quadratici. Questo ha permesso, partendo dal presupposto di una maggiore accuratezza raggiungibile attraverso gli elementi quadratici, di venire a conoscenza della differenza nei risultati derivanti dall’utilizzo delle due tipologie e, di conseguenza, dell’errore di stima degli sforzi proveniente dall’utilizzo di elementi lineari.

Tale differenza risulta ben visibile confrontando gli sforzi nella direzione verticale (S_{33}) ottenuti mediante le due simulazioni (Fig. 6-1 e 6-2). I valori massimi di compressione lungo z risultano di 0.65 MPa con elementi lineari e di 0.90 MPa con elementi quadratici, ad attestare una differenza del 27,5% circa. Questi dati sono una chiara dimostrazione di come ricorrere agli elementi di tipo lineare comporti generalmente una sottostima degli sforzi con la conseguenza che le analisi risultano a sfavore di sicurezza.

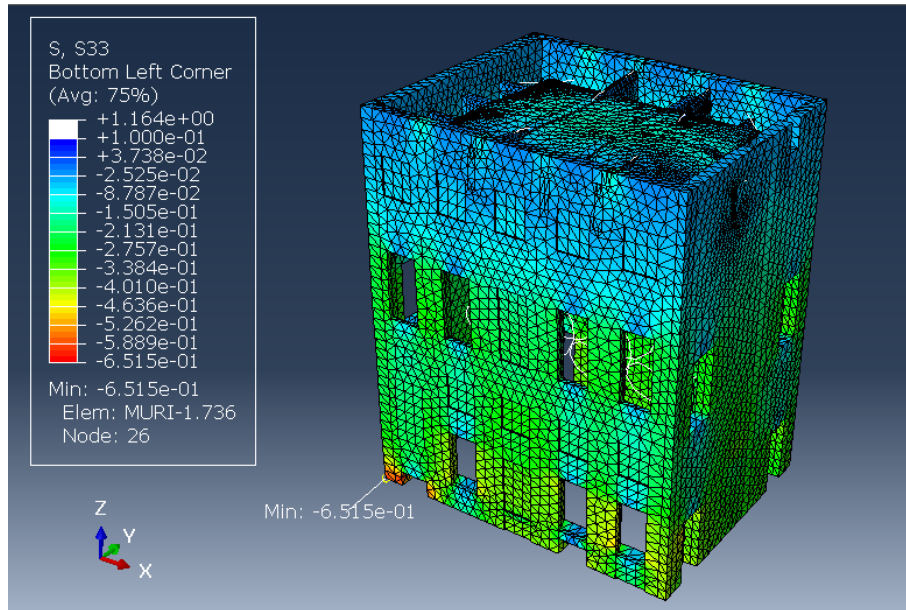


Figura 6-1: Sforzi lungo la direzione z - modello con elementi lineari

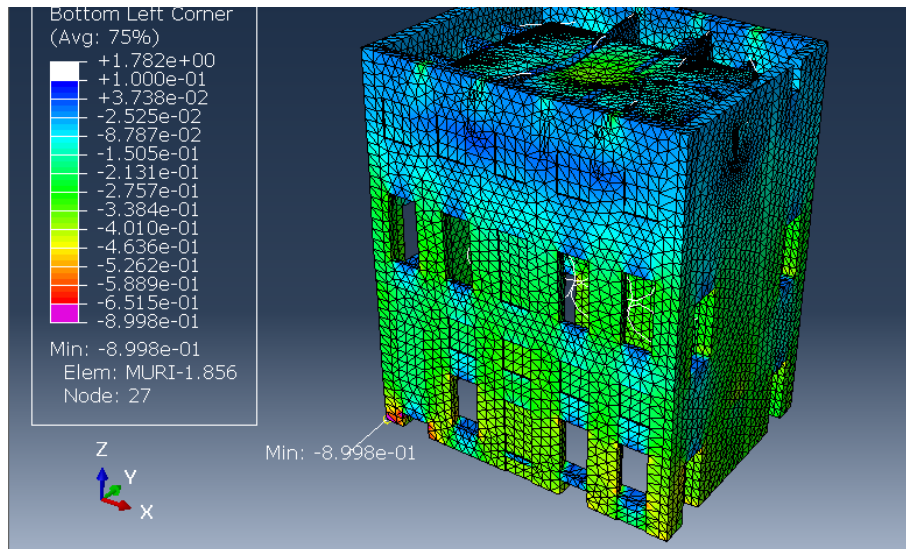


Figura 6-2: Sforzi lungo la direzione z - modello con elementi quadratici

Relativamente agli altri risultati dell'analisi lineare con materiale isotropo, sono di seguito riportati esclusivamente quelli relativi al modello con elementi quadratici. Non si è ritenuto necessario riportare anche gli output da modello con elementi lineari in quanto sarebbero stati utili solamente a una ulteriore conferma della sottostima degli sforzi derivante dall'utilizzo di questi stessi elementi.

Un'analisi di tipo lineare non consente di osservare quella che è la redistribuzione degli sforzi a causa del danneggiamento del materiale. Malgrado quanto appena affermato, i risultati permettono di individuare le regioni in cui si verifica la maggior concentrazione degli sforzi. È proprio in queste regioni, quando lo sforzo supera il limite di resistenza a trazione del materiale, che si può ipotizzare la generazione di fessure: si possono dunque confrontare con il quadro fessurativo in modo da verificare la correttezza delle ipotesi fatte durante la modellazione. Se esiste una corrispondenza tra queste regioni e quelle soggette a dissesti nel quadro fessurativo, si può dedurre che il modello sta simulando correttamente le condizioni reali.

Nelle Figure da 6-3 a 6-5 sono riportate tre differenti viste della distribuzione degli sforzi massimi principali di trazione, nella struttura: una vista panoramica dell'intera struttura e due viste in pianta rispettivamente relative a intradosso ed estradosso. Nella scala degli stress, associata allo spettro "Rainbow", sono stati inseriti come valore limite inferiore 0 MPa e come limite positivo 0.2 MPa, valore di resistenza a trazione da letteratura [12]. Ne risulta dunque che le regioni contrassegnate con colore magenta sono soggette, nel modello con materiale elastico, a sforzi pari o superiori al limite di trazione imposto.

Dalla vista panoramica si può notare come lo stato tensionale delle pareti non sia particolarmente elevato e di conseguenza si può assumere che non ne derivino particolari dissesti. Si ipotizza dunque che il quadro fessurativo delle pareti derivi da sollecitazioni diverse dal solo peso proprio della struttura. Si rimanda comunque questa valutazione alle successive analisi.

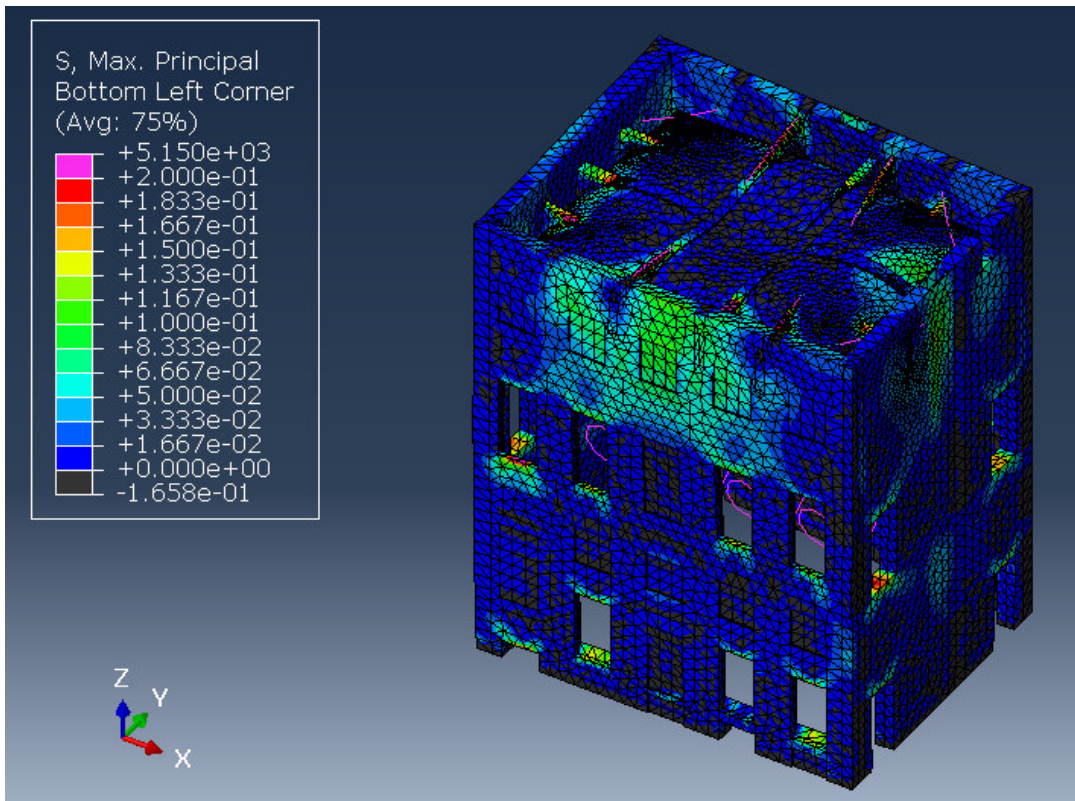


Figura 6-3: Sforzi principali massimi (panoramica) - Analisi elastica lineare con materiale isotropo

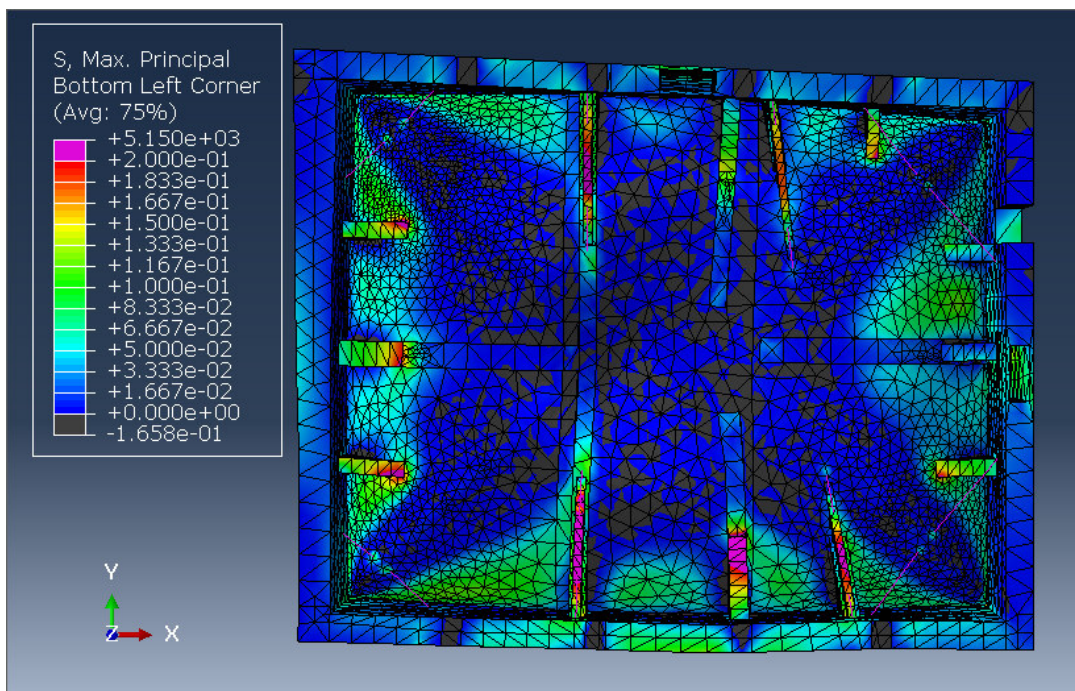


Figura 6-4: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi elastica lineare con materiale isotropo

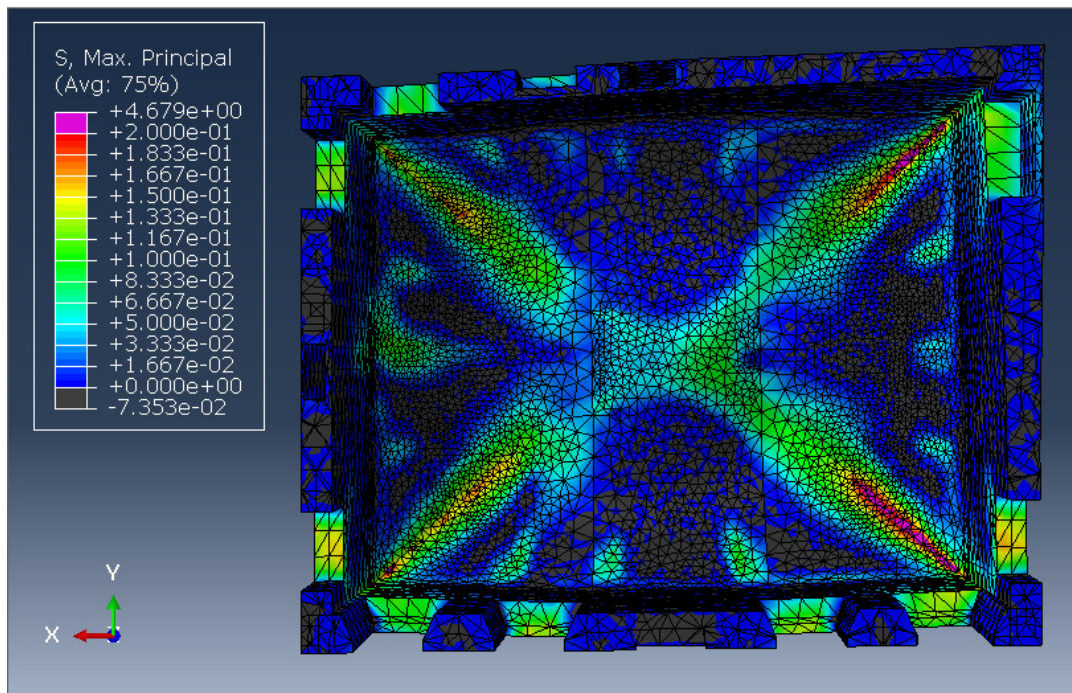


Figura 6-5: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi elastica lineare con materiale isotropo

La mappatura degli sforzi massimi principali all'estradosso mostra invece come la regione più centrale della volta non sia soggetta a trazioni mentre lo sono le porzioni più prossime all'appoggio con i muri. In particolare si può notare come alcuni frenelli siano caratterizzati da alti sforzi di trazione nella loro parte sommitale. Questo è sintomo di un particolare comportamento che si potrebbe dedurre anche osservando le deformazioni. Infatti, si può ipotizzare che la parte centrale della volta faccia deformare verso l'interno e il basso le regioni più periferica della stessa. I frenelli, nella loro funzione di limitare queste deformazioni subiscono uno sforzo di trazione che potrebbe essere quello precedentemente annotato. Questa interpretazione risulta abbastanza coerente con le fessurazioni riscontrate realmente sui frenelli, soprattutto in quelli che supportano le catene. Si noti comunque che nelle restanti parti del frenello, gli sforzi risultano prevalentemente di compressione.

