

# POLITECNICO DI TORINO

DISEG

Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Edile**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Tecniche di rinforzo strutturale per il recupero di edifici storici in muratura Applicazioni del BIM e confronto fra software**



### **Relatori**

Prof. Carlo Caldera  
Dott. Paolo Roffina  
Ing. Valentina Villa

### **Candidato**

Matteo Albesano

Marzo 2019



# Indice

|  |    |
|--|----|
| Abstract.....  | 1  |
| Premessa .....   | 5  |
| 1. Murature in edifici storici.....  | 7  |
| 1.1 Classificazione delle tipologie di muratura esistenti .....                      | 7  |
| 1.2 Caratteristiche delle murature esistenti in generale .....                       | 11 |
| 1.3 Caratteristiche degli edifici in muratura .....                                  | 15 |
| 1.3.1 Edifici di prima classe .....  | 16 |
| 1.3.2 Edifici di seconda classe .....  | 26 |
| 1.3.3 Edifici di terza classe.....   | 30 |
| 2. Solai in edifici storici: classificazione delle tipologie e caratteristiche ..... | 35 |
| 2.1 Solai voltati .....  | 35 |
| 2.1.1 Volte a botte .....  | 35 |
| 2.1.2 Volte a crociera .....   | 37 |
| 2.1.3 Analisi concettuale delle volte .....  | 37 |
| 2.1.4 Schema statico delle cupole .....  | 38 |
| 2.2 Solai lignei .....   | 40 |
| 3. Unità tecnologiche .....  | 47 |
| 3.1 Muratura portante in mattoni pieni .....   | 47 |
| 3.2 Volta a botte in mattoni pieni.....  | 49 |
| 3.3 Intradosso di solaio in legno a doppia orditura.....                             | 50 |
| 3.4 Estradosso di solaio in legno a doppia orditura .....                            | 52 |
| 4. Lesioni, dissesti e relative cause .....  | 55 |
| 4.1 Lesioni fisiologiche e lesioni patologiche .....                                 | 55 |
| 4.1.1 Lesioni da schiacciamento.....   | 56 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1.2 | Lesioni di distacco.....  | 59 |
| 4.1.3 | Dissesti dovuti alle spinte.....                                | 60 |
| 4.1.4 | Dissesti dovuti a cedimenti in fondazione.....                  | 63 |
| 4.1.5 | Dissesti dovuti alle azioni sismiche.....                       | 66 |
| 4.2   | Lesioni strutturali e lesioni non strutturali .....             | 79 |
| 4.3   | Diagnostica dei quadri fessurativi.....                         | 81 |
| 4.3.1 | Il metodo degli sforzi .....                                    | 82 |
| 4.3.2 | Metodo degli spostamenti .....                                  | 83 |
| 4.4   | Concetti avanzati nell'analisi delle lesioni .....              | 84 |
| 4.4.1 | Metodo dei vettori spostamento .....                            | 84 |
| 4.4.2 | Metodo della trilaterazione.....                                | 84 |
| 4.4.3 | Uso dei fessurimetri .....                                      | 84 |
| 4.5   | Prove in situ non distruttive .....                             | 85 |
| 4.5.1 | Prove soniche e ultrasoniche .....                              | 85 |
| 4.5.2 | Georadar G.P.R. ....  | 87 |
| 4.5.3 | Termografia.....  | 87 |
| 5.    | Tipologie di interventi e relativi materiali utilizzabili ..... | 89 |
| 5.1   | Incatenamenti metallici.....                                    | 89 |
| 5.2   | Applicazioni di materiali compositi.....                        | 92 |
| 5.2.1 | Fibre .....   | 93 |
| 5.2.2 | Matrici .....   | 94 |
| 5.2.3 | FRP ( <i>Fiber Reinforced Polymers</i> ).....                   | 94 |
| 5.2.4 | FRCM ( <i>Fiber Reinforced Cementitious Matrix</i> ).....       | 95 |
| 5.2.5 | Planarità delle superfici.....                                  | 95 |
| 5.2.6 | Linee Guida .....   | 96 |
| 5.2.7 | Rinforzo di pannelli murari .....                               | 98 |
| 5.2.8 | Rinforzo di archi e volte.....                                  | 99 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 5.2.9  | Rinforzo di colonne in muratura .....                                      | 100 |
| 5.2.10 | Ancoraggi .....  | 100 |
| 5.2.11 | Preparazione del substrato .....   | 102 |
| 5.2.12 | Rinforzo di strutture in muratura .....                                    | 103 |
| 5.2.13 | Rinforzo di strutture in legno .....                                       | 104 |
| 5.3    | Cuci - scuci .....   | 105 |
| 5.4    | Rifacimenti .....  | 107 |
| 5.4.1  | Rifacimento di solai di interpiano o di copertura con cordolo .....        | 107 |
| 5.4.2  | Rifacimento di architravi con profili metallici .....                      | 112 |
| 6.     | Codifica degli elaborati .....   | 115 |
| 7.     | Procedure .....  | 117 |
| 7.1    | Modellazione 3D .....  | 117 |
| 7.2    | Elaborazione video .....   | 123 |
| 8.     | Matrici di confronto .....   | 133 |
| 8.1    | Scelta del software per la modellazione 3D .....                           | 135 |
| 8.2    | Scelta del software per l'elaborazione video .....                         | 139 |
| 8.3    | Scelta del software per il passaggio del modello da Revit a Sketchup ..... | 143 |
|        | Conclusioni .....  | 147 |
|        | Bibliografia e sitografia .....  | 151 |
|        | Glossario .....  | 156 |
|        | Indice delle figure .....  | 167 |
|        | Indice delle tabelle .....   | 173 |
|        | Riferimenti normativi .....  | 175 |
|        | Ringraziamenti .....   | 177 |
|        | Allegati .....   | 181 |



## **Abstract**

La tesi propone lo studio delle metodologie pratiche d'intervento per il rinforzo delle strutture degli edifici storici in muratura. Tale studio viene affrontato mediante l'applicazione della metodologia *Building Information Modeling* e di alcuni software tipicamente utilizzati per tale metodologia. L'obiettivo della tesi è quello di sperimentare l'utilizzo del metodo BIM nel campo del recupero edilizio e individuare quindi i vantaggi e gli svantaggi di tale metodo in un campo di piccola scala quale quello delle ristrutturazioni. Oltre alle varie normative di riferimento, per tale campo, si è fatto anche riferimento a manualistica storica per modellare, tramite l'utilizzo del software BIM Autodesk Revit, alcune unità tecnologiche spesso ricorrenti negli edifici storici, in una forma il più standard possibile. Tali modelli, tramite l'inserimento di alcuni QRcode sugli elaborati grafici, sono consultabili anche in formato 3D su qualsiasi dispositivo mobile che abbia installata l'applicazione di condivisione dei progetti A360. Infine, è stato elaborato, per ogni metodologia di rinforzo, un video dimostrativo tramite il software di progettazione 4D Navisworks, visualizzabile sempre tramite la lettura di un QRcode presente sugli elaborati. Per la migliore comprensione della tesi ed una maggiore consultabilità della stessa, anche da parte delle persone non specializzate sul tema, è stato redatto un glossario tecnico. Come risultato finale della tesi si sono individuati punti di forza nell'applicazione della metodologia BIM allo studio del rinforzo strutturale di edifici storici ma anche non trascurabili punti deboli, evidenziati a favore di eventuali sviluppi futuri che portino al loro superamento.





*The topic of this thesis is the study of intervention methodologies for the reinforcement of the structures of historic masonry buildings. This study is approached through the application of Building Information Modeling methodology and of some software typically used for this methodology. The aim of this thesis is to experiment the use of the BIM method in building restoration and then identify the advantages and disadvantages of such method in the small-scale field of restructuring. In addition to the various reference standards, this study refers to historical manuals in order to shape some technological units recurring in historical buildings, in a form as standard as possible, by using the BIM modeling software Autodesk Revit. By inserting some QR codes on graphic drawings, these models can also be consulted in 3D format on any mobile device on which the project sharing application 'A360' has been installed. Finally, a demonstration video was made for each reinforcement methodology using the 4D design software Navisworks – these videos can also be viewed by reading a QR code on the documents. A technical glossary has been drawn up to improve the understanding of the text also by non-specialized readers. As a final result of the thesis, strengths were identified in the application of the BIM methodology to the study of structural reinforcement of historical buildings. However, considerable weaknesses have been pointed out, so that they can be overcome through any future developments.*



## **Premessa**

La presente tesi vuole essere una proposta di manuale tecnico operativo interattivo nel campo del recupero edilizio.

Per il recupero di un edificio storico, a seguito di appropriate operazioni di rilievo, vanno eseguiti studi e valutazioni sull'opportuno rinforzo della struttura dell'edificio, in vista di un eventuale cambio di destinazione d'uso.

Il seguente saggio non è basato sull'analisi di un determinato caso studio, ma si propone come approfondimento generale sul tema del rinforzo strutturale di edifici storici. Perciò saranno evidenziati gli elementi e le caratteristiche maggiormente ricorrenti negli edifici in muratura costruiti nel territorio italiano tra il 1750 e il 1950.

La filosofia su cui poggia il presente saggio è quella del recupero edilizio. Molto spesso il mondo dell'edilizia è visto unicamente come quel settore dedicato alla costruzione di nuovi manufatti, nei migliori casi, il più efficienti possibili, anche a costo di demolirne altri ormai considerati obsoleti e inefficienti. Ma, a volte, questa valutazione viene fatta in mancanza di studi approfonditi sulla storia dell'edificio stesso o della metodologia con cui è stato costruito. Questo può accadere in contesti, soprattutto al di fuori dell'Italia, in cui non vi sia una affermata presenza di enti di salvaguardia dei patrimoni, quali ad esempio le soprintendenze, che si occupino di valutare approfonditamente l'esigenza o meno di vincolare edifici ormai antichi ma rilevanti per storia e per tecnologia costruttiva. Altre volte, purtroppo, le valutazioni sono guidate da interessi puramente economici, piuttosto che da una visione di sviluppo socioculturale. Infine, in alcuni casi, si scende a compromessi affidando ad un edificio di rilevanza architettonica, una nuova destinazione d'uso, poco nobile.

In ogni caso, laddove venga scartata l'opzione della demolizione, l'edificio, per tornare a nuova vita, deve essere sottoposto ad interventi di manutenzione straordinaria. Paradossalmente, questa tendenza è molto presente in Italia, paese nel quale il rischio sismico però è molto alto. Quindi si incorre non solo nella verifica statica dell'edificio, bensì anche nella verifica della sua resistenza ad eventuali sollecitazioni sismiche.

Gli interventi da eseguire su un edificio storico non sono solo di natura globale, in difesa da eventuali eventi sismici, ma anche di natura locale. Spesso per fare in modo che l'intero edificio non abbia un comportamento globale che porti al collasso, bisogna intervenire localmente su alcuni nodi strutturali. Questa tesi, quindi, si propone di analizzare alcune tipologie di interventi tecnici e quindi di studiare le tecnologie e i materiali utilizzabili. Non si occupa di studiare eventuali nuove tecnologie di intervento, ma di individuare un metodo per l'esposizione e la spiegazione di tali tecnologie e metodologie in maniera nuova. Questa innovazione è portata dalle moderne tecnologie BIM (*Building Information Modeling*), sottoforma di software di progettazione, software di elaborazione video e applicazioni che permettano la visualizzazione dei modelli elaborati. Per l'ottenimento di tali risultati sarà sperimentato l'utilizzo di diversi software equivalenti, che saranno quindi confrontati in funzione della complessità nell'utilizzo e della qualità del risultato.

Il lettore avrà quindi la possibilità di avere informazioni su quelle che furono le tecnologie di costruzione degli edifici in muratura fino alla metà del secolo scorso e su quali possono essere alcune tecnologie di intervento per il rinforzo strutturale di alcuni nodi strutturali. Riceverà queste informazioni sia in modo tradizionale, tramite la lettura del testo e l'interpretazione delle schede antologiche e delle tavole grafiche, sia in modo originale, tramite il supporto di dispositivi portatili che gli permettano di leggere QRcodes e visionare il materiale interattivo presente in tutta la tesi.

# 1. Murature in edifici storici

## 1.1 *Classificazione delle tipologie di muratura esistenti*

La “muratura” è un materiale composito di elementi lapidei e leganti che li tengono assieme [1]. Si possono distinguere varie tipologie di muratura in funzione della forma, della tecnica utilizzata per costruirla e di altri aspetti quali:

- il materiale lapideo e il legante utilizzati (solitamente come legante si utilizza una malta);
- la modalità con la quale i componenti sono assemblati;
- l'epoca storica in cui è stata eseguita la costruzione della muratura e quindi del manufatto;
- la zona geografica in cui il manufatto è stato costruito (solitamente veniva costruito del materiale più facilmente reperibile in tale zona).

Siccome sulla base di tali criteri è possibile ritrovare un numero elevato di tipologie di murature differenti, è bene raggruppare tali tipologie in macrocategorie all'interno delle quali queste possano avere caratteristiche comuni dal punto di vista delle proprietà meccaniche e quindi semplificarne la catalogazione.

Nei primi anni '80, a seguito dei terremoti del Friuli e dell'Irpinia, in Italia si risvegliò l'interesse della comunità scientifica nei confronti di questo materiale antico e quindi l'interesse a cominciare una prima classificazione di questa.

Fino ad allora, dal momento che l'attenzione era concentrata su altri materiali quali il cemento armato e l'acciaio, poiché rispecchianti al meglio i principi della Scienza delle Costruzioni, l'Ingegneria strutturale e gli enti di normazione in merito non si erano occupati dell'argomento “muratura”.

Quindi, fu esplicitata una prima distinzione, che si basava principalmente su:

- il tipo di materiale lapideo utilizzato (laterizi, pietra, ecc.);
- la metodologia di posa in opera e disposizione degli elementi all'interno della tessitura muraria (regolare, irregolare, ecc.)

In questo modo, si individuarono una decina di tipologie murarie, comprendenti anche le murature moderne in blocchi di calcestruzzo o laterizi forati.

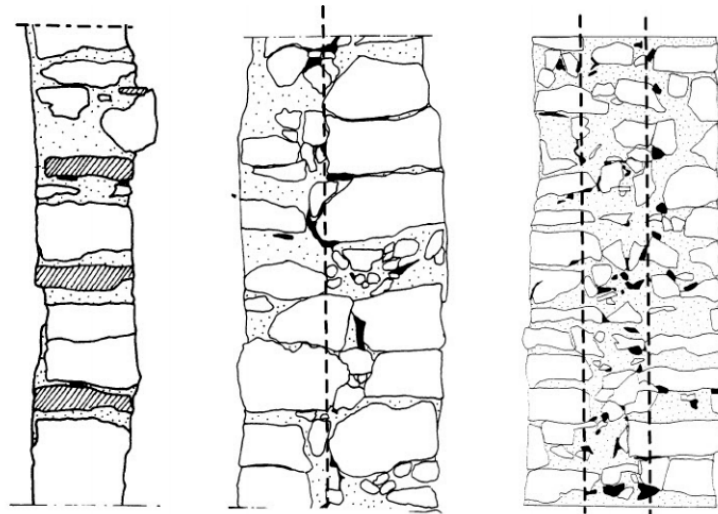
Per quanto riguarda prettamente le murature “antiche”, queste possono essere comunque classificate in tre tipologie:

- **muratura irregolare**, costituita da elementi di forma irregolare, solitamente derivanti da letti di fiume (ciottoli levigati o spigolosi) o da cave (scapoli, scaglie) ecc.;
- **muratura semi-regolare**, costituita da elementi che si presentano in forma semi-regolare a seguito di una lavorazione sommaria e quindi di un taglio non perfettamente squadrato;
- **muratura regolare**, costituita da elementi che si presentano in una forma regolare a seguito quindi di un taglio perfettamente squadrato, eseguibile su materiali quali il tufo, il laterizio e alcune pietre.

Passando dalle murature irregolari a quelle regolari, aumenta la resistenza delle stesse alle azioni orizzontali di origine sismiche e aumentano le loro caratteristiche di tipo meccanico. Infatti, in caso di evento sismico, una muratura irregolare composta da elementi arrotondati, può arrivare alla disgregazione e perdere la sua monoliticità, cosa che normalmente non avviene solamente a causa dei carichi verticali. Questo fenomeno può essere evitato anche solo inserendo all'interno della tessitura muraria dei collegamenti trasversali e, in questo modo, anche a seguito del crollo, il muro è in grado di mantenere la sua forma geometrica e monoliticità.

Muri di spessori diversi, anche se composti da elementi della stessa pezzatura, possono avere comportamenti diversi. Con riferimento alla Figura 1.1, si può vedere

come, nel paramento murario in sezione a sinistra, le pietre prendono praticamente tutto lo spessore del muro, rendendolo monolitico. Aumentando lo spessore, come nella sezione muraria centrale, il muro può diventare a due paramenti fino ad aumentare a tal punto da diventare una vera e propria muratura a sacco, come nella sezione a destra.



**Figura 1.1** - Murature antiche di spessore diverso, figura tratta da [2]

Per questo motivo, nello stesso edificio storico potrebbero riscontrarsi comportamenti meccanici diversi per la presenza di murature di spessori diversi, seppur realizzate con gli stessi elementi lapidei di stesse dimensioni e fattura.

Un modo per tentare di uniformare i comportamenti a quello monolitico potrebbe essere quello di inserire dei “*diatoni*”, ovvero degli elementi di collegamento trasversale, o delle listature in mattoni pieni. Infatti, seppure un muro è composto da due paramenti murari ma questi sono ben collegati fra di loro, questo si comporterà monoliticamente e sopporterà meglio le sollecitazioni che riceverà perpendicolarmente al suo piano.

Lavorando con pietre tenere quali il tufo, è possibile ottenere degli elementi maggiormente squadrati e quindi delle murature più resistenti piuttosto che lavorando con pietre dure e quindi elementi di forma più arrotondata perché meno lavorabili. In quest’ultimo caso, se gli elementi componenti la muratura erano troppo piccoli e irregolari,

negli angoli solitamente venivano messi degli elementi di pezzatura maggiore e maggiormente squadri per migliorare la connessione tra i muri ortogonali.

La normativa attuale definisce una classificazione delle murature in base al tipo di elementi lapidei utilizzati e al livello di lavorazione e posa in opera degli stessi. Tale classificazione, nello specifico, è esplicitata nella Tabella C.8.5.I della circolare esplicativa delle NTC 2018 (sul supplemento ordinario n. 5 alla Gazzetta ufficiale n. 35 dell'11 febbraio 2019). La classificazione è richiamata, nella presente tesi, in Tabella 1.1.

**Tabella 1.1** - Tipologie di muratura secondo le NTC 2018

|          | <b>Tipologia di muratura</b>  |
|----------|---|
| <b>A</b> | Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)          |
| <b>B</b> | Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo                    |
| <b>C</b> | Muratura in pietre a spacco con buona tessitura                                     |
| <b>D</b> | Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)                      |
| <b>E</b> | Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)                |
| <b>F</b> | Muratura a blocchi lapidei squadri  |
| <b>G</b> | Muratura in mattoni pieni e malta di calce  |
| <b>H</b> | Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: UNI foratura $\leq 40\%$ ) |



La Tabella 1.1 si può idealmente dividere in due parti:

1. le categorie A, B, C, D, E, F e G si riferiscono a muratura più antiche;
2. la categoria H è invece una muratura nata nel XX secolo.

Ci sono quindi 7 categorie di murature antiche, che si possono ridurre a 3 se si inglobano le categorie D, E, F e G nella C. Quindi passando da A a C si hanno murature sempre migliori e:

- all'interno della categoria A rientrano le **murature irregolari**, ovvero quelle realizzate con pietre piccole, a sacco e male intessute;
- all'interno della categoria B rientrano le **murature semi-regolari**, ovvero quelle realizzate con conci sbazzati, a sacco con diatoni e ben intessute;
- all'interno della categoria C rientrano le **murature regolari**, ovvero quelle realizzate con pietre a spacco e pietre tenere, con le quali è possibile ottenere conci più regolari, e ben intessute.

Quindi, quando ci si trova di fronte ad una muratura antica, bisogna capire se si tratta di muratura irregolare, semi-regolare o regolare, perché questo influisce direttamente sulla sua resistenza a compressione o a taglio.

## ***1.2 Caratteristiche delle murature esistenti in generale***

La muratura genericamente è sempre composta da due componenti: gli elementi lapidei e la malta. Di qualunque tipologia essa sia, regolare o irregolare, la muratura ha sempre una resistenza a compressione maggiore rispetto alle resistenze a trazione o a taglio.

La resistenza a trazione non è nulla ma molto bassa. Infatti, nei calcoli e nelle applicazioni numeriche conviene sempre trascurarla. Ciò sembra essere noto ai costruttori da molti secoli, infatti le murature sono sempre state disposte in modo che la sollecitazione dominante fosse quella a compressione.

Le murature sono spesso costituite di elementi lunghi ed estesi collegati tra di loro in modo da costituire insieme una struttura il più scatolare possibile e reagire quindi agli sforzi di trazione sfruttando una specie di precompressione naturale: la struttura non si rompe finché lo sforzo di trazione non supera il peso del muro. Di conseguenza, in un edificio in muratura, quasi tutte le pareti devono essere portanti e le tramezzature sono solo poche altre pareti, anch'esse in muratura, di sezione minore rispetto a quelle portanti. Questo provoca una grossa differenza fra i carichi maggiormente influenti. Infatti, negli edifici di muratura portante, la maggior parte del peso dell'intero edificio è dato proprio dalla struttura. Mentre per quanto riguarda gli edifici con struttura in cemento armato, il telaio influisce poco sul peso dell'intero edificio e i carichi maggiori sono quelli portati, non strutturali o variabili che siano.

Essendo la muratura un materiale formato da due elementi, per studiare la sua resistenza a compressione è bene studiare separatamente la resistenza a compressione dei suoi componenti, ossia degli elementi lapidei e della malta, e successivamente combinare le due resistenze ottenute per ricavare quella della muratura.

La resistenza dei materiali lapidei si può valutare eseguendo prove di compressione su provini ricavati dalla roccia. Si noterà che sia la resistenza a trazione che quella a compressione possono avere valori molto variabili a seconda del tipo di roccia [1], ma non esiste comunque una proporzionalità diretta tra queste due resistenze.

Per quanto riguarda le malte invece, le NTC 2018 esprimono le loro resistenze in funzione di un parametro simboleggiante la loro resistenza media a compressione. Inoltre, a seconda della tipologia di malta, ovvero della sua natura, sono previste diverse classi di resistenza.

La resistenza a compressione della muratura quindi si ottiene partendo da quelle dei suoi componenti, tenendo conto di alcune teorie che sono state messe a punto sulla base di osservazioni qualitative di quello che esiste nella realtà e che si basano sui principi di “perfetta aderenza” tra mattone e malta e comportamento lineare dei materiali.

A livello qualitativo quindi, si nota che la muratura ha un comportamento intermedio tra quello degli elementi e quello della malta.

Quando la muratura si rompe, si creano delle fessure verticali in direzione del carico, in quanto nascono, nella direzione ortogonale a quella del carico, degli sforzi di trazione.

Se si fissa l'attenzione, per semplicità, su una muratura di mattoni, si può notare come le tensioni di trazioni nascono nella direzione ortogonale al carico a causa delle interazioni tra mattoni e malta. Questo è dovuto al fatto che la malta ha una deformazione maggiore di quella dei mattoni. Se questa fosse libera di scorrere sui mattoni, avrebbe deformazioni maggiori per via del minore modulo elastico e del diverso coefficiente di Poisson.

Queste deformazioni sono impedita dalla presenza di attrito tra malte e mattoni e quindi di tensioni tangenziali all'interfaccia tra mattoni e malta che ripristinano la congruenza delle deformazioni tra i materiali. queste tensioni tangenziali creano delle tensioni orizzontali di compressione sulla malta, che diminuiscono la sua resistenza a trazione, e delle tensioni orizzontali di trazione sui mattoni, che diminuiscono la resistenza a compressioni degli stessi. Questo spiega perché, alla fine, la resistenza della muratura è un valore medio tra quelli degli elementi che la compongono.

Da queste teorie qualitative si possono trarre quindi le seguenti conclusioni genericamente valide e da tener presenti durante l'approccio ad una muratura, che sia questa storica o nuova [1]:

- la resistenza della muratura aumenta all'aumentare della resistenza delle sue componenti ma non in modo proporzionale;
- all'aumentare della resistenza degli elementi aumenta velocemente anche la resistenza della muratura ma solamente se la malta è di buona qualità;
- a parità di resistenza degli elementi lapidei, la resistenza della muratura aumenta lentamente all'aumentare della resistenza della malta;
- la resistenza di una muratura diminuisce all'aumentare delle dimensioni dei giunti a causa dell'aumento correlato delle tensioni di confinamento e diminuisce tanto più velocemente quanto più la malta è di cattiva qualità.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche delle murature esistenti, per conoscere la resistenza a compressione della muratura si potrebbe decidere di studiarla nel dettaglio. Ad esempio, si potrebbe estrarre una pietra ed eseguirvi delle prove di compressione, oppure prendere dei campioni di malta per ricavarne dei provini, cosa molto difficile da fare perché raramente si riesce ad estrarre abbastanza malta da poterne ricavare un provino. Meglio sarebbe estrarre un campione abbastanza grande di muratura ed eseguire direttamente su di esso prove di compressione; in questo modo si riuscirebbe direttamente a studiare il comportamento della muratura e non quello dei suoi singoli componenti.

Il problema di questo approccio è che avere a disposizione un campione di dimensioni sufficienti vorrebbe dire avere un campione di dimensioni almeno 1 metro per 1 metro, o comunque dimensioni proporzionate a quelle dei suoi elementi lapidei. Questo comporta enormi difficoltà tecniche oltre che enormi danni alla struttura esistente stessa. Inoltre, per quanto sia grande il numero di campioni prelevati, questi non saranno mai sufficienti ad avere una buona rappresentatività di tutto l'edificio, a causa della probabile enorme diversità e variabilità delle resistenze da punto a punto dell'edificio.

Quando perciò non è possibile utilizzare tale tecnica e quindi eseguire un numero di prove esaustive sul materiale componente la muratura studiata, si può fare riferimento ai valori di caratteristiche tecniche riportate nella Tabella C.8.5.I del supplemento ordinario n. 5 alla Gazzetta ufficiale n. 35 dell'11 febbraio 2019.

Per concludere il discorso riguardo le caratteristiche meccaniche delle murature, si può dire che è bene indagare su esse quando ci si interfaccia con un edificio esistente, ma è anche vero che non sono così importanti.

Infatti, quando un edificio viene investito da azioni sismiche può attivare due tipi di meccanismi: meccanismi di I modo o meccanismi di II modo. Se i collegamenti sono inefficienti, si attivano meccanismi locali e si ha quindi un comportamento di I modo. Se invece i collegamenti sono eseguiti a regola d'arte, allora la struttura riesce a scaricare al suolo l'energia ricevuta dal sisma e si attiva un meccanismo globale di II modo. Perciò, in questo specifico caso, assumono importanza anche le caratteristiche meccaniche dei materiali con cui la struttura è stata costruita.

Nel primo caso, il meccanismo di I modo, invece, non importa quali materiali siano stati utilizzati se questi non sono stati collegati correttamente, perché attivandosi meccanismi locali di collasso, avverrà il crollo della struttura in parte o in toto.

Quindi è molto più raro che una struttura crolli per un meccanismo di II modo. Perciò, prima di affrontare lo studio delle caratteristiche meccaniche dei materiali, è bene studiare la conformazione geometrica dell'edificio, i collegamenti e la presenza o meno di diaframi o listature e, quindi, la monoliticità di tutta la struttura, piuttosto che conoscere con precisione la resistenza di tale muratura.

### ***1.3 Caratteristiche degli edifici in muratura***

Gli edifici in muratura, in generale, hanno caratteristiche differenti in base al loro periodo di costruzione. Queste differenze possono ritrovarsi anche all'interno dello stesso edificio. Infatti, sarebbe possibile ritrovare un edificio con soffitti voltati al primo impalcato, solai in legno agli impalcati successivi e magari, a causa di ristrutturazioni in tempi relativamente recenti, sottotetti in c.a. e tetto in legno.



**Figura 1.2** - Sezione di un esempio di edificio storico in muratura, immagine tratta da [3]

Anche se gli elementi verticali sono sempre in muratura, il tipo di orizzontamenti e le connessioni con queste strutture verticali hanno un'importanza fondamentale nel comportamento globale della struttura. Per cercare di organizzare e ordinare le tipologie di strutture degli edifici abitativi si può fare riferimento alla classificazione messa a punto dal Prof. M. Pagano [4] focalizzando l'attenzione solo sugli edifici in muratura che rappresentano le prime tre classi di questa classificazione. Le prime due classi si riferiscono ad edifici in muratura storici o comunque antichi, mentre la terza classe si riferisce a edifici in muratura nuovi.

### 1.3.1 Edifici di prima classe

Questi edifici sono solitamente quelli più antichi e sono realizzati completamente in muratura, sia nelle elevazioni che negli orizzontamenti. Questi ultimi sono realizzati tramite l'utilizzo di superfici curvilinee quali archi e volte di diverso tipo, poiché la muratura non resiste a trazione.

All'interno di questi edifici quindi, vi è la presenza di molte spinte, che si instaurano all'interno di questi elementi tecnici, quali archi e volte, che lavorano a compressione. Negli edifici di prima classe c'è quindi sicuramente la presenza di una fitta maglia di pareti portanti che hanno una duplice funzione: la prima è quella di stabilizzazione reciproca tra muri ortogonali e la seconda è quella di funzionare come appoggi per gli elementi arco o volta, che necessitano appunto di appoggi su tutti i lati, in quanto elementi bidimensionali.

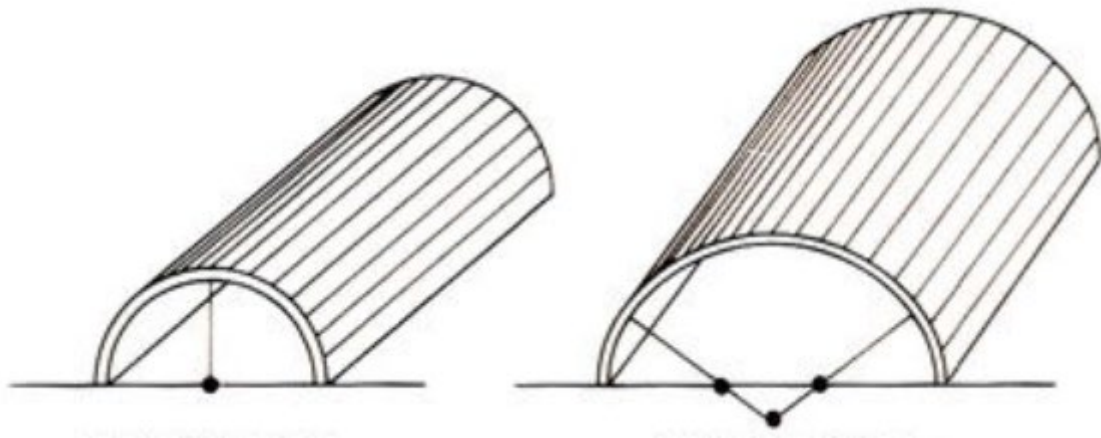
Di seguito vengono, a tal proposito, elencati i vari tipi di volta che è possibile ritrovare all'interno di un edificio in muratura per comprendere meglio il loro comportamento statico e quindi la tipologia e quantità di appoggi che necessitano.

In generale si possono distinguere le volte in:

- **volte semplici:** generate da una sola superficie di rotazione cilindrica (volta a botte) o sferica (volta a vela o cupola);

- **volte composte:** generate da più superfici di rivoluzione (volte a padiglione, volte a botte con teste a padiglione, volte a crociera, volte a schifo).

Le **volte a botte** (Figura 1.3) sono porzioni di superfici cilindriche che possono vedersi anche come un susseguirsi continuo di archi. Scaricano tutte le loro spinte su due lati d'appoggio, ovvero sulle imposte, e lasciano liberi gli altri due lati. Possono essere a tutto sesto, se il loro profilo è costituito da un semicerchio, o a sesto ribassato, nel caso in cui il loro profilo sia invece costituito da una superficie circolare con angolo al centro inferiore ai  $180^\circ$ . Possono essere anche utilizzate inclinate come copertura dei vani scala.

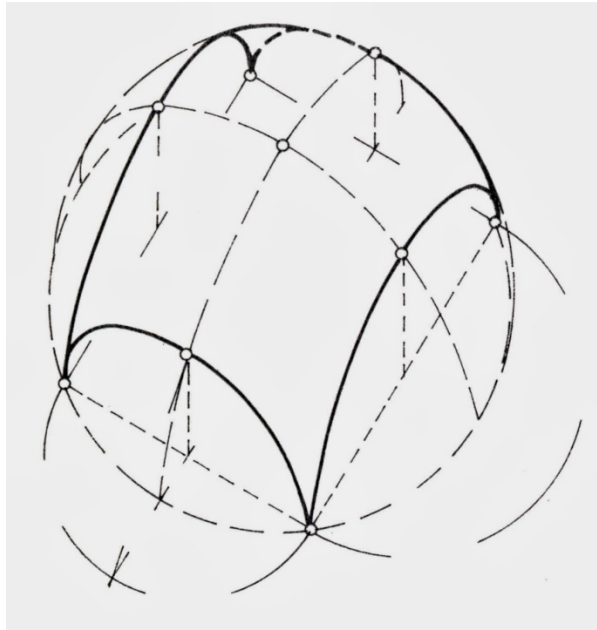


**Figura 1.3** - Volta a botte (sinistra) e volta a sesto ribassato (destra), immagine tratta da [5]

Sebbene si parli principalmente di un funzionamento ad archi trasversali che scaricano in modo uniforme sulle pareti alle imposte, si potrebbe parlare anche di un funzionamento ad archi longitudinali, ovvero nello spessore della volta stessa. Si potrebbe infatti individuare un arco curvo e non rettilineo, che lavora nell'altro senso e potrebbe assorbire alcune spinte riportandole negli angoli d'appoggio della volta.

Quindi, se i muri su cui appoggia la volta sono spessi, probabilmente il funzionamento è ad archi accostati, mentre se i muri si assottigliano o presentano dei contrafforti, allora molto probabilmente si creano degli archi longitudinali. Per questo motivo gli incroci di muri sono punti molto delicati, dove la presenza di spinte non trascurabili può portare anche al loro distacco dal resto dei paramenti.

Le **volte a vela** invece (Figura 1.4) si ottengono tagliando una cupola con dei piani verticali in corrispondenza dei muri perimetrali che chiudono l'ambiente che si intende coprire.

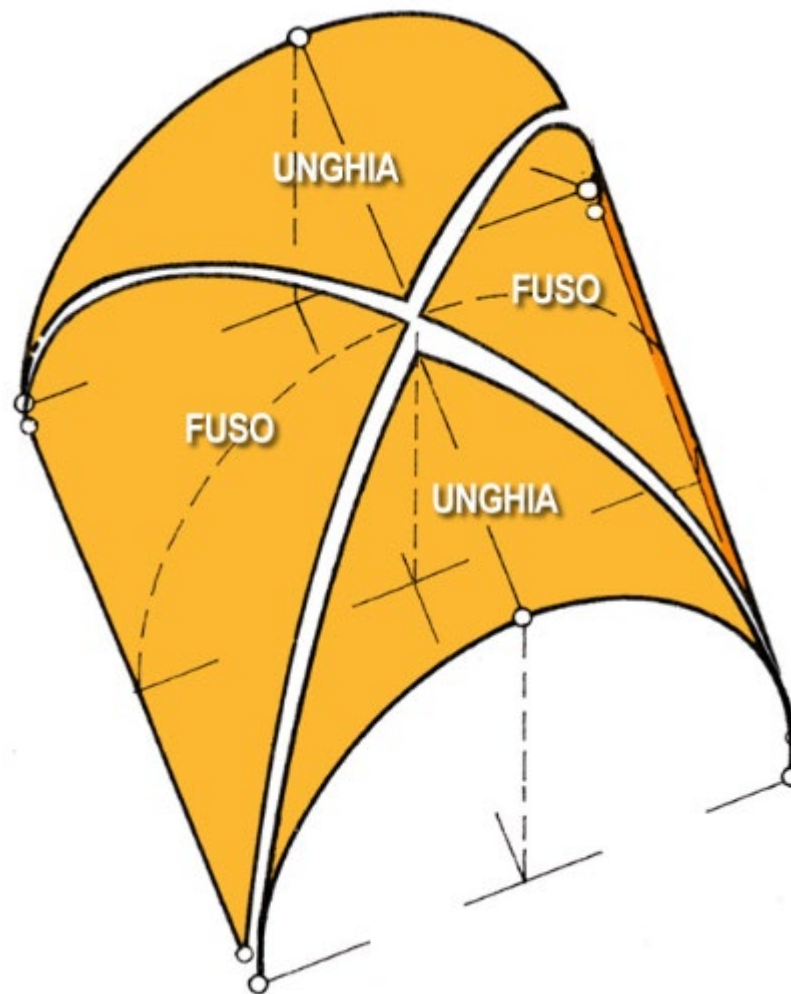


**Figura 1.4** - Volta a vela, immagine tratta da [5]

Le linee d'appoggio sono dunque delle linee curve giacenti su tali piani verticali e quindi i carichi vengono scaricati nei quattro spigoli dell'ambiente voltato.

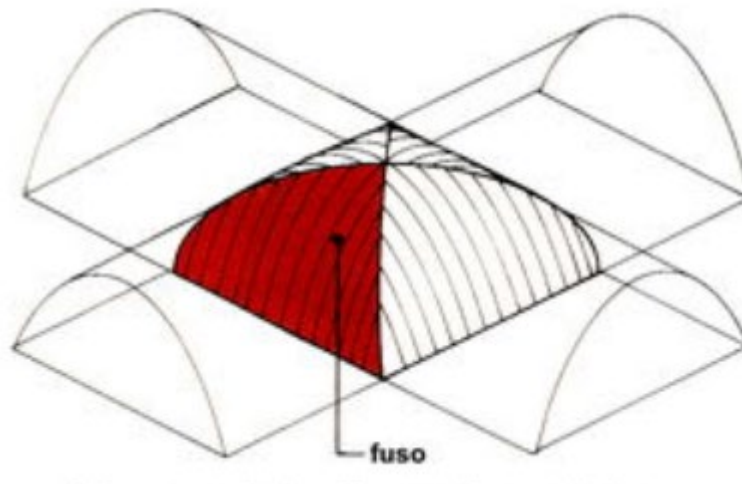


Introduciamo ora il concetto di fuso e di unghia. Se si interseca una volta a botte con due piani verticali passanti per le diagonali della figura di base, infatti, si ottengono le cosiddette unghie e fusi cilindrici, come mostrato in Figura 1.5.



**Figura 1.5** – Unghie e fusi cilindrici, immagine tratta da [6]

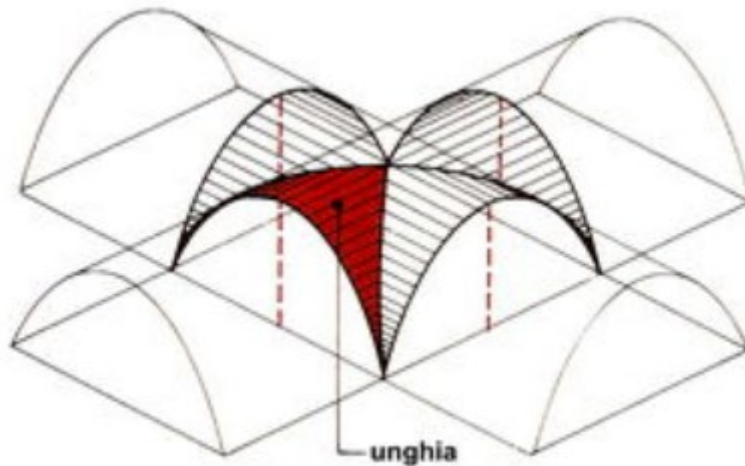
Intersecando quindi tra di loro due volte a botte, con un angolo di  $90^\circ$ , e mantenendo i fusi cilindrici così ottenuti, si ottiene una **volta a padiglione** (Figura 1.6), che mantiene quindi tutte le linee di imposta e scarica le spinte uniformemente su tutti e quattro i muri perimetrali che delimitano l'ambiente.



**Figura 1.6** - Volta a padiglione, immagine tratta da [5]

Nella volta a padiglione si possono individuare due tipi di comportamento: il primo è quello ad archi trasversali che scaricano uniformemente le forze su tutte le pareti perimetrali e gli archi centrali che invece vengono compressi; mentre il secondo comportamento è quello per cui si individuano degli archi longitudinali che scaricano le forze solamente sui quattro spigoli dell'ambiente circoscritto.

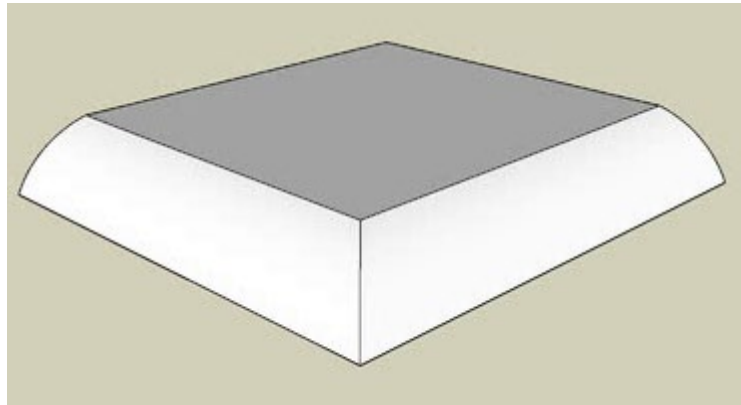
Se invece dall'intersezione delle due volte a botte sopra citata, si prendessero le quattro unghie formatesi, si otterrebbe una **volta a crociera** (Figura 1.7), che scarica gli sforzi nei quattro spigoli dell'ambiente.



**Figura 1.7** - Volta a crociera, immagine tratta da [5]

Per lo scarico delle forze, siccome dall'intersezione delle volte a botte si tengono solo le unghie, sono sufficienti i piedritti su cui poggia la volta a crociera. Il principio di funzionamento è sempre quello degli archi accostati, in quanto ognuna delle quattro parti si comporta come una volta a botte. Ma ognuno di questi archi avrà entità di forze scaricate diverse, poiché avvicinandosi al centro dell'ambiente, gli archi accostati sono sempre più piccoli e più scarichi.

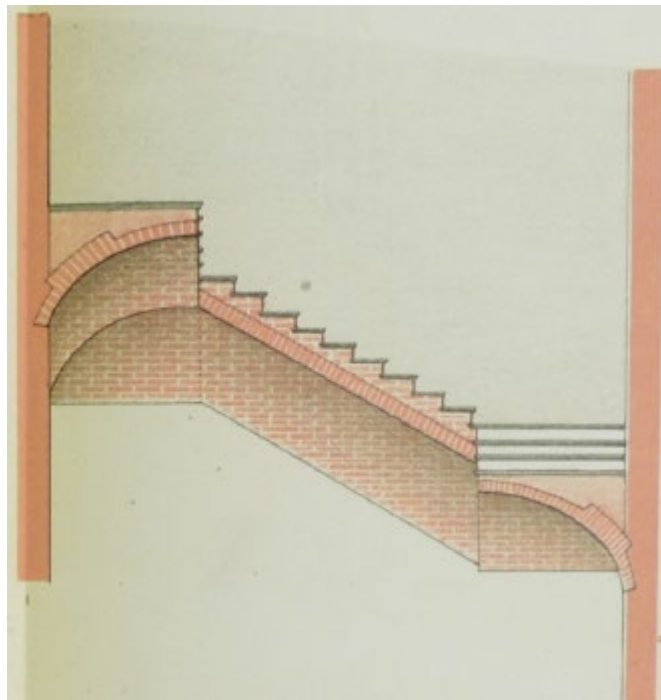
L'ultima volta di cui bisogna parlare è la **volta a schifo** (Figura 1.8) che non è nient'altro che una volta a padiglione tagliata da un piano orizzontale. C'è sempre il funzionamento ad arco ma è comunque una volta delicata. Bisogna fare attenzione che non aumentino troppo i carichi verticali o potrebbero crearsi delle lesioni.



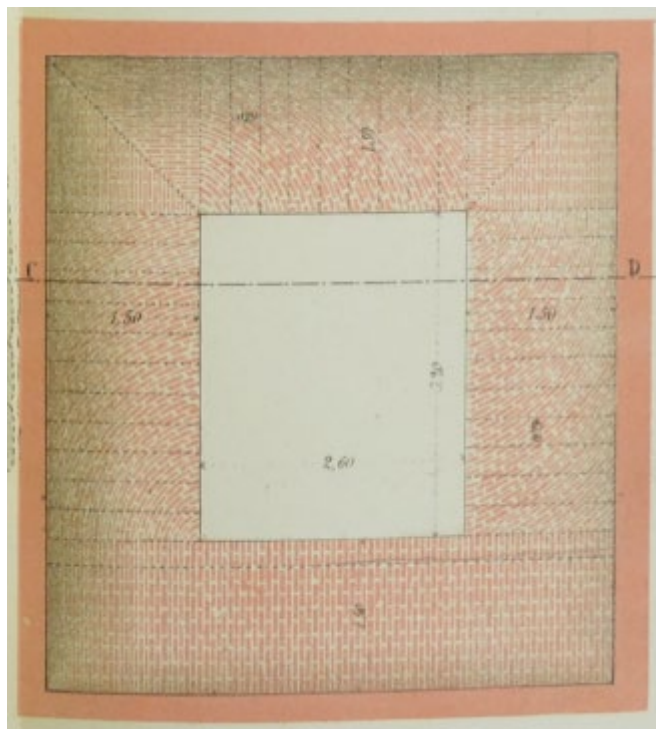
**Figura 1.8** - Volta a schifo, immagine tratta da [7]

Fra tutte le volte viste quindi, è chiaro che la volta a vela e quella a crociera hanno bisogno di quattro appoggi agli angoli dell'ambiente confinato, mentre quella a padiglione, quella a botte e quella a schifo distribuiscono le spinte su tutta la lunghezza delle pareti perimetrali. Perciò è anche chiaro che queste ultime sono maggiormente in grado di sopportare eventuali aumenti di carichi verticali.

Anche le scale possono essere costruite con struttura interamente in muratura utilizzando il sistema cosiddetto delle “voltine a sbalzo”, indicato da alcuni manuali come “sistema romano”. Il nome “voltine a sbalzo” deriva dal fatto che, guardando la scala in sezione (Figura 1.9) [7], questa sembra proprio una mensola. Tale struttura fa quindi pensare che, per lo meno all’estradosso, sia presente un elemento che funzioni da tirante ma tale elemento non esiste. Bensì, guardando la scala in pianta (Figura 1.10), si nota la sua somiglianza ad una volta a padiglione con un buco centrale rettangolare, in corrispondenza del quale, viene realizzato un anello compresso che garantisce l’equilibrio all’intera struttura. Questo è lo stesso principio di funzionamento della cupola con lanterna.



**Figura 1.9** - Sezione di scala costruita con sistema romano, immagine tratta da [8]



**Figura 1.10** – Pianta di scala costruita con sistema romano, immagine tratta da [8]

È bene che le pareti perimetrali del vano scala siano resistenti e ben collegate fra di loro perché riescano a compensare gli sforzi di compressione dell’anello e quindi a far funzionare correttamente tutto il sistema. Per tale motivo, questo sistema è considerato “delicato”, soprattutto in zona sismica. Infatti, basterebbe un’azione sismica in grado di danneggiare anche solo parzialmente le pareti e verrebbe a mancare un punto di scarico delle forze trasmesse dall’anello compresso, il che causerebbe delle lesioni nella struttura, soprattutto in corrispondenza degli attacchi ai pianerottoli, dove l’anello devia la direzione del flusso di tensione.

Sarebbe bene, quindi, prevedere l’inserimento di catene metalliche che rafforzino e rassicurino maggiormente i collegamenti tra le pareti dei vani scala in muratura.

Anche nella scala a sbalzo può instaurarsi un comportamento ad archi longitudinali, lungo la direzione della rampa, che scaricherebbero gli sforzi sulle pareti, ulteriore motivo per rafforzare il più possibile tali pareti.

Tornando a parlare dell'edificio in muratura di prima classe nel suo complesso, questo è composto anche da molti orizzontamenti che generano delle spinte sui muri in facciata che dovrebbero essere in grado di assorbirle grazie al loro peso ed in maniera che la risultante vettoriale delle spinte non sia troppo inclinata ma rimanga all'interno dello spessore dei muri e venga scaricata in fondazione almeno all'interno della pianta delle fondazioni.

Per questi motivi le pareti portanti sono di spessori importanti e se ci fossero solai voltati anche agli ultimi piani, anche le pareti di questi piani dovrebbero avere spessori elevati. In realtà però, è difficile trovare un edificio che abbia impalcati in muratura a tutti i livelli. Infatti, almeno le coperture solitamente sono tutte lignee, siccome questi edifici passano facilmente da una condizione di stabilità ad una di instabilità.

Se infatti ci dovesse essere un piccolo cedimento in fondazione, questo provocherebbe una lieve rotazione della parete e quindi un lieve allargamento dell'imposta delle volte con successiva riduzione delle frecce. Quest'ultima comporta un aumento delle spinte (la spinta infatti è inversamente proporzionale alla freccia).

Se aumentano le spinte, il muro tenderà a ruotare ulteriormente e quindi si ridurranno ancora le frecce e così via.

Questo fenomeno dunque è non lineare e allontana la struttura dalla condizione di equilibrio. Quindi, in questo tipo di edifici, occorre progettare dei contrafforti che intervengano impedendo il fenomeno di staccamento dei muri. Inoltre, questo tipo di edifici, essendo poco adatto a sopportare azioni orizzontali, reagisce male alle azioni sismiche, dal momento che, tra l'altro, tali azioni tenderebbero proprio a far ruotare la facciata verso l'esterno.

### **1.3.2 Edifici di seconda classe**

Si tratta di edifici che presentano la struttura portante in muratura, mentre gli impalcati non sono voltati, come nel caso degli edifici di prima classe, bensì sono impalcati orizzontali realizzati per lo più con travi con semplici appoggi alle loro estremità. Gli orizzontamenti venivano realizzati per lo più in legno, soprattutto negli edifici più antichi, e solo più recentemente in acciaio, a partire da fine '800.

Quindi l'edificio di seconda classe presenta pareti continue in muratura e impalcati in legno o acciaio semplicemente appoggiati su di esse, infilati in apposite forature o asole, quindi scollegate dalle elevazioni. In alcuni casi è possibile ritrovare collegamenti fra trave e muratura con staffature in ferro, ma queste soluzioni sono deleterie e col tempo si danneggiano e perdono completamente la loro efficacia. In altri casi, la muratura al di sotto delle travi dei solai si presenta di miglior fattura, ad esempio tramite l'utilizzo di mattoni pieni, per reagire meglio alle sollecitazioni dovute al solaio. In quest'ultimo caso, la presenza di eventuali lesioni verticali al di sotto delle travi è quindi simbolo di sovraccarico dell'impalcato.

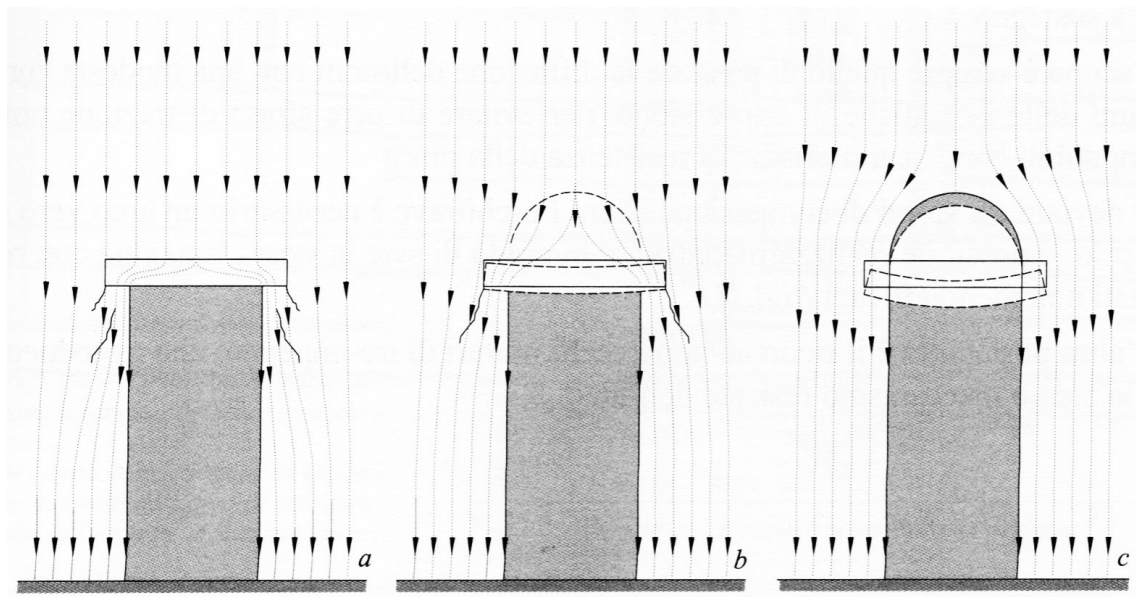
Le principali differenze tra questa classe di edifici e la prima sono che le pareti sono più sottili in quanto non devono più sopportare le spinte delle volte e la loro stabilità non è più data dal loro peso, bensì dall'efficacia dei collegamenti con le altre pareti a loro ortogonali.

Quindi gli edifici della prima classe si distinguono da quelli di seconda classe per lo spessore delle pareti e per il fatto che gli edifici della seconda classe solitamente hanno un numero di piani maggiori rispetto a quelli della prima. Questo è dovuto al fatto che un edificio di prima classe non può avere troppi piani, perché man mano che si sale con gli impalcati le spinte delle volte avrebbero un braccio sempre maggiore rispetto al terreno, creando un momento sempre maggiore che cercherebbe di ruotare la facciata. L'unico modo per impedire questo fenomeno sarebbe quello di fare le pareti ancora più spesse. Mentre negli edifici di seconda classe l'unico limite alla crescita in altezza è dato dalla resistenza a compressione delle murature, considerando solo i carichi verticali.



Nonostante tutto ciò anche negli edifici di seconda classe è possibile trovarsi di fronte a lesioni dovute solamente ai carichi verticali. Infatti, spesso, in questi edifici, al di sopra delle aperture di porte e finestre si usava posizionare delle piattabande create accostando mattoni a coltello e quindi creando degli archi con frecce bassissime dell'ordine di 2-4 cm ma che comunque creavano delle spinte notevoli.

Se le aperture sono nelle pareti ortogonali alle facciate, le spinte devono essere assorbite da quest'ultime. Il fatto che molto spesso le pareti di facciata non siano in grado di assorbirle in realtà non è del tutto negativo. Infatti, siccome le facciate tendono a ruotare, le piattabande si scaricano e tendono a rompersi in corrispondenza della chiave di volta, favorendo quindi la formazione di archi di scarico con freccia maggiore sopra di loro. Questo permette quindi di distribuire meglio i carichi verticali, diminuire il sovraccarico verticale delle piattabande e quindi di avere delle spinte più modeste. Questo ragionamento risulta di maggiore comprensione se si guarda la Figura 1.11.



**Figura 1.11** - Formazione progressiva di un arco di scarico al di sopra di una piattabanda (da *a* a *c*), immagine tratta da [9]

Tale situazione non è deleteria localmente ma lo è per quanto riguarda l'intero edificio, perché col tempo tende a distaccare le facciate dalle pareti a loro ortogonali. Questo comportamento è aumentato dal fatto che, siccome solitamente i solai degli edifici di seconda classe sono costituiti da impalcati piani a travi parallele ordite nella stessa direzione, abitualmente nella direzione della luce più corta, le pareti sono anche caricate diversamente.

In più, in questa classe di edifici, le pareti hanno lo stesso spessore ma, come appena detto, sono sottoposte a intensità di sforzi diverse. Questo porta all'instaurarsi, in corrispondenza degli incroci delle pareti, di tensioni tangenziali atte a ristabilire l'equilibrio e, quindi, a distacchi tra i muri ortogonali.

Questi distacchi possono essere causati anche alle diverse temperature a cui sono sottoposte le pareti durante l'anno. Infatti, quelle esterne possono raggiungere i  $-10^{\circ}$  d'inverno e i  $-50^{\circ}$  d'estate, se esposte al sole. Questa ingente escursione termica porta a dilatazioni notevoli; dilatazioni che invece non subiscono le pareti interne ad esse ortogonali, che rimangono pressoché esposte alla stessa temperatura durante tutto l'anno, essendo all'interno dell'edificio. Queste diverse dilatazioni portano anch'esse a distacchi tra pareti ortogonali in corrispondenza degli incroci dei muri a causa della scarsa resistenza a trazione della muratura. Questa resistenza, inoltre, è fortemente influenzata dalla bontà della malta. La malta tende, infatti, a degradarsi col tempo, soprattutto se l'edificio è costruito in prossimità di vie stradali, il che implica ripetute vibrazioni che danneggiano le malte.

Se quindi in un edificio di seconda classe si verificano tutti questi fenomeni, la parete di facciata sarà staccata dagli impalcati e perderà i vincoli dategli dalle pareti ad essa ortogonali. Statisticamente parlando, la si potrebbe vedere quindi come una mensola vincolata in fondazione. Siccome questa parete avrà spessori diversi ai vari livelli e non sarà caricata verticalmente dai solai, poiché da essi staccata, tenderà a ribaltarsi verso l'esterno. Infatti, siccome le pareti di facciata devono avere spessori diversi ai vari piani ma devono fare in modo che la facciata sia, per ovvie ragioni, piana, presenteranno una rastremazione interna. Questo porta al gravare di maggiori carichi sulla parte esterna della parete di facciata e quindi a dei piccoli momenti flettenti, che sommati possono creare un notevole momento ribaltante, ricordando che la parete di facciata è staccata dagli

impalcati. Questo fenomeno è maggiormente amplificato in quegli edifici che presentano impalcati realizzati con putrelle e voltine, in quanto la parete di facciata subisce una forza di ribaltamento incrementata dalla presenza delle spinte orizzontali delle voltine.

Quando ci si trova di fronte a edifici che subiscono questo tipo di fenomeno, si possono ritrovare facilmente lesioni ai solai, nella direzione della loro orditura, che indicano proprio il fatto che la parete di facciata ha subito un ribaltamento. Inoltre, si dovrebbe constatare un aumento dell'ampiezza delle fessurazioni dal basso verso l'alto dell'edificio.

Considerando sempre lo schema statico di mensola incastrata in fondazione, se i solai fossero ben attaccati alla parete di facciata, trascurando la bontà o meno dei collegamenti tra travi e parete, ma considerandole come semplicemente appoggiate, scaricherebbero internamente dei carichi verticali che creerebbero un momento stabilizzante rispetto quello destabilizzante dovuto alla forma rastremata della parete.

Se poi i collegamenti tra solai e pareti fossero realizzati a regola d'arte, tramite delle staffe in acciaio per esempio, allora le travi funzionerebbero da catene e impedirebbero la rotazione della parete verso l'esterno. La parete quindi passerebbe, da uno schema di mensola incastrata a un estremo, a uno schema di trave con più vincoli posizionati in corrispondenza di ogni impalcato. I momenti quindi non si andrebbero più a sommare di piano in piano ma verrebbero scaricati in corrispondenza della mezzeria di ogni campata di tale trave verticale schematizzata, quindi in corrispondenza della metà di ogni piano.

È quindi chiaro che, nel caso in cui un edificio della seconda classe sia stato realizzato a regola d'arte (collegamenti tra pareti ortogonali realizzati ad hoc, orditure dei solai sfalsate di piano in piano, collegamenti perfetti tra travi e pareti, ecc.), tutti i fenomeni sopra descritti potrebbero non presentarsi.

È chiaro che edifici che abbiano un comportamento non scatolare, dovuto alla mancanza di collegamenti efficaci tra le pareti e tra pareti e solai, reagiscono anche male alle azioni sismiche.

La prima cosa da fare quindi, quando ci si trova ad avere a che fare con un edificio della seconda classe, è quella di controllare i collegamenti agli incroci dei muri:

- se questi collegamenti sono pessimi o mancanti, le pareti in facciata ribalteranno verso l'esterno in presenza di sisma (meccanismi locali di I modo);
- se invece questi collegamenti saranno presenti e realizzati a regola d'arte, la struttura avrà un comportamento di tipo scatolare in presenza di azioni sismiche (meccanismi di collasso globale del II modo).

Comunque, anche in questo secondo caso è alta la vulnerabilità sismica, poiché è complicato realizzare connessioni tra pareti che non saltino durante un sisma.

Quindi se si vuole fare un confronto fra gli edifici di queste due classi, si può affermare che un edificio della prima classe è più portato a “soffrire” anche solo i carichi verticali, a causa della presenza di forze orizzontali che nascono per presenza di impalcati voltati. Per quanto riguarda un edificio di seconda classe, invece, questo può comportarsi in due maniere diverse: una positiva, nel caso in cui le sue pareti siano ben ammorsate e quindi abbia un comportamento scatolare, e una negativa, quando i collegamenti fra pareti e fra pareti e orizzontamenti non siano di buona qualità.

Nella pratica, è difficile trovare edifici che appartengano solo alla prima classe o edifici che appartengano solo alla seconda, bensì è molto più comune trovare edifici che siano un misto fra le due classi. Questo non deve spaventare, perché implica solamente il fatto che il loro comportamento riporterà alcuni aspetti tipici di entrambe le classi.

### **1.3.3 Edifici di terza classe**

Nei primi del '900, con l'invenzione del cemento armato, è cominciata la diffusione di edifici con impalcati cementizi. Infatti, fino ad allora, come descritto nei paragrafi precedenti, le pareti erano portanti, erano la continuazione delle fondazioni e riportavano asole in corrispondenza dei punti nei quali dovevano essere appoggiate le travi per la realizzazione dei solai.

A seguito dell'introduzione dell'innovazione del calcestruzzo armato nel mondo dell'edilizia, si cominciò a preferire la realizzazione delle pareti perimetrali in muratura fino all'altezza del primo impalcato, dopodiché l'esecuzione del solaio in latero-cemento, con relativo cordolo in cemento armato al di sopra della muratura del piano terra. Di seguito procedendo con l'esecuzione delle pareti del primo piano sempre in muratura e l'esecuzione del solaio del primo piano anch'esso in cemento armato misto ad elementi in laterizio. Così proseguendo di piano in piano la struttura non risulta più quindi solo in muratura o in muratura e legno, ma mista, muratura - c.a..

Dopo il terremoto del 1930, che coinvolse parte dell'Italia, durante il conto dei danni, si constatò come gli edifici costruiti in questo modo non fossero crollati, ma avessero subito solamente danni limitati. Si pensò allora di normare la costruzione degli edifici in muratura con il Regio Decreto Legge del 22 novembre 1937, n. 2105 [10], che di fatto sancì la nascita dell'edificio in muratura "moderno".

All' articolo 5, punto f), il decreto recita: *«In tutti i fabbricati deve eseguirsi, ad ogni ripiano e al piano di gronda, un telaio di cemento armato sui muri perimetrali e su tutti gli altri muri interni portanti. Tali telai debbono essere estesi a tutta la larghezza dei muri su cui poggiano...»*.

Inoltre, raccomanda che (articolo 5 punto d)): *«Nei piani superiori a quello terreno debbono essere vietate le strutture spingenti contro i muri perimetrali ove non siano munite di robuste catene. I tetti debbono essere costruiti in modo da escludere qualsiasi spinta orizzontale.»*.

Un'altra prescrizione importante è quella dell'articolo 26: *«Nelle costruzioni in muratura ordinaria può anche bastare di sovrapporre ai vani di porta e finestra, architravi di ferro o cemento armato che sostengano il muro in tutto il suo spessore, con sovrapposto arco di scarico quando lo consenta l'altezza della muratura soprastante.»*.

Infine, all'articolo 23 viene detto: *«I solai di cemento armato, i quali sono da preferirsi in località sismiche, debbono essere sempre ben collegati con i correnti orizzontali, e nel caso di fabbricati in muratura ordinaria debbono essere collegati ai telai di ripiano.»*.

Quindi questa norma vietava la costruzione di nuovi edifici di prima o seconda classe e ufficializzava la nascita degli edifici in muratura di terza classe.

Ricapitolando, si può definire della terza classe, un edificio che abbia le seguenti caratteristiche:

- le murature portanti non sono più continue dalle fondazioni alla copertura ma vengono interrotte ad ogni piano da un telaio in cemento armato costituito da un cordolo di piano;
- non esistono elementi spingenti;
- al di sopra di porte e finestre sono presenti architravi in acciaio o in c.a. ben ammorsati nella muratura;
- solitamente i solai sono in cemento armato e sono anch'essi ben ammorsati nella muratura.

Questa nuova tipologia strutturale risolve quindi i problemi che caratterizzavano gli edifici in muratura “antichi”, ovvero quelli della prima e della seconda classe, infatti:

- gli impalcati in cemento armato costituiscono delle vere e proprie catene bidimensionali, che rendono l'edificio una struttura scatolare, impedendo il ribaltamento delle pareti perimetrali;
- le piattabande in acciaio o in cemento armato risolvono il problema delle degli architravi;
- i cordoli ripartiscono i carichi verticali, ridistribuendoli in modo uniforme sulle strutture sottostanti,
- non esistono spinte orizzontali.

La normativa attuale (NTC 2018), effettivamente, al § 4.5.4 definisce gli edifici in muratura come edifici della terza classe, poiché le caratteristiche che devono avere sono le seguenti:

- *«L'edificio a muratura portante deve essere concepito come una struttura tridimensionale. I sistemi resistenti di pareti di muratura, ...»*
- *«...gli orizzontamenti e le fondazioni devono essere collegati tra di loro in modo da resistere alle azioni verticali ed orizzontali.»*
- *«I pannelli murari, di muratura non armata, sono considerati resistenti anche alle azioni orizzontali quando hanno una lunghezza non inferiore a 0,3 volte l'altezza di interpiano.»*
- *«Gli orizzontamenti sono generalmente solai piani, o con falde inclinate in copertura, che devono assicurare, per resistenza e rigidezza, la ripartizione delle azioni orizzontali fra i muri di controventamento.»*
- *«Tutte le pareti devono essere collegate al livello dei solai mediante cordoli di piano di calcestruzzo armato e, tra di loro, mediante ammorsamenti lungo le intersezioni verticali.»*

Ovviamente anche gli edifici di terza classe potranno subire dei danni se sottoposti ad azioni sismiche, ma non subiranno più il ribaltamento delle pareti di facciata e perciò si avranno solo meccanismi di collasso globale e non più meccanismi di collasso locale.

Mentre gli edifici di prima e seconda classe, per quanto riguarda le sollecitazioni nel piano, non presentano porzioni di pareti che resistano a trazione, gli edifici di terza classe hanno i cordoli di piano e perciò un miglior comportamento nel piano delle loro pareti se sottoposti al sisma.

Quindi in presenza di cordoli o catene si attivano tutte le pareti collegate, in quanto non sono più parti che tendono a staccarsi come negli edifici di prima o seconda classe.

Infine, quindi, se si interviene su un edificio di prima o seconda classe, è bene cercare di riportarlo al comportamento di un edificio di terza classe. Questo obiettivo può essere raggiunto cercando di realizzare delle cuciture tra le pareti al fine di evitare fenomeni di ribaltamento fuori dal piano e quindi trasformare l'edificio in un edificio a comportamento scatolare, con meccanismo di collasso di tipo globale (meccanismi del II modo). Successivamente si possono eseguire dei collegamenti trasversali per aumentare la resistenza a trazione delle pareti e avvicinarsi il più possibile ad un meccanismo di piano come negli schemi a telaio.

Dopo aver fatto questi interventi si può stimare in modo verosimile quale sia l'indice di rischio della struttura dell'edificio storico in muratura di cui ci si sta occupando.



## 2. Solai in edifici storici: classificazione delle tipologie e caratteristiche

### 2.1 Solai voltati

Come precedentemente accennato nel § 1.3.1, mentre l'evoluzione del sistema trilitico primordiale ha portato all'invenzione di moderne strutture intelaiate, l'elemento "arco", tramite il concetto di estensione spaziale, ha portato all'invenzione di due elementi strutturali e architettonici: le *volte*, che non sono altro che il prodotto della traslazione di tanti archi accostati fra di loro, e le *cupole*, che invece sono il prodotto della rotazione di un arco attorno al proprio asse di simmetria e che, assieme alle volte, appartengono alla categoria delle strutture a guscio. Nello specifico, le volte possono definirsi gusci cilindrici, mentre le cupole gusci sferici, salvo i moderni gusci a paraboloide iperbolici che sono il prodotto della tecnologia del cemento armato.

#### 2.1.1 Volte a botte

Sicuramente il primo tipo di volta inventato fu quella a botte. In primo luogo, perché essa rappresenta il passaggio più immediato dall'arco alla volta e, in secondo luogo, perché si può considerare semplicemente come la ripetizione lungo il senso perpendicolare al piano di giacitura di un arco, elemento base. In prima approssimazione quindi si potrebbe considerare la volta semplicemente come una serie di archi giustapposti ma il suo comportamento in realtà è influenzato notevolmente dalle dimensioni e dalla continuità strutturale. Infatti, le strutture ottenute per traslazione di un elemento base, dipendono molto dalle proporzioni e dalle condizioni d'appoggio; inoltre, un problema è anche il fatto che tendenzialmente si considera il cerchio come figura base di un cilindro, mentre questa base può in realtà essere costituita anche da un'ellisse, una policentrica, ecc.

Definendo come guscio lungo, una struttura a guscio che sia lunga almeno tre volte la sua luce trasversale, è importante, per studiare un eventuale quadro fessurativo, riuscire a comprendere il comportamento di una volta a botte. Infatti, una volta a botte corta, realizzata con appoggi continui, si comporta come una serie di archi accostati e paralleli ma, se la struttura è irrigidita perché realizzata in c.a. o per la presenza di irrigidimenti trasversali, allora il suo comportamento è assimilabile a quello di una piastra e si instaurano degli sforzi di taglio tra gli elementi trasversali accostati e costituenti la struttura. Questo può essere un comportamento utile perché può permettere di sopportare carichi anche ingenti e distribuirli, ma rischioso perché può portare alla creazione di lesioni parallele agli archi nel caso in cui venga superata la resistenza a taglio della volta.

Se la volta a botte può considerarsi come una struttura a guscio lunga invece, il comportamento è quello di un arco nella direzione trasversale e quello di una struttura flessibile nella direzione longitudinale. Praticamente si instaura un comportamento flessionale come di una trave semplicemente appoggiata e quindi come in un sistema trilitico. Quindi in pratica nascono degli sforzi di compressione nella zona superiore e degli sforzi di trazione nella porzione inferiore, creando delle fessurazioni che si sviluppano ortogonalmente alla direzione delle tensioni.

In ogni caso, come già accennato nel capitolo 1. La presenza di una volta in un edificio, porta alla nascita di sforzi orizzontali, che portano a loro volta alla creazione di spinte verso l'esterno. Tali spinte di solito vengono contrastate da muri di grosso spessore che cercano di scaricarle al terreno all'interno della propria impronta. Questo crea uno schema di sforzi trapezoidale tra parete e terreno o fondazione e terreno, che può instaurare forze destabilizzanti, ampi cedimenti ed eventuali moti roto-traslativi. Una possibile soluzione a questi problemi può essere la realizzazione di contrafforti sulle pareti, soluzione che veniva utilizzata già nell'antichità.

### **2.1.2 Volte a crociera**

La volta a crociera, come già detto al § 1.3.1, può essere vista come l'unione di due volte a botte che si intersecano ortogonalmente tra di loro. Per cercare di comprenderne il comportamento strutturale, si può vedere come due archi diagonali che scaricano i carichi sui quattro spigoli e quattro unghie cilindriche formate dalle due volte che si intersecano.

Queste unghie possono essere anche viste come l'accostamento di tanti archi paralleli che si riducono sempre di più di dimensione andando verso il centro della volta, scaricando le loro spinte sugli archi diagonali che a loro volta devono scaricarle sui quattro pilastri agli spigoli. Questi pilastri devono quindi scaricare ingenti forze e perciò devono essere progettati attentamente e possono subire facilmente cedimenti, che non saranno altro che la cartina tornasole dell'instabilità della volta stessa.

Si ricorda ancora, come già spiegato nel § 1.3.1, che anche la volta a padiglione è il prodotto dell'intersezione di due volte a botte, ma della quale si mantengono i fusi e non le unghie. Il suo comportamento è però caratterizzato dalla distribuzione uniforme dei pesi su tutto il perimetro d'appoggio della volta, in corrispondenza del quale si deve quindi trovare una parete perimetrale accuratamente dimensionata.