Osservando la distribuzione degli sforzi all'intradosso si nota che la massima concentrazione risulta lungo le diagonali, mettendo in evidenza un comportamento simile a quello tipico delle volte a padiglione. La concentrazione delle trazioni lungo le diagonali all'intradosso è concorde al quadro fessurativo rilevato sulla volta, a confermare una buona simulazione del comportamento reale di questa parte della struttura. Le termografie mettono in evidenza alcune delle fessure passanti, già descritte nel capitolo relativo, che questa analisi non riesce a prevedere. Questo era prevedibile in quanto si ritiene che esse non siano

dovute al solo carico proprio della struttura: la loro origine è stata ricercata attraverso analisi successive in cui altre tipologie di carico sono state sottoposte al modello, oltre al carico gravitazionale.

In Figura 6-6 è possibile invece osservare la distribuzione degli sforzi minimi principali. Si può notare come essi si attestino su valori relativamente piccoli, soprattutto se confrontati con la resistenza a compressione delle murature, stimabile nell'ordine 2-3 MPa, valore citato in letteratura [12]. Ne deriva dunque che non sono previsti danni a compressione (schiacciamento), in accordo anche con le condizioni reali della struttura.

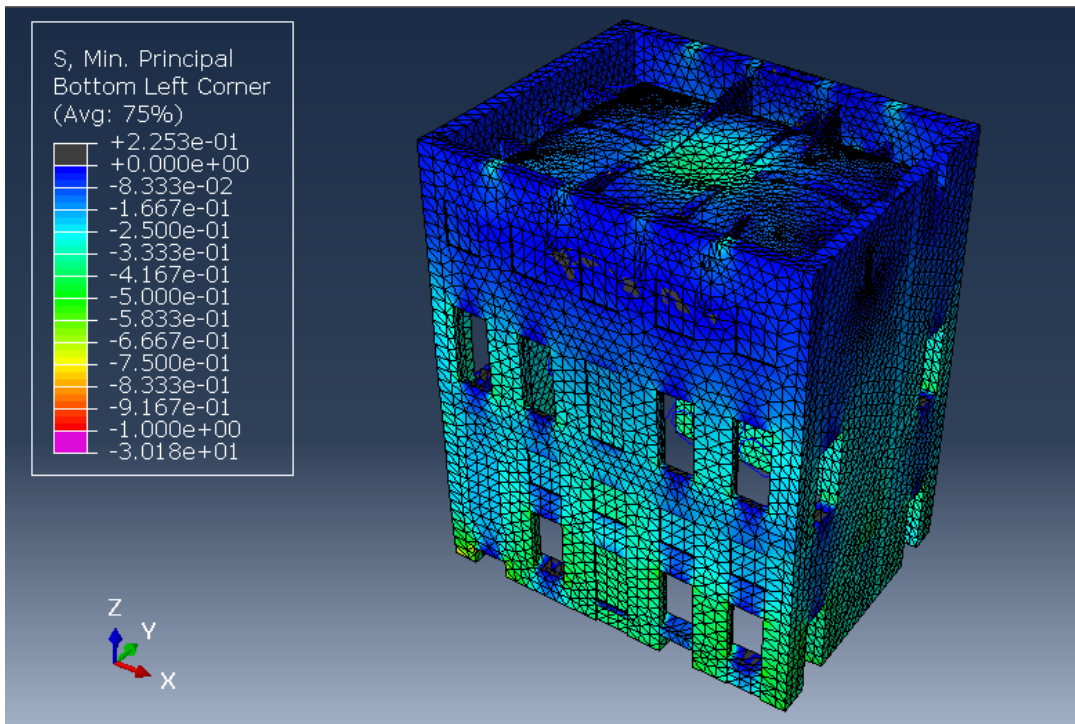


Figura 6-6: Sforzi principali minimi - Analisi elastica lineare con materiale isotropo

6.1.2 Analisi elastica lineare con materiale ortotropo

L'analisi elastica lineare è stata svolta nuovamente, considerando ancora la presenza del solo carico gravitazionale ma assegnando materiale di tipo ortotropo, caratterizzato dunque da un comportamento differente nelle tre direzioni ortogonali, modellato come descritto nel Capitolo 5.2, relativo alla definizione delle proprietà. Si ritiene che l'utilizzo di questo modello delle proprietà meccaniche permetta di descrivere più accuratamente il comportamento elastico effettivo della muratura e che quindi i risultati di questa analisi siano anch'essi più accurati di quelli ottenuti dalla simulazione su modello con materiale isotropo, precedentemente illustrata.

Nello specifico si è preventivato che i valori degli sforzi principali, riscontrati nella volta, sarebbero risultati minori rispetto a quelli ottenuti nell'analisi precedente. Si è prevista tale evidenza come una conseguenza dell'incremento nel valore di modulo elastico nella superficie media della volta a confronto quella del materiale isotropo.

Nelle figure da 6-7 a 6-9 viene illustrata la distribuzione degli sforzi massimi principali, nelle tre viste già definite per l'analisi precedente.

Per quanto riguarda il comportamento globale della struttura testata, non esistono, come facilmente prevedibile, differenze significative con quello emerso nel modello con materiale isotropo.

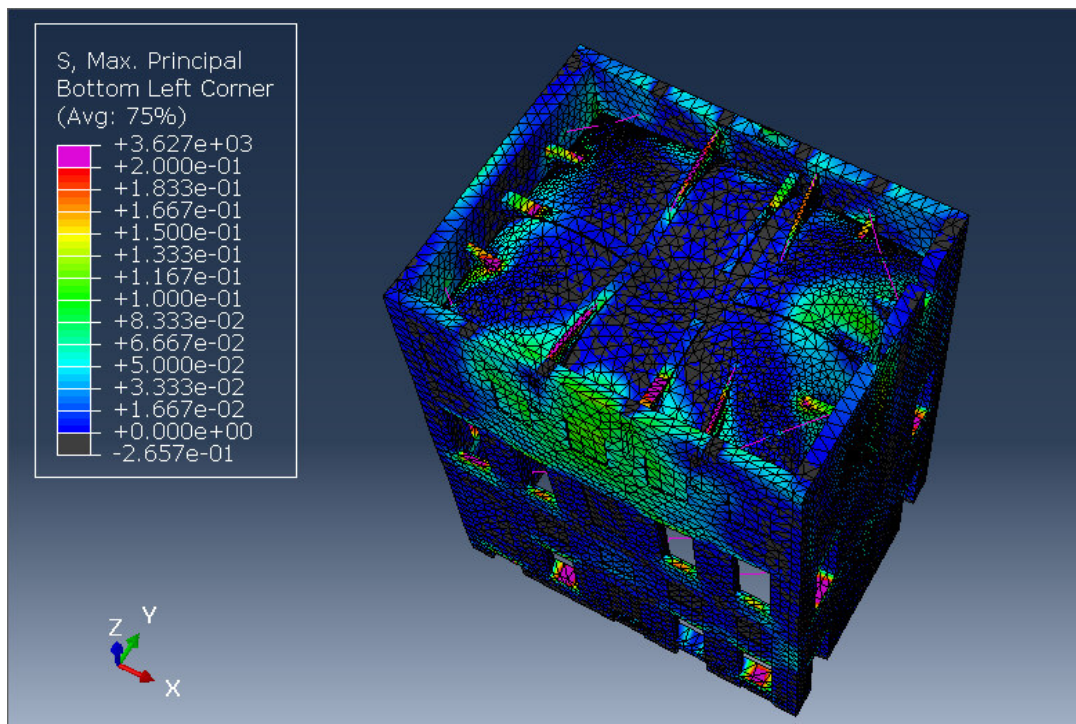


Figura 6-7: Sforzi principali massimi (panoramica) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo

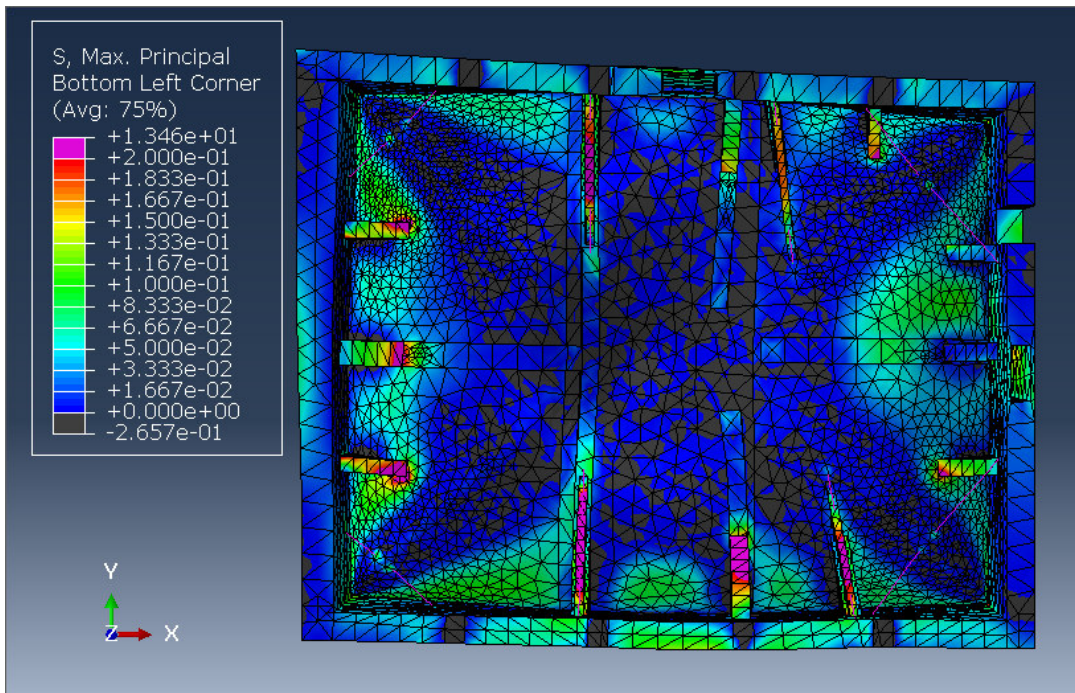


Figura 6-8: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo

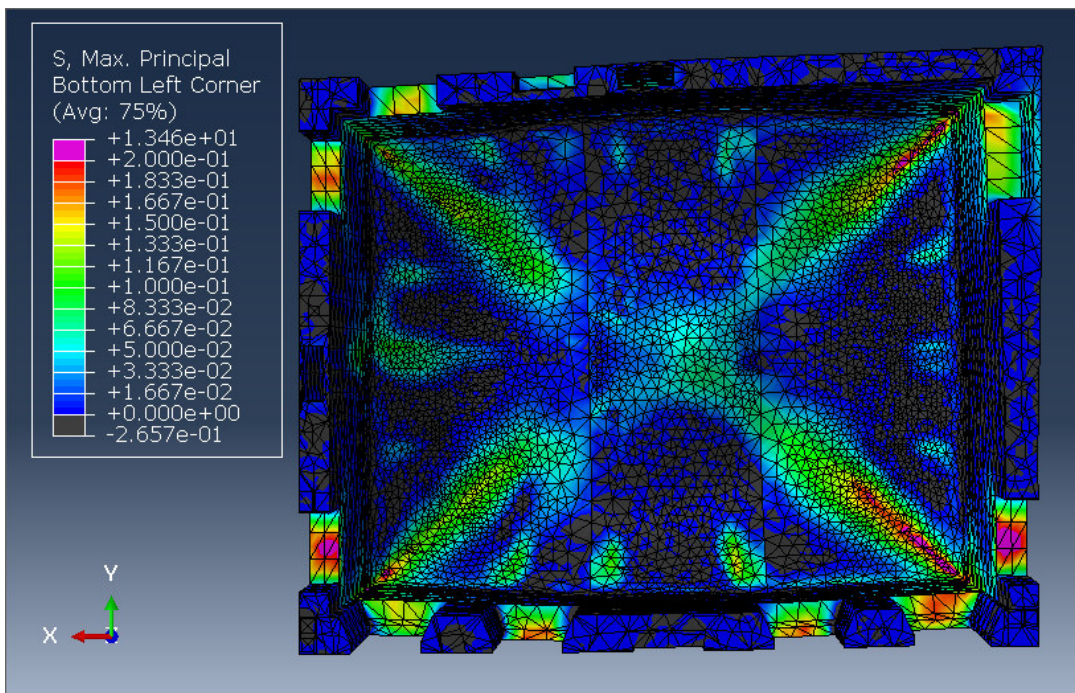


Figura 6-9: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo

Ciò che subisce una leggera variazione sono i picchi di sforzo nelle diverse regioni. Nello specifico risultano di poco incrementati gli sforzi di trazione alle sommità dei frenelli (cfr. Fig. 6-8 e 6-4) e, come dalla previsione

precedentemente formulata, all'intradosso emerge una riduzione degli sforzi sulle diagonali (cfr. Fig. 6-9 e 6-5). Quest'ultima variazione è percepibile come una minore estensione delle regioni di colore magenta, ovvero le regioni in cui si hanno picchi di sforzi superiori al limite massimo.