### **2.1.3 Analisi concettuale delle volte**

L'importanza della conoscenza dei vari tipi di volta (affrontati accuratamente al § 1.3.1) è dovuta al fatto che molto spesso nella storia recente ci si è trovati di fronte ad una struttura voltata che andava recuperata, rinforzata e si sono commessi degli errori. Per esempio, se ci si trova di fronte ad una volta a crociera, non bisogna intervenire con l'esecuzione di micropali lungo tutto il suo perimetro (intervento che è corretto invece per una volta a padiglione da rinforzare) ma bisogna rinforzare i quattro pilastri angolari.

Un altro motivo per cui è fondamentale lo studio di tutte le tipologie di solai voltati è che questi venivano utilizzati in larga scala durante il medioevo e, in Italia, gli edifici medievali sono molto ricorrenti.

Infine, la conoscenza approfondita del tipo di volta è il primo passo di un procedimento di studio dell'intera struttura, perché sapendo come e dove vanno scaricati i carichi, si può procedere con l'individuazione e l'analisi dell'eventuale quadro fessurativo e quindi con lo studio e la progettazione degli interventi di rinforzo necessari per il recupero dell'edificio storico.

#### **2.1.4 Schema statico delle cupole**

Per completezza, anche se non sono fra le unità tecnologiche scelte per lo studio delle tecniche di rinforzo nella presente tesi, si affronta anche il tema dell'individuazione dello schema statico di una cupola. Tale struttura di copertura può essere vista come una superficie di rivoluzione a doppia curvatura, rappresentando di fatto una struttura spaziale che presenta un doppio stato di sforzo, potendo essere anche idealmente divisa in meridiani e paralleli, come un emisfero terrestre.

Infatti, il comportamento delle cupole non può essere completamente associato a quello degli archi. Mentre in questi ultimi lo stato di sforzo è costituito solamente da una compressione lungo i meridiani, nella cupola è presente anche uno stato di compressione e trazione lungo i paralleli, a seconda delle modalità di deformazione. Questo stato di sforzo permette di reagire meglio ai carichi provenienti dall'esterno ma allo stesso tempo rende ancora più precaria l'intera stabilità della struttura, anche in funzione del materiale da costruzione utilizzato per realizzarla (solitamente mattoni o pietre).

Per la compresenza di diversi stati di sforzi, i carichi applicati alle superfici a guscio vengono direttamente trasmessi a terra o a strutture portanti sottostanti mediante lo sviluppo contemporaneo di sollecitazioni di compressione, trazione e sforzi tangenziali. Quindi, come accade per gli archi, anche le cupole non sono in grado di sopportare in modo ottimale i carichi verticali concentrati, mentre resistono anch'esse in modo eccellente ai carichi distribuiti.

Ipotizzando quindi uno stato di carichi distribuiti normali, la cupola subisce un abbassamento nello strato superiore che porta ad avere degli sforzi di compressione anche nei paralleli e non solo nei meridiani. Di conseguenza all'abbassamento nella parte

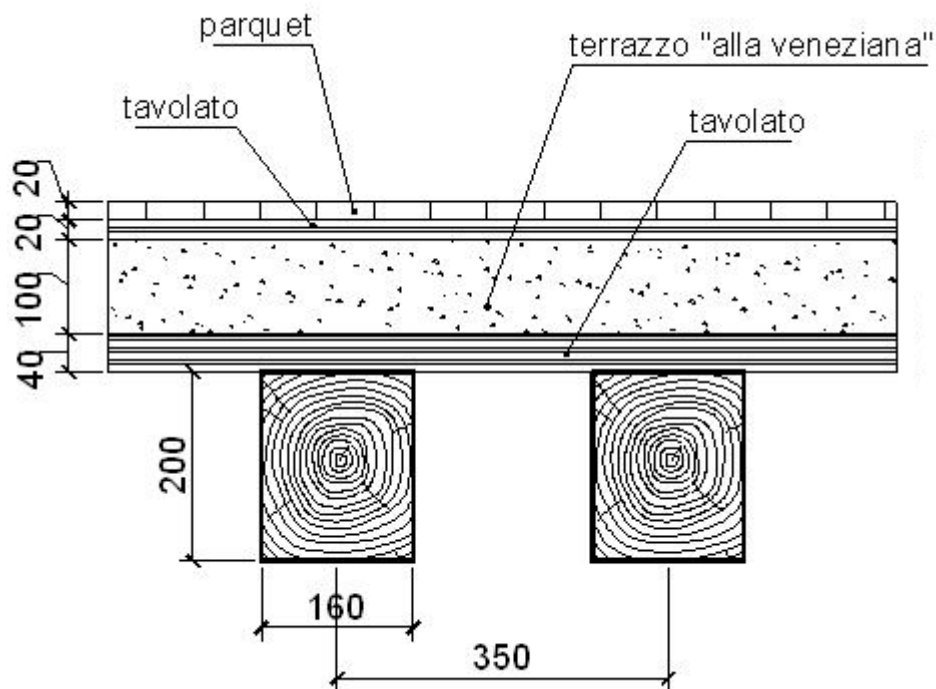
superiore, nella parte inferiore ci sarà un aumento volumetrico accompagnato da un aumento dello stato di tensione nei meridiani. La sperimentazione su questo sistema di copertura ha dimostrato che esiste un parallelo di demarcazione tra gli sforzi di compressione e quelli di trazione in corrispondenza dell'angolo zenitale di  $51^{\circ}49'$ .

La presenza di due stati di sforzo mutualmente ortogonali permette di assimilare le cupole a delle piastre in cui gli sforzi tangenziali agiscono sulle ipotetiche linee di separazione degli archi che le costituiscono. Le forze di compressione e trazione agiscono sui paralleli e quindi vengono definite forze circonferenziali e hanno funzione di cerchiatura per aumentare l'efficienza strutturale della cupola stessa. Infatti, è lungo queste direzioni che vengono posizionate eventuali cerchiature metalliche per il rinforzo delle cupole e non lungo la direzione degli archi. Ovviamente questo tipo di intervento di rinforzo non può prescindere da un rinforzo delle strutture di sostegno, che siano pareti circolari o archi e pilastri, che sostengono la cupola, in modo da contenere correttamente gli sforzi di trazione ai vincoli.

Dopotutto, l'efficienza di una cupola corrisponde alla possibilità di instaurare sforzi di trazione nella parte inferiore, di un'entità che non causi instabilità e non metta però in crisi il materiale utilizzato per costruirla. Quindi se ben progettato, un guscio sferico si comporta come una struttura molto rigida. Purtroppo, però, è proprio tale elevata rigidità che rende le cupole particolarmente sensibili a cedimenti differenziali del terreno e a sollecitazioni sismiche. Così, analogamente all'inserimento di catene metalliche all'imposta degli archi per sopportare gli sforzi di trazione ai vincoli, anche nelle cupole è bene prevedere la progettazione dell'installazione di un anello metallico alla base della cupola, così come negli anni è stato fatto per molte cupole storiche esistenti.

## 2.2 Solai lignei

In Figura 2.1 è riportata la tipica composizione di un solaio in legno, dove con “terrazzo alla veneziana” si intende una soletta in conglomerato non collaborante.



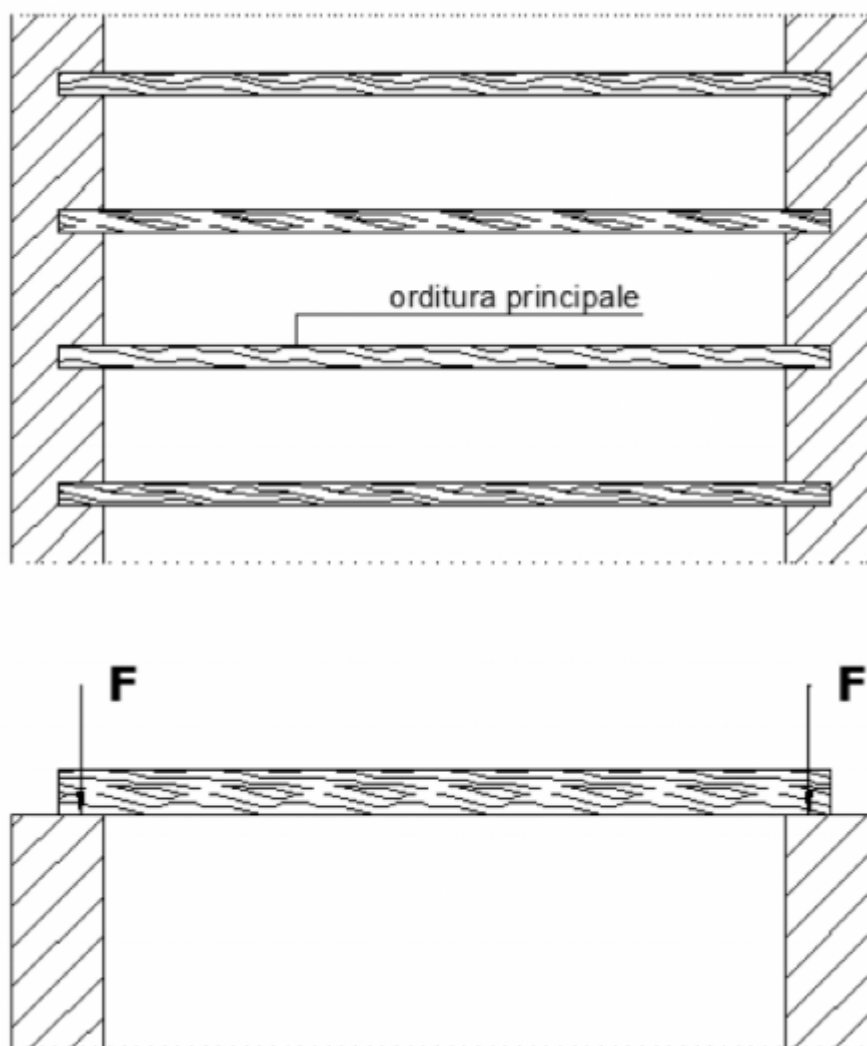
**Figura 2.1** - Tipica composizione di un solaio di legno, immagine tratta da [11]

Come struttura principale solitamente si utilizzavano travi in castagno, larice o abete, di sezione variabile ma solitamente attorno i 10x20 cm, poste ad interassi variabili dai 30 ai 50 cm, con un sovrastante assito in tavole dello spessore di circa 4 cm.

La base delle travi solitamente era compresa tra metà e tre quarti dell'altezza. Se non si decideva di lasciare l'intradosso ligneo, spesso veniva attaccato sotto le travi un'incannicciatura con funzione di controsoffittatura, che forniva il supporto per il successivo strato di finitura realizzato con l'utilizzo di intonaco civile o scagliola. Al di sopra dell'assito era posto un impasto di malta con pozzolana a grana grossa e pomice o calcinacci, con spessori variabili dai 5 ai 10 cm, usato come sottofondo per la

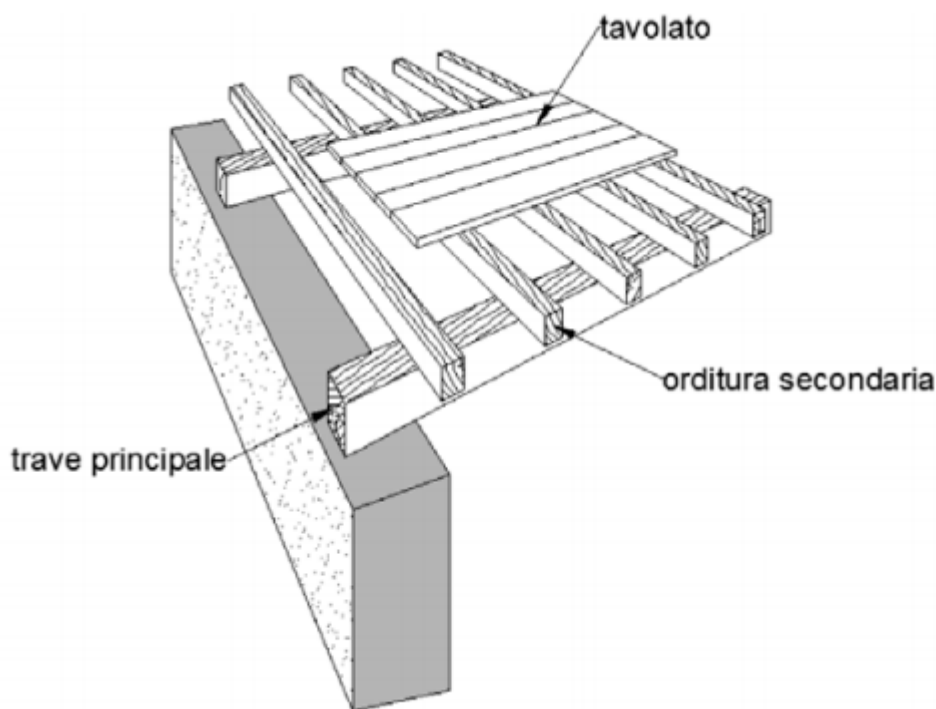
pavimentazione. Quest'ultima veniva solitamente realizzata con parquet (come in Figura 2.1) oppure con mattoni di cotto o marmette. Questo tipo di solai è chiamato *solaio a semplice orditura* o *monodirezionale*. La loro costruzione è semplice e non richiede travi di dimensioni elevate.

Come si nota nello schema riportato in Figura 2.2, questo tipo di orditura scarica il peso del solaio sottoforma di forze concentrate applicate solo su due dei quattro muri perimetrali che definiscono l'ambiente.



**Figura 2.2** – Pianta e sezione di solaio a semplice orditura, immagine tratta da [12]

Per luci maggiori di 5 m invece, poteva essere usuale ritrovare una seconda orditura di travi e quindi un solaio appartenente alla tipologia cosiddetta a *doppia orditura* (Figura 2.3).

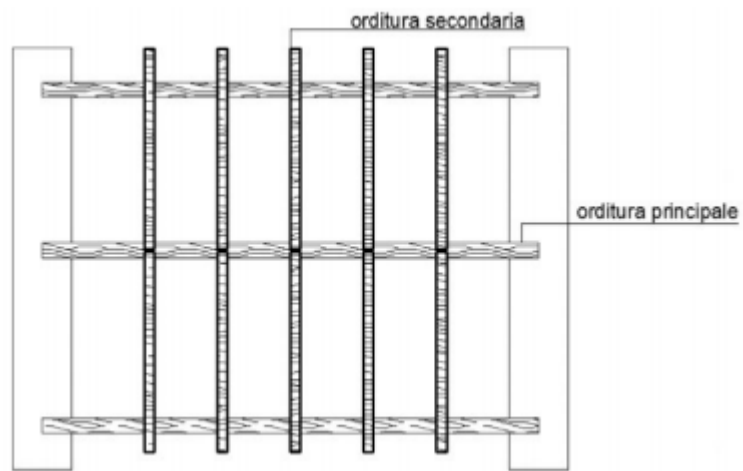


**Figura 2.3** - Solaio a doppia orditura, immagine tratta da [12]

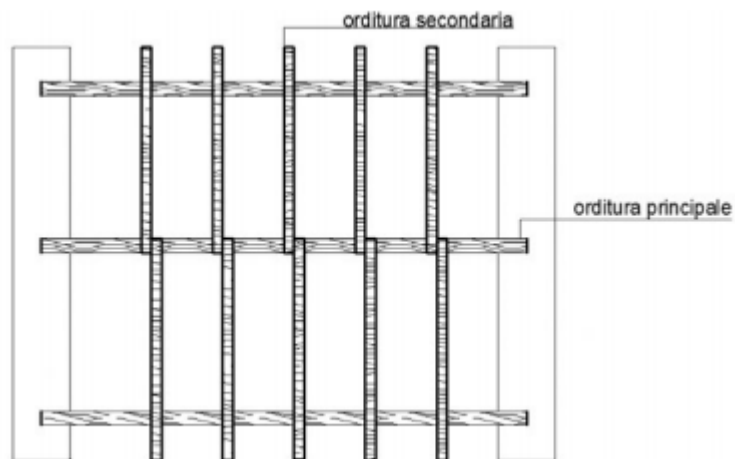
Le travi principali sono disposte secondo la dimensione minore dell'ambiente, in modo da suddividere la luce maggiore in campate uguali fra loro, di luce minore. Una seconda orditura di travi con sezione più piccola è posta al di sopra della prima orditura, in direzione ortogonale ad essa, come se fosse una semplice orditura.

L'interasse delle travi principali solitamente si aggira attorno ai 3-4 m, mentre quello delle travi secondarie può ricondursi a 50 cm circa. Queste ultime possono essere disposte con assi allineati, poggiando su metà larghezza della trave principale sottostante (Figura 2.4) oppure con gli assi sfalsati in modo da poggiare interamente sulla larghezza della trave sottostante (Figura 2.5).





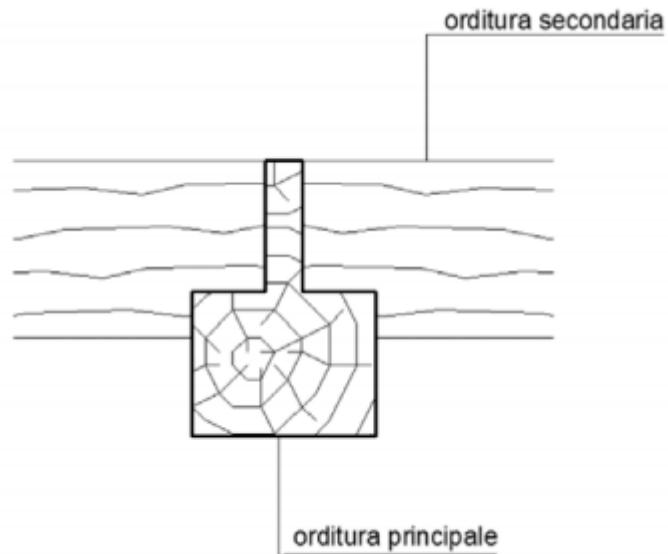
**Figura 2.4** - Travi secondarie in asse fra di loro, immagine tratta da [12]



**Figura 2.5** - Travi secondarie sfalsate tra di loro, immagine tratta da [12]

Nei solai a doppia orditura i carichi sono ripartiti fra tutti i muri ma sono maggiori sotto le travi principali.

Lo spessore di questi solai è maggiore rispetto a quello dei solai a semplice orditura, a causa del sovrapporsi delle orditure. In alcuni casi, per ovviare a questo problema di spessori, sono state ricostruite mensole o intagliate fessure alle travi principali, sulle quali venivano appoggiate quelle secondarie (Figura 2.6).



**Figura 2.6** - Sezione di trave principale con intagli per l'appoggio delle travi secondarie in solaio a doppia orditura, immagine tratta da [12]

Oggi giorno, invece di realizzare intagli, si utilizzano scarpe in lamierino (Figura 2.7) di acciaio o staffe a vista o a scomparsa.



**Figura 2.7** - Scarpa in lamierino d'acciaio, immagine tratta da [13]

Le travi principali erano semplicemente infisse (appoggiate) nelle murature portanti e, nel caso di strutture più importanti, quest'appoggio poteva essere costituito da una lastra di pietra o un legno detto “dormiente”.

L'appoggio delle travi di legno è un nodo a cui fare particolare attenzione e che va studiato attentamente poiché possono instaurarsi i seguenti fenomeni dannosi:

- a) elevati carichi concentrati con conseguente danneggiamento puntuale della muratura portante;
- b) umidità proveniente dalla muratura o formazione di condensa, con conseguente degrado biologico dell'elemento ligneo di testata;
- c) mancanti o non corrette connessioni delle testate delle travi alla muratura che, in caso di sisma, possono innescare meccanismi locali di collasso, sfilandosi dai muri e, spingendo sulle pareti, provocando il loro ribaltamento.

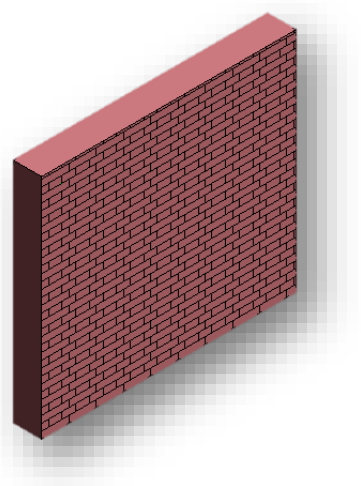


### 3. Unità tecnologiche

A seguito di approfonditi ragionamenti su quali potessero essere gli elementi e i nodi strutturali maggiormente rappresentativi dell'intero edificio storico in muratura ed escludendo la copertura, componente complessa che richiederebbe un apposito studio specifico, si sono scelte le seguenti unità tecnologiche come oggetto di applicazione della metodologia proposta:

- muratura portante in mattoni pieni;
- volta a botte in mattoni pieni;
- intradosso di solaio in legno a doppia orditura;
- estradosso di solaio in legno a doppia orditura.

#### 3.1 *Muratura portante in mattoni pieni*



**Figura 3.1** - Porzione di muratura portante in mattoni pieni

Per la scelta della prima unità tecnologica, si è proceduto ipotizzando un edificio storico in muratura con caratteristiche standard. Scartando le fondazioni, perché elementi strutturali sui quali gli interventi di rinforzo sono più rari e di solito consistenti in rifacimenti, la prima unità scelta è stata la muratura portante in mattoni pieni.

Secondo la norma UNI 8290, la muratura portante ricadrebbe all'interno delle unità tecnologiche classificate come “chiusura verticale” (nel caso in cui si trattasse di muri portanti esterni) o “partizione interna verticale” (nel caso in cui si trattasse di muri portanti interni). Per comodità però, nella presenta tesi, si è indicata questa unità tecnologica nominandola “muratura portante in mattoni pieni”. La precisazione “mattoni pieni” è stata necessaria data l'esistenza di murature in pietra, o in altri materiali lapidei, e di muratura realizzate in mattoni forati, casistiche diverse da quella in esame.

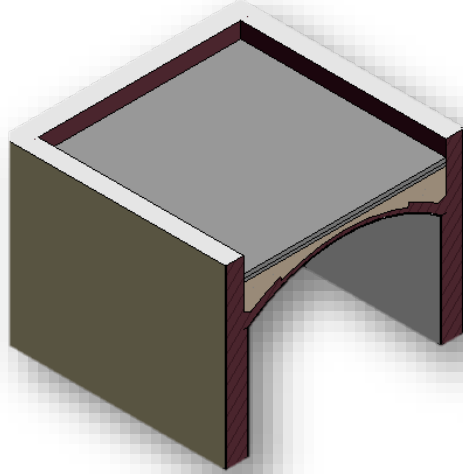
Per il dimensionamento di tale unità tecnologica in vista della sua modellazione tramite l'utilizzo del software Revit si è fatto riferimento a [14]. Per il disegno dell'orditura di mattoni in facciata, invece, si è scelta, fra le tessiture murarie enumerate in [15], la tessitura a croce a due teste, che ha permesso di raggiungere lo spessore di 25 cm. Per quanto riguarda, infine, le dimensioni dei mattoni (storici) si è fatto riferimento a [16].

Inquadrando con un qualsiasi dispositivo mobile il seguente QRcode, si viene rimandati all'applicazione “A360” ed è possibile prendere visione del modello 3D dello stato di fatto di questa unità tecnologica:



**Figura 3.2** - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "muratura portante"

### 3.2 *Volta a botte in mattoni pieni*



**Figura 3.3** - Volta a botte in mattoni pieni

La seconda unità tecnologica ritenuta significativa della struttura in muratura di un edificio storico è la volta a botte. Sempre procedendo idealmente verso l'alto di un ipotetico edificio, le volte venivano spesso utilizzate come elemento tecnico per la realizzazione degli impalcati più bassi. Fra tutte le possibili volte (vedere §1.3.1) si è scelta quella geometricamente più semplice, ovvero quella a botte.

Anche in questo caso, la normativa UNI 8290 prevedrebbe che tale unità tecnologica ricada all'interno della categoria denominata “partizione interna” ma, sempre per comodità, durante tutta la tesi verrà indicata come “volta a botte”. Come per l'unità tecnologica precedente, anche la volta a botte è realizzata in mattoni pieni.

Per il dimensionamento di tale unità tecnologica, in vista della sua modellazione tramite l'utilizzo del software Revit, si è fatto riferimento a [8] e a [16]. Per la modellazione di un profilo che non fosse troppo basico ma più realistico, si è sottolineato il maggiore inspessimento dello stesso in corrispondenza degli appoggi, che nella pratica veniva ricreato tramite un doppio strato di mattoni posizionati di taglio. Senza entrare troppo in dettagli superflui, il reale susseguirsi degli strati al di sopra del rinfiacco è stato

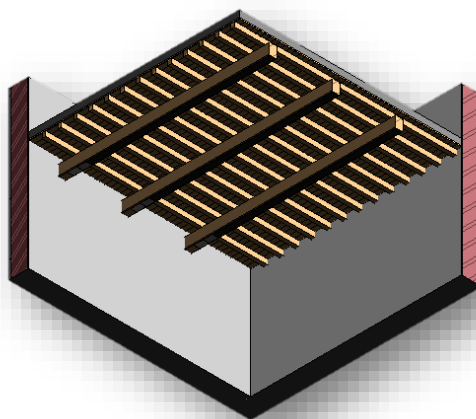
raggruppato in un unico strato, modellato come massa generica. Ulteriore attenzione si è posta nel ridurre la sezione dei muri al variare di livello, pratica realmente utilizzata per alleggerire l'intera struttura e quindi i carichi incombenti sulle strutture di fondazione. Per quanto riguarda, infine, le dimensioni dei mattoni (storici) e quindi gli spessori in sezione di muri e volta si è fatto sempre riferimento a [16]. Al contrario del caso della muratura portante (§3.1), in questo caso i muri e l'intradosso della volta sono intonacati.

Inquadrando con un qualsiasi dispositivo mobile il seguente QRcode, si viene rimandati all'applicazione "A360" ed è possibile prendere visione del modello 3D dello stato di fatto di questa unità tecnologica:



**Figura 3.4** - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "volta a botte"

### ***3.3 Intradosso di solaio in legno a doppia orditura***



**Figura 3.5** - Intradosso di solaio in legno a doppia orditura



Proseguendo nell'analisi dell'ipotetico edificio standard, le successive strutture individuate, dopo la muratura portante e gli impalcati dei piani bassi, sono rappresentate da solai più leggeri e quindi lignei. Pertanto, la terza unità tecnologica selezionata è l'intradosso di un solaio in legno a doppia orditura (vedere §1.3.3). Sebbene l'unità tecnologica vera e propria sia il solaio nel suo complesso (intradosso ed estradosso), in questo specifico caso ci si è incentrati dolo sull'intradosso.

Anche in questo caso, la norma UNI 8290 prescriverebbe di chiamare questa unità tecnologica “partizione interna orizzontale” ma, sempre per comodità, nella tesi verrà chiamata “intradosso ligneo”, nome che permette di specificare anche il materiale principale di cui è composto questo insieme di elementi strutturali.

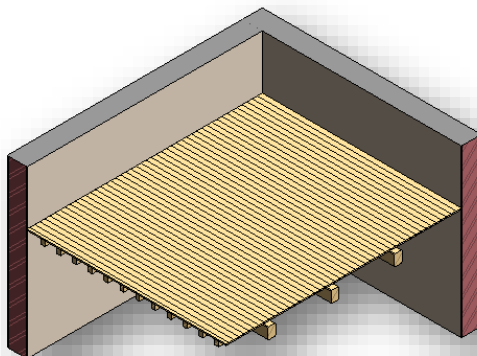
Per il dimensionamento di tale unità tecnologica in vista della sua modellazione tramite l'utilizzo del software Revit si è fatto riferimento a [14] e a [17]. Si è scelta la soluzione a doppia orditura, piuttosto che ad orditura semplice, anche perché risultasse ancora più rappresentativo il modello elaborato. Si è posta attenzione allo smusso delle travi dell'orditura principale ad uso Fiume, per rendere più realistico il tutto.

Inquadrando con un qualsiasi dispositivo mobile il seguente QRcode, si viene rimandati all'applicazione “A360” ed è possibile prendere visione del modello 3D dello stato di fatto di questa unità tecnologica:



**Figura 3.6** - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "intradosso ligneo"

### ***3.4 Estradosso di solaio in legno a doppia orditura***



**Figura 3.7** - Intradosso di solaio in legno a doppia orditura

L'ultima unità tecnologica scelta come significativa e rappresentativa degli elementi strutturali caratterizzanti un edificio storico standard in muratura, è l'estradosso di un solaio ligneo a doppia orditura. La modellazione di questa unità non è stata necessaria perché è stato riutilizzato il modello elaborato per la rappresentazione dell'unità "intradosso ligneo" (vedere §3.3).

Per ciò che è stato appena affermato, anche per questa unità tecnologica valgono le stesse valutazioni fatte in termini di nomenclatura normata fatte per l'estradosso ligneo, nonché gli stessi riferimenti presi per il dimensionamento degli elementi che la costituiscono.

Inquadrando con un qualsiasi dispositivo mobile il seguente QRcode, si viene rimandati all'applicazione "A360" ed è possibile prendere visione del modello 3D dello stato di fatto di questa unità tecnologica:



**Figura 3.8** - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "intradosso ligneo"



## 4. Lesioni, dissesti e relative cause

Nel seguente capitolo si analizzano tutte le possibili lesioni o i possibili dissesti ritrovabili che un edificio storico in muratura possa riportare sulla sua struttura.

### 4.1 *Lesioni fisiologiche e lesioni patologiche*

Eseguendo l'analisi dei dissesti su un edificio in muratura, si arriva a tracciare un quadro fessurativo e ci si può trovare di fronte a diversi tipi di dissesto, a seconda che si tratti di dissesti di natura fisiologica o dissesti di natura patologica.

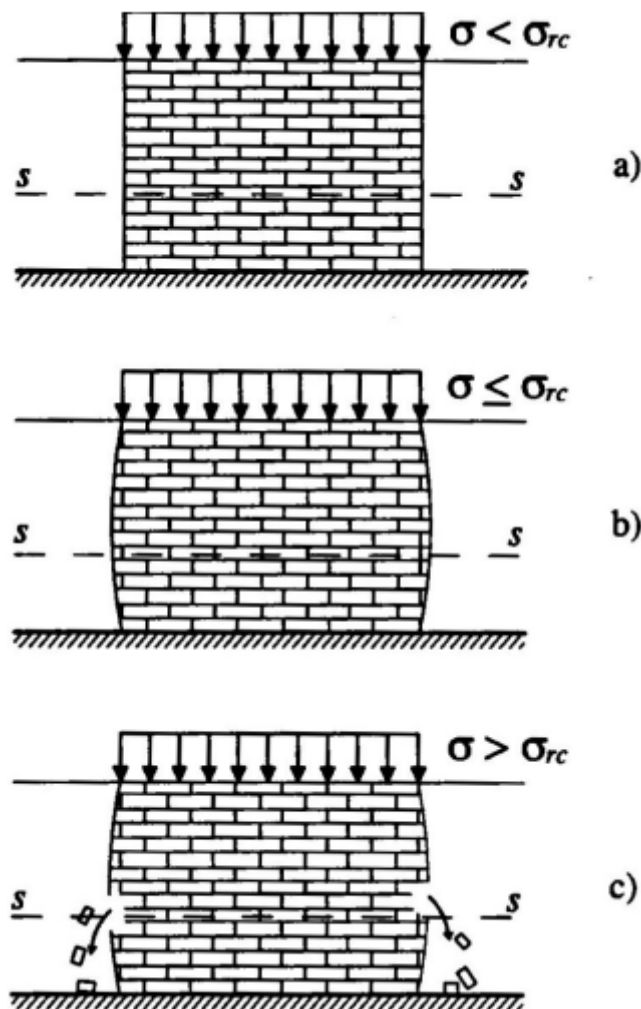
I dissesti di natura fisiologica dipendono tendenzialmente dalla tipologia di costruzione e dalla concezione che ha portato alla sua realizzazione. Si ricava, in questo caso, un quadro fessurativo tipico degli edifici di prima e seconda classe (vedere § **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) e generalmente non dovrebbe compromettere la resistenza dell'edificio ai carichi verticali ma potrebbe causare problemi nella reazione della struttura a sollecitazioni dovute ad un sisma. Occorre quindi valutare questi dissesti nel caso in cui si voglia agire sull'edificio con interventi di miglioramento o adeguamento sismico.

Invece, i dissesti di natura patologica possono essere causati da:

- L'accentuarsi dei difetti fisiologici a causa della scarsa qualità dei materiali;
- Il sottodimensionamento della struttura in fase di progettazione;
- Il degrado dei materiali dovuto all'invecchiamento;
- Eventi esterni accidentali o eccezionali (compresi gli eventi sismici);
- Interventi umani inappropriati.

#### 4.1.1 Lesioni da schiacciamento

La muratura, come si è spiegato nel capitolo 1, ha una buona resistenza a compressione ma ovviamente con dei limiti. Infatti, oltre un certo limite di carico la muratura può presentare dei dissesti dovuti allo schiacciamento. In Figura 4.1 è visibile come, all'aumentare delle tensioni normali verticali, la muratura inizia a sconnettersi (a). Mano a mano che aumenta il carico, la sezione si rigonfia (b) e quindi espelle gli elementi in muratura periferici (c).



**Figura 4.1** - Evoluzione dello schiacciamento di una porzione di muratura storica all'aumento delle tensioni verticali, immagine tratta da [18]

Lo schiacciamento è un fenomeno che si sviluppa progressivamente e quindi una volta innescato risulta difficile da fermare. Perciò bisogna intervenire in tempo per evitare il crollo. I primi segnali della presenza di questo fenomeno si riscontrano sull'intonaco. Iniziano a crearsi delle increspature e lesioni orizzontali, che non portano neanche a pensare che ci sia uno schiacciamento, ma che in realtà sono il segnale del fatto che i giunti di malta cominciano a deformarsi.

Una volta che la malta si è schiacciata sufficientemente, i mattoni cominciano ad entrare in contatto fra di loro. Questo contatto può generare delle tensioni notevoli, che portano alla formazione di piccole fessure negli elementi. Con il proseguo del fenomeno, queste piccole fessure entrano in contatto tra di loro fino a crearne di grandi e verticali, non più orizzontali. Quindi l'elemento murario viene suddiviso in porzioni sottili e separate fra loro, con inerzia maggiore rispetto all'elemento originale.

Bisogna sottolineare che, durante l'evolversi di questo fenomeno, il carico verticale rimane costante. Il problema maggiore è dovuto al fatto che le fessure si ingrandiscono fino a interessare tutto lo spessore della muratura. L'elemento iniziale tende a dividersi in elementi più sottili che sono perciò più instabili sotto l'azione di carichi verticali. Tutto ciò può portare al crollo, che avviene in maniera repentina e sotto l'azione di una tensione costante, poiché quello che porta all'instabilità è la diminuzione del carico critico degli elementi formatisi.

Una volta che il fenomeno si innesca, le lesioni cominciano ad aumentare d'ampiezza e se ci si accorge di tali lesioni verticali è opportuno intervenire rapidamente, anche per evitare eventuali espulsioni di materiale (Figura 4.1.c) che possono far degradare ulteriormente il fenomeno. Occorre perciò monitorare le lesioni e quindi la loro ampiezza.

Le cause di schiacciamento delle murature sono molteplici ma nella maggiorparte dei casi sono riconducibili ad interventi che sarebbe stato meglio non fare quali:

- 1) Riduzione della sezione resistente dovuta alla creazione di aperture;
- 2) Aumento dei carichi verticali dovuto a sopraelevazioni, soppalchi o cambi di destinazione d'uso;
- 3) Diminuzione della resistenza dei materiali dovuta ad agenti atmosferici o al traffico ravvicinato e quindi ad eccessive vibrazioni;
- 4) Aumento delle sollecitazioni dovuto ad eventi accidentali e imprevisti, come ad esempio un sisma o un cedimento in fondazione.

È bene far notare che la possibilità di schiacciamento è maggiore nei casi di *pilastrini in muratura*, che sebbene siano realizzati regola d'arte, sono più esposti a questo tipo di dissesto. Mentre in una muratura continua è più facile che il sovraccarico venga distribuito meglio, a seconda della tipologia di tessitura muraria.

Il fenomeno di schiacciamento può avvenire anche al di sotto di travi in legno in acciaio direttamente appoggiate sulla muratura, senza l'interposizione di elementi per la ripartizione dei carichi. Questo dissesto di solito è dovuto alla nascita di eccessive forze di trazione tra gli elementi della muratura a seguito di un eccessivo carico verticale proveniente dalla trave. Ma solitamente tale fenomeno non è eccessivamente preoccupante, perché le forze riescono ad essere ripartite in altre zone del muro, e provoca solo l'espulsione di piccole porzioni di intonaco.