Per quanto riguarda invece gli sforzi minimi principali (cfr. Fig. 6-10 e 6-6), non emergono sostanziali differenze rispetto a quanto osservato dall'analisi elastica lineare con materiale isotropo.

Nel complesso, la simulazione qui descritta, conferma tutte le ipotesi già formulate riguardo il comportamento della struttura e la sua risposta ai carichi. Lo stato di dissesto rilevato sui muri non è attribuibile al peso proprio del sistema, ne sono state infatti indagate le cause nelle analisi successive. Sussiste nuovamente l'ipotesi per cui la parte centrale della volta tenda a far deformare verso l'interno e il basso le regioni più laterali, causando trazioni sui frenelli. Infine alcune delle fessure più ingenti rilevate dal quadro fessurativo della volta continuano a non essere catturate da questa analisi, confermando che la loro causa vada cercata in altre tipologie di carico.

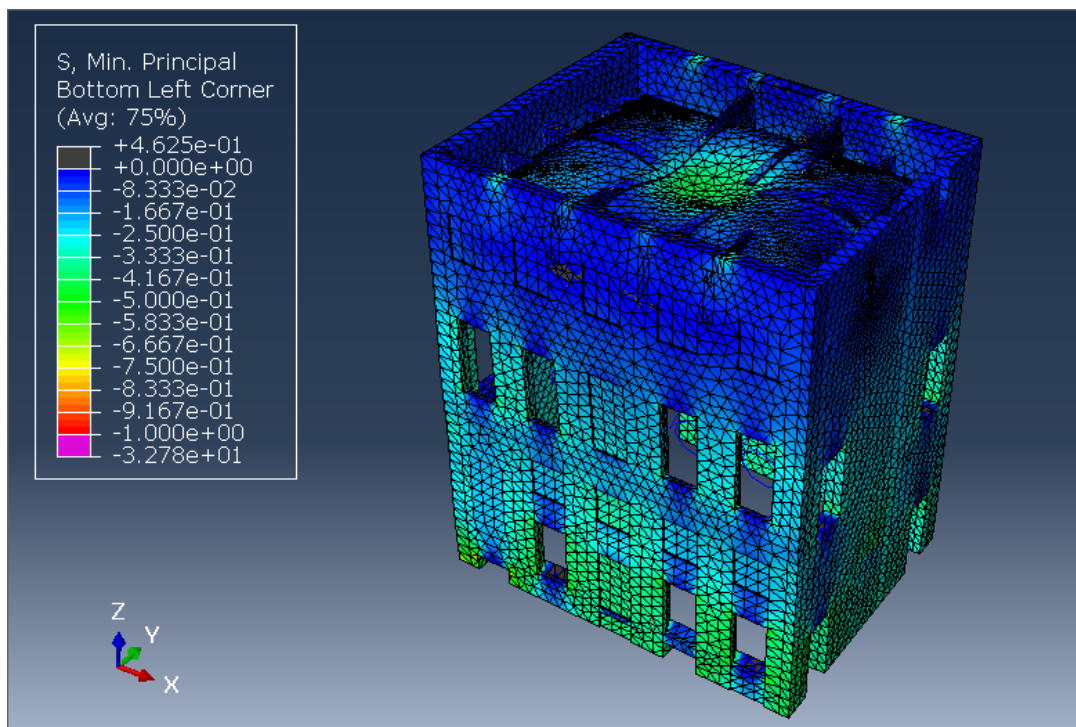


Figura 6-10: Sforzi principali minimi - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo

Considerando la maggiore accuratezza fornita dal modello con materiale ortotropo, è stato analizzato lo stato tensionale delle 6 catene, qui riportato nelle Figure da 6-11 a 6-13. La prima illustrazione riporta una vista globale mentre le altre due riportano il dettaglio delle catene estradossali principali.

Il livello massimo di sforzo all'interno delle catene si attesta a circa 13,46 MPa, risulta dunque verificata l'ipotesi che le catene rimangano in campo elastico per i carichi cui il sistema studiato è soggetto in quanto i valori di sforzo di snervamento si attestano, da letteratura, negli acciai delle catene attorno ai 200-240 MPa. Considerando che la massima azione assiale risulta $N = 6500 \text{ N}$ e che il valore di momento massimo è $M = 4240 \text{ N} \cdot \text{mm}$, ne deriva una eccentricità $e = \frac{M}{N} = 0.65 \text{ mm}$, su una sezione di altezza pari a 50 mm . Si può dunque affermare che il contributo flessionale delle catene è minimo rispetto a quello assiale e che quindi l'utilizzo di elementi beam non inficia sulla correttezza dei risultati di analisi.

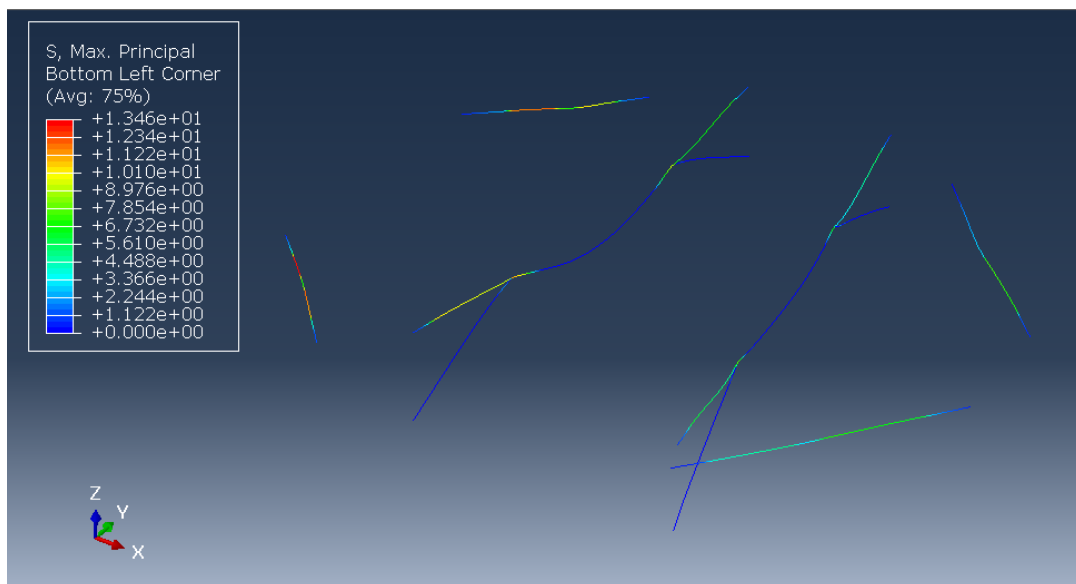


Figura 6-11: Sforzi principali massimi (panoramica catene) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo



Figura 6-12: Sforzi principali massimi (catena 3) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo



Figura 6-13: Sforzi principali massimi (catena 2) - Analisi elastica lineare con materiale ortotropo

Dai risultati si nota che le regioni maggiormente soggette a trazione sono quelle non inglobate all'interno della muratura. Per quanto riguarda le catene agli angoli si ha che nei tratti centrali, definiti come embedded regions, sono presenti sforzi di trazione, di intensità minore se confrontati con quelli nei tratti liberi. Nelle catene estradossali, come si può notare dalle due figure di dettaglio, le porzioni immerse nella muratura sono soggette a trazione nelle loro estremità mentre i tratti centrali sono caratterizzati da sforzo nullo.

Quello che emerge da questi risultati è dunque che le catene apportano un contributo irrigidente alla struttura, andando a limitare deformazioni verso l'esterno. Questa funzione risulta meglio evidenziata nel paragrafo successivo in cui l'analisi è stata eseguita su un modello in assenza delle catene.

6.1.3 Valutazione del contributo resistente di catene e frenelli

Nel contesto delle analisi lineari sono state eseguite, infine, due simulazioni considerando variazioni nella composizione geometrica del modello. La prima è stata svolta trascurando la presenza delle catene e la seconda su un modello in cui sia catene che frenelli sono stati rimossi.

Lo scopo di queste analisi è stato quello di comprendere l'effettivo contributo irrigidente e resistente di catene e frenelli nel contesto strutturale. I risultati provenienti da queste nuove simulazioni sono stati dunque confrontati con quelli ottenuti nell'analisi precedentemente illustrata. Nelle Figure 6-14 e 6-15 sono riportati i risultati, in termini di sforzi massimi principali nella prima di queste due simulazioni. Si può subito notare come l'assenza delle catene, in particolare delle due principali, causi un incremento degli sforzi di trazione nelle parti sommitali dei frenelli (cfr. Fig. 6-14 e 6-8). Si ipotizza che, nel sistema reale, catene e frenelli siano collaboranti nella funzione irrigidente e che quindi in assenza degli elementi in acciaio, gli sforzi da essi portati, siano in gran parte ridistribuiti negli irrigidimenti in muratura. Si generano inoltre nei muri delle leggere deformazioni fuori dal piano, verso l'esterno. Questo conferma la funzione irrigidente degli elementi catena, che già veniva evidenziata dai risultati in termini di sforzi massimi principali nelle stesse, ottenuti con la precedente analisi.

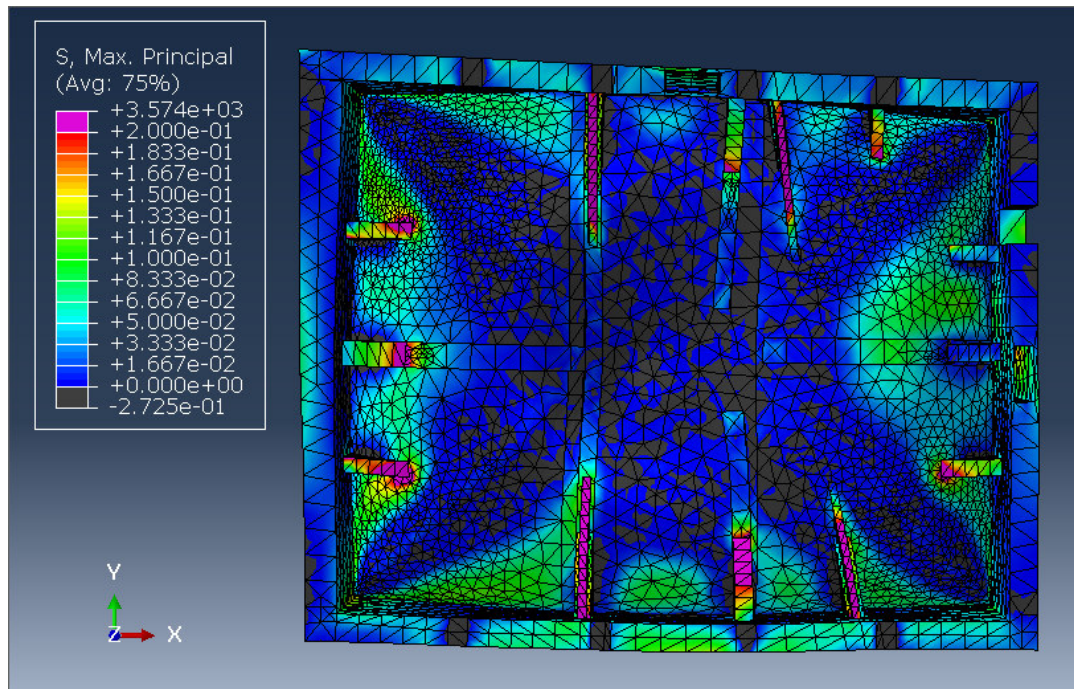


Figura 6-14: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi elastica lineare in assenza di catene

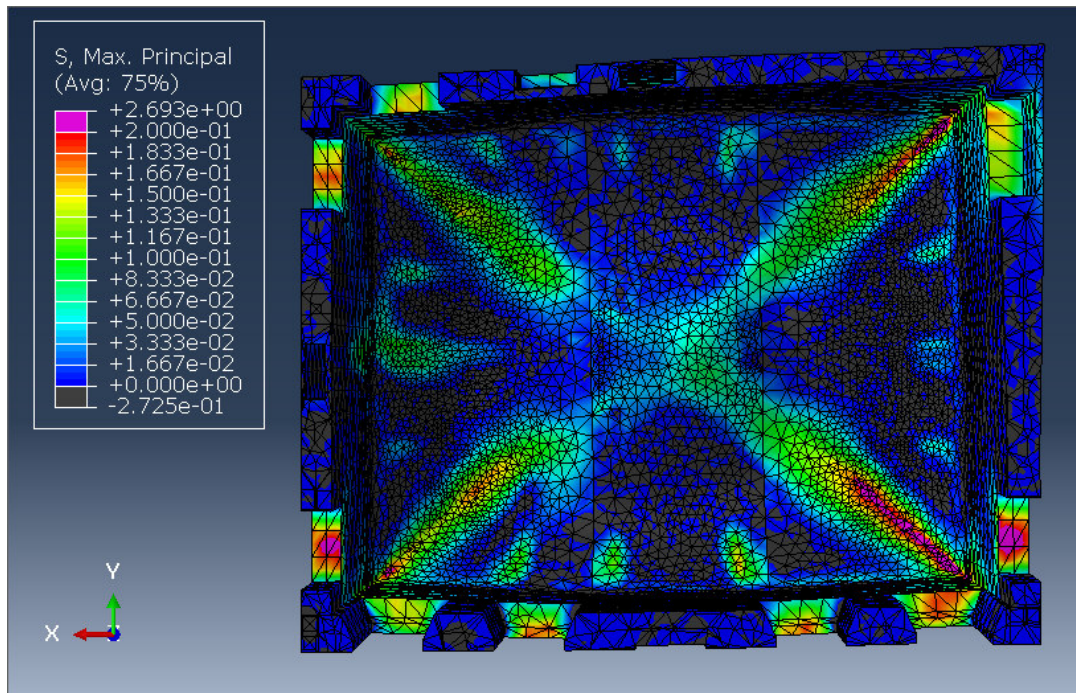


Figura 6-15: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi elastica lineare in assenza di catene

Osservando l'intradosso si evidenzia invece un minimo incremento nello stato tensionale in prossimità delle diagonali (cfr. Fig. 6-16 e 6-9).

Le evidenze più interessanti in termini di risultati si hanno invece dal modello in cui sia frenelli che catene sono stati rimossi (Fig. 6-16 e 6-17). In generale si può subito osservare che la mancanza dei frenelli ha un effetto molto più ingente (e più facilmente visibile a occhio nudo) rispetto alla rimozione delle sole catene. Basti osservare le deformate ottenute da queste due analisi, a confronto: quella proveniente dalla seconda simulazione, presenta spanciamenti laterali ben visibili in tutti i muri, in particolare molto ingenti sono quelli nelle due pareti di maggiore estensione. Questo dimostra come i due elementi irrigidenti, di cui soprattutto i frenelli, assumano una funzione di contenimento dell'effetto spingente proveniente dalla volta, nelle sue regioni perimetrali ed è concorde con gli sforzi prevalentemente di compressione rilevati sui frenelli, al di fuori delle parti sommitali.

Oltre all'evidente incremento delle deformazioni, queste analisi mostrano anche come gli sforzi derivanti dal peso proprio, vengano redistribuiti all'interno della volta e dei muri. Nella vista estradosso si attesta un'importante espansione delle regioni soggette a sforzo di trazione non trascurabile mentre all'intradosso si può ben notare un ingente incremento dello stato tensionale lungo le diagonali.

I risultati ottenuti da queste due particolari analisi mettono dunque ben in evidenza l'importante funzione di questi elementi irrigidenti e stabilizzanti, sia da un punto di vista del contenimento delle deformazioni sia da quello di una redistribuzione degli sforzi. Essa permette infatti alla volta, nelle condizioni reali, di non essere soggetta a un eccessivo carico tensionale, che potrebbe portare a problemi di fessurazione molto più gravi di quelli effettivamente esistenti.

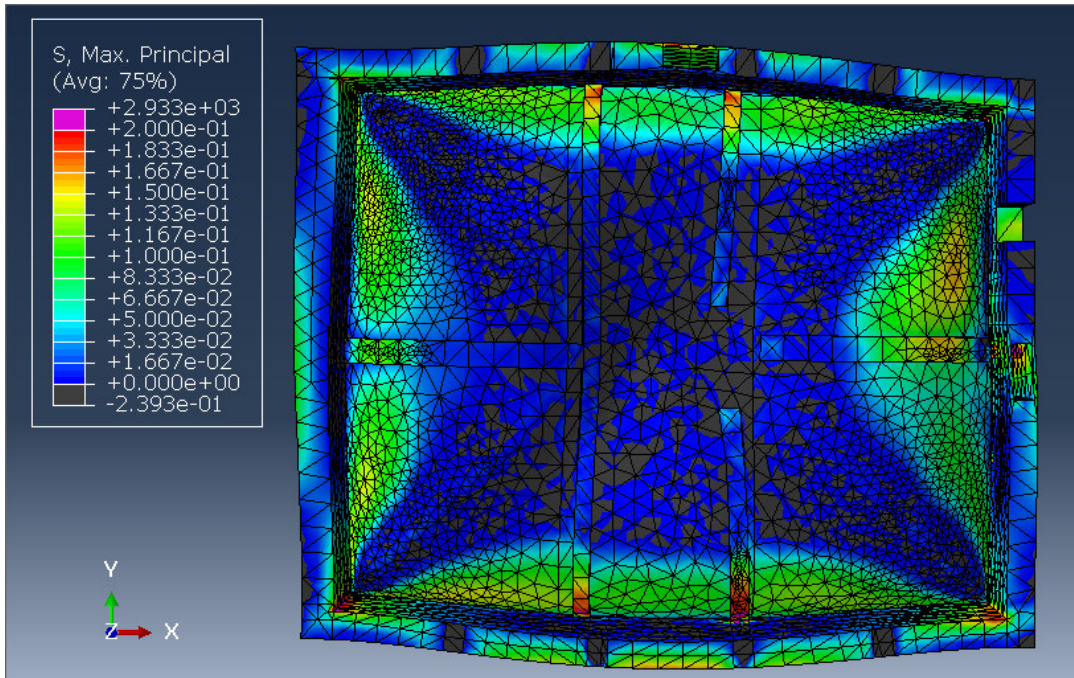


Figura 6-16: Sforzi principali massimi (estradosso) - Analisi E-L in assenza di catene e frenelli

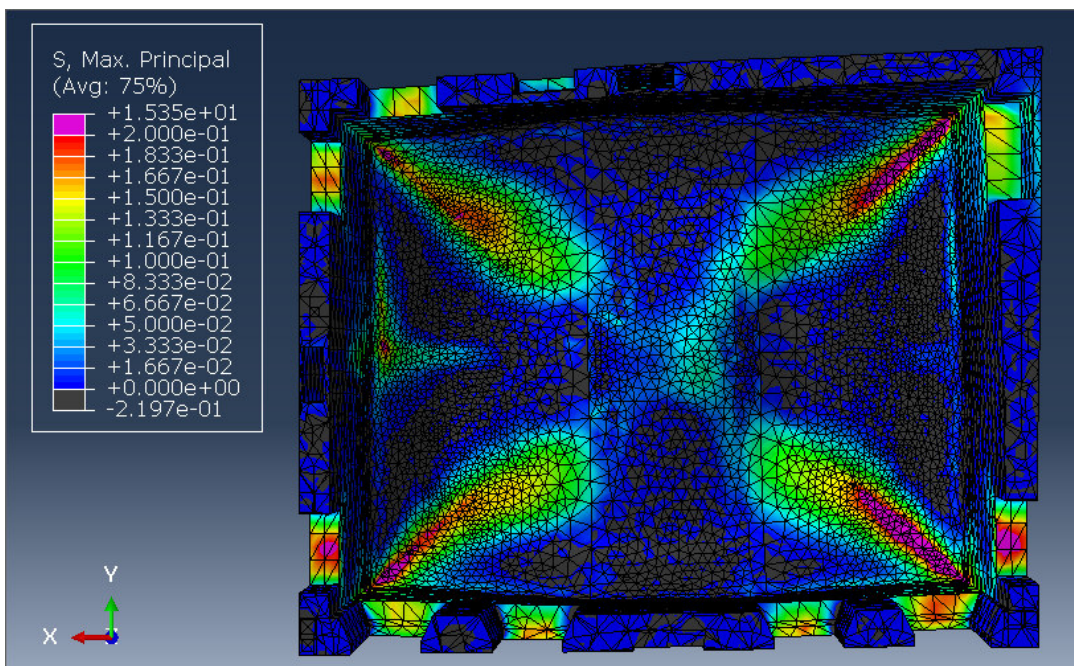


Figura 6-17: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi E-L in assenza di catene e frenelli

6.2 Analisi non lineari

In questa fase di analisi si è voluto considerare la muratura come un materiale caratterizzato da un comportamento elasto-plastico con danneggiamento. È stato dunque assegnato il modello con danno CDP, già dettagliatamente illustrato nel capitolo relativo alla definizione delle proprietà dei materiali (Cap. 5.2)

Diverse analisi non lineari sono state eseguite, considerando diverse tipologie di carico applicate in step successivi. Oltre alla modellazione delle proprietà meccaniche, la differenza fondamentale tra le analisi di tipo lineare e quelle non lineari è stata nella definizione degli step, per il motivo di seguito illustrato. Considerando che la legge sforzo-deformazione che caratterizza le strutture non è più di tipo elastico lineare, non è possibile applicare la totalità del carico in una singola volta nella sua interezza, in quanto, come già visto nei risultati delle analisi precedenti, alcune regioni sarebbero soggette a sforzi tanto elevati da non poter essere sorretti, considerando il criterio di plasticizzazione definito. Quello che avviene realmente nella struttura è anche quello che avviene nel modello così meccanicamente definito: una regione, raggiunto lo sforzo massimo, tende a plasticizzarsi, con conseguente redistribuzione degli sforzi applicati nel resto della struttura ancora in campo elastico.

Ha assunto dunque un ruolo fondamentale la funzionalità, fornita dal software, che permette di suddividere gli step in un certo numero di incrementi. Infatti, applicando il carico frazionato in modo incrementale, a ogni incremento il software verifica in ogni regione se lo sforzo massimo resistente è stato superato: se questo non si verifica, l'analisi prosegue con un ulteriore incremento, nel caso contrario viene eseguita un'iterazione in cui viene ridotta l'entità dell'incremento. Questo in modo automatico permette, in fase di analisi, di individuare le regioni plasticizzate e di conseguenza, la redistribuzione degli sforzi negli incrementi successivi.

Una spiegazione grafica di questa procedura automatica compiuta dal software durante l'analisi non lineare è spiegata in modo semplificato nello schema generico in Figura 6-18 in cui viene ipotizzato sforzo di tipo uniassiale.

Segue la descrizione e discussione delle analisi non lineari sottoposte al modello, in cui sono illustrati nel dettaglio gli step definiti.

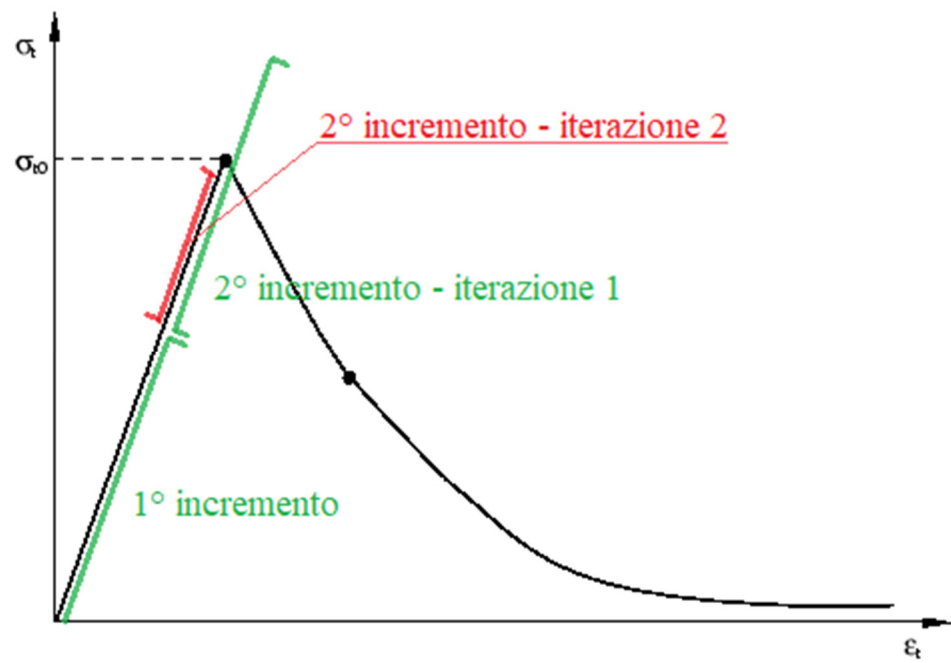


Figura 6-18: Schematizzazione di incrementi e iterazioni come eseguite dal software ABAQUS CAE

6.2.1 Analisi non lineare con peso proprio

La prima delle analisi non lineari è stata eseguita considerando nuovamente il solo peso proprio.