Si possono trovare lesioni dovute a schiacciamento anche sui piedritti che sostengono un arco, con l'unica particolarità che tali lesioni non saranno verticali ma inclinate. Tale inclinazione non è nient'altro che la rappresentazione della risultante tra forze dovute ai carichi verticali e spinte orizzontali dell'arco stesso.



#### 4.1.2 Lesioni di distacco

Queste lesioni solitamente interessano le croci di muro, sono ancora verticali e sono dovute a scarse connessioni tra muri ortogonali.

Come già detto le principali cause di disconnessione in corrispondenza di croci di muri sono:

- scarsi concatenamenti murari e inappropriata tessitura muraria;
- differenza di carichi sui muri che concorrono alla stessa croce e quindi diverse deformazioni;
- variazioni termiche tra muri esterni e muri interni;
- degrado della malta a causa delle vibrazioni dovute al traffico;
- spinte delle piattabande;
- costruzione delle pareti in periodi diversi e perciò senza ammorsamento.

Se questi motivi causano il distacco delle pareti e la rotazione della facciata, le lesioni saranno sempre più ampie andando verso l'alto lungo l'edificio. Questo fenomeno è amplificato all'aumentare del numero di aperture ravvicinate fra loro nelle pareti che convergono alla croce di muro, essendo questa una parete debole, e le lesioni possono interessare le piattabande e le pareti superiori. Inoltre, nel caso di ribaltamento della facciata, le lesioni potrebbero essere presenti anche nel solaio ordito parallelamente alla facciata, proprio nella direzione parallela alla facciata, soprattutto nei solai spingenti come quelli con voltine (Figura 4.2).



**Figura 4.2** - Distacco tra pareti ortogonali e lesioni sul solaio ordito parallelamente alla parete di facciata, immagine tratta da [19]

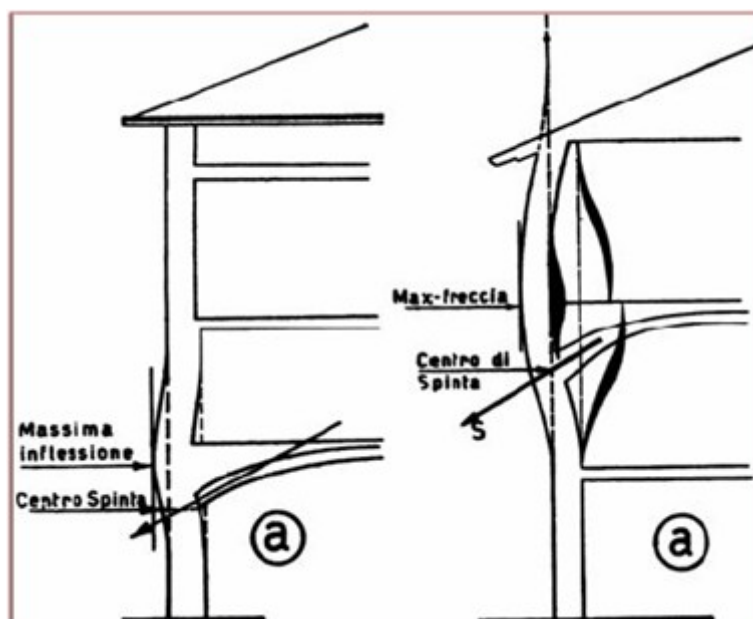
#### **4.1.3 Dissesti dovuti alle spinte**

Anche le spinte, molte volte, sono causa di dissesti. Ad esempio, le lesioni sulle piattabande sono fisiologiche e, quando le piattabande sono nei pressi della parete di facciata, favoriscono il distacco di quest'ultima. Questi sforzi tendono però notevolmente a ridursi quando gli appoggi cedono e si crea un arco di scarico naturale con freccia molto grande che riduce drasticamente le spinte.



**Figura 4.3** - Formazione di arco di scarico sopra piattabanda e lesione sotto trave per schiacciamento a destra, immagine tratta da [20]

Esistono però anche casi più patologici, in cui la muratura non riesce a reggere la spinta di archi o volte (Figura 4.4), soprattutto a causa di non corrette connessioni in corrispondenza delle croci di muro. E quindi in questi casi la spinta di una volta può favorire il distacco tra pareti ortogonali.

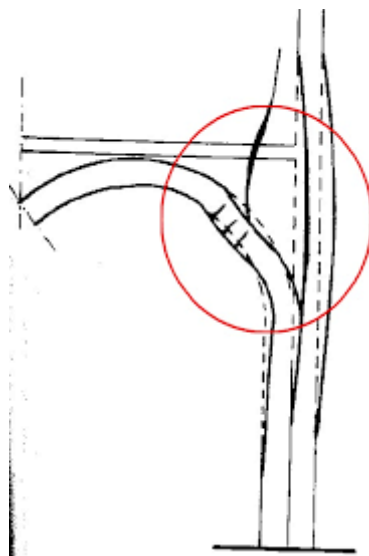


**Figura 4.4** - Spinta delle volte sulla muratura, con individuazione della massima inflessione della stessa e del centro di spinta a seconda del livello, immagine tratta da [21]

Potrebbe anche esserci il problema opposto, ovvero che il ribaltamento di una parete di facciata si ripercuota anche nelle volte. Infatti, spostandosi, la parete di facciata crea lesioni di richiamo nelle pareti ortogonali e quindi depressioni nelle volte, più o meno pericolose, a seconda del fatto che il fenomeno tenda a fermarsi o no.

Anche negli archi e nelle volte possono presentarsi tipologie di lesioni tipiche, come all'intradosso alle chiavi e all'estradosso alle reni. Le lesioni in chiave sono il segno che 'arco o la volta stanno lavorando. Contemporaneamente potrebbero esserci lesioni all'estradosso in corrispondenza delle reni ma è più difficile notarle perché nascoste.

Se controllate, queste lesioni non sono pericolose, anzi indicano il corretto funzionamento dell'arco o della volta, che cercano di aumentare il più possibile la loro freccia per resistere meglio ai carichi esterni.



**Figura 4.5** - Depressione su volta causata dal distacco della parete di facciata, immagine tratta da [21]

La situazione potrebbe diventare preoccupante al formarsi di ulteriori lesioni nella parte sottostante alle reni, che potrebbero portare lo schema statico da un arco a 3 cerniere, ad 1 a 5. Questa configurazione potrebbe anche stare in equilibrio ma precario, infatti alla minima variazione dei carichi ci sarebbe il crollo dell'arco in una serie di conci.

A volte, invece, si possono avere lesioni su un arco in posizione invertita rispetto a quella appena illustrata. Questo potrebbe succedere in presenza di una volta piccola schiacciata da due volte grandi ad essa accostate oppure nel caso di arco a sesto acuto.

#### **4.1.4 Dissesti dovuti a cedimenti in fondazione**

Solitamente questa tipologia di dissesti si ha quando i cedimenti in fondazione sono di tipo differenziale. Se, infatti, tutta la struttura si muovesse verso il basso in modo compatto, non si avrebbero lesioni. Se, invece, la fondazione dell'edificio fosse un corpo molto rigido, eventuali cedimenti differenziali provocherebbero una rotazione globale della struttura.

Negli edifici antichi, le fondazioni sono in muratura, quindi non abbastanza rigide da provocare un ribaltamento dell'intero edificio, quindi, in caso di cedimenti, si verificano dei dissesti localizzati nelle sole zone interessate dal fenomeno.

I cedimenti delle fondazioni, generalmente, possono essere causati da:

- zone di terreno più cedevole o passaggi di cunicoli;
- aumento localizzato dei carichi verticali, dovuto ad esempio a sopraelevazioni, con successivo aumento delle forze scaricate in fondazione;
- infiltrazioni di acqua nel terreno, dovute a perdite nelle tubazioni, che portano alla creazione di voragini e successivi cedimenti nel terreno stesso;
- variazione del livello della falda con conseguenti fenomeni di subsidenza;
- vibrazioni dovute al traffico;
- realizzazione di fabbricati nelle strette vicinanze;
- realizzazione di scavi nelle strette vicinanze, che riducono la capacità portante del terreno.

I cedimenti vengono classificati in base alla localizzazione in:

1. cedimenti intermedi: quando la parte ceduta è compresa tra gli estremi della muratura che si considera;
2. cedimenti terminali: quando la parte ceduta interessa l'estremità del tronco murario.

Una seconda classificazione può essere fatta in base alla lunghezza del tronco ceduto in rapporto all'altezza del muro e quindi si possono avere:

- a. cedimenti lunghi;
- b. cedimenti medi;
- c. cedimenti corti.

Quest'ultima classificazione è basata sul rapporto di grandezza fra le tensioni normali e tangenziali nei cedimenti intermedi e terminali. Nello specifico si possono ancora individuare due casi:

- Il caso in cui l'altezza della parete sia maggiore della lunghezza della zona interessata dal cedimento. In questi casi la lesione delinea la formazione di un arco di scarico, con freccia tale da trasferire i carichi a zone che siano in grado di sopportarli.
- Il caso in cui l'altezza della parete è inferiore alla lunghezza della zona interessata dal cedimento. In questo caso, il comportamento è riconducibile a quello di una trave doppiamente incastrata con momenti flettenti negativi agli incastri e positivo in mezzzeria, tali da provocare delle lesioni all'estradosso in corrispondenza degli appoggi e all'intradosso in mezzzeria.

Nel caso in cui il muro non sia pieno ma siano presenti aperture, le fessure si andranno a formare in corrispondenza delle zone più deboli, ovvero delle fasce di piano.

Il cedimento di un edificio va visto nel suo complesso, in quanto le lesioni sui paramenti murari esterni dovranno essere coerenti fra di loro. Mentre questo è valido sia per gli edifici di prima classe che per quelli di seconda, può tuttavia non essere vero per gli edifici di terza classe. In questi ultimi, infatti, la presenza di cordoli comporta un funzionamento a trave e quindi può portare al distacco del primo piano da quelli superiori, in caso di cedimento in fondazione. È anche vero, però, che questi edifici spesso presentano fondazioni in cemento armato, quindi più rigide e meno sensibili ai cedimenti del terreno rispetto a quelle storiche in pietrame.

#### 4.1.5 Dissesti dovuti alle azioni sismiche

Di seguito vengono analizzati i possibili dissesti dovuti al sisma, facendo sempre riferimenti alla suddivisione degli edifici in classi, poiché la loro appartenenza ad una, piuttosto che a un'altra di queste, influenza anche il tipo di danno. Vengono quindi descritti i danni dovuti ai meccanismi di I e II modo.

I danni ascrivibili al **meccanismo di I modo** si riscontrano chiaramente solo negli edifici di prima e seconda classe, poiché assenti in essi i collegamenti tra pareti ortogonali e quindi la distribuzione delle forze scatenate dal sisma alle pareti parallele al sisma. Queste forze quindi sollecitano le pareti ortogonali a loro e, avendo queste una resistenza minore se così sollecitate, innescano il meccanismo di I modo. Questi meccanismi si possono scatenare anche quando le pareti sono ben collegate fra di loro ma scollegate di solai, causando così delle rotture per flessioni verticali.

Se i paramenti murari sono realizzati con elementi poco lavorati, arrotondati e soprattutto se il paramento esterno è scollegato da quello interno, in caso di evento sismico si può avere la *disgregazione del paramento murario* (Figura 4.6 e Figura 4.7) che perde la propria monoliticità. Di conseguenza si ridurrà lo spessore della parete e quindi si potranno avere ulteriori instabilità dovute ai carichi verticali, che, nel peggiore dei casi, possono portare al collasso dell'intera parete.





**Figura 4.6** - Disgregazione del paramento murario, immagine tratta da [22]



**Figura 4.7** - Disgregazione del paramento murario, immagine tratta da [23]

Il meccanismo di *ribaltamento semplice* (Figura 4.8) si innesca solitamente quando la parete di facciata è scollegata dai muri a lei ortogonali e dagli impalcati. Quando questi ultimi sono tessuti parallelamente alla facciata, non danno nessun contributo alla sua stabilizzazione. In queste condizioni, la parete di facciata è una mensola incastrata in fondazione a tutt'altezza, che, sollecitata ortogonalmente al suo piano, subisce un ribaltamento.



**Figura 4.8** - Ribaltamenti rigidi, immagine tratta da [24]

A volte, in presenza di sporto realizzato con palombelle lignee con minuta orditura per esempio, si riesce ad evitare il collasso totale della parete grazie ad una forza stabilizzante. Se questa azione stabilizzante invece è totalmente assente, si arriva al ribaltamento rigido della parete verso l'esterno. Anche la presenza di discontinuità all'interno del paramento murario, come canne fumarie o tracce per impianti tecnologici, può favorire tale meccanismo.

Quando la parete di facciata è ben ammorsata alle pareti ortogonali può avvenire un *ribaltamento con trascinamento* (Figura 4.9), in cui una parete trascina con sé una porzione delle pareti ortogonali. Questo può avvenire principalmente in due casi specifici: quando vi è la presenza di numerose aperture sulle pareti ortogonali (caso ricorrente negli edifici di seconda classe) e quando l'angolo d'incrocio dei muri sia realizzato con pietre squadrate e di migliore fattura ma avvenga un distacco in una zona di muro più spostata verso l'interno dell'edificio, dove il concatenamento murario è più scarso.

Rispetto al trascinamento semplice, il ribaltamento con trascinamento ha una vulnerabilità inferiore, in quanto la porzione di parete ortogonale trascinata, con il suo peso, esercita un'azione stabilizzante nei confronti del meccanismo di collasso locale.



**Figura 4.9** - Ribaltamento con trascinamento, immagine tratta da [25]

Quando invece l'ancoraggio fra le pareti è corretto ma si ha uno scarso ammorsamento in corrispondenza dell'impalcato di copertura, può avvenire un collasso dovuto a *flessione orizzontale* (Figura 4.10 e Figura 4.11). La parete, funzionando con schema statico di piastra incentrata su tre lati, a causa delle forze d'inerzia è sollecitata sul piano verticale e su quello orizzontale da momenti flettenti, subendo così un distacco di una porzione trapezoidale.

Il pannello risponde con un effetto ad arco orizzontale all'interno dello spessore della parete. Nel caso di pareti a doppio paramento, poi, se l'arco interessa solo quello esterno, si può verificare il distacco solo di quest'ultimo



**Figura 4.10** - Flessione orizzontale di parete ben ancorata, immagine tratta da [25]

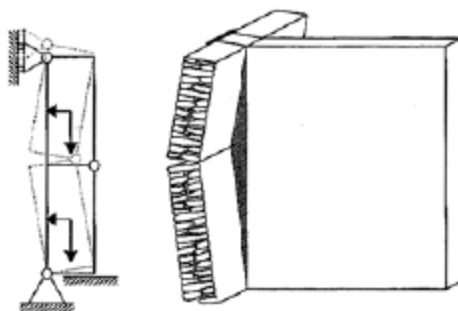


**Figura 4.11** - Flessione orizzontale di parete ben ancorata, immagine tratta da [25]

Quando, poi, la parete non è ancorata in corrispondenza di un impalcato intermedio, mentre lo è più efficacemente agli impalcati superiori e inferiori, può avvenire un collasso dovuto ad una *flessione verticale* (Figura 4.13 e Figura 4.14). Succede spesso negli edifici di rima o seconda classe in cui si p intervenuti con interventi di rifacimento e si cono realizzati cordoli di coronamento. Infatti, se questo tipo di intervento non è accompagnato dalla realizzazione di ancoraggi in corrispondenza degli impalcati intermedi, il cordolo funziona da confinamento che trattiene in testa la parete evitandone il ribaltamento, ma allo stesso tempo può instaurare un meccanismo di instabilità verticale che la fa collassare a causa della formazione di cerniere cilindriche in corrispondenza degli estremi e della mezzeria (Figura 4.12). Questo meccanismo può interessare uno o più impalcati a seconda della presenza o meno di idonei vincoli agli orizzontamenti ma

comunque presenta una vulnerabilità inferiore rispetto al meccanismo di ribaltamento semplice.

Occorre quindi precisare che l'intervento di realizzazione di un cordolo di cemento armato in sommità agli edifici in fase di rifacimento della copertura, è un intervento che migliora il comportamento della struttura ed evita un eventuale fenomeno di ribaltamento semplice a seguito di un sisma. Ma questo intervento dev'essere accompagnato dalla realizzazione di connessioni tra parete esterna ed impalcati intermedi, per evitare anche il fenomeno appena descritto.



**Figura 4.12** - Flessione verticale, schema del cinematismo, immagine tratta da [25]





**Figura 4.13** - Flessione verticale, immagine tratta da [25]



**Figura 4.14** - Flessione verticale, immagine tratta [25]

Passando ai **meccanismi di II modo**, questi sono legati al comportamento delle pareti nel proprio piano e possono avvenire principalmente negli edifici di terza classe, dove i meccanismi di collasso locale sono evitati grazie alla presenza di cordoli, ma anche in edifici di prima o seconda classe che abbiano incatenamenti o croci di muro integre.

Molto spesso, grazie alla ottima realizzazione delle connessioni tra pareti ortogonali, le pareti ortogonali alla direzione del sisma riescono a trasmettere correttamente le sollecitazioni alle pareti parallele alla direzione del sisma. Ma, a volte, queste pareti non sono realizzate a regola d'arte e non riescono a sopportare gli sforzi di trazione che vi si instaurano e a scaricarli correttamente in fondazione. Tutto questo provoca *danneggiamenti* causati dalla presenza di *pareti senza catene*.

Negli edifici di prima e seconda classe non si verifica questo tipo di danneggiamento, in quanto, in assenza di incatenamenti, il sisma non riesce a sollecitare le pareti nel proprio piano. Quindi eventualmente questo danneggiamento può verificarsi in edifici già parzialmente crollati a causa di meccanismi locali.

In Figura 4.15 e in Figura 4.16 si vede come alle pareti rimaste mancano delle porzioni triangolari in alto che rappresentano proprio quelle zone di parete che non riescono a trasferire l'azione sismica in fondazione a causa dell'assenza di elementi che resistano a trazione come le catene.



**Figura 4.15** - Comportamento nel piano di parete senza catene, immagine tratta da [26]



**Figura 4.16** - Comportamento nel piano di parete senza catene, immagine tratta da [27]

Sia negli edifici di terza classe, sia in quelli di prima e seconda in cui i collegamenti tra pareti e tra pareti e solai siano efficaci e siano realizzati correttamente gli incatenamenti, si possono verificare *tagli per fessurazione diagonale di maschi e fasce*.

Bisogna però distinguere i casi di fasce resistenti e fasce deboli. Nel caso di fasce deboli, il danneggiamento interessa solo queste e quindi la parete si comporta come una serie di mensole collegate. In Figura 4.17 le lesioni tipiche a X hanno interessato l'edificio in corrispondenza delle fasce di piano (deboli) e quindi la presenza di incatenamenti diffusi ha permesso la risposta dell'edificio al sisma con il comportamento delle pareti nel loro piano.





**Figura 4.17** - Taglio per fessurazione diagonale in fasce di piano, immagine tratta da [28]

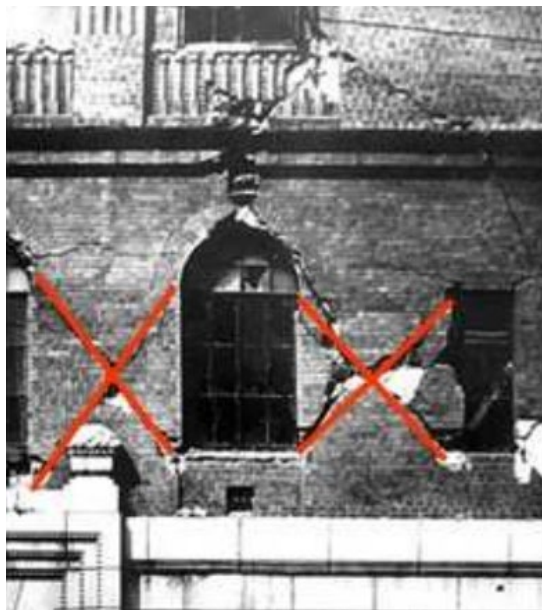
Se in corrispondenza delle teste dei capochiave delle catene vi sono danneggiamenti, questo è un segno del corretto funzionamento delle stesse durante il sisma.

Se, invece, le fasce di piano avessero una resistenza adeguata (forti), la rottura a taglio per fessurazione diagonale si sposterebbe nei maschi murari (Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20) e l'edificio si comporterebbe come un vero e proprio telaio in muratura.

Questo tipo di danno è molto più frequente negli edifici di terza classe, in cui si hanno cordoli di piano e architravi in cemento armato ben ancorati alla muratura, che fanno comportare le fasce di piano come delle vere e proprie travi in muratura.



**Figura 4.18** - Taglio per fessurazione diagonale in maschi murari, immagine tratta da [28]



**Figura 4.19** - Taglio per fessurazione diagonale in maschi murari, immagine tratta da [28]



**Figura 4.20** - Taglio per fessurazione diagonale in maschi murari, immagine tratta da [28]

Negli edifici di terza classe, può esserci uno scorrimento orizzontale dell'edificio, in corrispondenza di un letto di malta. In questo caso allora si parla di *taglio per scorrimento* (Figura 4.21 e Figura 4.22). Questa tipologia di danno non può riscontrarsi in edifici più antichi, in quanto in questi edifici i letti di malta sono irregolari.

Il livello di vulnerabilità di tale danneggiamento è basso per i piccoli spostamenti che si possono generare ma è praticamente impossibile intervenire per ripristinare la situazione ante-sisma, perché ormai è avvenuto uno spostamento di carico ingente, con decentramento del baricentro delle masse.



**Figura 4.21** - Taglio per scorrimento, immagine tratta da [29]



**Figura 4.22** - Taglio per scorrimento, immagine tratta da [29]

Un altro danno che può interessare i maschi murari è la rottura aa *pressoflessione complanare* (Figura 4.23). Generalmente si manifesta con lesioni orizzontali da un lato, dovute alla trazione della muratura, e lesioni subverticali dal lato opposto, dovute allo schiacciamento. Questo meccanismo di rottura interessa solo elementi snelli, con rapporto di altezza e base maggiore di 2.5, e con resistenza a pressoflessione inferiore a quella a taglio, quindi si verifica raramente. Inoltre, siccome alla fine dell'evento sismico le lesioni orizzontali si richiudono, è anche di difficile individuazione.



**Figura 4.23** - Rottura a pressoflessione complanare, immagine tratta da [28]

## **4.2 Lesioni strutturali e lesioni non strutturali**

La presenza di una lesione non necessariamente compromette la stabilità di un edificio, bisogna indagare se la lesione è solo superficiale oppure interessa l'intera sezione dell'edificio o della muratura. Quindi, si può fare una distinzione tra *lesioni strutturali* e *lesioni non strutturali*.

Effettivamente, una lesione dell'intonaco non implica per forza una lesione della muratura sottostante e, anche nel caso in cui questa sia lesionata, ciò non implica per forza una instabilità dell'intera struttura, bisogna comunque studiare il comportamento globale dell'edificio. La lesione delle murature di un edificio con struttura a telaio, infatti, non implica che l'intero edificio rischi il collasso, perché, in questa tipologia di edifici, la muratura svolge la mera funzione di tamponatura, con eventuali lesioni passanti non

strutturali. Quelle che vengono chiamate *lesioni da intonaco* spesso sono dovute semplicemente al fatto che l'intonaco è molto più delicato della muratura sottostante e può lesionarsi anche solo sotto l'azione di sollecitazioni di entità insignificante, sesso di natura meccanica, sebbene comunque siano indicatori di un fenomeno in atto.

A prescindere dalla tipologia di struttura portante, i tramezzi in mattoni intonacati sono degli ottimi indicatori di eventuali fenomeni tensionali in evoluzione, essendo più fragili e quindi i primi a riportare lesioni sull'intonaco. Per quanto riguarda i piani terra o interrati, invece, bisogna tener presente che in passato spesso veniva realizzata una soletta di calpestio su un letto di ghiaia o sabbia direttamente a contatto con il terreno. Quindi, in questi casi, eventuali lesioni potrebbero essere semplicemente dovuti ad assestamenti che portano al deformarsi della soletta per inflessione. In questi casi, la presenza di lesioni a direttrice orizzontale in corrispondenza dell'incrocio di solaio e tramezzo è l'evidente segno della presenza di una flessione della soletta e quindi un conseguente distacco alla base dei tramezzi. Perciò le successive lesioni sul tramezzo possono essere trascurate.

La casistica è talmente varia (cause di umidità, temperatura, errori di progettazione, ecc.) che in alcuni casi non è possibile spiegare il fenomeno ma solo analizzare caso studio per caso studio, facendo tesoro degli errori in vista della progettazione futura.

Lo svilupparsi delle lesioni, in ogni caso, è dovuto alla natura iperstatica delle strutture, che, a seguito di uno scavo in prossimità delle fondazioni, un aumento dei carichi a seguito di una sopraelevazione, o altri interventi differenti, deve adattarsi alla nuova configurazione dei carichi e perde l'iperstaticità. Perciò le fratture rappresentano proprio gli ideali giunti destinati alla redistribuzione dei carichi e al trasferimento degli stati di coazione.

### ***4.3 Diagnostica dei quadri fessurativi***

Un possibile iter per la diagnostica delle sezioni di un edificio è stato proposto dai professori Caputo e Viggiani [30] e dovrebbe essere costituito dalle seguenti fasi:

- Rilievo e analisi delle lesioni;
- Studio delle informazioni progettuali sulle strutture;
- Indagini, fatte di programmazione, esecuzione e interpretazione dei risultati;
- Diagnosi, ovvero individuazione della relazione causa-effetto;
- Stesure di un progetto di intervento che comprenda anche le verifiche geotecniche e strutturali;
- Monitoraggio, durante e dopo l'intervento.

Siccome spesso, per questioni di costo, non è possibile eseguire tutte le indagini, di suolo e struttura, che andrebbero eseguite per avere una panoramica il più completa possibile della condizione della struttura, il saper studiare i quadri fessurativi risulta di fondamentale importanza. Altrettanto importanti però sono le indagini di tipo geologico e geomorfologico e le prove in situ sui materiali. Infatti, molto spesso tramite lo studio dei terreni su cui è stata realizzata l'opera, si possono ottenere informazioni più esaustive sull'edificio e capire anche il motivo di alcune scelte tecniche. Queste ultime non sempre sono quelle giuste, ed è qui che assumono importanza le indagini in situ e in laboratorio su provini di materiali, che spesso portano alla conclusione di una non corretta scelta delle tecnologie e dei materiali da parte del progettista dell'edificio. A volte, i tecnici sbagliano, non solo in fase progettuale, ma anche in fase di diagnosi, proprio perché si fidano troppo delle proprie conoscenze acquisite trascurando l'importanza delle prove e delle indagini, che sono fondamentali caso per caso.

#### 4.3.1 Il metodo degli sforzi

Quando si progetta una struttura, si può contare su metodologie codificate che riguardano la progettazione architettonica, strutturale ed impiantistica, nonché il dimensionamento delle sezioni resistenti e le analisi geotecniche per lo studio dell'interazione terreno-struttura. La procedura consiste nello schematizzare la struttura e valutare i carichi di progetto, costituiti dal peso proprio, i carichi permanenti (come ad esempio il mobilio), i carichi accidentali (quali la neve, il vento e il sisma) e quant'altro. Quindi si procede alla trasformazione di queste azioni in sforzi e deformazioni tramite l'utilizzo dei legami costitutivi, per studiare il comportamento della struttura. Riassumendo, quindi, viene utilizzato un *metodo* basato sull'analisi *degli sforzi*.

Se ci si trova di fronte ad un edificio già lesionato, invece, la questione è più complicata, siccome non esiste una metodologia capace di ricreare tutte le variabili presenti nel processo di dissesto di un edificio esistente. Si può solo cercare di far convergere i risultati dei calcoli con il modello reale, ovvero elaborare un modello iniziale che coincida con i risultati delle analisi e trasformarlo successivamente in un modello predittivo, capace di proiettare nel futuro il comportamento della struttura per progettarne il consolidamento. Però, per procedere in questo modo, bisogna aver individuato in maniera chiara e univoca la causa del dissesto, altrimenti tutto il procedimento sarebbe vano e il consolidamento non porterebbe a nessun risultato.

Esistono molte tecnologie in grado di prevedere il comportamento di una struttura ma bisogna utilizzare quella con il maggiore grado di affidabilità. La procedura descritta è in grado di complicare notevolmente tutto il processo a causa dell'elevato numero di informazioni coinvolgibili. Bisogna quindi avere un'ottima esperienza e non basta il modello di calcolo; perciò questa procedura è difficilmente utilizzabile per le applicazioni di tutti i giorni. Inoltre, spesso i sistemi di monitoraggio non sono appropriati o sono malfunzionanti. Questo è molto più comune di quanto si possa credere anche a causa della grande diffusione di questi sistemi e la loro indipendenza da valutazioni tecniche di esperti. In ultima istanza, molto spesso si ha il problema opposto, ovvero bisogna anche scontrarsi con l'ignoranza dell'interlocutore che spesso non accetta però l'installazione di tali strumentazioni per il monitoraggio.



#### 4.3.2 Metodo degli spostamenti

La metodologia basata sui modelli convergenti richiede ovviamente che le scelte progettuali siano precedute dall'analisi del quadro fessurativo per la ricostruzione del cinematismo in atto e l'individuazione della causa. Quindi si può ricostruire un modello basato sulla relazione causa-effetto, affidandosi agli unici elementi disponibili, ovvero le lesioni. Il loro studio e monitoraggio consiste nella ricostruzione del quadro fessurativo mediante l'utilizzo del *metodo degli spostamenti*, considerando che questi costituiscono idealmente le lesioni. Il metodo degli spostamenti è sicuramente più comodo di quello degli sforzi, che invece risulta più utile in fase di progettazione.

L'analisi di una sola lesione è inutile. Al contrario, l'analisi di un intero quadro fessurativo, tramite lo studio dei vettori spostamento, permette, individuando lo schema statico dell'edificio, di simularne il comportamento nel suo complesso e di ricercarne l'eventuale forza scatenante cioè la causa.

L'unica cosa che rimane da capire è, quindi, come rilevare, misurare e graficizzare gli spostamenti, per poterli riutilizzare nella ricostruzione dei cinematismi e nell'individuazione delle possibili cause. Le variabili a disposizione devono essere analizzate singolarmente e, successivamente, nel loro insieme. Questa scienza però non è perfetta proprio perché queste variabili possono essere praticamente infinite e quindi non si sarà mai in grado di riprodurre tutte le condizioni al contorno. Inoltre, un ulteriore ostacolo alla scoperta della verità assoluta è costituito dal fatto che le cause possono essere molteplici raramente un dissesto può essere imputato ad un'unica forza scatenante. Infine, anche i costi delle indagini impediscono un'efficienza di tale metodologia. Bisogna sempre valutare se i costi siano tarati rispetto all'importanza dell'opera che si sta analizzando e rispetto all'entità del danno.

#### ***4.4 Concetti avanzati nell'analisi delle lesioni***

Spesso, invece che individuare la causa, data la suddetta difficoltà nel farlo, è possibile eseguire una panoramica della situazione e ricercare semplicemente una terapia che possa curare le lesioni. Quindi si procede con la misurazione dei vettori spostamento. Questo può essere fatto con tre metodi che vengono di seguito brevemente esposti.

##### **4.4.1 Metodo dei vettori spostamento**

Consiste, fissato un sistema di riferimento locale, di caratterizzare una lesione mediante il vettore spostamento, congiungendo punti originariamente in contatto e definendo lo spostamento in termini di direzione, verso e modulo.

##### **4.4.2 Metodo della trilaterazione**

Consiste nel posizionamento di tre punti inamovibili di riferimento, che possono essere semplicemente disegnati sul muro (metodo manuale) o possono essere costituiti da elementi metallici che accolgono un estensimetro (metodo analogico). Viene successivamente ricostruito il vettore risultante utilizzando il metodo della composizione vettoriale, mediante la regola del parallelogramma o per somma algebrica dei termini

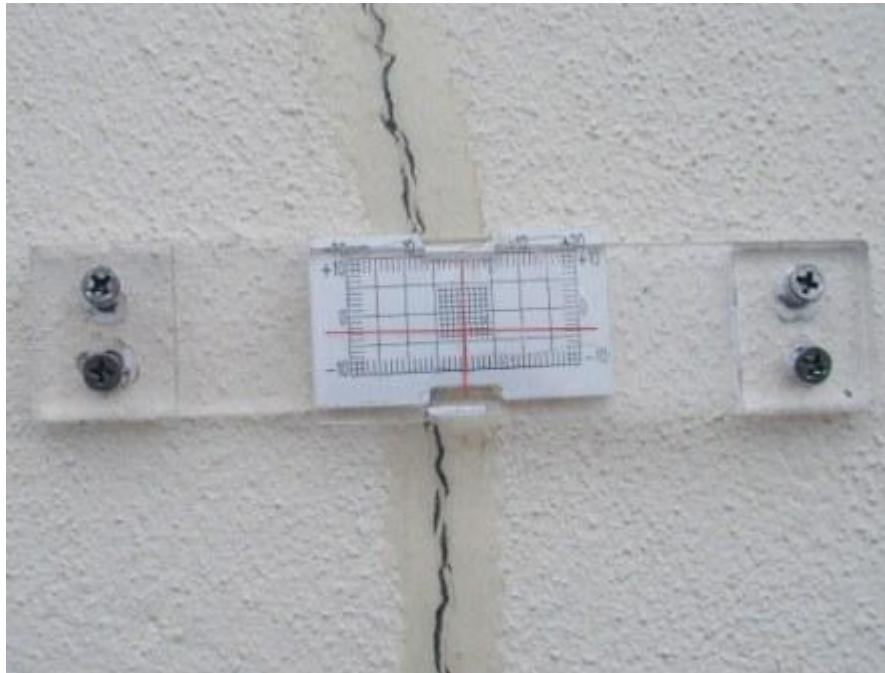
Nel caso del metodo manuale, invece si misurando i tre lati del triangolo e tramite la costruzione di archi, verificare la bontà o meno delle misure.

##### **4.4.3 Uso dei fessurimetri**

Sono costituiti da due lamine che vengono sovrapposte senza che possano interferire l'una con l'altra, essendo fissate su un solo lato e potendo muoversi solidariamente con la porzione di muro sulla quale sono posizionate. La presenza di un reticolo millimetrato permette di apprezzare una lettura dell'ordine del quarto di

millimetro degli spostamenti. si individuano in questo modo, riportando le misure su un grafico, valore, direzione e verso degli spostamenti.

Oltre a quelli utilizzabili per le pareti (Figura 4.24), esistono anche fessurimetri utilizzabili per misurare le lesioni su pavimenti, solai e pilastri.



**Figura 4.24** - Fessurimetro da parete, immagine tratta da [31]

## **4.5 Prove in situ non distruttive**

Per completezza di informazioni, di seguito verranno elencate e spiegate alcune tipologie di prove in situ non distruttive che è possibile eseguire sugli edifici per la loro caratterizzazione.

### **4.5.1 Prove soniche e ultrasoniche**

Esattamente come la sismica dei terreni, la tecnica di indagine acustica si basa sull'analisi di fenomeni oscillatori e sui principi della meccanica dei solidi. La velocità di propagazione di un'onda acustica all'interno di un solido dipende dalle proprietà di

quest'ultimo e dalla frequenza dell'onda dell'impulso. Rispetto alla sismica dei terreni però, per le indagini acustiche sugli edifici si utilizzando onde sonore con frequenza molto più elevate, gli spessori dei materiali che si analizzano sono naturalmente più piccoli e, mediamente, i valori delle velocità sono maggiori.

Il principio base del metodo ultrasuoni è la produzione di un treno di onde longitudinali mediante un trasduttore elettroacustico tenuto a contatto con la superficie della muratura sottoposta a prova. Dopo aver percorso una distanza nota all'interno della muratura, il treno d'onde è convertito in un segnale elettrico mediante l'uso di un secondo trasduttore e alcuni circuiti di temporizzazione elettronica permettono di trasformare questo segnale nella misurazione del tempo che gli impulsi hanno impiegato ad attraversare la muratura.