È stato definito un solo step, successivo a quello “Initial”, mediante il quale è stato imposto il carico gravitazionale in modo incrementale. La Tabella 6-1 illustra nello specifico i parametri di definizione dello step di analisi non lineare.

| Tipo di suddivisione | N° max. di incrementi | Increment size | | |
|----------------------|-----------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | | <i>Initial</i> | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> |
| Automatic | 100000 | 0.1 | $1 \cdot 10^{-8}$ | 1 |

Tabella 6-1: Parametri di definizione dello step di applicazione del peso proprio

È bene specificare che questa analisi è stata inizialmente predisposta con un modello definito a elementi finiti quadratici. L’analisi ha però incontrato problemi di convergenza che sono stati attribuiti a un eccessivo onere di calcolo. Si è dovuto dunque ricorrere all’utilizzo di elementi lineari, pur essendo a conoscenza della minore accuratezza che garantiscono ai risultati di analisi.

L’analisi con elementi lineari ha raggiunto il completamento senza errori ma i risultati non mettevano in evidenza alcun tipo di danno sulla struttura, in accordo con uno stato tensionale molto basso. Come già dimostrato, infatti, l’utilizzo di elementi lineari nella definizione della mesh causa tendenzialmente una drastica sottostima degli sforzi in output dalle analisi. Per ovviare a questa problematica è stata eseguita una semplice modifica nella definizione del modello Concrete Damage Plasticity. In origine era stata definita una tensione ultima pari a 0,08 MPa (vedi Tab. 5-7), dato nettamente inferiore rispetto a quello da letteratura, già citato e pari a 0,2 MPa, così assunto per rappresentare lo stato di degrado del materiale muratura, in opera ormai da secoli. Si è optato per una ulteriore riduzione di questo dato al valore di 0,05 MPa, nell’intento di compensare la sottostima dello stato tensionale, attribuendo un valore di resistenza a trazione inferiore a quello reale e dunque anch’esso sottostimato a monte delle analisi.

I risultati in termini di sforzi massimi principali sono riportati nelle Figure 6-19 e 6-20. Si evidenzia una distribuzione perfettamente coerente con quelle ottenute da analisi lineare, con la massima concentrazione degli sforzi nelle sommità dei frenelli e sulle diagonali all'intradosso.

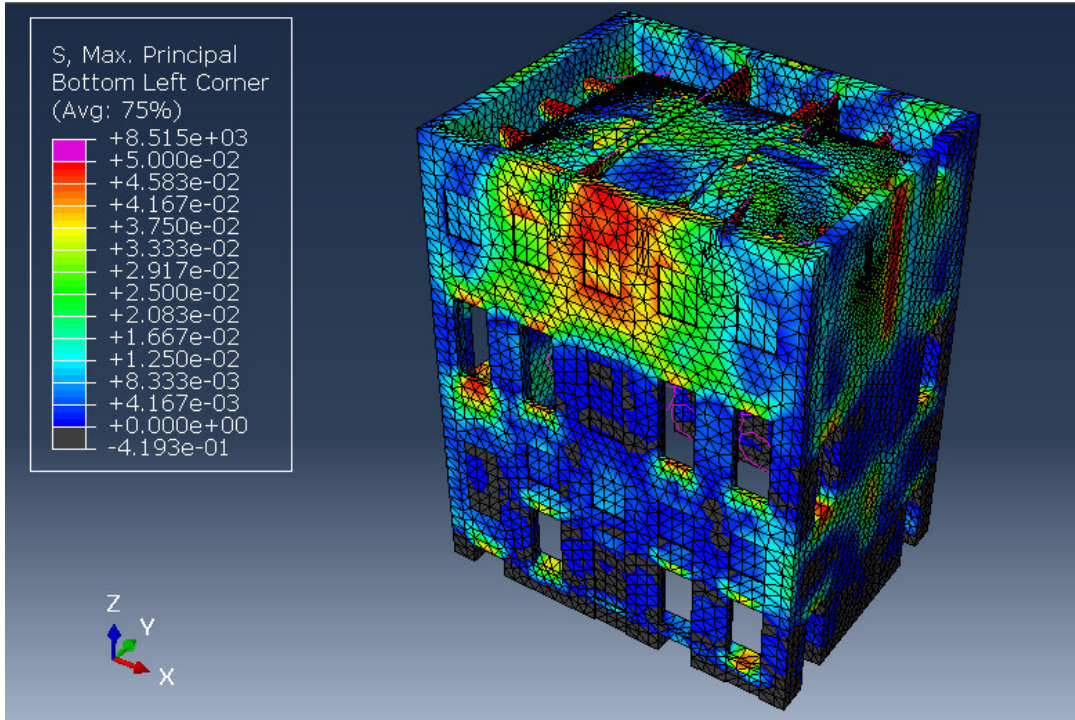


Figura 6-19: Sforzi principali massimi (panoramica) - Analisi non lineare con peso proprio

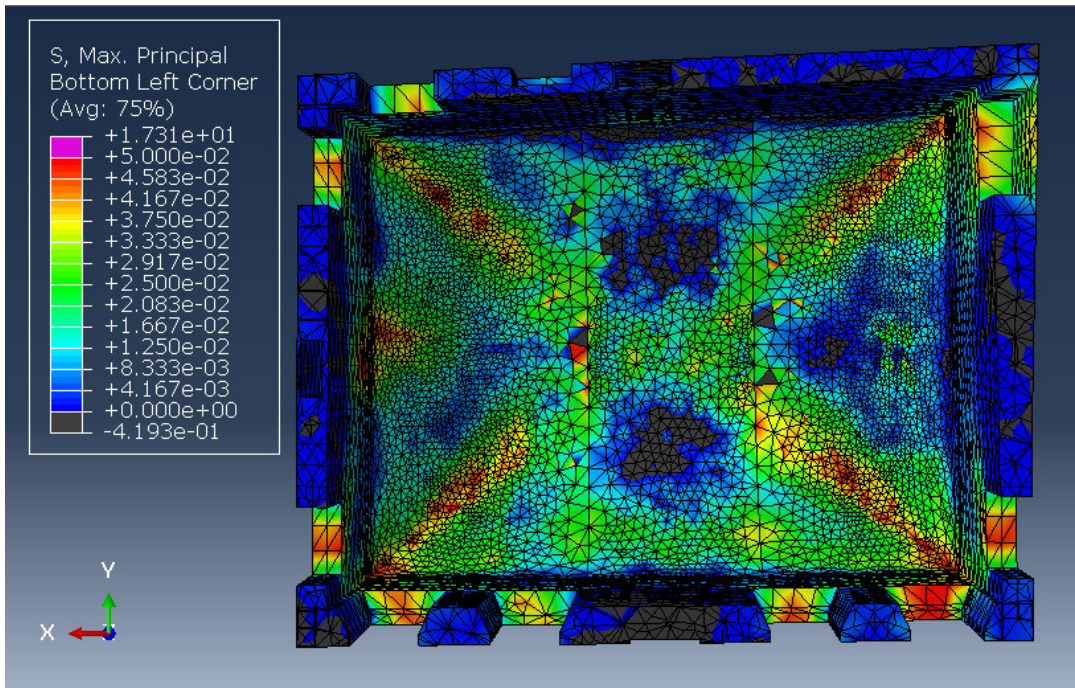


Figura 6-20: Sforzi principali massimi (intradosso) - Analisi non lineare con peso proprio

Viene ora introdotta la variabile PEMAG, indice dei risultati in termini di deformazione plastica. Attraverso la distribuzione di questa variabile si possono individuare i dissesti messi in luce dall'analisi, per poi essere confrontati con il quadro fessurativo reale della struttura. Si osservi che anche in queste mappature sono stati posti dei limiti superiori e inferiori alla scala delle deformazioni: il limite inferiore è stato definito pari a uno mentre quello superiore uguale a 0,0005, si è considerato questo valore di limite in quanto il valore di deformazione uniassiale elastica legato al massimo sforzo di trazione si ottiene:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{t0}}{E_0} = \frac{0.05 \text{ MPa}}{3800 \text{ MPa}} = 1,32 \cdot 10^{-5} \quad (6-1)$$

Per quanto riguarda i risultati ottenuti (Fig. 6-21 e 6-22), come già predetto dall'osservazione dei risultati da analisi lineari, il sistema murario non subisce danno alcuno se si considera la sola applicazione del peso proprio. Le due simulazioni successive a questa sono state fondamentali per verificare l'ipotesi che lo stato di fessurazione delle pareti derivi da altre tipologie di carico. Risulta invece una leggera presenza di deformazioni di tipo plastico in prossimità delle diagonali, all'intradosso e sui frenelli. Esse risultano comunque molto limitate quindi da questa analisi si può dedurre che il peso proprio non è la principale causa delle fessurazioni rilevate sulla struttura.

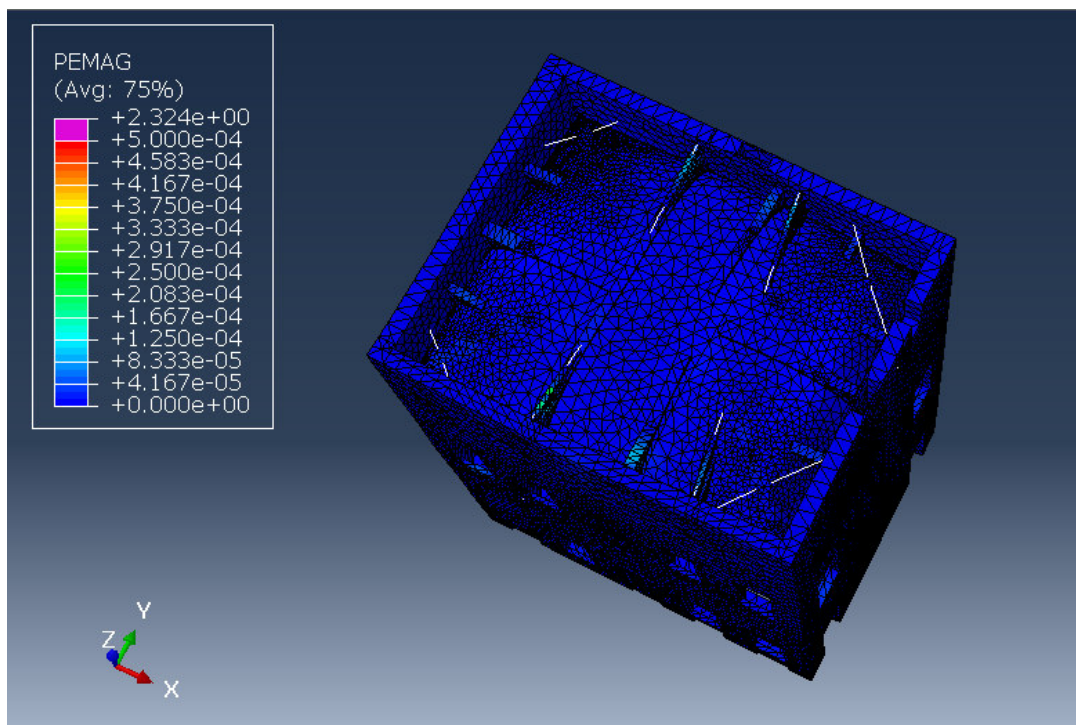


Figura 6-21: Deformazioni plastiche (vista panoramica) - Analisi non lineare con peso proprio

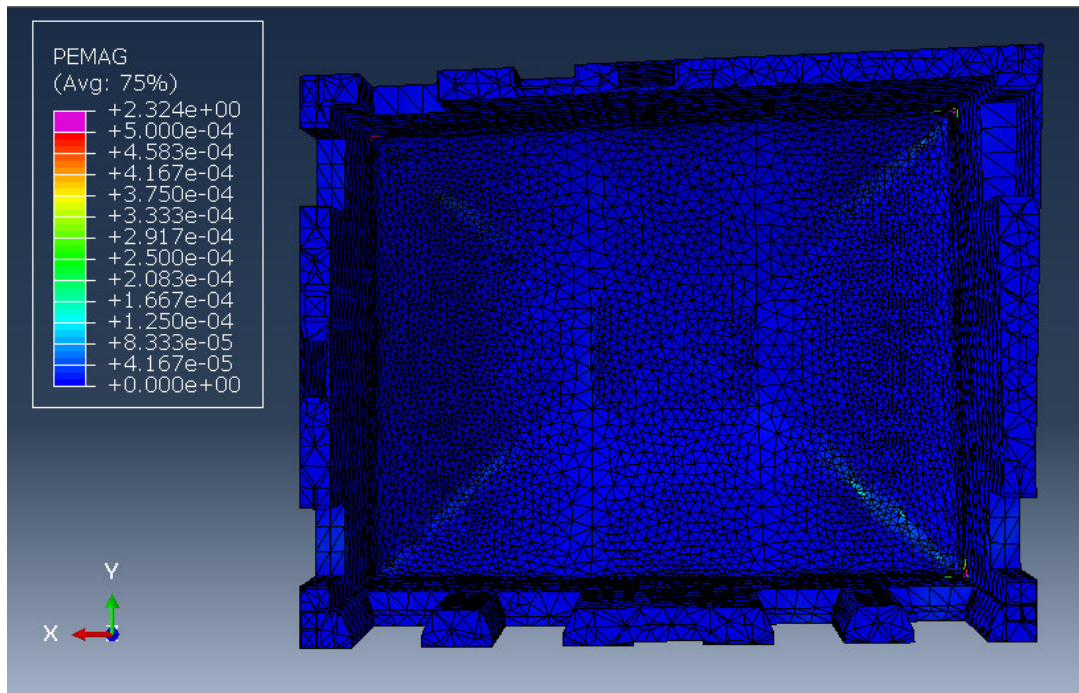


Figura 6-22: Deformazioni plastiche (intradosso) - Analisi non lineare con peso proprio

6.2.2 Analisi non lineare con cedimento

Come già descritto durante l'analisi del quadro fessurativo, la parete ovest risulta soggetta a numerose fessure passanti diagonali (Fig. 3-17) che fanno pensare a un danno indotto da cedimento alla base. Il primo carico aggiuntivo considerato in fase di analisi non lineare è stato dunque un cedimento applicato alla base di appoggio di questa parete. I risultati, soprattutto nei termini della variabile PEMAG sono analizzati per comprenderne il livello di corrispondenza con i dissesti presenti realmente sulla struttura, nelle regioni interessate.

Nello specifico è stato definito un cedimento di 20 mm su una porzione perfettamente centrale della base, di estensione pari a circa un terzo della sua lunghezza.

Per quanto riguarda l'applicazione dei carichi in fase di analisi, si è deciso di effettuare un'analisi multi-step: nello step-1 sono stati inseriti i carichi derivanti dal peso proprio della struttura mentre nello step-2 è stato introdotto il cedimento, sottoforma di condizione al contorno. Questo ha permesso di applicare il cedimento successivamente all'intero carico da peso proprio, quindi sulla struttura già caratterizzata da uno stato tensionale non nullo. Entrambi gli step sono stati caratterizzati da una suddivisione automatica in incrementi, secondo i parametri già definiti nell'analisi precedente, riportati nella Tabella 6-2 per completezza di trattazione.

| Tipo di suddivisione | N° max. di incrementi | Increment size | | |
|----------------------|-----------------------|----------------|-------------------|----------------|
| | | <i>Initial</i> | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> |
| Automatic | 100000 | 0.1 | $1 \cdot 10^{-8}$ | 1 |

Tabella 6-2: Parametri di definizione dello step di applicazione del peso proprio e del cedimento

Nella Figura 6-23 sono riportati gli sforzi massimi principali risultanti al termine dell'analisi. Come si può notare, sulla parete ovest si ha una concentrazione di sforzi di trazione molto più ingente rispetto a quella derivante dai soli carichi gravitazionali, a evidenziale che un cedimento simile a quello sottoposto potrebbe aver comportato, almeno in parte lo stato fessurativo reale della parete.

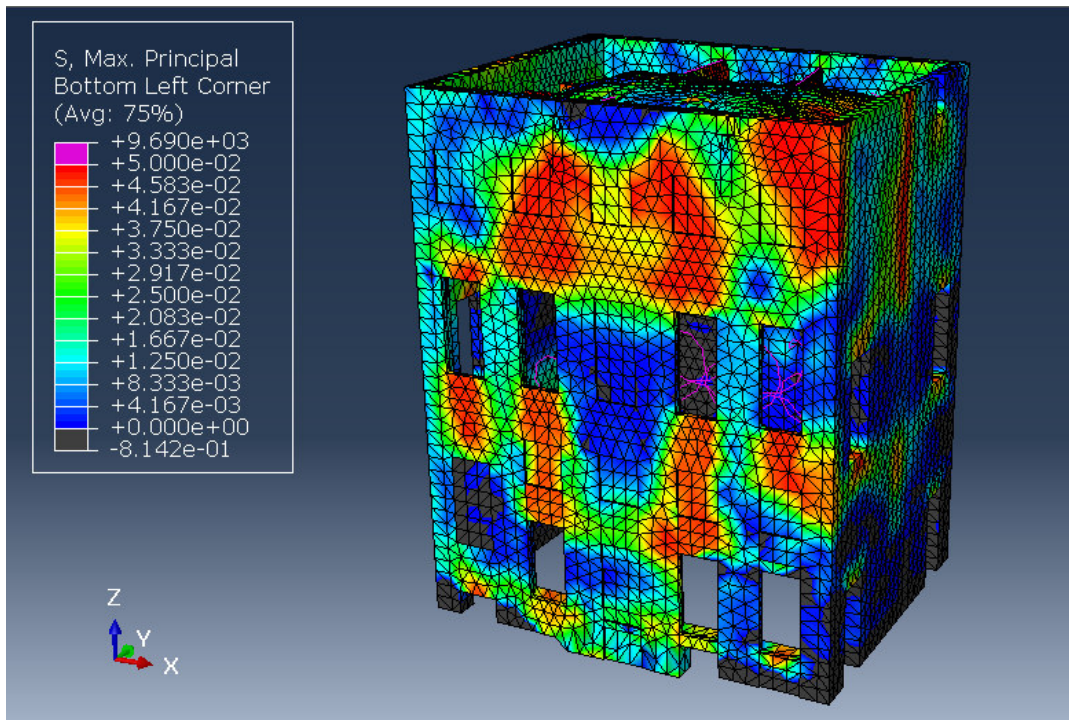


Figura 6-23: Sforzi principali massimi - Analisi non lineare con cedimento

I risultati più importanti sono quelli in termini della deformazione plastica. Essi sono riportati attraverso due viste della parete ovest, una dall'esterno (Fig. 6-24) e una dall'interno (Fig. 6-25).

Importanti deformazioni plastiche si generano al primo piano, al di sopra delle quattro finestre. Esse sono ben visibili da entrambe le viste e questo fa ipotizzare la presenza di fessure passanti. Si ritiene che si verifichi una buona corrispondenza tra questi risultati e il quadro fessurativo, soprattutto nella regione delle due fessure diagonali più centrali, che sono infatti di tipo passante. Dalla vista interna della stanza è ben percepibile inoltre come queste due fessure vadano ad espandersi per un buon tratto nella regione di volta immediatamente superiore. Andando a confrontare questa evidenza con lo stato di degrado della volta, si può notare che esiste una sua corrispondenza con due fessure di tipo passante rilevate circa in quel tratto, in prossimità di due frenelli (cfr. Fig. 6-25 e 3-17).

Le due fessure presenti al primo piano, più vicine agli spigoli della parete non sono invece del tutto captate dall'analisi. Si prenda in considerazione che i valori utilizzati per i parametri a definire il cedimento, non derivano da dati deterministici ma sono semplici ipotesi. Esse possono essere soggette dunque a variazioni, per l'esecuzione di nuove analisi, a verificare se è possibile raggiungere una maggiore corrispondenza con il quadro fessurativo.

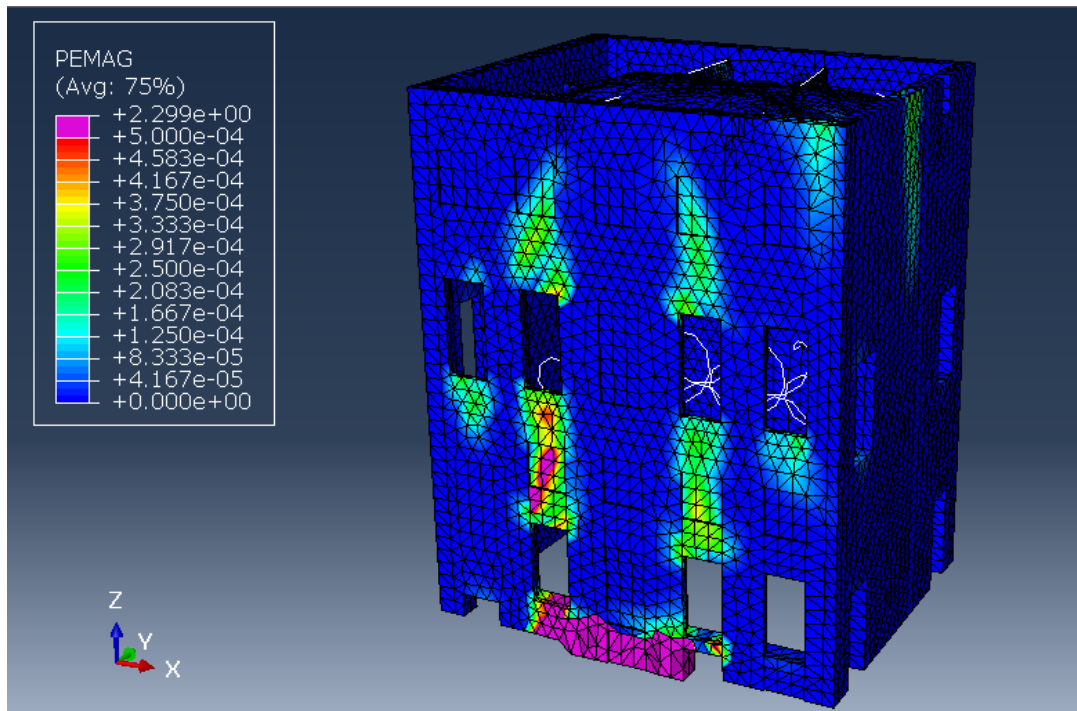


Figura 6-24: Deformazioni plastiche (esterno) - Analisi non lineare con cedimento

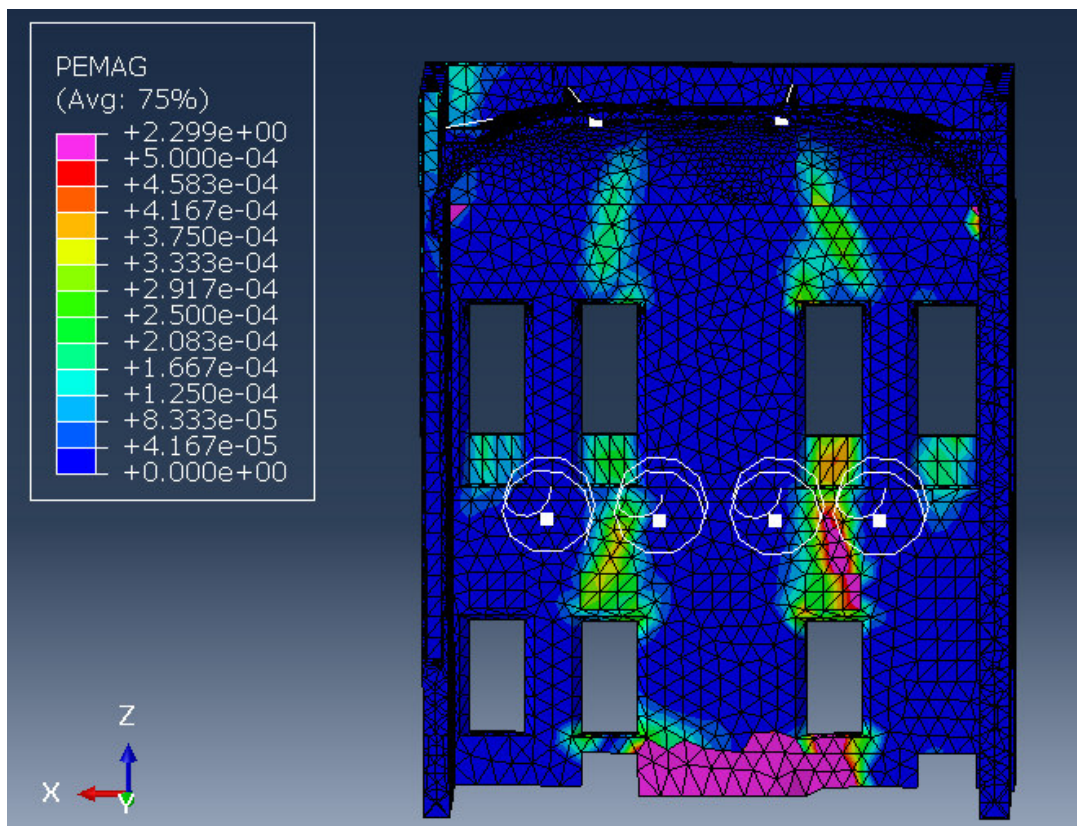


Figura 6-25: Deformazioni plastiche (interno) - Analisi non lineare con cedimento

6.2.3 Analisi non lineare con carico termico

Nel capitolo relativo la descrizione del quadro fessurativo era stata fatta un'ulteriore ipotesi riguardo la causa di alcune delle fessure più ingenti riscontrate nella stanza. Nello specifico ci si riferisce alla fessura verticale presente nella parte centrale della parte est, a partire dalla quota di calpestio del primo piano espandendosi in altezza nel muro, fino alla copertura, ma diffondendosi anche nella volta. La possibile causa di questo importante dissesto è stata individuata nella combinazione di discontinuità muraria e carico termico in corrispondenza della canna fumaria.

L'ultima delle analisi non lineari su modello completo è stata eseguita dunque considerando l'applicazione di un carico termico di 70 °C nelle due canne fumarie. Sono stati definiti due step per l'applicazione dei carichi di cui il primo prevede l'applicazione del peso proprio e il secondo l'imposizione del carico termico. Nello specifico, sono stati inseriti due campi per simulare la temperatura. Il primo definito sull'intera struttura, pari a 20 °C, a rappresentare la temperatura iniziale del sistema strutturale, il secondo, riferito alla temperatura raggiunta dai camini in uso, applicato alle sole pareti interne delle canne fumarie, di intensità 70 °C. Gli step sono stati parametrizzati analogamente a quelli nelle analisi precedenti (Tab 6-3).

| Tipo di suddivisione | N° max. di incrementi | Increment size | | |
|----------------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------|
| | | <i>Initial</i> | <i>Minimum</i> | <i>Maximum</i> |
| Automatic | 100000 | 0.1 | 1·10 ⁻⁸ | 1 |

Tabella 6-3: Parametri di definizione dello step di applicazione del peso proprio e del carico termico

Nelle Figure 6-26 e 6-27 sono illustrati i risultati in termini della variabile PEMAG, derivanti dall'analisi con carico termico completa. Innanzitutto si può affermare di avere una buona corrispondenza tra gli output ottenuti e il reale quadro fessurativo della struttura, nelle regioni qui considerate. Questo dimostra che l'ipotesi di carico termico a causare le fessure descritte è corretta.