Esistono due tipologie di apparecchiatura elettroniche per questi scopi:

- a. oscilloscopi sui quali è visualizzato il primo arrivo in relazione a una scala di tempo idoneamente fissata (permettono di esaminare la forma dell'onda dell'impulso in condizioni complesse di prova);
- b. contatori di tempi con display digitali a lettura diretta.

I requisiti della strumentazione sono che.

- deve avere una barra a velocità nota per la taratura;
- generalmente si utilizza una bassa frequenza naturale dei trasduttori, che comunque dovrebbe stare nell'intervallo che va da 20 khz a qualche mhz.

Le prove soniche e ultrasoniche si eseguono su superfici lisce senza intonaco e lontano da eventuali ferri di armatura.

Una volta calcolati i dati, si può fare una misura della velocità e dell'attenuazione, cioè dell'amplificazione necessaria (ovvero dei dB necessari) a portare il picco al valore di riferimento. Velocità ed attenuazione servono a valutare l'omogeneità e la qualità del materiale, nonché a valutare la presenza o meno di difetti. Quest'ultima individuazione è possibile grazie all'analisi della diffrazione dell'impulso attorno alla zona difettosa. Ci

sarà una diminuzione della velocità apparente, che in realtà sarà una debole trasmissione dell'energia ondulare acustica attraverso l'aria, nonché ci sarà una lettura di un'ampiezza più bassa dell'impulso ricevuto. Dopodiché, attraverso appropriate formule, può essere calcolato lo spessore dello strato deteriorato, conoscendo la velocità di propagazione delle onde sia nel materiale sano che in quello deteriorato.

#### **4.5.2 Georadar G.P.R.**

Lo strumento per eseguire la prova in situ non distruttiva di georadar G.P.R. (*Ground Penetrating Radar*) solitamente è composto da:

1. modulo G.P.R. *High Frequency*;
2. un'antenna trasmittente e un'antenna ricevente, le cui dimensioni dipendono dalla frequenza dell'impulso;
3. un sistema di registrazione e visualizzazione in tempo reale del dato;
4. un cart con ondometro.

Sostanzialmente questa tecnica serve ad individuare le caratteristiche dimensionali di eventuali elementi metallici all'interno di una muratura, per esempio è in grado di individuare diametro e passo di una eventuale rete metallica costituente un passato intervento di rinforzo.

#### **4.5.3 Termografia**

L'ultima tecnica di diagnosi non distruttiva è la termografia, con cui, in generale, si riesce a misurare la radiazione infrarossa emessa da un corpo. Praticamente sfrutta il principio fisico secondo il quale qualunque corpo abbia una temperatura maggiore dello zero assoluto emette energia sottoforma di radiazione infrarossa.

Si riesce sostanzialmente a calcolare la temperatura di un corpo, attraverso opportuni passaggi matematici.

La radiazione infrarossa (IR) è invisibile all'occhio umano e ha una lunghezza d'onda maggiore della luce visibile e inferiore delle microonde.

La radiazione infrarossa emessa dal corpo viene rilevata da una termocamera. Diversi software in commercio elaborano i dati della termocamera sono in grado di fornire una “mappa” termica dell'oggetto, attraverso scale di colori.

Può essere utilizzata per l'individuazione di difetti negli edifici, quali infiltrazioni, dispersioni, ecc. Può essere utile per la valutazione di sistemi di coibentazione e impianti termici, può identificare difetti strutturali e, infine, controllare il funzionamento degli impianti elettrici.

## **5. Tipologie di interventi e relativi materiali utilizzabili**

Nel seguente capitolo vengono esposte le tipologie di intervento per il consolidamento e il recupero delle strutture in muratura. Non potendo analizzare tutti i tipi di interventi esistenti, ne sono stati scelti alcuni significativi quali:

- incatenamenti metallici;
- applicazioni di materiali compositi;
- tecnica del cuci-scuci;
- rifacimenti.

Per ogni tipologia di intervento sono anche indicati i materiali e le strumentazioni da utilizzare.

Per quanto riguarda gli interventi, si è fatto riferimento alla classificazione che ne fanno le NTC 2018 nel supplemento ordinario n.5 della Gazzetta Ufficiale dell'11/02/2019, che distingue gli interventi in:

- riparazioni o interventi locali;
- miglioramenti;
- adeguamenti.

In questa tesi, non trattandosi specificamente dei problemi e delle relative soluzioni riguardanti gli effetti del sisma, è stata fatta solamente l'analisi di alcuni interventi locali significativi, ricadenti quindi dentro la prima categoria.

### **5.1 Incatenamenti metallici**

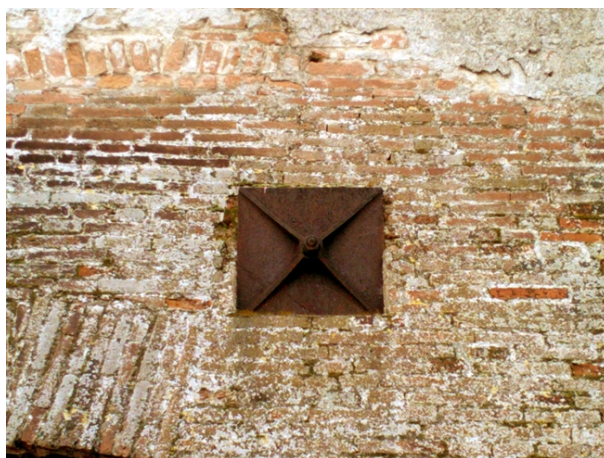
L'intervento di incatenamento metallico, tra i più antichi ed efficaci, ricade sicuramente nella categoria degli interventi locali, così come ribadito nel § C8.4.1 della

C.M. n.7/2019 «Il ripristino o rinforzo dei collegamenti esistenti tra i singoli componenti o tra parti di essi o la realizzazione di nuovi collegamenti (ad esempio tra pareti murarie, tra pareti e travi o solai, anche attraverso l'introduzione di catene/tiranti, chiodature tra elementi lignei di una copertura o di un solaio, tra component prefabbricati) ricadono in questa categoria» (interventi locali n.d.r.).

L'inserimento di incatenamenti in un edificio di seconda classe è finalizzato a far tendere il comportamento di tale edificio a quello di un edificio di terza classe (vedere § 1.3.3). L'inserimento di tiranti infatti evita l'instaurarsi di meccanismi locali di collasso (I modo), portando l'edificio verso un comportamento globale (meccanismi di II modo). Inoltre, gli incatenamenti migliorano anche il comportamento delle pareti nel proprio piano, aiutandole a trasferire meglio in fondazione le azioni orizzontali presenti nel piano della parete, grazie ad un funzionamento a mensole collegate o a telaio vero e proprio.

Le catene, in funzione della loro posa in opera, possono essere distinte in:

- **Catene semplici o tradizionali:** realizzate solitamente con un tondino e assicurate alle estremità con piastre (Figura 5.1) o con capochiave e paletto (Figura 5.2). Normalmente, a queste estremità, è presente un bullone, tramite il cui serramento è possibile pretendere la catena. Questa azione di pretensione può essere esplicata anche all'interno dell'edificio nel caso in cui siano presenti manicotti tenditori in corrispondenza di eventuali giunti.



**Figura 5.1** - Estremità di catena ancorata con piastra e bullone, immagine tratta da [32]



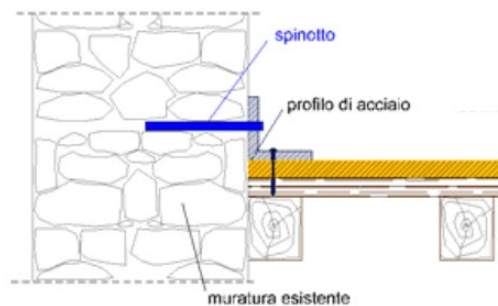


**Figura 5.2** - Estremità di catena ancorata con capochiave e paletto, immagine tratta da [33]

- **Catene aderenti alla muratura:** normalmente realizzate con profili metallici piatti, angolari o UPN, che vengono collegati alla muratura mediante perforazioni con interasse di 50/100 cm, in cui saranno inserite barre che poi saranno saldate o imbullonate al profilo. Normalmente la catena, realizzata ad esempio con profilo ad L, corre all'interno dell'edificio, all'estradosso o all'intradosso del solaio, dopodiché, all'esterno della muratura vengono fatte fuoriuscire le barre di ancoraggio, saldate al profilo e filettate solitamente all'estremità esterna per inserirvi il classico capochiave (Figura 5.3). A differenza delle catene semplici, queste ultime possono essere utilizzate anche quando non si ha l'accesso all'esterno della muratura per il fissaggio del capochiave (Figura 5.4). Come nel calcestruzzo armato, qui si ha una perfetta aderenza dell'acciaio alla muratura, con la conseguenza che, a parità di forza di trazione agente, in una catena aderente si avranno degli allungamenti minori, in quanto si attiverà prima, rispetto ad una catena semplice.



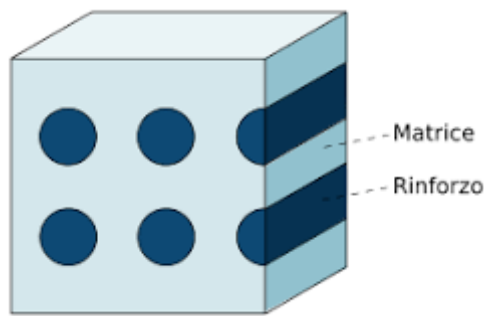
**Figura 5.3** - Sezione di catena aderente a muratura con profilo a L in corrispondenza di ancoraggio con piastra in caso di esterno accessibile, immagine tratta da [34]



**Figura 5.4** - Sezione di catena aderente a muratura con profilo a L in corrispondenza di ancoraggio in caso di esterno inaccessibile, immagine tratta da [34]

## 5.2 Applicazioni di materiali compositi

Con il termine “materiale composito” si intende un materiale progettato e prodotto come costituito da due o più fasi e che avrà proprietà e prestazioni superiori rispetto a quelle che avrebbero i costituenti se agissero indipendentemente. La fase meno rigida e meno forte delle due è continua ed è chiamata “matrice”, quella più rigida e più forte è discontinua ed è chiamata “rinforzo” (Figura 5.5). Talvolta può esistere, a causa di interazioni chimiche o altri effetti, una fase aggiuntiva, chiamata “interfase”.



**Figura 5.5** - Fasi di un materiale composito

La distribuzione del rinforzo determina le caratteristiche dell'intero sistema: meno è uniforme il rinforzo, più è eterogeneo il materiale e maggiore è la probabilità di rottura dello stesso nelle zone più fragili. La geometria e l'orientamento del rinforzo, invece, agiscono sull'anisotropia del sistema.

Ogni fase ha la sua funzione: il rinforzo, soprattutto nel caso di compositi con prestazioni medio-basse con fibre corte o particellari, dà un certo irrigidimento ma rinforza solo localmente il materiale; la matrice regge i carichi e definisce le proprietà meccaniche del materiale composito.

Nei compositi ad alte prestazioni strutturali invece le fibre, continue, costituiscono lo "scheletro" del materiale e ne determinano la rigidità e la resistenza nella direzione della fibra, mentre la fase matriciale funge da protezione, sostegno e trasferisce gli sforzi locali da una fibra all'altra.

L'interfase, infine, può servire a controllare i meccanismi di rottura, le resistenze alla frattura e soprattutto il comportamento sforzi/deformazioni del materiale.

### **5.2.1 Fibre**

Le fibre presentano una perfezione strutturale fuori dal comune, che garantisce loro:

- resistenza meccanica elevata;
- modulo elastico alto;
- peso specifico basso;
- comportamento elastico lineare.

Le fibre più importanti e maggiormente utilizzate per la realizzazione di materiali compositi possono essere di vetro, carbonio, organiche e minerali. Si trovano all'interno dei compositi o in modo continuo, disposte parallelamente in un piano, o sotto forma di fibre tagliate e disposte casualmente in un piano o ancora tessute in un piano secondo una configurazione trama-ordito.

### **5.2.2 Matrici**

Le fibre però, nonostante la loro eccellente resistenza, non avrebbero importanza se non fosse possibile dare al pezzo una forma stabile. Allo svolgimento di questa funzione provvede la matrice che, inglobando le fibre, le protegge dall'ambiente esterno e dà la forma al pezzo finale. Si possono distinguere matrici plastiche matrici metalliche e matrici ceramiche.

### **5.2.3 FRP (*Fiber Reinforced Polymers*)**

Una delle fibre di cui ci si occupa nel presente lavoro di tesi è il gruppo delle FRP (*Fiber Reinforced Polymers* o anche *Fiber Reinforced Plastic*), che è fra le più utilizzate nel rinforzo delle strutture in muratura esistenti. Questi due acronimi vengono utilizzati per definire materiali costituiti da fibre di carbonio, vetro o fibre con differenti caratteristiche fisico-chimiche, tutte impregnate in una matrice polimerica. Questi compositi sono caratterizzati da elevate prestazioni meccaniche: le resine polimeriche, infatti, permettono un'elevata distribuzione dei carichi fra le fibre ed elevate prestazioni di adesione al supporto. Hanno però come svantaggi una scarsa resistenza alle alte

temperature ed una bassa traspirabilità dei supporti. Quindi sono una soluzione che viene scelta quando l'esigenza di avere un sistema di rinforzo con elevate caratteristiche meccaniche prevale sulle eventuali problematiche relative alle alte temperature e all'umidità. Fanno parte della categoria degli FRP tutti i prodotti ottenuti per pultrusione che vengono realizzati mediante un processo di impregnazione continuo delle fibre con matrici polimeriche.

#### **5.2.4 FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*)**

Un altro tipo di materiale composito spesso utilizzato nel rinforzo delle murature storiche sono gli FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), che si distinguono dalle FRP perché, invece di avere matrici polimeriche, derivano dall'accoppiamento di fibre di vetro o carbonio con una matrice inorganica a base cementizia. Le fibre, in questo caso, sono delle reti con diversa grammatura e diverso passo, ma sempre con maglie piuttosto larghe, per consentire un perfetto inglobamento della malta.

Gli FRCM vengono spesso utilizzati al posto dei tradizionali intonaci armati con rete metallica, perché hanno dimostrato di avere numerosi vantaggi tecnici e applicativi:

- maneggevolezza e lavorabilità in cantiere;
- radiotrasparenza maggiore rispetto alla rete tradizionale;
- possibilità di applicazione di rete con matrice cementizia a base naturale e quindi ottima compatibilità con le murature esistenti.

Per questi motivi, il loro utilizzo è molto diffuso nelle ricostruzioni post-sisma.

#### **5.2.5 Planarità delle superfici**

Un'esigenza fondamentale nella posa in opera di questi materiali di rinforzo è la planarità delle superfici delle strutture da rinforzare. Questa planarità è richiesta per poter far lavorare le fibre disponendole in maniera planare e assiale rispetto alla direzione degli

sforzi, affinché possano offrire la massima resistenza possibile. In questo modo, si evitano fenomeni di rottura locale causati dall'assenza di allineamento tra le fibre o da fenomeni di riduzione della sezione resistente. Questa condizione viene rispettata solitamente tramite l'utilizzo di stucchi epossidici che permettano quindi di riportare a spessore una certa planarità delle strutture sulle quali i materiali compositi devono aderire. Se gli spessori diventano consistenti, viene a crearsi una sezione resistente con caratteristiche meccaniche molto diverse da quelle della muratura su cui aggrappano e, di conseguenza, con dinamiche di movimento molto diverse. Inoltre, si viene a creare una nuova superficie di contatto tra rinforzo e muratura, costituita da stucco e resina, che aumenta la possibilità di distacchi delle superfici all'interfaccia. È bene quindi realizzare strati di stucco di spessori non superiori a quelli indicati sulle schede tecniche e applicare tutte le resine costituenti il sistema, per fare in modo che si polimerizzino contemporaneamente e riescano quindi a creare un legame chimico primario che garantisca caratteristiche meccaniche più elevate e riduca le possibilità di rottura del sistema per delaminazione.

#### **5.2.6 Linee Guida**

Indicazioni normate a progettisti e direttori lavori sull'utilizzo di materiali fibrorinforzati con matrice polimerica negli interventi di rinforzo delle strutture esistenti sono fornite dalle *Linee Guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di Strutture di cemento armato, cemento armato precompresso e murarie mediante FRP*. Tali linee guida sono state approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel 2009 e sono successivamente diventate parte integrante prima delle NTC 2008 e poi delle NTC 2018, nello specifico ai capitoli 8.6 e 12, in riferimento ai materiali non tradizionali per l'intervento sulle strutture esistenti.

L'obiettivo di queste linee guida, in accordo con le normative vigenti in materia, è quello di fornire indicazioni e regole per la progettazione, l'esecuzione e il monitoraggio degli interventi di consolidamento strutturale che prevedano l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati.

Le Linee Guida trattano i seguenti argomenti:

- concetti di base sul rinforzo con gli FRP;
- rinforzo delle strutture in c.a. e c.a.p;
- rinforzo delle strutture in muratura;
- materiali utilizzabili.

Inoltre, sono fornite indicazioni inerenti l'adeguamento e il miglioramento sismico.

Oltre a ribadire concetti basilari sul progetto dei rinforzi, già contenuti nelle Linee Guida CNR DT200 del 2004, si definiscono delle novità importanti, come l'introduzione dell'obbligatorietà dei controlli di accettazione dei materiali. I prelievi e la preparazione dei provini, infatti, devono essere eseguiti sotto la supervisione del Direttore dei Lavori, che successivamente potrà portare i provini nei laboratori abilitati all'esecuzione delle prove sperimentali e al rilascio della certificazione relativa.

I materiali compositi che si vuole utilizzare per le applicazioni di rinforzo strutturale da eseguire devono essere:

- identificabili, per poter risalire al produttore;
- qualificati e controllati, secondo procedure definite e applicabili al processo di produzione in fabbrica;
- verificati da parte di un ente terzo;
- accettati dal direttore dei lavori, dopo che avrà verificate la documentazione per l'accettazione;
- collaudati.

Per la normazione dell'utilizzo dei compositi FRCM nella realizzazione di sistemi di rinforzo esterni di strutture esistenti in muratura, nonché in c.a. e c.a.p., sono stati invece fornite, sempre in linea con quanto previsto dalle NTC, le *Linee Guida per l'identificazione, la qualificazione ed il controllo di compositi fibrorinforzati a matrice*

*inorganica, denominati FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), impiegati per il consolidamento strutturale. L'ente normativo è sempre il Consiglio Superiore dei Lavori pubblici e l'approvazione di tali linee guida è avvenuta l'8 gennaio del 2019, con decreto del Presidente dello stesso Consiglio. La finalità di tali norme è una sempre migliore garanzia della sicurezza e della qualità delle opere strutturali ed infrastrutturali, sia pubbliche che private. Dalla prevenzione del rischio sismico alla valutazione e messa in sicurezza del patrimonio edilizio, tutti gli interventi che coinvolgano materiali compositi a base cementizia devono seguire queste linee guida.*

Anche qui il Consiglio si è espresso in merito al campo di applicazione e ai materiali applicabili, alle caratteristiche dei sistemi di rinforzo in FRCM, alla qualificazione di tali sistemi, ai controlli di accettazione in cantiere (sempre di responsabilità della DLL) e, infine, all'installazione di tali sistemi di rinforzo.

#### **5.2.7 Rinforzo di pannelli murari**

Gli interventi di rinforzo con materiali compositi sui pannelli in muratura hanno lo scopo di migliorarne la resistenza alle azioni nel piano o fuori dal piano del pannello stesso.

Sui pannelli murari rinforzati con tali materiali si possono eseguire diverse verifiche, di seguito citate:

- verifiche per azioni fuori dal piano;
- verifiche per ribaltamento semplice;
- verifiche per flessione della striscia di muratura verticale;
- verifiche per flessione della striscia orizzontale;
- verifiche per azioni nel piano;
- verifiche per pressoflessione nel piano;



- verifiche a taglio.

### **5.2.8 Rinforzo di archi e volte**

L'applicazione dei materiali compositi può essere fatta anche su elementi voltati, come ad esempio quelle a singola o a doppia curvatura.

Da un punto di vista statico, la stabilità di una volta è garantita quando la curva delle pressioni, cioè il poligono funicolare rappresentante i carichi permanenti e accidentali, passa all'interno del nocciolo centrale d'inerzia di ciascuna sezione della volta. Fino a quando l'eccentricità si mantiene limitata entro il nocciolo d'inerzia, l'arco riesce a rimanere in esercizio anche se si fessura. Se, invece, la curva delle pressioni, essendo già fuori dalle linee del nocciolo, si allontana anche dalle linee di intradosso o estradosso, e quindi dai bordi dell'arco, si ha una crisi per formazione di una cerniera. L'arco può resistere comunque fino alla formazione di tre di queste cerniere, funzionando così proprio con la configurazione di arco a tre cerniere. Invece, se le cerniere aumentano ulteriormente, la struttura diventa labile e si ha un cinematismo con conseguente collasso dell'arco. Le sollecitazioni di trazione che si vengono a creare non sono sopportabili dai conci costituenti l'arco, avendo essi una bassissima resistenza a trazione. L'utilizzo di materiali compositi è quindi finalizzato all'assorbimento di tali sollecitazioni di trazione.

L'applicazione di un rinforzo in FRP impedisce la creazione di cigli fessurativi e quindi di cerniere sulla parte opposta a quella su cui il rinforzo stesso è applicato. Quindi la presenza di un rinforzo all'intradosso (o all'estradosso) inibisce la formazione di cerniere sull'opposta porzione di estradosso (o rispettivamente intradosso). Quindi l'applicazione di FRP non è tanto idonea al contrasto di rotture a taglio o per schiacciamento, quanto invece per impedire la formazione di determinate cerniere nella volta o nell'arco.

### **5.2.9 Rinforzo di colonne in muratura**

Anche il rinforzo di colonne in muratura tramite applicazione di materiali compositi è di notevole interesse, in quanto ha lo scopo di incrementare la loro resistenza a deformazione ultima, nonché di migliorare la risposta dell'edificio in condizioni di esercizio.

Il confinamento di tali colonne in muratura può essere fatto tramite l'utilizzo di tessuti, lamine o barre di materiale composito. I tessuti vengono applicati su tutto il contorno della colonna come una fasciatura esterna continua (nel caso di ricoprimento) o discontinua (nel caso di cerchiatura), le barre, invece, vengono disposte all'interno della colonna realizzando cuciture armate.

Queste ultime contrastano le dilatazioni laterali della colonna nel caso in cui sia sottoposta ad eccessiva compressione assiale.

### **5.2.10 Ancoraggi**

Per l'ancoraggio dei laminati alla muratura, oltre che all'effetto di adesione dato dalle resine, è opportuno procedere ad un successivo ancoraggio meccanico tramite materiale composito o metallico.

A parte gli ancoraggi realizzabili tramite piastre metalliche, esistono anche degli ancoraggi costituiti da “corde” composte da fibre unidirezionali e chiamate solitamente “focchi” (Figura 5.6).



**Figura 5.6** - Fiocchi in fibra di vetro (sopra) e fibra di carbonio (sotto), immagine tratta da [35]

Solitamente l'ancoraggio di questo tipo viene eseguito a seguito della fase di polimerizzazione delle fibre, mediante un taglio che viene eseguito del tessuto e che distacca le fibre stesse riducendone parzialmente la resistenza e l'inserimento del fiocco con successiva impregnazione manuale. Per evitare il taglio delle fibre e quindi la riduzione della resistenza finale, è sufficiente prevedere la locazione del fiocco spostando le fibre in modo da creare una cavità che lo possa ospitare. In questo caso, l'impregnazione di fiocco e tessuto può avvenire in una volta sola, in modo quindi da garantire una maggiore continuità dell'interfaccia foro-fiocco, grazie alla contemporanea polimerizzazione di tessuto e trefolo. Per la realizzazione dei trefoli è sconsigliato l'utilizzo delle fibre di carbonio, a causa della loro bassa resistenza a taglio, mentre è più indicato utilizzare fibre aramidiche o di acciaio. Nel caso in cui si utilizzino fiocchi

costituiti sia da fibre di acciaio che di carbonio per l'ancoraggio di rinforzi in tessuti FRP, è bene evitare il contatto diretto tra acciaio e carbonio, ad esempio interponendovi fibre di vetro.

#### **5.2.11 Preparazione del substrato**

Il corretto funzionamento dei sistemi di rinforzo può essere inficiato dallo scorretto trasferimento dei carichi dal supporto dell'elemento da rinforzare ai materiali di rinforzo. Quindi, oltre alle verifiche sulle proprietà meccaniche della muratura costituente la struttura da rinforzare, durante la stesura del progetto di rinforzo, è bene eseguire verifiche riguardo le proprietà meccaniche del substrato. Queste proprietà assumono maggiore o minore importanza a seconda che si tratti di applicazioni per aderenza (come nel caso di rinforzo a taglio o a flessione) oppure di applicazioni per contatto (come per il confinamento passivo delle colonne o dei pilastri in muratura). Per migliorare le caratteristiche meccaniche del supporto, si può intervenire preventivamente all'applicazione dei materiali compositi, con la realizzazione di strati di imprimitura mediante l'utilizzo di appositi primer.

Il substrato può aver subito un danneggiamento dovuto ad un impatto; in tal caso è opportuno rimuovere il materiale degradato. Una volta rimossa la porzione di muratura deteriorata e dopo aver bloccato i processi che hanno portato al suo deterioramento (ad esempio presenza di umidità o di micro-vegetazione), si può procedere alla ricostruzione delle parti rimosse mediante l'utilizzo di prodotti compatibili con la muratura esistente. A questo ripristino delle parti ammalorate è opportuno accostare il livellamento di eventuali asperità superficiali al di sopra dei 10 mm. Questo passaggio può essere fatto con stucco epossidico nel caso di asperità comprese tra i 10 e i 20 mm di spessore o con malta fibrorinforzata per asperità superiori ai 20 mm. Infine, se l'elemento da rinforzare presenta fessure con ampiezza massima maggiore di 0.5 mm, è bene richiuderle con iniezioni di materiale appropriato prima di procedere con l'applicazione del rinforzo.

Nell caso in cui la muratura su cui si opera non necessiti di un rispristino ma sia scadente, è opportuno valutare l'applicazione di un consolidante su di essa, prima di stendere il primer.

È necessario aver cura di rimuovere polveri, grassi, idrocarburi o tensioattivi dalle parti degli elementi strutturali da rinforzare, assicurandosi quindi che siano ben pulite prima di procedere con il rinforzo.

Bisogna inoltre arrotondare eventuali spigoli su cui si andranno ad applicare i materiali compositi, ricreando superfici che non abbiano un raggio di curvatura inferiore ai 20 mm.

Infine, dopo aver preparato il substrato, bisogna tenere in considerazione che i rinforzi non possono essere installati su substrati che abbiano un grado di umidità superiore al 10%: la presenza di un tasso di umidità maggiore infatti potrebbe impedire la corretta penetrazione del primer nei pori e generare bolle d'aria che comprometterebbero la corretta aderenza del rinforzo al supporto. Inoltre, il sistema di rinforzo non va installato se la temperatura ambiente è troppo bassa, in quanto potrebbe essere pregiudicata la perfetta stagionatura delle resine e l'impregnazione delle fibre. È bene fare in modo che le temperature siano comprese tra i 10° e i 35°. Con “fare in modo” si intende che, se le tempistiche di cantiere non dovessero permettere l'attesa di temperature più favorevoli, bisognerebbe provvedere scaldando artificialmente le zone interessate dal rinforzo. Allo stesso modo è sconsigliato rinforzare una struttura che sia esposta ad un elevato soleggiamento. Gli intervalli precisi di temperatura accettabile sono indicati sulle relative schede tecniche di ogni materiale composito.

#### **5.2.12 Rinforzo di strutture in muratura**

Durante il progetto può insorgere la necessità di affidare alle strutture murarie caratteristiche meccaniche nuove. Il rinforzo di pannelli murari con FRP permette di aumentare notevolmente la durabilità dell'intervento, rispetto al caso in cui esso fosse stato eseguito tramite l'utilizzo tradizionale di rete elettrosaldata. Gli FRP, infatti, permettono di evitare fenomeni di ossidazione e di non dover ricorrere alla costruzione di

contro pareti in c.a. che determinerebbero notevoli incrementi di carico in fondazione e di rigidità dei pannelli, con successiva probabile rottura a taglio degli stessi.

Un altro vantaggio da non sottovalutare dell'utilizzo di FRP per il rinforzo di strutture in muratura è il fatto che la superficie di quest'ultima occupata da nuovo materiale poco traspirabile di solito è inferiore al 50% della superficie totale, il che consente una sufficiente traspirabilità delle murature. La disposizione del rinforzo dipende dalle caratteristiche della muratura che si vogliono aumentare: può essere con un'inclinazione di  $45^\circ$  nel caso in cui si voglia aumentare la resistenza a flessione e a  $90^\circ$  nel caso in cui si voglia aumentare la resistenza a taglio.

Si possono rinforzare un solo lato della muratura o entrambi. Nel secondo caso si è soliti collegare le due facce con trefoli in FRP passanti all'interno della muratura e collegati ad entrambi i rinforzi sulle due facce.

Parimenti, il rinforzo di archi e volte in muratura con FRP può essere realizzato sia in zona intradossale che estradossale, evitando la creazione di cerniere in entrambi i lati e portando la struttura in una condizione di ipostaticità in cui può al massimo variare la sua condizione di equilibrio da una condizione iperstatica ad una isostatica. Nel caso di interventi intradossali, conviene ancorare il rinforzo alla muratura tramite l'utilizzo di trefoli. Il posizionamento delle fasce di tessuto varia con la geometria della volta e quindi è diverso per una volta a botte o per una volta a crociera.

### **5.2.13 Rinforzo di strutture in legno**

Ovviamente l'utilizzo di FRP presenta molti vantaggi anche nel rinforzo di strutture portanti lignee. Infatti, una delle caratteristiche più apprezzate del legno, che fanno sì che sia stato scelto, nella storia, come materiale strutturale per gli impalcati più elevati, non viene intaccata dall'applicazione di rinforzi con FRP. Allo stesso tempo, i difetti più vistosi del legno, come ad esempio l'elevata disomogeneità meccanica dovuta alla presenza di un cospicuo numero di difetti, risultano notevolmente migliorati dalla sinergia con i materiali compositi. L'applicazione più diffusa è quella su singoli elementi inflessi come travi, putrelle o singoli elementi di sistemi più complessi, quali capriate o

telai. Il rinforzo può essere eseguito attraverso l'applicazione di lamine o fogli di varia costituzione, in modo da conseguire vantaggi in termini di resistenza, deformabilità e duttilità. Ultimi impieghi sono quelli per il rinforzo di strutture per azioni nel piano, il rinforzo delle unioni e il rinforzo di elementi prevalentemente compressi.

### **5.3 *Cuci - scuci***

La tecnica del *cuci-scuci* appartiene agli interventi volti a migliorare i collegamenti e gli ammorsamenti tra le pareti in muratura e consiste nella sostituzione di porzioni di muratura degradata con una nuova tessitura muraria costituita da elementi sani. I nuovi elementi devono avere caratteristiche il più simili possibile a quelli sostituiti, sia in termini di forma che in termini di dimensioni e caratteristiche meccaniche.

Ad esempio, questa tecnica può essere usata per riparare le connessioni in corrispondenza delle croci di muro e ricollegare le pareti tra di loro staccate. Laddove battendo con un martello si intuisca che la natura del laterizio, in termini di solidità, non sia più in grado di resistere e sopportare, per esempio, del nuovo intonaco, si procede esportando completamente il materiale degradato tramite scalpello (Figura 5.7), si pulisce dalla malta di allettamento e si sostituisce la muratura mancante con nuovi mattoni pieni (Figura 5.8). [36]

Non è però una tecnica risolutiva: ha infatti una buona utilità solo nei casi in cui la muratura sottostante alla zona di intervento sia di buona qualità, mentre invece dà scarsi risultati se adoperata per murature scadenti. In questi ultimi casi, è opportuno accompagnare questo intervento con altri, come ad esempio con incatenamenti.



**Figura 5.7** - Esempio di rimozione di mattoni degradati, immagine tratta da [37]



**Figura 5.8** - Sostituzione di mattoni degradati con mattoni sani, immagine tratta da [37]



## **5.4 Rifacimenti**

Spesso, negli edifici storici in muratura, è necessario provvedere al rifacimento di alcuni elementi strutturali in vista di un cambio di destinazione d'uso, l'inserimento di nuovi elementi strutturali o la vetustà degli elementi da rifare.

### **5.4.1 Rifacimento di solai di interpiano o di copertura con cordolo**

Ad esempio, può capitare di dover rifare i solai di interpiano o di copertura perché lignei e quindi in fase di degrado, oppure per l'inserimento di un corpo scala all'interno dell'edificio.

Affinché questi interventi di rifacimento siano classificabili come locali, è opportuno sostituire le vecchie strutture con altre con caratteristiche simili e in particolare:

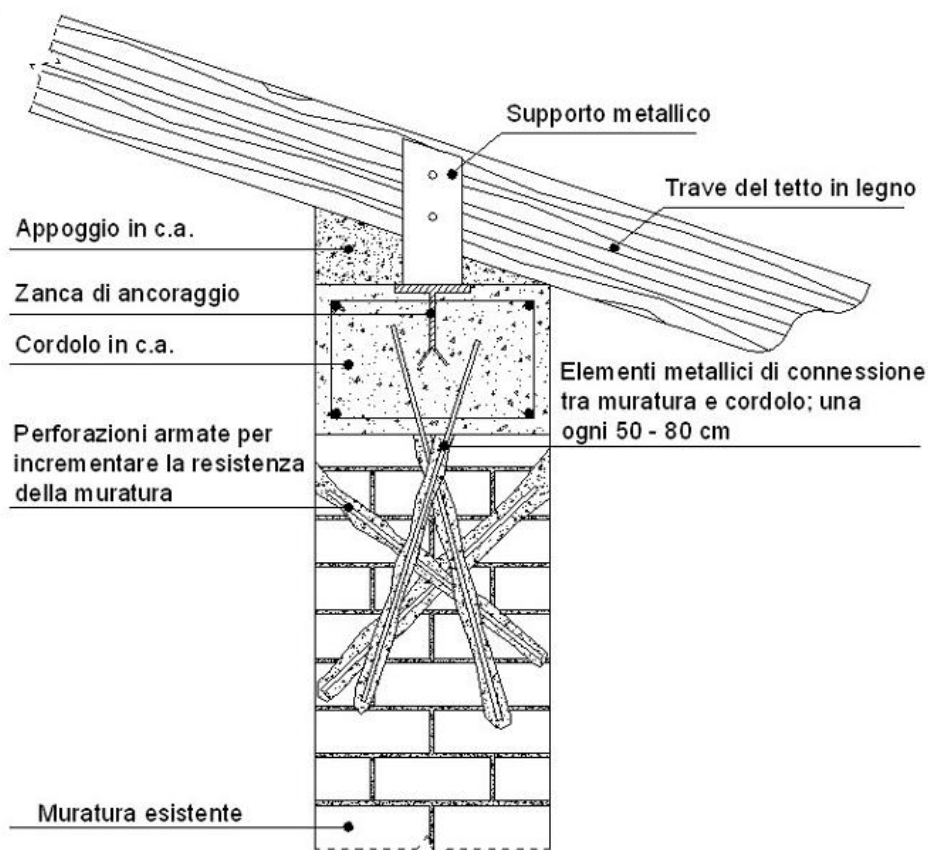
- Dev'essere mantenuta la stessa orditura del solaio precedente, al fine di mantenere la stessa distribuzione dei carichi verticali e delle masse sugli elementi verticali (le murature).
- Non bisogna variare significativamente il peso del solaio, rimanendo al di sotto di un range del 10% rispetto al peso originale (come riportato nel §8.4.3 delle NTC 2018) e, in questo caso, mantenendo la stessa destinazione d'uso, al fine di non modificare i carichi variabili.
- È opportuno evitare una variazione della rigidezza del solaio, in vista di eventuali sollecitazioni di natura sismica, curando inoltre i collegamenti tra i solai e la muratura, in modo da assicurare un comportamento dell'edificio il più scatolare possibile.
- È possibile variare l'altezza del solaio, mantenendo però la variazione all'interno della fascia di piano. Questo succede ad esempio quando si abbassa il solaio di sottotetto: mantenendo la variazione all'interno della fascia di

piano non si va ad alterare la rigidità dei maschi murari, che mantengono la propria altezza deformabile, ma solo l'altezza della zona rigida.

- Se si eseguono nuovi collegamenti tra pareti e solai, è opportuno prevedere nuovi collegamenti anche tra le pareti fra loro ortogonali per rafforzare il comportamento scatolare, ad esempio prevedendo l'inserimento di incatenamenti metallici (vedere § 5.1).

Nel rifacimento del solaio di copertura si può progettare la realizzazione di un cordolo perimetrale, che, salvo casi particolari, migliora il comportamento della struttura. La sua funzione principale è quella di collegamento tra pareti ortogonali, evitando l'instaurarsi di meccanismi di collasso locali e migliorando anche il comportamento delle pareti nel proprio piano nonché il grado di connessione tra pareti e solaio di copertura. Infine, funge da ridistributore dei carichi verticali provenienti dalle travi principali della copertura sulla muratura, prevenendo la formazione di lesioni verticali al di sotto delle stesse.

Nelle strutture esistenti i cordoli possono essere fatti in diversi modi. Il primo, più diffuso, è quello in cemento armato. Viene realizzato ponendolo sulla sommità delle murature in copertura, previa demolizione dell'ultima parte delle stesse. Può avere un'altezza che si aggira attorno ai 20 cm e deve contenere barre di acciaio ad aderenza migliorata disposte in modo da non creare concentrazioni di sforzi e facendo attenzione a sovrapporle per una congrua lunghezza in modo da trasferire correttamente gli sforzi di trazione. In alcuni casi, per incrementare la resistenza della muratura, è possibile eseguire anche delle perforazioni armate che la colleghino al cordolo, come nell'esempio riportato in Figura 5.9.

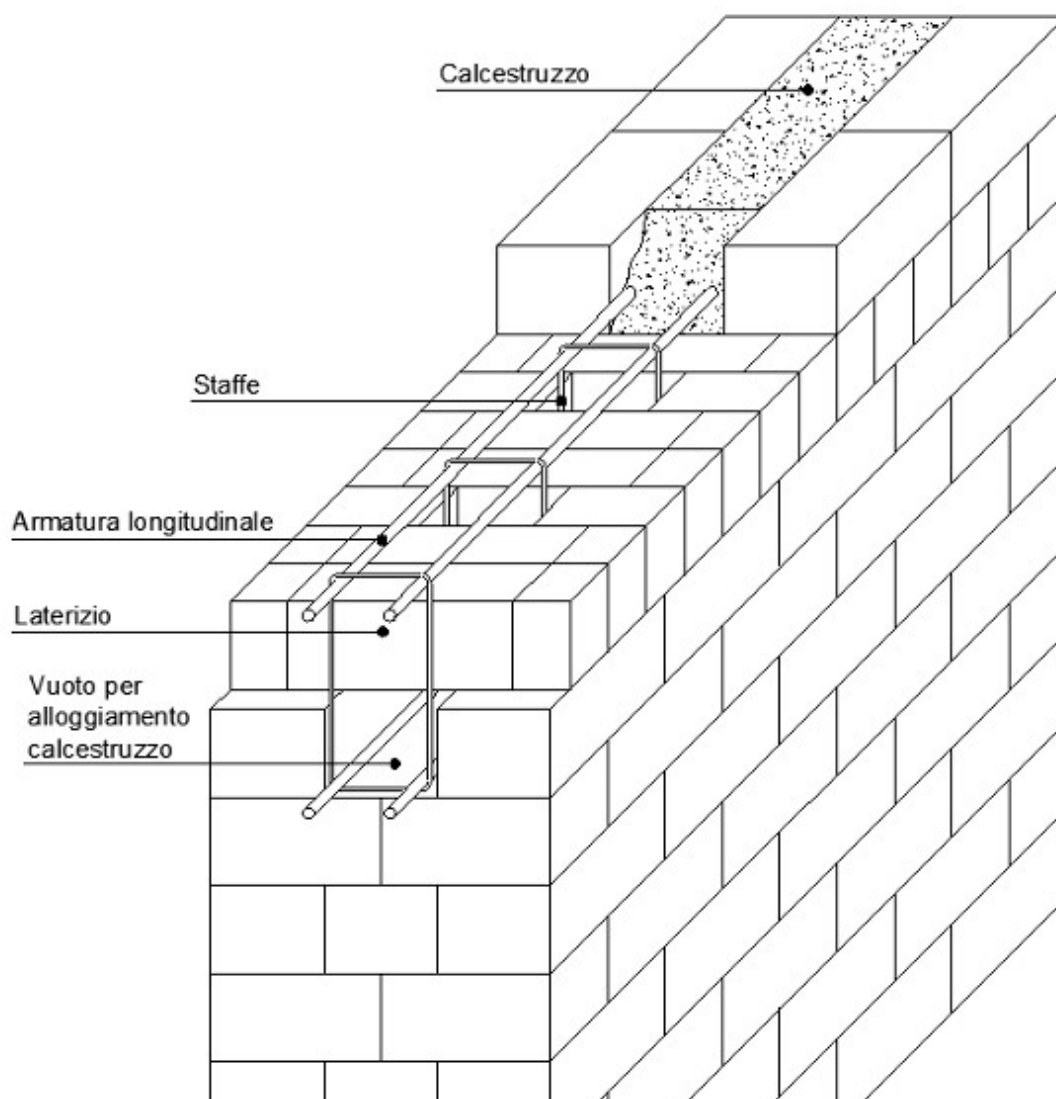


**Figura 5.9** - Cordolo in c.a., immagine tratta da [38]

Questa tecnologia è di difficile applicazione negli edifici esistenti in corrispondenza dei solai di interpiano. Siccome infatti è sconsigliato il taglio della muratura per il loro inserimento, spesso vengono realizzati accanto alla parete stessa, senza essere causa quindi di discontinuità della muratura esistente. In sommità ai muri di copertura possono essere realizzati più facilmente ma comunque comportano un incremento dei carichi non indifferente.

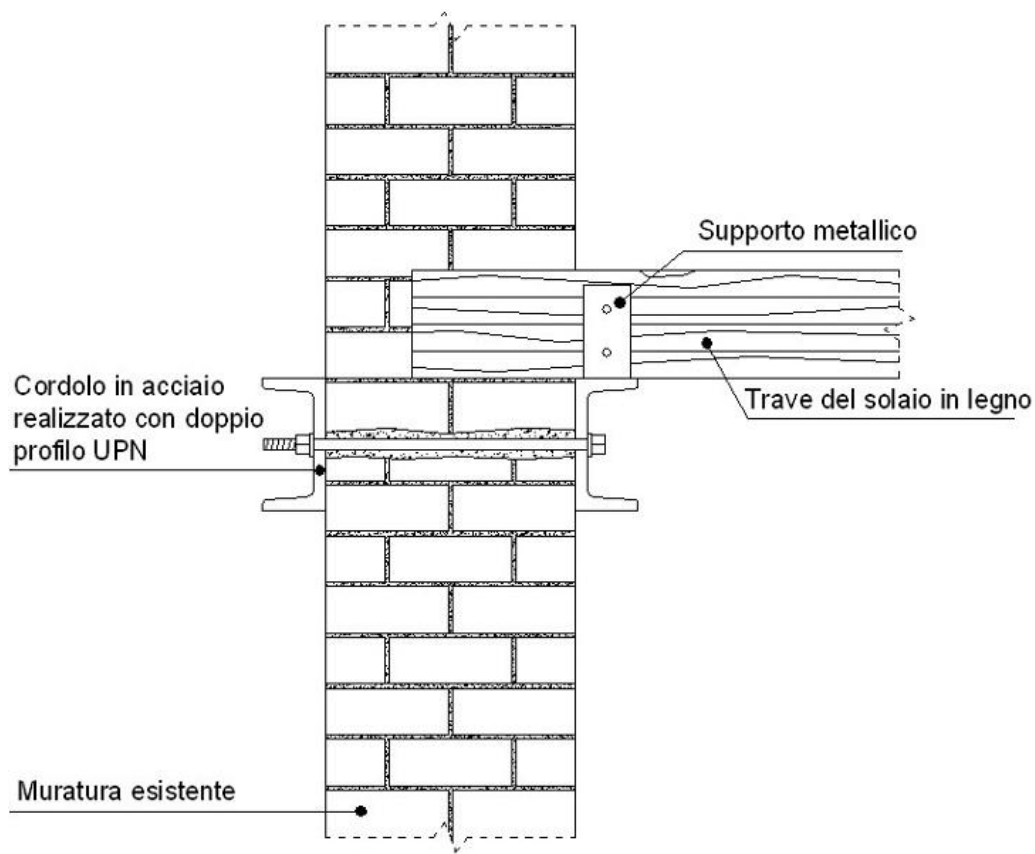
Altri modi per la realizzazione di un cordolo sono:

- in **muratura armata** (Figura 5.10): disponendo barre in acciaio ad aderenza migliorata direttamente all'interno dei muri di copertura, facendo in modo di annegarle nel cls e quindi creando una sorta di cordolo in c.a. con casseri costituiti dagli stessi mattoni o blocchi portanti;



**Figura 5.10** - Cordolo in muratura armata, immagine tratta da [38]

- in **acciaio** (Figura 5.11): impiegando profilati in acciaio con profili IPE, HEA o UPN, che possano legarsi facilmente alle murature esistenti, mediante l'inserimento di barre in acciaio ad aderenza migliorata, che annegate nel cls e imbullonate al profilo rendono cordolo e muratura solidali. Questa tecnologia non è invasiva ed è di facile realizzazione. Inoltre, non incrementa i carichi in modo significativo, quindi è impiegabile in tutti quei casi in cui si voglia intervenire evitando demolizioni sostanziali delle murature esistenti;



**Figura 5.11** - Particolare costruttivo di cordolo in acciaio collegato a muratura e solaio, immagine tratta da [38]

- in **legno**: realizzando dei collegamenti tra le strutture lignee esistenti (i puntoni per esempio) e altre nuove (dei dormienti per esempio), inserite nella parte alta della muratura, mediante connettori in acciaio, che si fan passare nella muratura stessa. Questa alternativa non è invasiva ma meno diffusa, in quanto si tratta di casi particolari e comunque di un intervento di tipo puntuale. Sicuramente, però, non implica aumento di carichi nella struttura.

In genere il posizionamento dei cordoli dev'essere ben studiato, di qualunque natura essi siano, facendo attenzione che la loro disposizione non sia isolata ma distribuita su tutto il perimetro della struttura, in modo da far collaborare efficacemente tutte le pareti, senza trascurare però vantaggi e svantaggi propri di ognuna delle tipologie possibili di cordolo.

#### **5.4.2 Rifacimento di architravi con profili metallici**

Anche il rifacimento di architravi con profili metallici (Figura 5.12 e Figura 5.13) può essere ritenuto un intervento di tipo locale ma può causare comportamenti diversi della parete a seconda di come viene curato l'ammorsamento dello stesso alle murature circostanti.

Si possono distinguere due casi principali per questo tipo di intervento:

- Nel primo caso i profili metallici sono ancorati alla muratura laterale per una lunghezza di 20/30 cm, perciò non sono in grado di resistere a nessun tipo di trazione lungo il loro asse ma l'appoggio è sufficiente a sostenere la fascia di piano sovrastante, nel caso in cui sia stata per esempio lesionata a seguito di un sisma, e ad evitare il totale sfilamento dei profili metallici dalla muratura.
- Nel secondo caso invece, l'ancoraggio è superiore (intorno agli 80/100 cm) ed è in grado di far sopportare ai profili metallici anche sforzi di trazione lungo al loro asse, trasformandoli in vera e propria muratura inferiore della fascia di piano. Ovviamente in questo secondo caso, dev'essere presente anche un'armatura superiore alla fascia di piano, costituita solitamente dalla catena dell'impalcato superiore alla copertura o dal cordolo in c.a. di copertura.

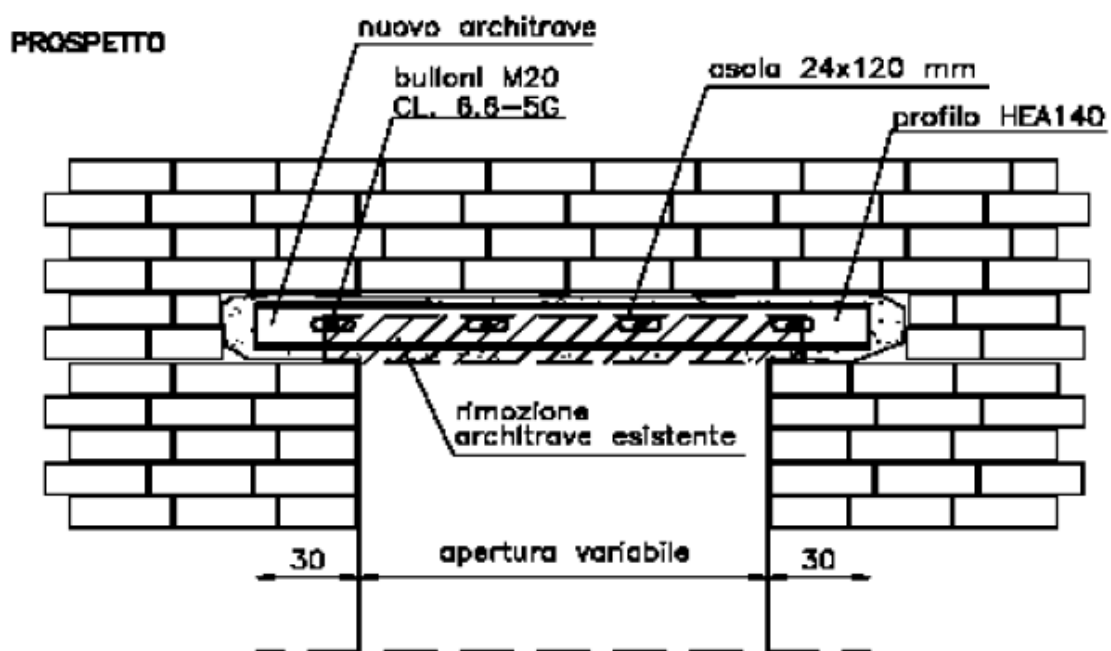


Figura 5.12 - Prospetto di architrave con profili metallici, immagine tratta da [39]



Figura 5.13 - Sezione di architrave con profili metallici, immagine tratta da [39]

Nel primo caso quindi lo schema strutturale della parete sarà quello di mensole collegate, nel secondo caso invece lo schema diventa quello di telaio vero e proprio, con forte riduzione di momento flettente alla base dei maschi murari del piano terra.



## 6. Codifica degli elaborati

Ogni scheda o tavola elaborata durante la stesura della presente tesi, è identificata tramite l'utilizzo di un codice, riportato nel cartiglio. La codifica utilizzata contiene le seguenti informazioni:

- Tipologia di elaborato:
  - scheda antologica (S);
  - tavola grafica (T);
- Unità tecnologica:
  - struttura verticale (V);
  - struttura orizzontale (O);
  - struttura curvilinea (C);
  - ...
- Materiale di supporto:
  - muratura (m);
  - legno (l);
  - ...
- Tipologia di rinforzo:
  - tessuto composito a matrice polimerica (F.R.P.);
  - lamina in carbonio (LC);
  - ...

Il tutto è seguito da una numerazione progressiva.

Di seguito, in Tabella 6.1, sono descritti i contenuti di ogni elaborato grafico, con riferimento al loro codice identificativo:

**Tabella 6.1** - Descrizioni dei codici degli elaborati

| CODICE          | DESCRIZIONE   |
|-----------------|---|
| S V M FRP<br>01 | Scheda sul rinforzo di muratura portante per azioni fuori e nel piano con F.R.P.                                  |
| T V M FRP<br>01 | Tavola sul rinforzo di muratura portante per azioni fuori e nel piano con F.R.P.                                  |
| S C M FRP<br>01 | Scheda sul rinforzo di volta a botte in muratura mediante F.R.P.  |
| T C M FRP<br>01 | Tavola sul rinforzo di volta a botte in muratura mediante F.R.P.  |
| S C M FRP<br>01 | Scheda antologica sul rinforzo di volta a botte in muratura mediante F.R.P.                                       |
| T C M FRP<br>01 | Tavola grafica sul rinforzo di volta a botte in muratura mediante F.R.P.  |
| S O L C 01      | Scheda antologica sul rinforzo a flessione di travi e travetti di solai lignei<br>mediante placcaggio in carbonio |
| T O L L C 01    | Tavola grafica sul rinforzo a flessione di travi e travetti di solai lignei mediante<br>placcaggio in carbonio    |

## 7. Procedure

Per l'esposizione delle procedure di modellazione dei modelli 3D scelti in questa tesi e l'elaborazione dei relativi video esplicativi degli interventi di recupero, si è scelta un'unica unità tecnologica, a titolo d'esempio: la **volta a botte**. Partendo da questa unità tecnologica per la sperimentazione delle procedure di modellazione e di elaborazione video, le stesse si sono applicate per la produzione degli elaborati delle altre unità tecnologiche. Quindi i problemi più rilevanti riscontrati e descritti di seguito, sono stati risolti durante la modellazione della volta e l'elaborazione del suo video. Ovviamente, però, l'applicazione di tale metodo alle altre unità ha portato comunque ulteriori problemi, risolti senza grosse difficoltà perché di minore entità.

### 7.1 Modellazione 3D

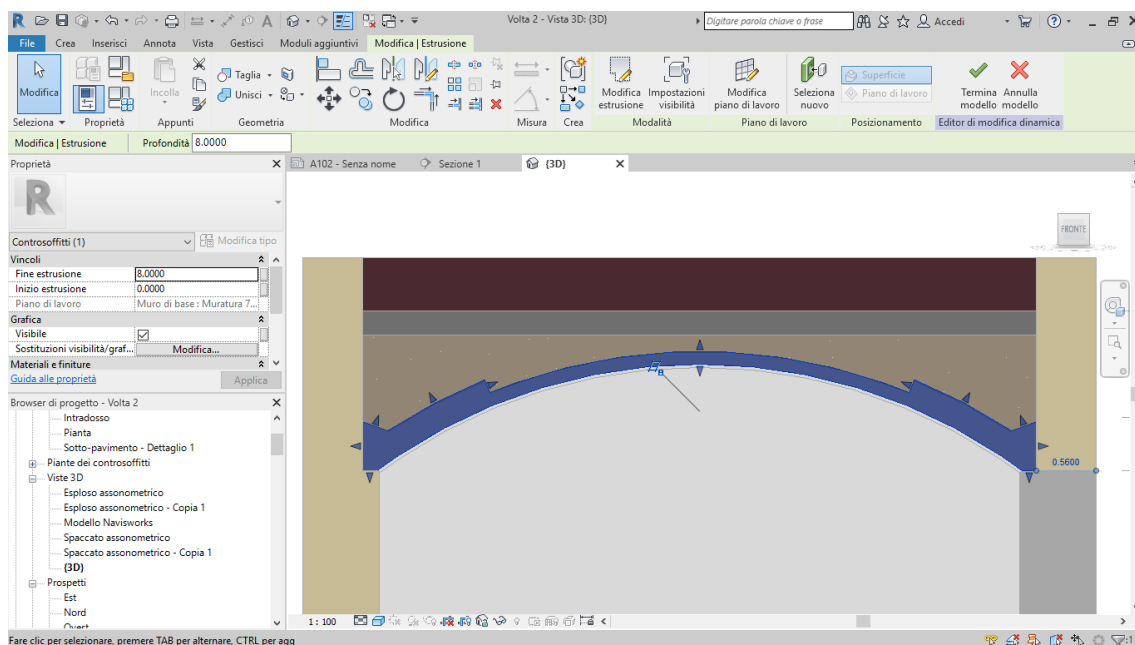
Per l'elaborazione del modello 3D dei nodi strutturali/unità tecnologiche, si è partiti dall'utilizzo del software Autodesk Revit. La scelta di questo software è stata ispirata dalle maggiori funzionalità che un software di modellazione pluriparametrica può offrire rispetto a quelle di un comune software di disegno computerizzato quale AutoCAD. Per capire nel dettaglio le motivazioni che hanno portato all'utilizzo di questo software piuttosto che altri per la modellazione 3D, vedere § 8.1.

Di seguito sono descritte le fasi di modellazione e le problematiche riscontrate, nonché le modalità di soluzione individuate.

La prima unità tecnologica analizzata, come già detto, è stata la volta in muratura. È stata modellata una volta esemplificativa e quindi standard su un nuovo modello Revit. Per le dimensioni, le stratigrafie e le proporzioni si è fatto riferimento a [16] e a manualistica storica, utilizzata dal 1750 al 1950 dai progettisti di edifici e non solo [40] [8].

Mentre i muri perimetrali della volta sono stati creati utilizzando semplicemente il comando “muro” di Autodesk Revit e andando a modificare la struttura scegliendo la stratigrafia appropriata ritrovata sui manuali di riferimento, per quanto riguarda la volta stessa, essa è stata modellata quale estrusione del suo profilo. Non è stato possibile, non essendo famiglia o componente, assegnare ad essa la composizione stratigrafica richiesta, quindi, per l'apposizione dell'intonaco all'intradosso della volta, è stata modellata un'ulteriore estrusione ad hoc, assegnandole il materiale “intonaco”. Dopodiché, sempre tramite il comando estrusione, è stato modellato il rinfiango. Il materiale corretto da assegnare a quest'ultimo non è stato trovato e quindi si è scelto il materiale che avesse la resa grafica più simile possibile, ovvero la “sabbia”. Infine, è stata modellata la pavimentazione e, in quanto non oggetto di studio della presente tesi, è stata modellata come pavimentazione standard, composta di due strati, sempre su esempio delle indicazioni presenti nella manualistica storica.

In Figura 7.1 è riportata una schermata del modello Revit della volta a botte vista in sezione, in modalità “ombreggiato”. Da questa schermata si può notare come la volta sia stata creata come un'estrusione, come l'intonaco sia stato creato come un'ulteriore estrusione a parte, come il rinterro abbia la sembianza di uno strato sabbioso e infine come il pavimento non sia stato particolareggiato nella sua stratigrafia.

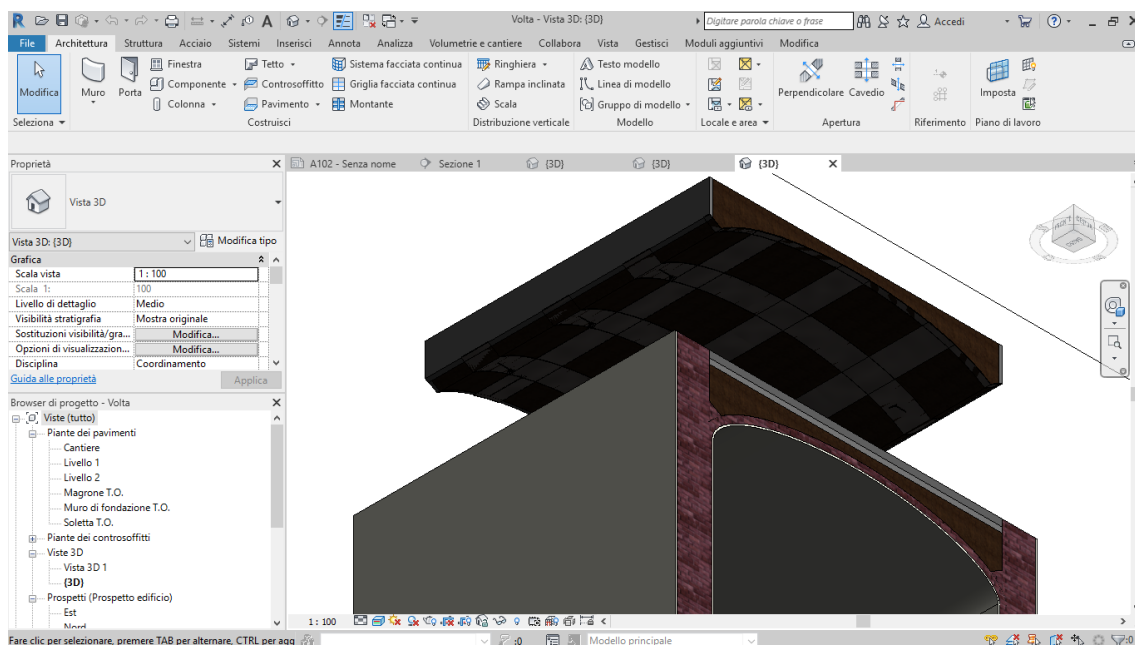


**Figura 7.1** – Vista in sezione della volta a botte in modalità “ombreggiato” (Autodesk Revit)

Nonostante la presente tesi si riproponga di studiare le tecnologie di rinforzo e consolidamento strutturale di un edificio storico in muratura, non è stato ritenuto necessario riprodurre e modellare i segni di eventuali danneggiamenti. Quindi gli elaborati della presente tesi che riportano o riproducono unità tecnologiche indicate come lo stato di fatto, implicano la possibile presenza o meno di fessurazioni o altri segni di danneggiamento strutturale. Ad esempio, in Figura 7.1 è riportato esattamente lo stato di fatto della volta a botte e come è visibile non si notano fessurazioni o lacune, ma queste sono implicitamente sottintese.

Modellata la volta e assegnati i materiali a tutti i suoi componenti, si è quindi ottenuto lo stato di fatto dell'unità tecnologica. Si è perciò proceduto alla modellazione degli elementi di rinforzo utili all'intervento di ripristino, facendo riferimento a [15].

A seguito di questa prima elaborazione grafica, la rappresentazione del video è risultata non soddisfacente, a causa di scarsa resa grafica. Si è reso quindi necessario attuare la modellazione degli elementi sospesi sulla volta (come è visibile in Figura 7.2). Tali operazioni saranno meglio descritte nel § 7.2.



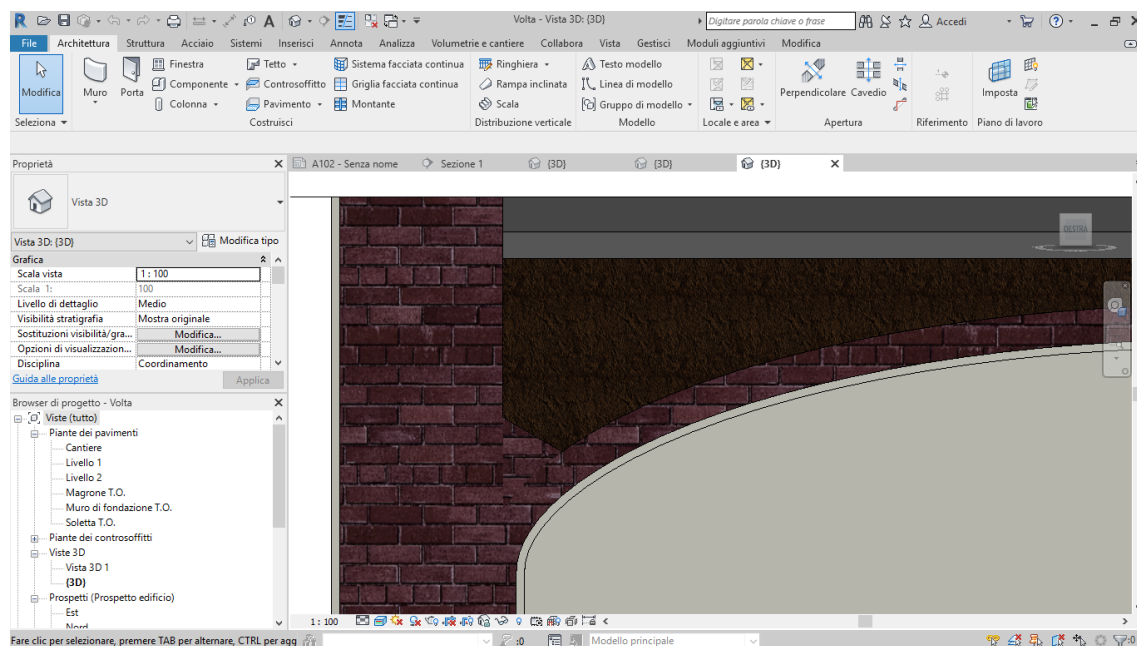
**Figura 7.2 – Modellazione sospesa degli elementi di rinforzo della volta (Autodesk Revit)**

Da notare il fatto che, il rinfiamento inizialmente modellato per lo stato di fatto non si è potuto riutilizzare a seguito dell'apposizione degli elementi di rinforzo. È stato quindi necessario modellare un nuovo rinfiamento, tramite un'estrusione che tenesse conto anche della presenza di nuovi elementi all'estradosso della volta.

Per quanto riguarda la scala grafica, si è deciso di riprodurre gli oggetti in scala reale 1:1, disegnando in millimetri. Questa scelta ha poi incontrato qualche ostacolo nella comprensione e visibilità grafica degli elaborati multimediali. Anche questo punto verrà meglio sviluppato nel § 7.2.

Dal punto di vista puramente grafico, si sono riscontrati problemi e ostacoli nella resa realistica della texture dei materiali. Premettendo che, per l'assenza di alcuni materiali all'interno delle librerie del software Autodesk Revit, la loro texture poteva essere ricreata soltanto a partire da fotografie correttamente fotoraddrizzate, il risultato che non si è riuscito ad ottenere è stato più specifico. Sebbene andasse bene nelle porzioni di pareti verticali sezionate, la resa della texture risultava insoddisfacente nell'intradosso della volta, nel suo estradosso e in sezione. Infatti, ad esempio, la volta sezionata non riportava una texture in cui i mattoni fossero posizionati a regola d'arte seguendo

l'andamento della volta e quindi posizionati di taglio, bensì erano posizionati orizzontalmente di piatto e sfalsati come in una qualunque tessitura muraria di una parete. Per comprendere meglio vedere Figura 7.3.

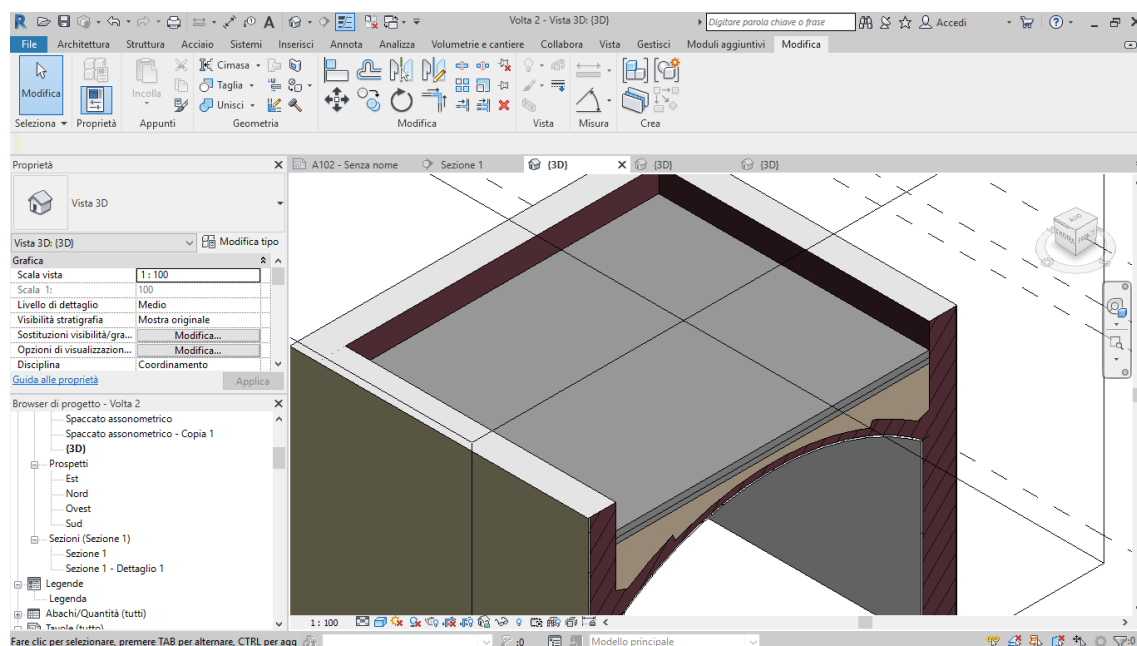


**Figura 7.3** – Irrealismo della texture del materiale muratura in modalità “realistico” (Autodesk Revit)

In realtà, questo problema di espressività grafica sarebbe stato di possibile risoluzione non andando a ricreare una texture personalizzata ad hoc, ma modellando la volta non più come un'unica estrusione, bensì come tante piccole estrusioni, tante piccole strisce, ognuna corrispondente ad una fila di mattoni, che quindi sezionate restituissero un risultato grafico soddisfacente. Tale approccio è stato ritenuto eccessivo per l'obiettivo della tesi in quanto avrebbe richiesto troppe ore di lavoro che si sarebbero potute impiegare per il perfezionamento e il raggiungimento di ben altri obiettivi, maggiormente pragmatici.

Per risolvere definitivamente il problema grafico, riscontrato specialmente nelle parti sezionate dell'elemento, si è deciso di visualizzare il modello non più in modalità “realistico” ma in modalità “ombreggiato”, modalità in cui ogni componente è riprodotta

con colori uniformi e il più possibile evocanti la reale resa grafica del materiale. Quindi gli elementi in proiezione appaiono di un colore omogeneo, che richiama il reale colore del materiale che li compone, e, in base alla loro posizione rispetto alla posizione della fonte di luce, ombreggiati o meno, come visibile in Figura 7.4.



**Figura 7.4** – Vista 3D del modello in modalità “ombreggiato” (Autodesk Revit)

A seguito della scelta di non riprodurre il video come un’animazione dove ogni singolo elemento si muove per arrivare alla sua posizione finale, ma di utilizzare appieno le funzionalità del software ricorrendo al comando “Timeliner” (che verrà di seguito descritto), si è rimodellata la volta. Mentre prima era stata modellata con pavimento e rinfianco finali al di sopra di essa in attesa di essere calati una volta completato il rinforzo, la scelta è stata quella di modellare il pavimento e il rinfianco originali direttamente sovrapposti agli elementi finali. Inoltre, si è approfittato della possibilità di rimodellare da zero l’unità tecnologica per eseguire qualche correzione; per esempio, come visibile nelle figure di questo paragrafo, il profilo della volta è stato scanalato andando a raddoppiare il suo spessore in corrispondenza degli appoggi alla muratura e il colore del materiale componente il rinfianco è stato reso meno pesante.



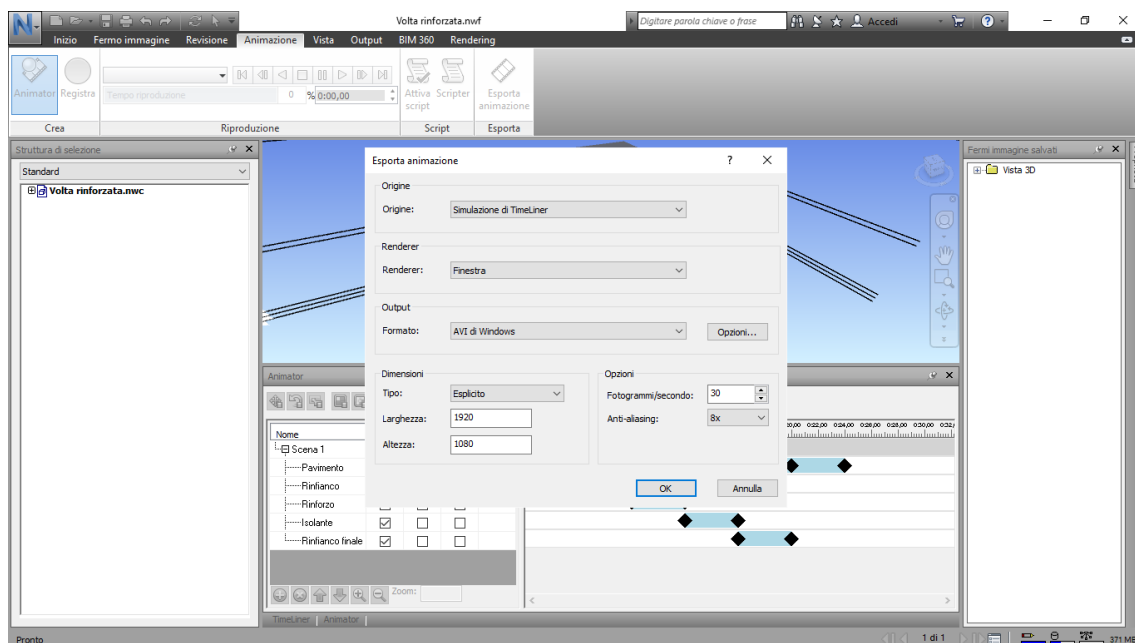
## **7.2 Elaborazione video**

Una volta elaborato il modello dell'unità tecnologica, si è passati all'elaborazione di materiale multimediale che rendesse l'operazione di rinforzo dell'elemento di facile e immediata comprensione, anche per i “non addetti ai lavori” o non esperti del settore. Nello specifico si è quindi passati allo sviluppo di video che mostrassero appunto nel dettaglio tutti i passaggi componenti l'intervento di ripristino dei manufatti.