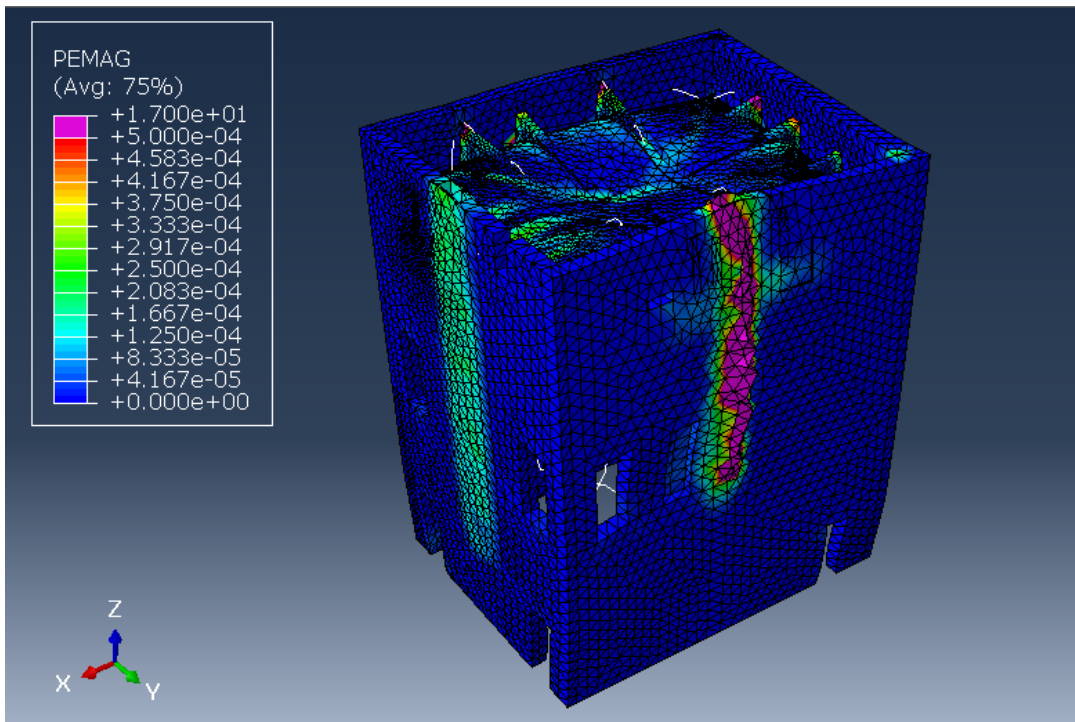


Figura 6-26: Deformazioni plastiche (panoramica esterna) - Analisi non lineare con carico termico

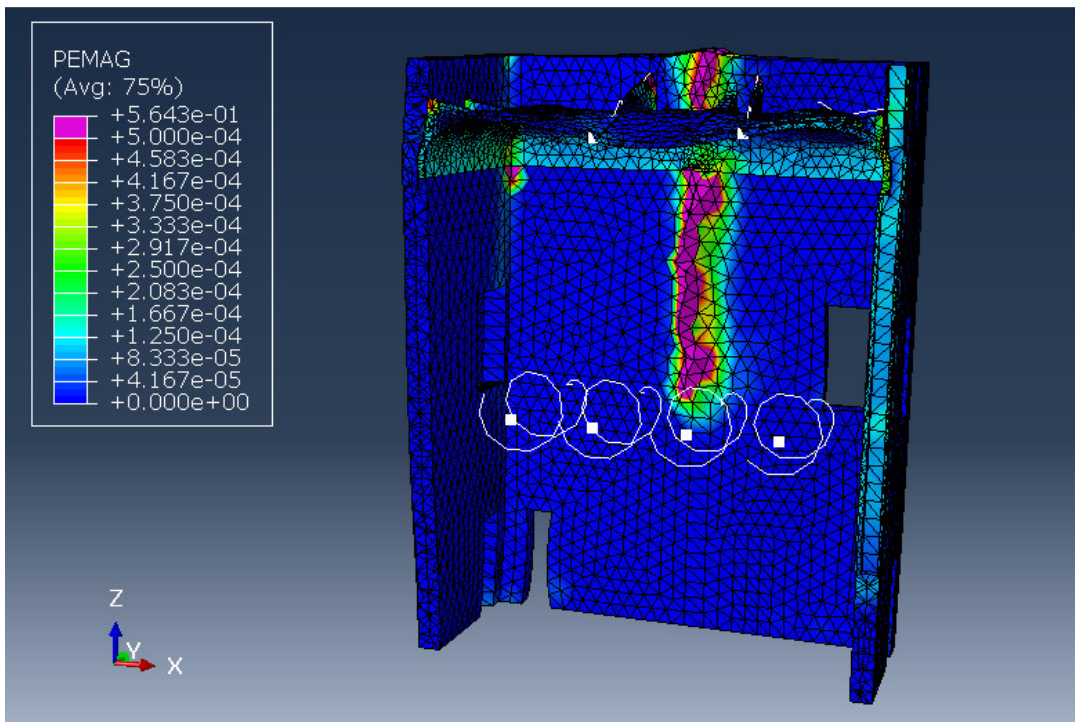


Figura 6-27: Deformazioni plastiche (panoramica interna) - Analisi non lineare con carico termico

L'ottima accuratezza dei risultati è apprezzabile soprattutto andando a osservare nel dettaglio le regioni soggette a deformazione plastica. La massima concentrazione di plasticizzazioni si rileva proprio in prossimità della canna

fumaria nella parete est, sia all'esterno (Fig. 6-28) che all'esterno (Fig. 6-29), a evidenziare la presenza di una importante fessura di tipo passante, coincidente con quella realmente rilevata sull'elemento murario (Fig. 3-22). Osservando invece le deformazioni in prossimità dell'altra canna fumaria, si può constatare che esse sono molto più contenute, non associabili quindi a una fessura passante, a rispecchiare perfettamente il quadro deessurativo della parete sud, caratterizzato esclusivamente da una buona densità di fessure non passanti. Si ritiene che sia stato possibile captare correttamente la differenza tra lo stato di fessurazione delle due pareti grazie alla corretta modellazione delle condizioni al contorno sui muri. Infatti, il vincolo verticale presente al centro della parete sud, a rappresentare l'ammorsamento con il muro della sala adiacente, si estende da terra fino alla massima quota del modello, mentre quello presente al centro della parete est arriva fino alla quota di calpestio del primo piano, a rappresentare un muro ammorsato solo al piano terra. Si ritiene dunque che i risultati di questa analisi abbiano una doppia valenza in quanto dimostrano sia la causa del quadro fessurativo che le ipotesi formulate in fase di definizione dei vincoli da imporre come condizioni al contorno sui muri. Il difetto dei risultati di questa analisi è nel non riuscire a catturare correttamente la fessura presente realmente nella volta nella sua regione est. Ci si aspettava infatti una propagazione della deformazione plastica presente nel muro, anche nell'elemento volta, ma questa è leggermente percepibile solamente all'intradosso. Si ritiene che questo non sia dovuto a una sbagliata

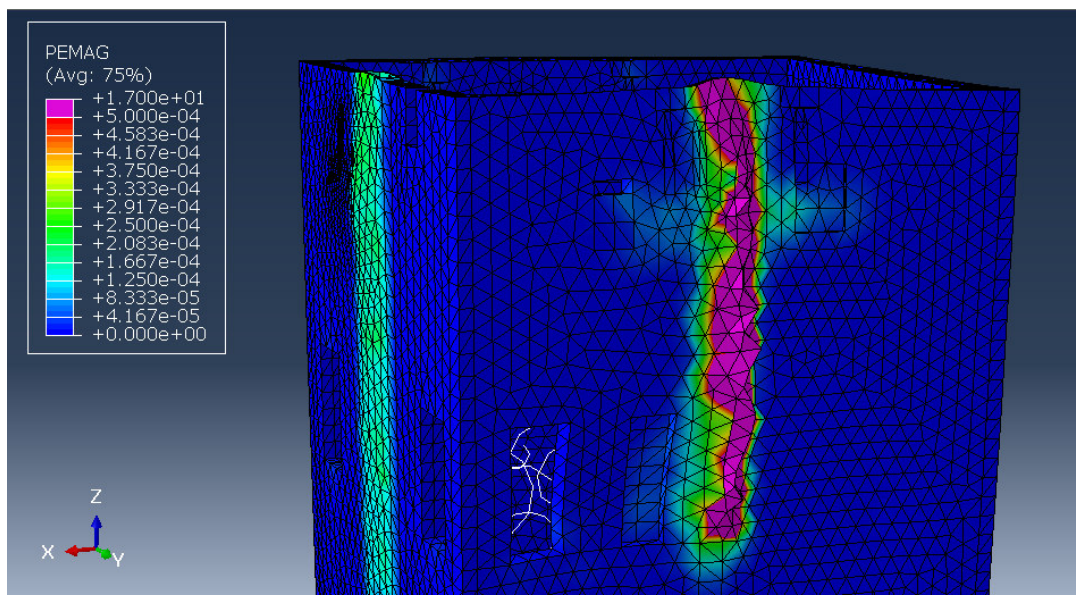


Figura 6-28: Deformazioni plastiche (dettaglio esterno) - Analisi non lineare con carico termico

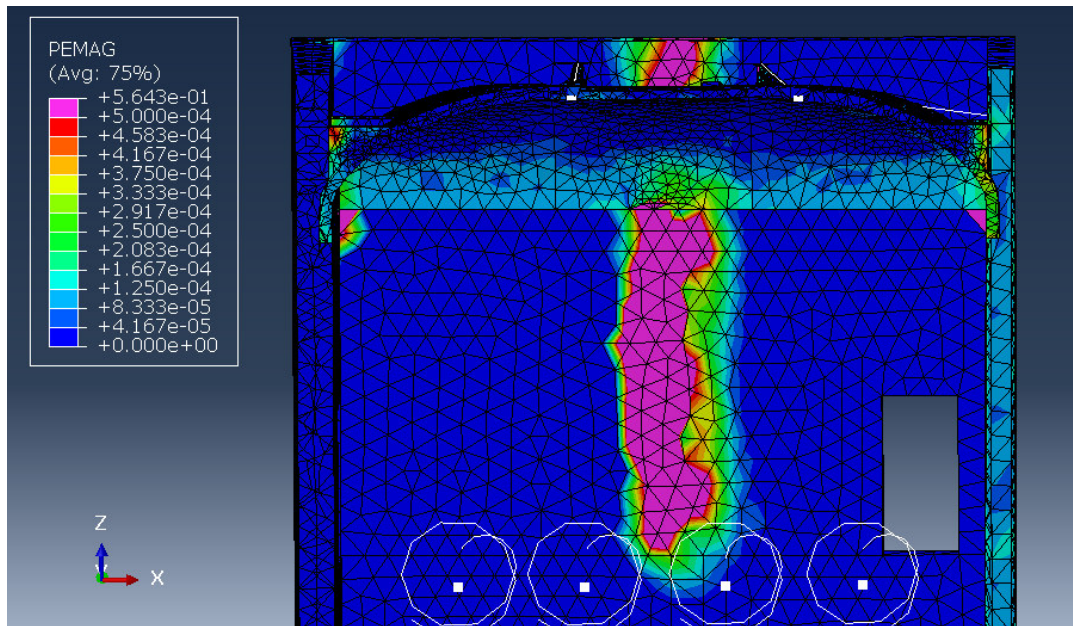


Figura 6-29: Deformazioni plastiche (dettaglio interno) - Analisi non lineare con carico termico

interpretazione della causa attestabile alla suddetta fessura nella volta, piuttosto a una modellazione poco raffinata della regione in cui si verifica il contatto tra la volta e la parte di muro in cui è inclusa la canna fumaria. Una migliore modellazione di questa parte del modello con buone probabilità, potrebbe portare a una migliore captazione dello stato fessurativo qui indagato.

Infine, una particolare evidenza è visibile dai risultati in Figura 6-30: il carico termico, per come imposto, ha causato la generazione di importanti deformazioni plastiche in prossimità delle canne fumarie ma anche, con intensità inferiori, nel resto della struttura, in particolare sulla volta. Non esiste una perfetta coincidenza con lo stato fessurativo, in termini globali, della struttura, ma questo dimostra comunque che esso è il frutto di una combinazione tra il peso proprio della struttura e altri carichi aggiuntivi, di diversa natura e di complessa previsione.

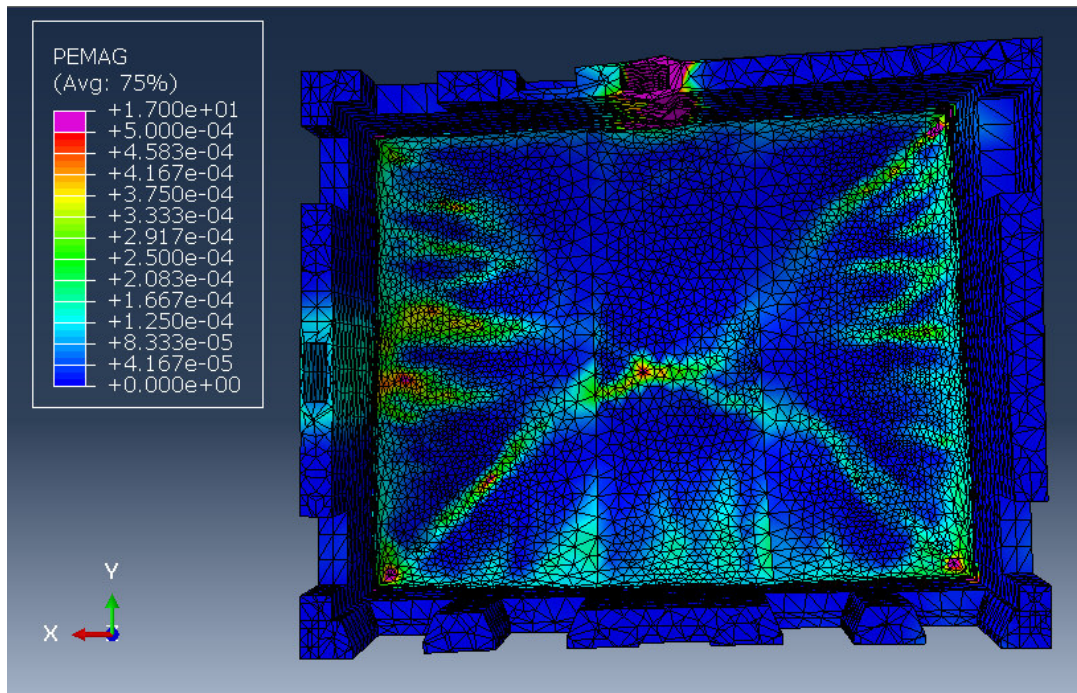


Figura 6-30: Deformazioni plastiche (intradosso) - Analisi non lineare con carico termico

7 Conclusioni

Si ritiene che lo studio presentato in questo elaborato abbia portato a buoni risultati sotto diversi punti di vista.

Innanzitutto, l'obiettivo principale e dichiarato del lavoro è stato quello di riuscire a individuare le cause dei dissesti rilevati nel salone 3.27 di Palazzo Magio Grasselli a Cremona. Sono state formulate diverse ipotesi, poi soggette a verifica mediante le diverse analisi svolte su un dettagliato modello a elementi finiti del sistema strutturale.

Nel complesso, i risultati delle analisi sono soddisfacenti in termini di riscontro con lo stato di fatto della volta, degli elementi murari e degli altri componenti strutturali. Nello specifico, attraverso le analisi di tipo lineare è stato possibile giustificare una buona parte delle fessure presenti sulla volta, la cui causa è attribuibile al peso proprio degli elementi facenti parte della struttura. Le analisi lineari evidenziano anche una concentrazione di sforzi di trazione sulle sommità dei frenelli, che si ipotizza potrebbe giustificare le fessure realmente esistenti su questi elementi. Le cause dei restanti dissesti presenti sulla struttura sono state indagate mediante analisi di tipo non lineare. In particolare, ottimi risultati si sono ottenuti imponendo un carico di tipo termico nelle canne fumarie, i quali hanno confermato l'ipotesi che questa sollecitazione fosse la causa del quadro fessurativo presente sulla parete est, che però non si propaga nella volta sovrastante, a differenza di quanto rilevabile in situ. Si ritengono buoni ma migliorabili invece i risultati dell'analisi con applicazione di un cedimento alla base della parete ovest: la corrispondenza con il quadro fessurativo non è perfetta ma variando i parametri di definizione del cedimento e indagando altre possibili cause, sicuramente si potrebbero ottenere output ancora migliori.

Tornando brevemente alle analisi lineari, si specifica che esse sono state eseguite considerando prima un modello con materiale isotropo e poi uno in cui la muratura è stata caratterizzata con comportamento meccanico ortotropo. Da un confronto tra risultati delle due analisi emerge che con materiale ortotropo, si ottengono sforzi inferiori all'intradosso e un leggero incremento degli sforzi di trazione nelle parti sommitali dei frenelli. Partendo dal presupposto che modellare il materiale come ortotropo sia una soluzione più corretta, in quanto più vicina al reale comportamento meccanico della muratura, sarebbe auspicabile considerare tale comportamento anche durante le analisi non lineari. Per la loro esecuzione è stato però definito il modello elasto-plastico con

danneggiamento CDP, che si basa su concetti di elasticità isotropa. In future implementazioni del modello del salone, potrebbe essere definito un nuovo modello elasto-plastico con danneggiamento che consideri l'ortotropia del materiale, in modo da poter ottenere risultati più accurati come output delle analisi non lineari.

Nel complesso, l'intero pacchetto di analisi completate è stato utile, non solo all'indagine delle cause del quadro fessurativo, ma anche a una più profonda comprensione del comportamento della struttura, in termini di distribuzione degli sforzi e delle deformazioni e della funzione di catene e frenelli, quest'ultima indagata anche grazie ad analisi su modello in assenza di tali elementi di rinforzo. La volta indagata non era assimilabile completamente a nessuna tipologia idealizzata e dunque non era prevedibile a priori il suo comportamento strutturale.

Approfondimenti futuri del lavoro potrebbero consistere proprio nella definizione di un modello idealizzato della stanza e in particolare della volta, per poterne confrontare i risultati con quelli da modello illustrato in questo elaborato, in modo da poter apprezzare le differenze in termini di accuratezza. Considerando che la definizione di un modello più idealizzato comporti un risparmio in termini di tempistiche di modellazione e disponendo dell'effettivo incremento di accuratezza derivante dall'utilizzo di un modello che riproduce con precisione le irregolarità del sistema strutturale, è possibile comprendere quale sia l'effettiva convenienza dell'eseguire una modellazione che raggiunga un livello di dettaglio come quello illustrato in questo elaborato, per il modello della stanza 3.27.

Come affermato in precedenza, i risultati dello studio sono buoni anche sotto altri punti di vista: avere ottenuto buone corrispondenze tra output delle analisi e stato di dissesto reale del salone è sintomo di una modellazione eseguita correttamente. Si può quindi affermare che il metodo sperimentato per la generazione del modello solido della volta sia efficiente e al contempo che sia migliorabile. Durante alcune fasi intermedie della modellazione si sono creati alcuni problemi di rallentamento delle operazioni, dovuti fondamentalmente all'eccessivo onere, in termini di memoria occupata, assunto dalla regione solida rappresentante la volta. In future applicazioni della procedura di modellazione geometrica qui illustrata, può essere sicuramente utile trovare una soluzione alla problematica appena esposta, mediante un'ulteriore regolarizzazione del modello geometrico, permettendo di lavorare con file più leggeri.

Proseguendo questa discussione riguardo le migliorie apportabili allo studio, si ritiene in generale che la via da percorrere sia quella di andare rendere la

modellazione più veritiera sia dal punto di vista geometrico, senza aggiunta di dettagli strutturalmente inessenziali, che delle proprietà dei materiali.

A tal fine, sarebbero utili ulteriori rilievi topografici eseguiti in loco, soprattutto su muri e estradosso, in modo da poter godere di una documentazione di partenza che riporti un'ancora migliore rappresentazione della realtà geometrica del caso studio.

Inoltre l'esecuzione di prove di caratterizzazione meccanica in sito, quali prove con martinetto piatto e martinetto piatto doppio, fornirebbero dei valori realistici delle proprietà meccaniche della muratura e della struttura. Considerando che i dati utilizzati nello studio presentato sono dati tabulati standard, utilizzare valori riferiti specificatamente al sistema reale analizzato porterebbe a una maggiore realistica dei risultati.

È certo che il livello di accuratezza desiderato per i risultati varia a seconda del livello di conoscenza che si vuole raggiungere riguardo il sistema strutturale. I possibili miglioramenti appena ipotizzati non risultano quindi utili, se si ritiene che le conoscenze acquisite con le analisi svolte siano già sufficienti.

8 Bibliografia

- [1] Landi, A. “COSTRUZIONE DELLA CITTÀ Fabbrica e tutela di palazzo Magio Grasselli a Cremona”, 2012.
- [2] Brumana, R., Condoleo, P., Grimoldi, A., & Landi, A. G. “Le volte a padiglione: forme analoghe, diverse apparecchiature varianti in un unico edificio tra xvii e xviii secolo”, Wendland, 2008.
- [3] Dusi A., Carletti R., Bergamaschi G. “Conservazione di Palazzo Magio Grasselli, relazione tecnica con calcoli esecutivi delle strutture”, 2008.
- [4] Montagnani G. “Analisi a Elementi Finiti per la valutazione della sicurezza di una sala di Palazzo Magio Grasselli a Cremona”, Master’s Degree Thesis, Politecnico di Milano, 2020.
- [5] Grimoldi A., Valisi L., Palazzo Magio Grasselli: Analisi termografiche, Dipartimento di Architettura e Studi Urbani, Laboratorio di analisi e diagnostica del costruito, Report Interno, 2015.
- [6] Laboratorio di restauro architettonico, Oggetto: Palazzo Magio Grasselli, Report interni, 2014-2015.
- [7] ABAQUS, Theory Manual, Version 6.13, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA, 2013.

- [8] Pande G.N., Liang J.X., Middleton J., “Equivalent elastic moduli of brick masonry”, *Computers and Geotechnics*, 1989.

- [9] Zucchini A., Lourenço P.B. “A micro-mechanical model for the homogenization of masonry”, *Int. J. Solids Structures*, 2002.

- [10] Ghiassi B., Milani G., “Numerical Modelling of Masonry and Historical Structures: From Theory to Application” , Woodhead Publishing, 2019.

- [11] Eurocode 6, Design of Masonry Structures - Part 1-1: General Rules for Reinforced and Unreinforced Masonry Structures, 2005.

- [12] Page A.W. “An experimental investigation of the biaxial strength of brick masonry“, *Proc. 6th Int. Brick Masonry Conf.*, Rome, 1982.

Ringraziamenti

Con questo lavoro di tesi giunge al termine il mio percorso di Laurea Magistrale e ripensando agli ultimi due anni e mezzo, non posso altro che descriverli come un vero e proprio insieme di esperienze e sensazioni: cambiare sede universitaria e di conseguenza cambiare colleghi, scoprire ancora più nel profondo il mondo dell'Ingegneria Civile, prendere parte a progetti di gruppo entusiasmanti, sperimentare (aimé) la didattica a distanza e infine intraprendere e concludere questo lungo, stimolante e temprante percorso di tesi.

Mi sento veramente orgoglioso dei traguardi raggiunti e di come sono cambiato in questi anni ma sono totalmente consapevole che tutto questo non sarebbe potuto succedere senza le persone che mi sono state accanto, a cui devo i miei più sentiti ringraziamenti.

Vorrei ringraziare il Professor Taliercio, prima per aver svegliato, grazie alle sue lezioni, il mio interesse per l'analisi di edifici storici e poi per avermi seguito in modo così attento e disponibile nella lavorazione e nella stesura di questa tesi, trasmettendomi continuamente fiducia e insegnamenti.

In un mondo come quello di oggi, in cui si vive in una corsa interminabile, il tempo ha assunto un valore altissimo, quindi un particolare grazie va alla Prof.ssa Condoleo, che negli ultimi mesi ha fatto proprio del suo tempo, oltre che delle sue conoscenze, un dono per me.

Un grazie infinito ai miei genitori, che ogni giorno mi fanno sentire fortunato per tutto l'amore che mi trasmettono. Li ringrazio perchè i loro sacrifici mi hanno permesso di essere oggi Ingegnere e soprattutto una persona felice. Li ringrazio per aver condiviso in questi anni ogni gioia e ogni preoccupazione con me, non lasciandomi mai solo, mai senza il loro riferimento. Tutto quello per cui io provi a ringraziarli, è impagabile.

Mio fratello Sebastiano, nei ringraziamenti della sua tesi di laurea, nel 2017, scrisse che avrebbe ricambiato il supporto che io (forse anche un po' inconsciamente) gli avevo fornito. Beh io dico: promessa mantenuta! Lo ringrazio immensamente per tutti i momenti e le battute che solo con lui potrei condividere e per essermi di consiglio ed esempio nelle scelte di vita e carriera.

Un grazie speciale a Cacio, Cami, Carli, Ciuti, Cla, Cola, Dani, Feb, Fede, Fra, Leo, Marta, Marti, Pippo, Tommi e Franca, miei più cari amici, con cui è sempre

più bello trascorrere ogni momento, con semplicità, sincerità e con una buona dose di frasi tormentoni ripetute allo sfinimento.

Il percorso di laurea triennale, a Lecco, mi ha dato la fortuna di conoscere persone che tuttoggi sono felice di considerare miei cari amici, con cui ho condiviso e spero di condividere esperienze entusiasmanti. Un grazie va dunque a loro: Albi, Angelino, Bea, Davide, Federica, Jack, Manu, Raf e Thom.

Chi mi conosce sa quanto sia importante per me la musica e ora voglio assolutamente ringraziare le persone che, oltre a essere miei amici, mi permettono di coltivare il mio amore per questa arte: Fede, Lore e Nic, ai più noti come gli Abilenia; Bush, Chine, Gio e Sici, in arte i Trincea.

Ci tengo infine a ringraziare tutti i miei colleghi, quelli con cui ho collaborato in team di progetto e quelli con cui ho scambiato opinioni, consigli e punti di vista, ognuno prezioso per il raggiungimento del nostro traguardo comune.

Samuele T.D. Pecora