Per l'elaborazione di tale video sono stati sperimentati diversi strumenti, primo dei quali Navisworks. Tale software è utilizzato per l'elaborazione di video che riproducono tutte le fasi di cantiere per la realizzazione di un'opera a partire da un cronoprogramma che può essere sviluppato direttamente su Navisworks, oppure elaborato con l'ausilio di un programma esterno e successivamente importato.

Una delle tante comodità dell'utilizzo di Navisworks per il raggiungimento dell'obiettivo prefissato è che il passaggio da Revit a Navisworks è praticamente immediato. Infatti, è sufficiente l'esportazione del modello, non in formato .rvt, come di default, bensì in formato .nwc.

Una volta importato il modello, si è quindi provato ad elaborare il video come animazione, tramite il comando “Animator”. Tale comando permette di registrare spostamenti, rotazioni e movimenti simili e infine, una volta pronta l'animazione, di esportare il tutto come file .avi e quindi di poterlo visualizzare come un qualsiasi video. È inoltre possibile regolare, non solo il numero di fotogrammi che si vogliono visualizzare al secondo, ma anche la risoluzione grafica che si vuole ottenere. Ovviamente in base alla scelta di tali parametri sarà anche diverso, in termini di byte, la dimensione del file video. In Figura 7.5 è riportata la finestra di comunicazione per l'impostazione di tali parametri prima dell'esportazione dell'animazione.



**Figura 7.5** - Finestra d'impostazione dei parametri per l'esportazione di un'animazione (Navisworks)

Nel caso della volta in muratura, a seguito di un primo test di elaborazione video eseguito partendo da un modello in cui era modellata la volta solo nelle sue parti fondamentali in stato di fatto, si è rimodellata diversamente la volta in modo da agevolare la resa grafica del video, nonché la sua stessa dinamica.

Inizialmente si era deciso di utilizzare il comando “spostamento” per l'elaborazione video. È stata quindi registrata una sequenza in cui le componenti della volta da rimuovere sono state spostate verso l'alto fino a sparire dall'inquadratura. Di conseguenza le componenti di rinforzo vengono calate dall'alto insieme al nuovo rinfianco e alla nuova pavimentazione. Quindi è stata rimodellata la volta per venire incontro a questa esigenza. Come già accennato nel capitolo “Modellazione 3D”, gli elementi di rinforzo, insieme a rinfianco e pavimentazione finali, sono stati quindi modellati posizionandoli ad una sufficiente altezza al di sopra della volta in stato di fatto. Una volta importato il modello su Navisworks, si è potuto procedere quindi agli spostamenti di cui sopra e alla loro registrazione. Il video così elaborato è stato esportato in diversi gradi di risoluzione grafica per verificare le diverse rese e dimensioni. Tale video è visionabile tramite la lettura del QRcode in Figura 7.6, video nel quale non sono

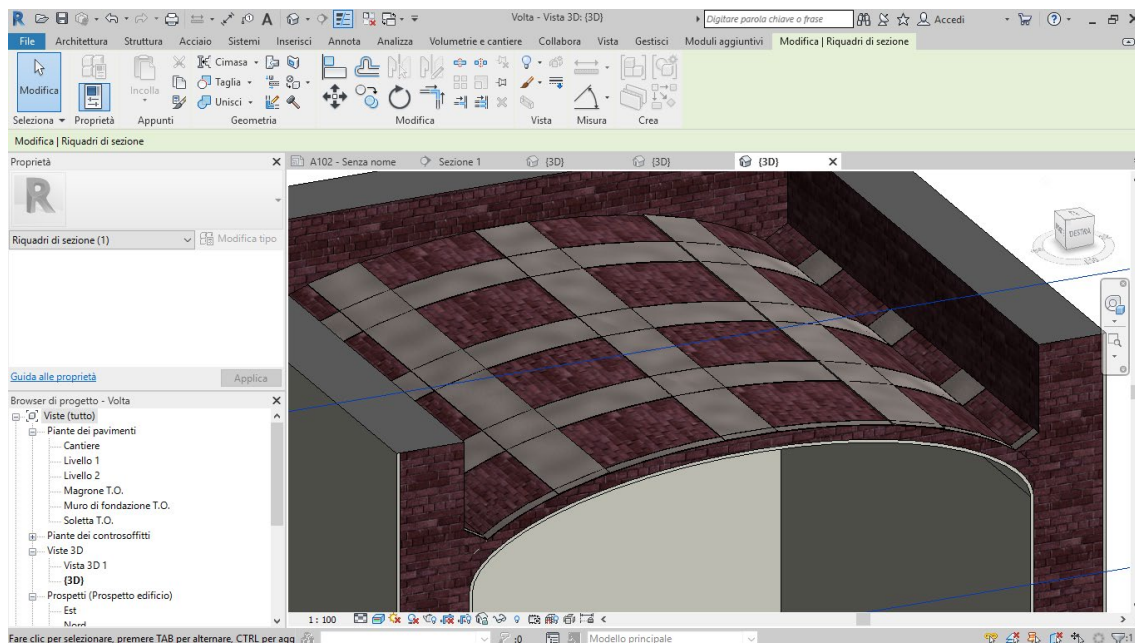
stati modellati tutti gli strati facenti parte del rinforzo ma solo uno strato rappresentativo l'intero sistema, con l'aspetto materico della fibra di carbonio.



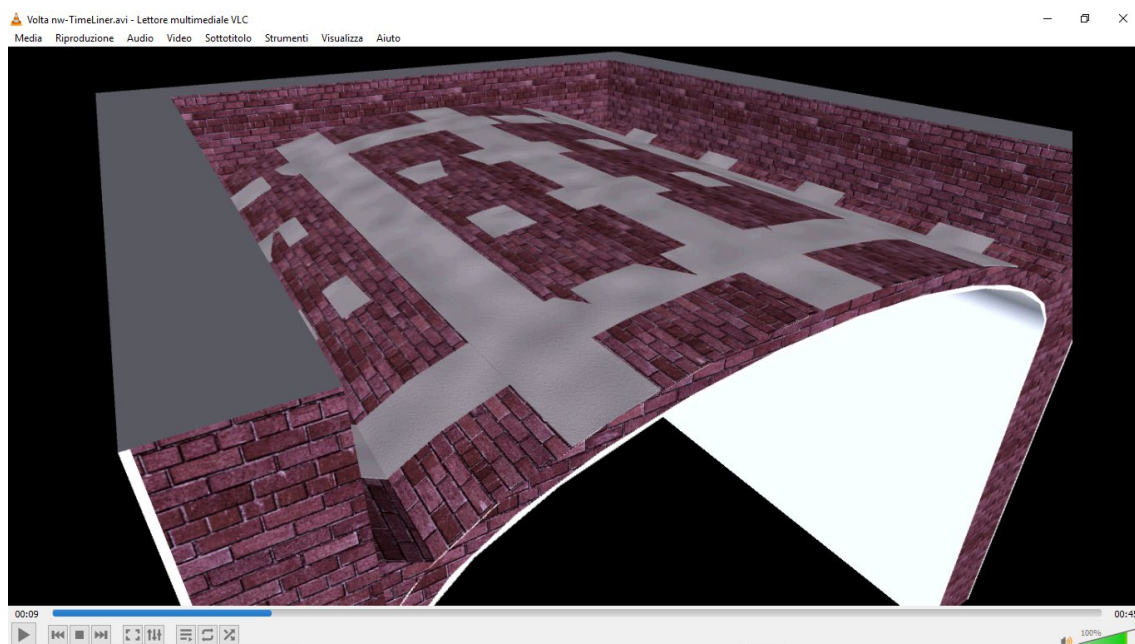
**Figura 7.6** – QRcode del video elaborato col comando Animator

Il video così ottenuto aveva non pochi problemi e aspetti sicuramente migliorabili. Per prima cosa, molti strati componenti la stratigrafia dell'intervento di ripristino sull'estradosso della volta risultavano apporsi su di esso in modo monolitico e come se fossero quindi degli oggetti prefabbricati precedentemente e successivamente posati in opera, cosa assolutamente non vera per elementi quali malte, resine e primer. Quindi un primo miglioramento sarebbe stato quello di cercare di riprodurre la stesura degli strati in modo più simile alla realtà, per rendere più comprensibile e immediato il video.

Un ulteriore problema era rappresentato dal fatto che, qualora si fosse riusciti ad ottenere una migliore resa della posa dei componenti, la loro risoluzione grafica in quanto a texture sarebbe risultata in alcuni casi ancora troppo irrealistica. In ultima istanza, si sono riscontrati problemi di interferenza dimensionale e di posizione degli elementi. Sebbene su Revit alcuni strati risultassero ad esempio ben sovrapposti alla volta (Figura 7.7), dopo aver importato il modello in formato .nwc, alcuni di essi risultavano parzialmente intersecati con la volta stessa (Figura 7.8). Si è tentato di risolvere quest'ultimo problema andando a modificare le posizioni finali degli elementi, non più quindi esattamente uguali a quelle che essi avevano sul modello in formato .rvt.



**Figura 7.7 – Sovrapposizione degli strati senza interferenze (Autodesk Revit)**



**Figura 7.8 - Sovrapposizione degli strati con interferenze (Navisworks)**

Per quanto riguarda il problema della resa grafica invece, si è deciso di provare a ricorrere all'utilizzo di programmi alternativi a Navisworks, quali ad esempio SketchUp. I problemi riscontrati però con l'utilizzo di SketchUp non sono stati pochi, sin dall'inizio.

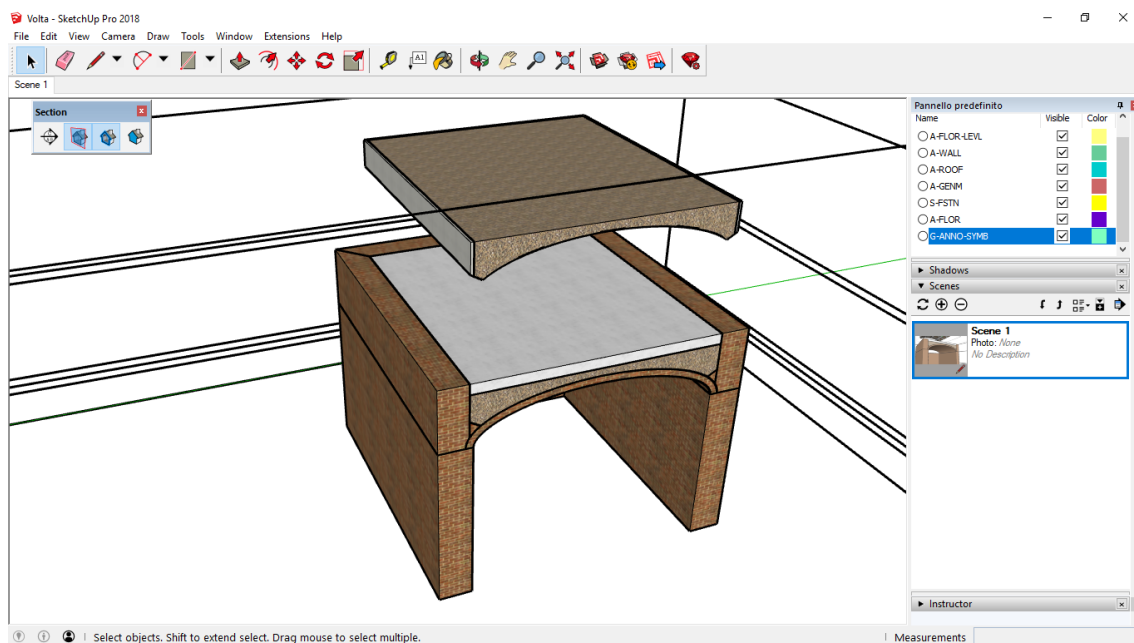
Si è deciso di ricorrere a SketchUp perché con Navisworks non si era riusciti ad ottenere la comparsa graduale dei componenti, ma solo il loro spostamenti nello spazio. Con Navisworks ad esempio si era tentato anche di far apparire gli strati fluidi, quali le resine e i primer, non dall'alto ma dall'interno dello strato della volta, in modo da evitare per lo meno la loro apposizione quali elementi monolitici prefabbricati dall'alto, completamente surreale. Il risultato di questa prova è esaminabile tramite la lettura del QRcode in Figura 7.9 e la successiva visione del video ad esso correlato.



**Figura 7.9** - QRcode del video con l'apparizione degli strati fluidi dal basso

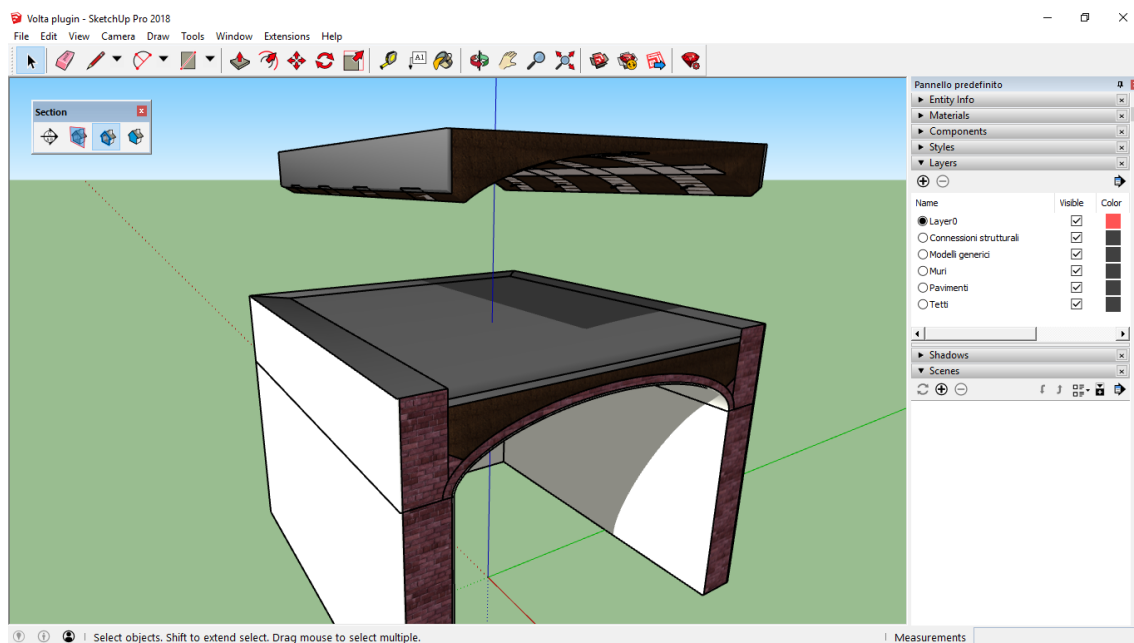
Il primo intoppo incontrato con l'utilizzo di SketchUp è stato l'importazione del modello .rvt. Importando il modello elaborato con Revit in formato .dwg, si andavano a perdere una serie di informazioni importanti, quali ad esempio i materiali, quindi il modello su SketchUp risultava praticamente una massa modellata ma bianca e priva di informazioni.

Allora si è provato ad esportare il modello in formato .fbx. Ma anche in questo formato erano molte le informazioni perse durante la trasformazione. Ad entrambi questi ostacoli si poteva rimediare in modo non automatico e quindi con grosso dispendio di tempo, riassegnando ad ogni elemento importato e riconosciuto in SketchUp di nuovo i relativi materiali. In questo modo il lato positivo era che la resa grafica era diversa rispetto a quella di Revit e Navisworks e in alcuni casi addirittura migliore. Ma in alcuni casi non si ritrovavano i materiali appropriati e quindi quest'ultima soluzione si è abbandonata. Inoltre, si erano perse tutte le stratigrafie dei singoli elementi e, come è visibile in Figura 7.10, ad esempio le pareti avevano perso l'intonaco.



**Figura 7.10** – Perdita delle stratigrafie (SketchUp)

Infine, tramite l'utilizzo di un apposito plugin di Revit, "Rvt2skt" si è riuscito ad importare su SketchUp il modello Revit con sufficienti informazioni e soprattutto con i materiali già assegnati ad ogni elemento (Figura 7.11). D'altro canto, però, le textures dei materiali così visibili su SketchUp non erano altro che le stesse di Revit; non venivano sostituite automaticamente con le complementari di SketchUp. In questo modo quindi, il possibile valore aggiunto di SketchUp dal punto di vista della resa grafica delle textures andava a perdersi.



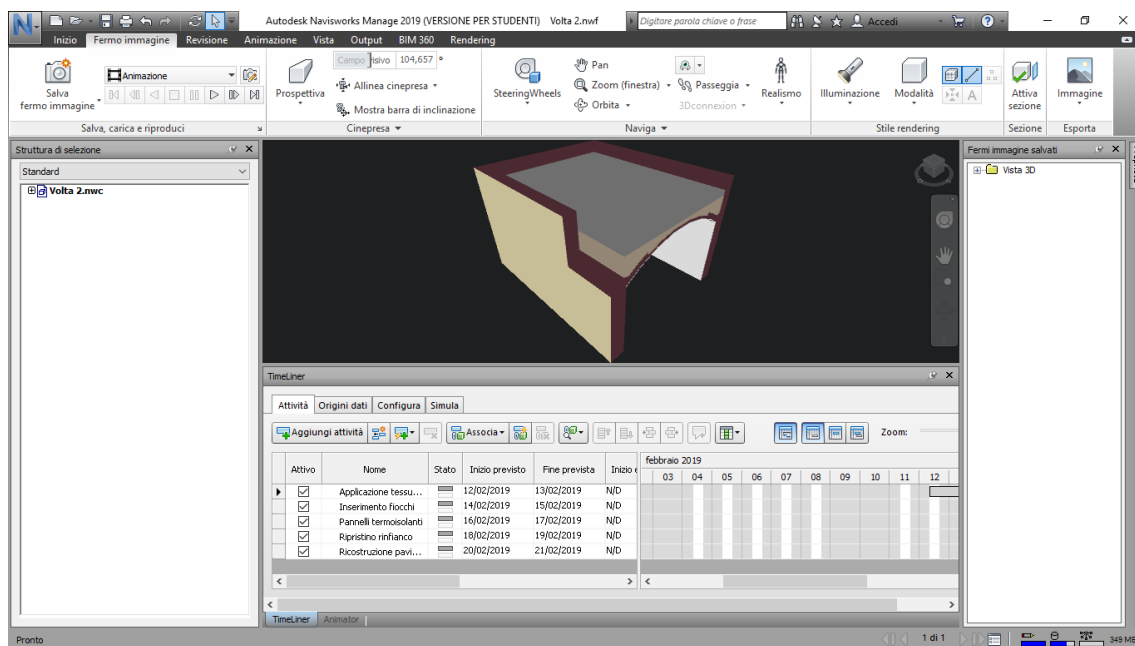
**Figura 7.11** – Conservazione delle stratigrafie (SketchUp)

Il lato positivo di aver importato il modello .rvt su SketchUp, avendo bypassato la fase di riassegnazione di tutti i materiali, era la possibilità di elaborare un video, tramite le apposite funzionalità di questo programma, in modo più realistico. Tramite l'utilizzo delle sezioni infatti era possibile simulare la messa in opera degli elementi in modo più realistico ed era anche possibile gestire ulteriormente, direttamente su SketchUp, la loro dimensione finale e la vista finale sull'intera unità tecnologica, andando eventualmente a sezionarla in toto per mostrare, a video terminato, la stratigrafia in una visione d'insieme.

Prima di procedere con eventuali sperimentazioni in questa direzione, si è deciso di effettuare ancora qualche tentativo con il programma Navisworks, considerando anche la miglior interoperabilità con Revit, che con SketchUp si sarebbe persa e quindi anche per rimanere maggiormente coerenti con la filosofia della procedura BIM.

Si è provato, quindi, a sfruttare una delle fondamentali funzionalità di Navisworks, ovvero l'elaborazione di un video tramite la funzione "Timeliner" (Figura 7.12). Per far ciò, si è costruito un cronoprogramma direttamente su Navisworks, creando delle attività sproporzionate in termini di tempistica, in modo da avere un video che, alla fine, risultasse non tanto realistico temporalmente, quanto di immediata comprensione. Ogni

demolizione o costruzione di singolo componente è stata associata ad una singola attività alla quale è stata assegnata sempre una durata giornaliera, in modo che nel video ogni attività avesse la stessa durata in secondi.



**Figura 7.12** – Interfaccia della funzione Timeliner (Navisworks)

Il grosso limite riscontrato alla fine di questa sperimentazione è stato che, sebbene l’elaborazione del video fosse più immediata e fossero sfruttate appieno le funzionalità del programma e della teoria BIM, il risultato grafico non era ancora soddisfacente. Infatti, uno dei problemi riscontrati precedentemente era quello della posa in opera graduale e più realistica possibile degli elementi, e questo obiettivo non risultava ancora raggiunto. Gli elementi, infatti, nel video elaborato tramite il comando “Timeliner”, nell’istante subito dopo la loro demolizione appaiono come delle ombre rosse e l’istante subito prima della loro costruzione come delle ombre verdi, per poi apparire istantaneamente. Sebbene si possano modificare i colori e l’intensità materica delle ombre, non è però possibile giocare su nessun parametro per far sì che gli elementi appaiano o scompaiano gradualmente come si desiderava.



Alla fine, si sono accettati questi limiti e si è deciso di utilizzare la funzione “Timeliner” per l’elaborazione dei video. Si è cercato di modificare i colori e le loro saturazioni, nonché assegnare un’animazione alla simulazione di “Timeliner”, che permettesse un avvicinamento della cinepresa ad alcuni punti del modello durante la riproduzione, per concentrare l’attenzione su alcuni passaggi ed elementi.



## 8. Matrici di confronto

Nel seguente capitolo, viene esplicitato il processo che ha portato all'elaborazione delle matrici di confronto. Infatti, le matrici di confronto costruite nella seguente tesi sono 3: una riguarda il confronto fra i possibili software utilizzabili per la modellazione 3D delle unità tecnologiche, una riguarda il confronto fra i software utilizzabili per l'elaborazione dei video dimostrativi degli interventi e l'ultima riguarda il confronto fra i programmi o le espansioni utilizzati per l'esportazione dei file.

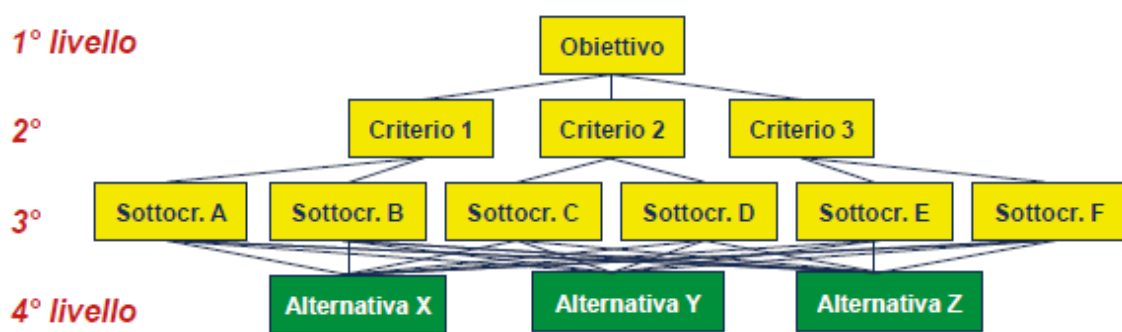
In tutti e tre i casi, per l'elaborazione della matrice di confronto viene eseguita un'analisi multicriteri, nello specifico, viene utilizzata la tecnica dell'Analytic Hierarchy Process (AHP), facendo riferimento a [41] e [42].

Tale tecnica è stata proposta e sviluppata da Thomas Saaty negli anni '70. Appartiene alla famiglia dei metodi compensativi ed è caratterizzata dalle seguenti proprietà: il decisore ha un comportamento razionale e una capacità di discriminazione infinita; il sistema delle preferenze è di tipo transitivo; alla fine si arriva ad un ordinamento completo delle alternative.

L'Analytic Hierarchy Process si basa su tre principi fondamentali:

1. la scomposizione gerarchica del problema;
2. il metodo dei giudizi comparati;
3. la sintesi delle priorità.

Per quanto riguarda la scomposizione gerarchica del problema, si procede individuando il contesto di riferimento, definendo gli attori, i loro obiettivi e infine definendo i criteri che influenzano il problema.



**Figura 8.1** - Scomposizione gerarchica del problema nell'AHP

Il metodo dei giudizi comparati, invece, consiste nel confronto a coppie degli elementi di ciascun livello rispetto ad ogni elemento posto nel livello soprastante e nello stabilire le priorità tra gli elementi appartenenti a ciascun livello della gerarchia. Per ogni livello, si costruiscono tante matrici quadrate di confronto a coppie tra gli elementi quanti sono gli elementi sopra ordinati. Se  $n$  è il numero di elementi da valutare ad un determinato livello e  $m$  il numero di elementi al livello superiore, si dovranno elaborare  $m$  matrici  $n \times n$ .

Come scala di valutazione si è utilizzata la scala di valutazione a nove punti riportata in tabella di seguito:

**Tabella 8.1** - Scala di valutazione a 9 punti

| Intensità  | Definizione                                | Spiegazione   |
|------------|--|---|
| 1          | Importanza uguale                          | Le due alternative contribuiscono in pari modo al raggiungimento dell'obiettivo |
| 3          | Moderata importanza                        | Il giudizio è leggermente a favore di una alternativa rispetto all'altra        |
| 5          | Importanza forte                           | Il giudizio decisamente a favore di una alternativa rispetto all'altra          |
| 7          | Importanza molto forte                     | La predominanza di una alternativa è ampiamente dimostrata                      |
| 9          | Estrema importanza                         | L'evidenza a favore di una alternativa è del più alto ordine                    |
| 2, 4, 6, 8 | Valori intermedi tra due giudizi adiacenti | Quando è necessario un compromesso tra i giudizi                                |

Per lo svolgimento dei calcoli tra le matrici e l'ottenimento della matrice finale rappresentante l'ordine di priorità delle alternative, si sono utilizzate le proprietà delle matrici quadrate.

Infine, per quanto riguarda la sintesi delle priorità, ovvero qual è il contributo dei componenti di ciascun livello della gerarchia al raggiungimento dell'obiettivo, si è proceduto con i seguenti passaggi operativi:

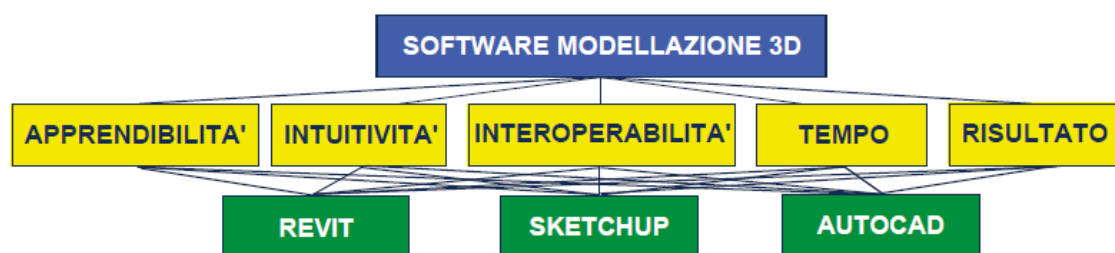
- si è calcolato l'autovettore principale di ciascuna matrice;
- si sono normalizzate le componenti dell'autovettore;
- si è costruito il vettore delle priorità e le relative matrici, ognuna delle quali è relativa a un livello e rappresenta l'ordinamenti degli elementi del livello stesso;
- si sono ordinate le alternative, attraverso la moltiplicazione delle matrici tra loro;
- e, infine, si è determinato il peso globale di ciascuna alternativa e quindi delle priorità delle stesse rispetto all'obiettivo.

### ***8.1 Scelta del software per la modellazione 3D***

Per la scelta del software da utilizzare per la modellazione 3D gli attori in gioco erano i software Revit, SketchUp e AutoCad. I criteri utilizzati per lo sviluppo della AHP finalizzata alla scelta del software da utilizzare sono stati:

- **Apprendibilità:** criterio col quale si intende la capacità del prodotto di ridurre l'impegno richiesto agli utenti per imparare ad utilizzarlo. Quindi nel confronto a coppie ha ricevuto un punteggio maggiore il software più facile da imparare ad utilizzare.

- **Intuitività:** criterio col quale si intende appunto l'intuitività del software e quindi nel confronto a coppie ha ricevuto un punteggio maggiore il software più facile da utilizzare per una persona non esperta.
- **Interoperabilità:** questa è forse il criterio più importante. Rappresenta la capacità del software di comunicare ed interagire con altri software, nonché la capacità dell'utente di esportare il file di lavoro su un software diverso da quello in questione. Quindi i software maggiormente interoperabili hanno ricevuto punteggi maggiori nel confronto a coppie.
- **Tempo:** con tale criterio si indica il tempo impiegato, utilizzando i diversi software in competizione, per ottenere lo stesso risultato. I software che richiedono minor tempo per svolgere l'azione hanno ricevuto punteggi maggiori nel confronto a coppie.
- **Risultato:** infine un altro criterio fondamentale, che rappresenta la qualità del risultato ottenuto tramite l'utilizzo del software. Il software che produce il risultato migliore dal punto di vista qualitativo e che permette di raggiungere la maggior parte degli obiettivi prefissati ha ricevuto il punteggio maggiore durante il confronto a coppie.



**Figura 8.2** - Scomposizione gerarchica del problema della modellazione 3D

Una volta definito l'obiettivo, i criteri e le alternative si è quindi proceduto eseguendo il confronto a coppie tra gli elementi del secondo livello della struttura

gerarchica, ovvero i criteri, utilizzando la scala di valori indicata in Tabella 8.1. Trattandosi di 5 criteri, si è quindi costruita una matrice di ordine 5 x 5:

**Tabella 8.2** - Matrice di confronto fra criteri per la modellazione 3D

|              | APPRENDIBIL. | INTUITIVITA' | INTEROPERABIL. | TEMPO | RISULTATO |
|--------------|--------------|--------------|----------------|-------|-----------|
| APPRENDIBIL. | 1            | 1/3          | 1/7            | 1/7   | 1/9       |
| INTUITIVITA' | 3            | 1            | 1/5            | 1/3   | 1/5       |
| INTEROPER.   | 7            | 5            | 1              | 3     | 1         |
| TEMPO        | 7            | 3            | 1/3            | 1     | 1/3       |
| RISULTATO    | 9            | 5            | 1              | 3     | 1         |

Dopodiché, si è calcolato l'autovettore principale V della matrice del confronto a coppie:

| V           |
|-------------|
| 0,000151172 |
| 0,008       |
| 21          |
| 0,466666667 |
| 27          |

Le componenti del vettore V sono state poi normalizzate ottenendo il vettore A:

| A           |
|-------------|
| 3,11856E-06 |
| 0,000165034 |
| 0,433214624 |
| 0,009626992 |
| 0,556990231 |

In questo modo si è ottenuto quindi il vettore delle priorità del secondo livello.

Allo stesso modo si è proceduto con il terzo livello della scomposizione gerarchica, andando ad eseguire un confronto a coppie tra le alternative per ogni criterio e quindi ottenendo 5 matrici 3 x 3. Tali matrici vengono riportate di seguito con anche i loro relativi autovettori normalizzati e non:

**Tabella 8.3** - Matrice di confronto col criterio "apprendibilità" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato B

| APPRENDIBIL. | SketchUp | AutoCad | Revit | V           | B           |
|--------------|----------|---------|-------|-------------|-------------|
| SketchUp     | 1        | 5       | 7     | 11,66666667 | 0,971451229 |
| AutoCad      | 1/5      | 1       | 5     | 0,333333333 | 0,027755749 |
| Revit        | 1/7      | 1/5     | 1     | 0,00952381  | 0,000793021 |

**Tabella 8.4** - Matrice di confronto col criterio "intuitività" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato C

| INTUITIVITA' | SketchUp | AutoCad | Revit | V           | C           |
|--------------|----------|---------|-------|-------------|-------------|
| SketchUp     | 1        | 3       | 5     | 5           | 0,933609959 |
| AutoCad      | 1/3      | 1       | 3     | 0,333333333 | 0,062240664 |
| Revit        | 1/5      | 1/3     | 1     | 0,022222222 | 0,004149378 |

**Tabella 8.5** - Matrice di confronto col criterio "interoperabilità" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato D

| INTEROPER. | SketchUp | AutoCad | Revit | V           | D           |
|------------|----------|---------|-------|-------------|-------------|
| SketchUp   | 1        | 1/5     | 1/7   | 0,00952381  | 0,001258917 |
| AutoCad    | 5        | 1       | 1/3   | 0,555555556 | 0,073436844 |
| Revit      | 7        | 3       | 1     | 7           | 0,925304238 |

**Tabella 8.6** - Matrice di confronto col criterio "tempo" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato E

| TEMPO    | SketchUp | AutoCad | Revit | V           | E           |
|----------|----------|---------|-------|-------------|-------------|
| SketchUp | 1        | 1/3     | 1/7   | 0,015873016 | 0,002159827 |
| AutoCad  | 3        | 1       | 1/3   | 0,333333333 | 0,045356371 |
| Revit    | 7        | 3       | 1     | 7           | 0,952483801 |

**Tabella 8.7** - Matrice di confronto col criterio "risultato" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato F

| RISULTATO | SketchUp | AutoCad | Revit | V           | F           |
|-----------|----------|---------|-------|-------------|-------------|
| SketchUp  | 1        | 1/3     | 1/5   | 0,022222222 | 0,004149378 |
| AutoCad   | 3        | 1       | 1/3   | 0,333333333 | 0,062240664 |
| Revit     | 5        | 3       | 1     | 5           | 0,933609959 |



Combinando i vettori B, C, D, E ed F si ottiene quindi la matrice delle priorità del terzo livello.

Quindi si ottiene l'ordine finale delle priorità delle alternative moltiplicando le matrici dei diversi livelli tra di loro:

$$\begin{bmatrix} 0,971 & 0,934 & 0,00126 & 0,00216 & 0,00415 \\ 0,0278 & 0,0622 & 0,0734 & 0,0454 & 0,0622 \\ 0,000793 & 0,00415 & 0,925 & 0,952 & 0,934 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 3,12E-06 \\ 0,000165 \\ 0,433 \\ 0,00963 \\ 0,557 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,00303 \\ 0,0669 \\ 0,93 \end{bmatrix}$$

Il vettore W così ottenuto rappresenta l'ordinamento delle alternative in ordine al raggiungimento dell'obiettivo. Se lo si volesse infatti esprimere in percentuale avrebbe la seguente forma:

| W     |          |
|-------|----------|
| 0,30% | SketchUp |
| 6,69% | AutoCad  |
| 93%   | Revit    |

L'AHP svolta porta quindi alla scelta di Revit come software per la modellazione 3D degli elaborati di tesi.

## 8.2 Scelta del software per l'elaborazione video

Per la scelta del software da utilizzare per l'elaborazione video gli attori in gioco erano i software SketchUp e Navisworks. I criteri utilizzati per lo sviluppo della AHP finalizzata alla scelta del software da utilizzare sono stati:

- **Apprendibilità:** criterio col quale si intende la capacità del prodotto di ridurre l'impegno richiesto agli utenti per imparare ad utilizzarlo. Quindi nel confronto a coppie ha ricevuto un punteggio maggiore il software più facile da imparare ad utilizzare.

- **Intuitività:** criterio col quale si intende appunto l'intuitività del software e quindi nel confronto a coppie ha ricevuto un punteggio maggiore il software più facile da utilizzare per una persona non esperta.
- **Realismo:** con tale criterio si indica la resa grafica che si è riusciti ad ottenere tramite l'utilizzo del software, ovvero il grado di realismo del video ottenuto. Quindi il software che permette di realizzare un video più realistico ha ricevuto più punti nel confronto a coppie.
- **Tempo:** con tale criterio si indica il tempo impiegato, utilizzando i diversi software in competizione, per ottenere lo stesso risultato. I software che richiedono minor tempo per svolgere l'azione hanno ricevuto punteggi maggiori nel confronto a coppie.
- **Risultato:** infine un altro criterio fondamentale, che rappresenta la qualità del risultato ottenuto tramite l'utilizzo del software. Il software che produce il risultato migliore dal punto di vista qualitativo e che permette di raggiungere la maggior parte degli obiettivi prefissati ha ricevuto il punteggio maggiore durante il confronto a coppie.



**Figura 8.3** - Scomposizione gerarchica del problema dell'elaborazione video

Il vettore di priorità del secondo livello della scala gerarchica costruita è stato ottenuto come nel caso precedente per il problema della modellazione 3D. Quindi si sono ricavati una nuova matrice 5 x 5 e nuovi autovettori come nel caso precedente.

**Tabella 8.8** - Matrice di confronto fra criteri per l'elaborazione video

|              | APPRENDIBIL. | INTUITIVITA' | REALISMO | TEMPO | RISULTATO |
|--------------|--------------|--------------|----------|-------|-----------|
| APPRENDIBIL. | 1            | 1/3          | 3        | 1/7   | 1/9       |
| INTUITIVITA' | 3            | 1            | 3        | 1/3   | 1/5       |
| REALISMO     | 1/3          | 1/3          | 1        | 3     | 1         |
| TEMPO        | 7            | 3            | 1/3      | 1     | 1/3       |
| RISULTATO    | 9            | 5            | 1        | 3     | 1         |

Dopodiché, si è calcolato l'autovettore principale V della matrice del confronto a coppie:

| V           |
|-------------|
| 0,003174603 |
| 0,12        |
| 0,066666667 |
| 0,466666667 |
| 27          |

Le componenti del vettore V sono state poi normalizzate ottenendo il vettore A:

| A           |
|-------------|
| 0,000114787 |
| 0,004338943 |
| 0,002410524 |
| 0,016873666 |
| 0,976262081 |

In questo modo si è ottenuto quindi il vettore delle priorità del secondo livello.

Allo stesso modo si è proceduto con il terzo livello della scomposizione gerarchica, andando ad eseguire un confronto a coppie tra le alternative per ogni criterio e quindi ottenendo 5 matrici 2 x 2. Tali matrici vengono riportate di seguito con anche i loro relativi autovettori normalizzati e non:

**Tabella 8.9** - Matrice di confronto col criterio "apprendibilità" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato B

| <b>APPRENDIBIL.</b> | SketchUp | Navisworks | V   | B   |
|---------------------|----------|------------|-----|-----|
| SketchUp            | 1        | 1          | 0,5 | 0,5 |
| Navisworks          | 1        | 1          | 0,5 | 0,5 |

**Tabella 8.10** - Matrice di confronto col criterio "intuitività" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato C

| <b>INTUITIVITA'</b> | SketchUp | Navisworks | V           | C   |
|---------------------|----------|------------|-------------|-----|
| SketchUp            | 1        | 3          | 1,5         | 0,9 |
| Navisworks          | 1/3      | 1          | 0,166666667 | 0,1 |

**Tabella 8.11** - Matrice di confronto col criterio "realismo" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato D

| <b>REALISMO</b> | SketchUp | Navisworks | V           | D    |
|-----------------|----------|------------|-------------|------|
| SketchUp        | 1        | 7          | 3,5         | 0,98 |
| Navisworks      | 1/7      | 1          | 0,071428571 | 0,02 |

**Tabella 8.12** - Matrice di confronto col criterio "tempo" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato E

| <b>TEMPO</b> | SketchUp | Navisworks | V           | E    |
|--------------|----------|------------|-------------|------|
| SketchUp     | 1        | 1/7        | 0,071428571 | 0,02 |
| Navisworks   | 7        | 1          | 3,5         | 0,98 |

**Tabella 8.13** - Matrice di confronto col criterio "risultato" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato F

| <b>RISULTATO</b> | SketchUp | Navisworks | V           | F   |
|------------------|----------|------------|-------------|-----|
| SketchUp         | 1        | 1/3        | 0,166666667 | 0,1 |
| Navisworks       | 3        | 1          | 1,5         | 0,9 |

Combinando i vettori B, C, D, E ed F si ottiene quindi la matrice delle priorità del terzo livello.

Quindi si ottiene l'ordine finale delle priorità delle alternative moltiplicando le matrici dei diversi livelli tra di loro:

$$\begin{bmatrix} 0,5 & 0,9 & 0,98 & 0,02 & 0,1 \\ 0,5 & 0,1 & 0,02 & 0,98 & 0,9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,000115 \\ 0,00434 \\ 0,00241 \\ 0,0169 \\ 0,976 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,10 \\ 0,90 \end{bmatrix}$$

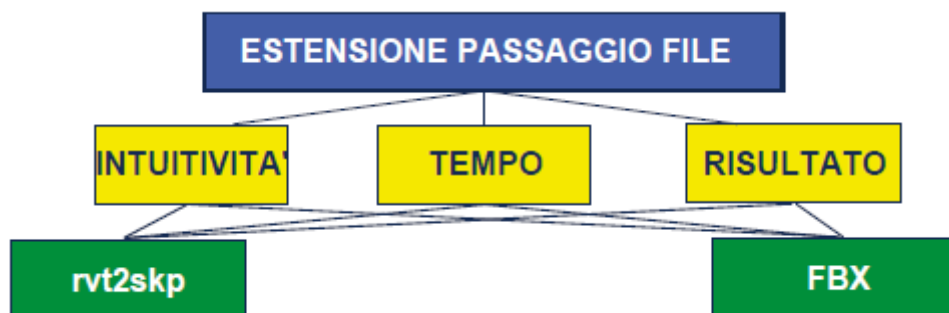
Il vettore W così ottenuto rappresenta l'ordinamento delle alternative in ordine al raggiungimento dell'obiettivo. Se lo si volesse infatti esprimere in percentuale avrebbe la seguente forma:

| W   |            |
|-----|------------|
| 10% | SketchUp   |
| 90% | Navisworks |

L'AHP svolta porta quindi alla scelta di Navisworks come software per la elaborazione video degli elaborati di tesi, già modellati a loro volta con il software Revit, che era risultato il migliore tra i possibili software dalla precedente AHP.

### 8.3 Scelta del software per il passaggio del modello da Revit a Sketchup

Per la scelta del software da utilizzare per il passaggio del modello da Revit a Sketchup gli attori in gioco erano le estensioni “Revit to SketchUp” (rvt2skp) ed FBX Converter. I criteri utilizzati per lo sviluppo della AHP finalizzata alla scelta del software da utilizzare sono stati alcuni tra quelli utilizzati per l'AHP svolta per la scelta del software da utilizzare per la modellazione 3D. Nello specifico si sono utilizzati i criteri intuitività, tempo e risultato, le cui spiegazioni sono presenti al §8.1.



**Figura 8.4** - Scomposizione gerarchica del problema del passaggio dei file

Una volta definito l'obiettivo, i criteri e le alternative si è quindi proceduto eseguendo il confronto a coppie tra gli elementi del secondo livello della struttura gerarchica, ovvero i criteri, utilizzando la scala di valori indicata in Tabella 8.1. Trattandosi di 3 criteri, si è quindi costruita una matrice di ordine 3 x 3:

**Tabella 8.14** - Matrice di confronto fra criteri per il passaggio dei file

|              | INTUITIVITA' | TEMPO | RISULTATO |
|--------------|--------------|-------|-----------|
| INTUITIVITA' | 1            | 1/3   | 1/5       |
| TEMPO        | 3            | 1     | 1/3       |
| RISULTATO    | 5            | 3     | 1         |

Dopodiché, si è calcolato l'autovettore principale V della matrice del confronto a coppie:

| V          |
|------------|
| 0,02222222 |
| 0,33333333 |
| 5          |

Le componenti del vettore V sono state poi normalizzate ottenendo il vettore A:

| A           |
|-------------|
| 0,004149378 |
| 0,062240664 |
| 0,933609959 |

In questo modo si è ottenuto quindi il vettore delle priorità del secondo livello.

Allo stesso modo si è proceduto con il terzo livello della scomposizione gerarchica, andando ad eseguire un confronto a coppie tra le alternative per ogni criterio e quindi ottenendo 3 matrici 2 x 2. Tali matrici vengono riportate di seguito con anche i loro relativi autovettori normalizzati e non:

**Tabella 8.15** - Matrice di confronto col criterio " intuitività " per il passaggio dei file e relativi autovettore V e autovettore normalizzato B

| INTUITIVITA' | fbx | rvt2skt | V   | B           |
|--------------|-----|---------|-----|-------------|
| fbx          | 1   | 1/5     | 0,1 | 0,038461538 |
| rvt2skt      | 5   | 1       | 2,5 | 0,961538462 |

**Tabella 8.16** - Matrice di confronto col criterio "tempo" per il passaggio dei file e relativi autovettore V e autovettore normalizzato C

| TEMPO   | fbx | rvt2skt | V           | C    |
|---------|-----|---------|-------------|------|
| fbx     | 1   | 1/7     | 0,071428571 | 0,02 |
| rvt2skt | 7   | 1       | 3,5         | 0,98 |

**Tabella 8.17** - Matrice di confronto col criterio "risultato" per il passaggio dei file e relativi autovettore V e autovettore normalizzato D

| RISULTATO | fbx | rvt2skt | V   | D           |
|-----------|-----|---------|-----|-------------|
| fbx       | 1   | 1/5     | 0,1 | 0,038461538 |
| rvt2skt   | 5   | 1       | 2,5 | 0,961538462 |

Combinando i vettori B, C e D si ottiene quindi la matrice delle priorità del terzo livello.

Quindi si ottiene l'ordine finale delle priorità delle alternative moltiplicando le matrici dei diversi livelli tra di loro:

$$\begin{vmatrix} 0,0385 & 0,02 & 0,0385 \\ 0,962 & 0,98 & 0,962 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0,00415 \\ 0,0622 \\ 0,934 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,0373 \\ 0,963 \end{vmatrix}$$

Il vettore W così ottenuto rappresenta l'ordinamento delle alternative in ordine al raggiungimento dell'obiettivo. Se lo si volesse infatti esprimere in percentuale avrebbe la seguente forma:

| W   |         |
|-----|---------|
| 4%  | fbx     |
| 96% | rvt2skt |

L'AHP svolta porta quindi alla scelta di "Revit to SketchUp" come estensione per l'esportazione dei file modellati con Revit e la successiva importazione di essi nel software SketchUp.



## Conclusioni

La presente tesi si è posta l'obiettivo, quindi, di affrontare il tema del recupero edilizio, più nello specifico quello del rinforzo delle strutture storiche in muratura, tramite l'utilizzo di software e applicazioni normalmente utilizzati nella metodologia BIM. Si è cercato, per quanto possibile, di modellare elementi architettonici, unità tecnologiche, nodi strutturali e tecnologie di rinforzo con gli stessi strumenti che normalmente vengono utilizzati per la modellazione di un intero edificio. Ovvero, si è affrontato una problematica di scala relativamente piccola, con lo stesso approccio con il quale di norma si affronta un argomento di scala decisamente maggiore. Questo ha portato all'individuazione di una serie di problematiche che sono state risolte e altre che potrebbero rappresentare spunti per eventuali sviluppi futuri.

Dopo una parte teorica introduttiva, che non aveva l'obiettivo di perseguire risultati pratici se non la descrizione delle tecniche di costruzione degli edifici fino ad un secolo fa, si è proceduto con la scelta degli elementi caratteristici maggiormente ricorrenti in questa tipologia di edifici. Ovviamente non sono state esaminate tutte le possibili soluzioni di un nodo strutturale, quindi è stata fatta una selezione. Poiché la presente tesi propone una metodologia di studio delle tecniche di rinforzo, si ritiene comunque che la presenza di un numero limitato di applicazioni di tale metodologia ad un numero altrettanto limitato di unità tecnologiche non escluda la possibilità di successive applicazioni future. Tali sviluppi che non è detto debbano consistere soltanto nell'incremento del numero di unità, nodi, elementi o tecnologie a cui applicare tale metodologia di studio, bensì anche sviluppi che portino ad un miglioramento dell'efficienza di tale metodologia, nella sua interoperabilità e nel numero e nella quantità di informazioni che può trasmettere.

Quindi, una volta scelte le unità tecnologiche, si è proceduto con lo studio delle possibili tecniche di intervento e dei possibili materiali e tecnologie utilizzabili per il rinforzo strutturale delle stesse, in vista eventualmente, di un cambiamento delle condizioni al contorno, a seguito di un cambio di destinazione d'uso dell'edificio. Tale

cambio di destinazione, infatti, molto spesso è la motivazione e l'obiettivo del recupero di un edificio storico.

Scelte le unità tecnologiche e le tecniche di rinforzo da analizzare, si è avanzato con la modellazione dello stato di fatto (ovvero delle unità tecnologiche prima dell'intervento di rinforzo) e dello stato di progetto (ovvero delle unità tecnologiche rinforzate). Dal momento che lo sviluppo della presente tesi prevede l'utilizzo dei modelli così elaborati in vari software di natura diversa, è stato necessario modellare la stessa unità tecnologica in diverse copie, adattando ognuna in funzione delle caratteristiche che doveva avere per la corretta importazione in altro software o la corretta resa grafica richiesta nel formato di output. Queste conclusioni si sono ottenute, ovviamente, a seguito di svariati tentativi e insoddisfacenti risultati ottenuti, fino ad arrivare ad un risultato che si è ritenuto accettabile.

Alcuni ostacoli sono stati ritenuti insormontabili con le tecnologie attualmente disponibili e ad altri si è posto rimedio con soluzioni alternative. Tutte queste problematiche evidenziate durante la tesi soprattutto al capitolo 7, potranno essere spunto di riflessioni e sviluppi futuri. Sviluppi non tanto dal punto di vista delle tecnologie pratiche di intervento sugli edifici, quanto dei software e delle applicazioni utilizzate dai professionisti BIM, che devono essere migliorate in questa direzione per essere utilizzate anche nel campo, seppur specifico ma importante, dell'edilizia storica.

Una conclusione importante è che questa tesi, nella metodologia proposta, potrebbe rappresentare un riferimento futuro per la redazione di manualistica tecnica edilizia. L'inserimento di video all'interno di elaborati grafici, che comunque rimangono lo strumento principale di comunicazione e scambio di informazioni tra gli operatori di un processo edilizio, non hanno una mera funzione di spettacolarizzazione del processo, come qualcuno potrebbe essere portato a pensare, ma, se migliorati, possono fungere da importante strumento di comprensione immediata delle tecniche, da parte degli operatori. Possono, insomma, facilitare e velocizzare lo scambio di informazioni.

Infine, l'utilizzo di QRcode come mezzo di passaggio dall'elaborato digitale a quello analogico è fondamentale e indispensabile, soprattutto per la direzione che sta prendendo la società odierna, che ovviamente influenza tutti i campi, anche quello edilizio.

A corredo della presente tesi, è stato elaborato anche un glossario, per consentire a chiunque si accinga alla lettura del documento una maggiore comprensione, pur non avendo nozioni specificatamente tecniche. Anche questo è uno strumento fondamentale per un documento che voglia definirsi manualistico.

In conclusione, la tesi si è proposta, pur lasciando spazio a ragionamenti ulteriori e ispirando svariati sviluppi futuri, di ricercare e sperimentare una metodologia con la quale studiare lo stato dell'arte nell'ambito del rinforzo strutturale di edifici storici. Ha cercato di farlo nel modo più innovativo possibile, anche nel tentativo di sottolineare l'importanza della collaborazione "nuovo" e "vecchio". Le innovazioni tecnologiche non possono essere utilizzate solo per progettare da zero un manufatto ma danno un contributo fondamentale anche nel recupero, nel suo significato più ampio, di tante testimonianze materiche e reali di ciò che è stato il passato dell'edilizia.



## Bibliografia e sitografia

- [1] G. Vecchi e M. Giovannelli, Consolidamento strutture in muratura: metodi e tecniche di intervento per edifici esistenti in muratura portante, Grafill, 2014.
- [2] L. Binda, G. Baronio, D. Penazzi, M. Palma e C. Tiraboschi, « Caratterizzazione di murature in pietra in zona sismica: Data-Base sulle sezioni murarie e indagini sui materiali,» in *L'ingegneria sismica in Italia*, Torino, 1999.
- [3] Mapei, «Prodotti e soluzioni: Linee: Prodotti per il rinforzo strutturale,» 2014. [Online]. Available: [www.mapei.com](http://www.mapei.com).
- [4] P. Lenza, A. Gherzi e B. Calderoni, Edifici in muratura alla luce della nuova normativa sismica, Flaccovio Dario, 2011.
- [5] «Tutte le tipologie di volte,» [Online]. Available: <http://artchist.blogspot.com/2017/05/tutte-le-tipologie-di-volte-piante-e.html>.
- [6] E. Pulvirenti, «Quando il soffitto è un capolavoro: dieci modelli di volta,» 31 ottobre 2014. [Online]. Available: <http://www.didatticarte.it/Blog/?p=3807>.
- [7] Mezzina, «Model: Volta a schifo,» [Online]. Available: <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/18ded213b0750ffa57a649f546c6941f/Volta-a-schifo>. [Consultato il giorno 2019].
- [8] G. Musso e G. Copperi, Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati/Musso Copperi costruttori. Costruzioni rurali, Paravia, 1912.
- [9] «Il Capochiave,» 2018. [Online]. Available: <https://ilcapochiave.it/2018/03/03/arco-senese-quando-la-statica-diventa-architettura/>.
- [10] «Statica e sismica: Normative,» [Online]. Available: [http://www.staticaesismica.it/normative/RDL\\_22\\_11\\_1937\\_n2105.pdf](http://www.staticaesismica.it/normative/RDL_22_11_1937_n2105.pdf).
- [11] «Promo Legno,» [Online]. Available: <http://risponde.promolegno.com/domanda/data/nel-caso-di-rinforzi-di-solai-esistenti-con-travi-in-legno-e-pavimentazioni-con-massetto-in-granigli/>.
- [12] S. Cascio, Consolidamento solai di legno. Tecniche d'intervento ed esempi pratici, I a cura di, Grafill, 2014.
- [13] «Amazon,» [Online]. Available: <https://www.amazon.it/scarpe-acciaio-innenliegenden-connettore-zincata/dp/B01LZUTIYY>.

- [14] A. Cazzani e F. Stochino, «Università di Cagliari - UniCa,» 2018. [Online]. Available:  
[http://people.unica.it/antoniocazzani/files/2014/03/Statica\\_per\\_edilizia\\_storica\\_18-2014\\_BN.ppt.pdf](http://people.unica.it/antoniocazzani/files/2014/03/Statica_per_edilizia_storica_18-2014_BN.ppt.pdf). [Consultato il giorno 2019].
- [15] «Studio Fornalé,» 2015. [Online]. Available:  
[http://www.studiofornale.it/ngg\\_tag/ristrutturazione/](http://www.studiofornale.it/ngg_tag/ristrutturazione/). [Consultato il giorno 2019].
- [16] «Ingegneri.info: Forum,» 2015. [Online]. Available:  
<http://www.ingegneri.info/forum/viewtopic.php?f=16&t=76920>. [Consultato il giorno 2019].
- [17] «Ingegneria e dintorni,» 2010. [Online]. Available:  
<http://www.ingegneriaedintorni.com/2010/09/i-dissesti-di-archi-e-volte-i-cedimenti.html>. [Consultato il giorno 2019].
- [18] R. Calabrese, «Edilportale: Notizie: Ambiente,» 13 09 2016. [Online]. Available:  
[https://www.edilportale.com/news/2016/09/ambiente/terremoto-nuovi-report-fotografici-dai-luoghi-del-sisma\\_53741\\_52.html](https://www.edilportale.com/news/2016/09/ambiente/terremoto-nuovi-report-fotografici-dai-luoghi-del-sisma_53741_52.html). [Consultato il giorno 2019].
- [19] D. Liberatore, «Crisbasilicata,» 25 5 2004. [Online]. Available:  
<http://www.crisbasilicata.it/admin%5Callegatidocumenti%5Cupload%5Cliberatore01245205138772.pdf>. [Consultato il giorno 2019].
- [20] G. Pasqualon, «Ingenio,» 18 3 2019. [Online]. Available: <https://www.ingenio-web.it/22914-come-si-comportano-le-strutture-in-muratura-sotto-lazione-del-sisma-i-vari-mechanismi-di-collasso>. [Consultato il giorno 2019].
- [21] «Università degli studi di Cassino e del Lazio Meridionale,» [Online]. Available:  
[https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwix4Dhto7hAhVCqaQKHQI5DbMQjhx6BAGBEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.3muri.com%2Fdocumenti%2Ftesi%2FManzi\\_tesi.pdf&psig=AOvVaw3sO50JvYqT6Adu31DL1hp&ust=1553092502101598](https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwix4Dhto7hAhVCqaQKHQI5DbMQjhx6BAGBEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.3muri.com%2Fdocumenti%2Ftesi%2FManzi_tesi.pdf&psig=AOvVaw3sO50JvYqT6Adu31DL1hp&ust=1553092502101598). [Consultato il giorno 2019].
- [22] C. Menna, R. Frascadore, C. Moroni, G. Lignola, G. De Martino, A. Salzano, M. Di Ludovico, A. Prota, G. Manfredi e E. Cosenza, «Reluis,» [Online]. Available:  
[http://www.reluis.it/images/stories/report%20fotografico%20sisma%20agosto%202016\\_31\\_08\\_Finale.pdf](http://www.reluis.it/images/stories/report%20fotografico%20sisma%20agosto%202016_31_08_Finale.pdf). [Consultato il giorno 2019].
- [23] L. Milano, A. Mannella, C. Morisi e A. Martineli, «Reluis,» [Online]. Available:  
[http://www.reluis.it/doc/emergenza\\_terremoto\\_abruzzo/Schede\\_Mechanismi.pdf](http://www.reluis.it/doc/emergenza_terremoto_abruzzo/Schede_Mechanismi.pdf). [Consultato il giorno 2019].

- [24] «Dicat.UniGe,» [Online]. Available:  
[http://www.dicat.unige.it/costruzioni\\_in\\_zona\\_sismica/2010\\_lezione%2016%20muratura.pdf](http://www.dicat.unige.it/costruzioni_in_zona_sismica/2010_lezione%2016%20muratura.pdf). [Consultato il giorno 2019].
- [25] «Promozione Acciaio,» [Online]. Available:  
<https://www.promozioneacciaio.it/cms/it5406-scorrimento-collasso.asp>.  
[Consultato il giorno 2019].
- [26] V. Caputo e C. Viggiani, «Valutazione delle condizioni di sicurezza e adeguamento delle opere esistenti,» in *XXII Convegno Nazionale di Geotecnica*, Palermo, 2004.
- [27] «Diemme Strumenti,» 2019. [Online]. Available:  
[https://www.diemmestrumenti.it/index.php?main\\_page=product\\_info&products\\_id=68](https://www.diemmestrumenti.it/index.php?main_page=product_info&products_id=68). [Consultato il giorno 2019].
- [28] «Studiopdaplus,» 16 04 2014. [Online]. Available:  
<https://studiopdaplus.wordpress.com/2014/04/16/catena-capochiave-bulzone-2/>.  
[Consultato il giorno 2019].
- [29] «Il Capochiave,» 25 09 2017. [Online]. Available:  
<https://ilcapochiave.it/2017/09/25/sua-maesta-il-capochiave/>. [Consultato il giorno 2019].
- [30] C. Algeri e E. Poverello, «Info Web srl,» 26 05 2010. [Online]. Available:  
<http://www.infoweb srl.it/infobuild/bossong/bossong3.pdf>. [Consultato il giorno 2019].
- [31] «Fibrenet,» [Online]. Available: <https://www.fibrenet.it/product/fiocchi-in-fibra-di-carbonio-e-vetro/>. [Consultato il giorno 2019].
- [32] C. Ostorero, *Corso di Recupero e Conservazione dell'Edificio*, Torino, 2018.
- [33] G. Campanini, «Iuav,» 2012. [Online]. Available:  
<http://www.iuav.it/Ateneo1/docenti/architetto/docenti-st/Paolo-Facc/materiali-claMARCH-c/lezione-S.marta1.pdf>. [Consultato il giorno 2019].
- [34] M. Vinci, *Metodi di calcolo e tecniche di consolidamento per edifici in muratura*, Dario Flaccovio, 2018.
- [35] T. e. srl, «Consolidamento e restauro,» [Online]. Available:  
[https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj0h-Hwx5PhAhUNKuwKHa3hAY0Qjhx6BAGBEAI&url=https%3A%2F%2Fwww.tecnicaedilizia srl.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F12%2FTecnica\\_Edilizia\\_web.pdf&psig=AOvVaw1wGSsiv35n5u5\\_Ex\\_K0YKO&u](https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj0h-Hwx5PhAhUNKuwKHa3hAY0Qjhx6BAGBEAI&url=https%3A%2F%2Fwww.tecnicaedilizia srl.it%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F12%2FTecnica_Edilizia_web.pdf&psig=AOvVaw1wGSsiv35n5u5_Ex_K0YKO&u). [Consultato il giorno 2019].

- [36] C. Guenzi, *L'arte di edificare: manuali in Italia 1750-1950*, BeMa, 1981.
- [37] P. Scarzella e M. Zerbinatti, *Recupero e conservazione dell'edilizia storica. L'insieme, le parti: interrati, fondazioni, partizioni, coperture, chiusure e aggetti*, Firenze: Alinea editrice s.r.l., 2009.
- [38] R. Roscelli, «Manuale di estimo: valutazioni economiche ed esercizio della professione,» UTET Università, 2014, pp. 227-244.
- [39] M. Prof.ssa Rebaudengo.
- [40] «Vocabolario: Ricerca,» Treccani, 2019. [Online]. Available: <https://www.reteimprese.it/>. [Consultato il giorno 2019].
- [41] «Redooc.com,» 2017. [Online]. Available: <https://redooc.com/it/>. [Consultato il giorno 2019].
- [42] «Garzanti,» [Online]. Available: <https://www.garzantilinguistica.it>. [Consultato il giorno 2019].
- [43] «Marconi,» 1999. [Online]. Available: <http://www.itimarconi.ct.it/>.
- [44] «Madame Curie,» [Online]. Available: <https://www.mcurie.edu.it/>. [Consultato il giorno 2019].
- [45] «Il Software,» [Online]. Available: <https://ilsoftware.page.tl/>. [Consultato il giorno 2019].
- [46] A. Osello, *Corso di Modellazione tecnologica*, Torino: Politecnico di Torino, 2015.
- [47] «Wikitecnica,» [Online]. Available: <http://www.wikitecnica.com>. [Consultato il giorno 2019].
- [48] G. Breda, «Edilizia in un click: Starbuilt,» 2017. [Online]. Available: <https://edilizia-in-un-click.starbuild.it/2017/11/che-cose-la-soletta-collaborante.html>. [Consultato il giorno 2019].
- [49] «Quora,» 2018. [Online]. Available: <https://it.quora.com/Cose-il-coefficiente-di-Poisson>. [Consultato il giorno 2019].
- [50] «Mapei,» [Online]. Available: <https://www.mapei.com>. [Consultato il giorno 2019].
- [51] «Unifi,» [Online]. Available: [http://web.taed.unifi.it/lab\\_tec\\_e/laboratorio2011-2012/LEZIONE%20B\\_sistema%20tecnologico22.pdf](http://web.taed.unifi.it/lab_tec_e/laboratorio2011-2012/LEZIONE%20B_sistema%20tecnologico22.pdf). [Consultato il giorno 2019].



- [52] «Corriere della sera: Dizionari,» [Online]. Available: <http://dizionari.corriere.it>.
- [53] «DocArtis,» [Online]. Available: [http://www.docartis.com/LIBRERIA\\_DIGITALE/6\\_VOCABOLARIO\\_SIRIS/St\\_rutture\\_Verticali\\_Continue.pdf](http://www.docartis.com/LIBRERIA_DIGITALE/6_VOCABOLARIO_SIRIS/St_rutture_Verticali_Continue.pdf). [Consultato il giorno 2019].
- [54] «Harpaceas,» [Online]. Available: <https://harpaceas.it/gestione-e-significato-dei-lod/>. [Consultato il giorno 2019].
- [55] «Dizionario Google,» [Online]. Available: <https://www.google.com/search?q=Dizionario>. [Consultato il giorno 2019].
- [56] «YouMath,» [Online]. Available: <https://www.youmath.it>. [Consultato il giorno 2019].
- [57] [Online]. Available: [http://dittgavekort.dk/edifici\\_in\\_muratura.pdf](http://dittgavekort.dk/edifici_in_muratura.pdf). [Consultato il giorno 2019].
- [58] M. Agliata, La direzione lavori, Maggioli Editore, 2009.
- [59] «X Polymers,» [Online]. Available: <https://www.xpolymers.it>. [Consultato il giorno 2019].
- [60] «La Repubblica: Dizionari,» [Online]. Available: [dizionari.repubblica.it](http://dizionari.repubblica.it).
- [61] «Glosbe,» Glosbe, 2019. [Online]. Available: <https://it.glosbe.com/>. [Consultato il giorno 2019].
- [62] [Online]. Available: <http://www.treccani.it/>.
- [63] «Wordreference,» Wordreference, 2019. [Online]. Available: <http://www.wordreference.com/it/>. [Consultato il giorno 2019].
- [64] «ReteImprese,» [Online]. Available: [https://www.reteimprese.it/arts\\_A8467B400](https://www.reteimprese.it/arts_A8467B400). [Consultato il giorno 2019].
- [65] «Unibas,» [Online]. Available: [http://www2.unibas.it/architettura/CORSI/LOSASSO/studenti\\_feb\\_2011/Sintesi%20Norme%20UNI.pdf](http://www2.unibas.it/architettura/CORSI/LOSASSO/studenti_feb_2011/Sintesi%20Norme%20UNI.pdf). [Consultato il giorno 2019].
- [66] P. S. M. Marketing, «Volte a Stella,» 2012. [Online]. Available: <http://www.voltestella.it/volte-a-botte/>. [Consultato il giorno 2019].
- [67] «Bab.la,» 2019. [Online]. Available: [it.bab.la](http://it.bab.la). [Consultato il giorno 2019].
- [68] D. Brigante, Rinforzo strutturale con materiali compositi, Palermo: Grafill, 2012.

## Glossario

**Allettamento** [*moisture*] Disposizione di qualche cosa a strati; lo stendere uno strato di qualche cosa: a. di malta, nelle costruzioni civili. [43]

**Ammorsamento** [*connection*] Deriva da *ammorsare*, ovvero dall'atto di chiudere in morsa. [43]

**Angolo al centro** [*central angle*] Angolo che ha come vertice il centro della circonferenza e come lati due dei suoi raggi, che delimitano un arco di circonferenza). [44]

**Anisotropia** [*anisotropy*] Caratteristica di un corpo, e specialmente di un cristallo, che non presenta le medesime proprietà fisiche (conducibilità elettrica, rifrazione ecc.) in tutte le direzioni. [45]

**Architrave** [*lintel*] Elemento architettonico orizzontale, atto a collegare tra loro i pilastri o le colonne sottostanti e a sostenere le strutture sovrastanti scaricandone il peso sui piedritti. [46]

**AutoCAD** [*AutoCAD*] è il primo software CAD (Computer Aided Design) sviluppato originariamente per PC, ed introdotto nel mercato nel 1982 da Autodesk. È utilizzato principalmente per produrre disegni bi/tridimensionali in ambito ingegneristico, architettonico, meccanico ed elettrotecnico. Il documento prodotto è di tipo vettoriale, ovvero le entità grafiche sono definite come oggetti matematico-geometrici: questo permette, diversamente da quanto succede nei documenti grafici di tipo raster, di scalarle e ingrandirle indefinitamente senza perdita di risoluzione. [47]

**Autodesk Revit** [*Autodesk Revit*] Programma CAD e BIM per sistemi operativi Windows che consente la progettazione con elementi di modellazione parametrica e di disegno. Tramite la parametrizzazione e la tecnologia 3D nativa è possibile impostare la concettualizzazione di architetture e forme tridimensionali. Questo nuovo paradigma comporta una rivoluzione nella percezione progettuale, poiché questa si sostanzia in termini non più cartesiani ma spaziali, con i vantaggi che questa può apportare alla

progettazione. Revit, come programma BIM, è da intendersi come un approccio più vicino alla realtà percepita dagli esseri umani. Uno dei punti di forza di Revit è quello di poter generare con estrema facilità viste prospettiche o assonometriche, che richiederebbero notevoli sforzi nel disegno manuale; un esempio è la creazione di spaccati prospettici ombreggiati. Altra caratteristica di estrema importanza è quello di costruire il modello utilizzando elementi costruttivi, mentre in altri software analoghi la creazione delle forme è svincolata dalla funzione costruttiva e strutturale. Elemento portante di Revit è lo sfruttamento della "quarta dimensione", cioè il tempo. Si possono infatti impostare le fasi temporali: ad esempio, Stato di Fatto e Stato di Progetto. Ogni elemento del modello può essere creato in una fase e demolito in un'altra, avendo poi la possibilità di creare viste di raffronto con le opportune evidenziazioni: "Gialli e Rossi". I punti deboli del programma sono rappresentati, invece, dall'interfaccia talvolta poco intuitiva, dalla qualità dei rendering, che, pur utilizzando il motore "radiosity", non è paragonabile a quella ottenibile con software di rendering dedicati, infine il programma limita la progettazione alle strutture "edili" mentre non è predisposto per l'ingegneria civile (strade e infrastrutture in generale). [48]

**BIM (BIM)** L'acronimo è usato per descrivere un'attività (*Building Information Modeling*) piuttosto che un oggetto (modello informativo dell'edificio). Come attività, il BIM è composto dall'insieme di processi applicati per creare, gestire, derivare e comunicare le informazioni tra le parti interessate ai vari livelli, utilizzando modelli creati da tutti i partecipanti processo edilizio, in momenti diversi e per scopi diversi, per garantire qualità e efficienza durante l'intero ciclo di vita degli edifici. Invece, il modello informativo dell'edificio è definito in modo inequivocabile come rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un servizio o di una struttura. [49]

**Capochiave [-]** Detto anche 'bolzone', è l'elemento che consente l'ancoraggio al muro e il tensionamento della catena. Si colloca all'estremità del tirante in aderenza alla superficie muraria, rimuovendo l'intonaco quando possibile ed evitando in ogni caso l'incasso, per contenere l'invasività dell'intervento e non ridurre la sezione resistente della muratura stessa. Lavora a flessione e va dimensionato in modo da imprimere una sollecitazione sulla muratura compatibile con la sua resistenza. Le configurazioni

prevalenti sono a paletto e a piastra, tuttavia la realizzazione attuale più diffusa impiega piastre d'acciaio nervate, saldate a un manicotto tenditore. [50]

**Cappa collaborante** o soletta collaborante [*structural screed*] La soletta in calcestruzzo armato è rappresentata dallo strato più estremo del solaio e si può definire collaborante quando è presente un'interconnessione tra struttura portante e soletta in c.a. [51]

**Coefficiente di Poisson** [*Poisson's ratio*] Proprietà di ciascun materiale, dipendente dalla temperatura, che misura il grado in cui il campione di materiale si restringe o si dilata trasversalmente in presenza di una sollecitazione monodirezionale longitudinale. [52]

**Comportamento elastico lineare** [*linear elastic behavior*] Comportamento tipico di un materiale elastico lineare cioè di un materiale che, sottoposto ad una tensione, subisce una deformazione elastica, proporzionale alla tensione stessa secondo un fattore di proporzionalità  $E$  detto *modulo di Young*. L'elasticità del materiale significa che, fino ad un valore limite, la deformazione del materiale segue la variazione della tensione nel tempo in maniera continua e non permanente.

**Consolidante** [*stabilizing agent*] Materiale chimico in solvente di tipo reversibile, per il restauro conservativo e il consolidamento di supporti lapidei porosi, intonaci di calce e strati pittorici. [14]

**Contrafforte** [*buttress*] Elemento costruttivo destinato a rafforzare una struttura assorbendo le spinte orizzontali e oblique che si scaricano sulla struttura stessa. Presenti solitamente all'esterno, possono essere realizzati anche all'interno di una muratura per renderla maggiormente resistente (in opere militari o di fortificazione, per aumentarne la resistenza al tiro delle artiglierie). Il c., da semplice rinforzo delle murature di contenimento delle terre (muro di sostegno), assume anche un particolare valore architettonico quando è utilizzato come rinforzo a murature di sostegno delle volte, delle quali è destinato ad assorbire l'azione di spinta. Il c. raggiunge particolare valore espressivo nell'architettura gotica, dove questa sorta di speroni esterni, decrescenti verso

l'alto mediante riseghe, finiscono quasi con il determinare le caratteristiche dell'architettura gotica stessa. [43]

**Cordolo** [*curb*] Elemento di calcestruzzo semplice o armato, ad andamento orizzontale, inserito per tutto lo spessore del muro, per lo più in corrispondenza del piano di imposta dei solai, a scopo di rinforzo. [43]

**Delaminazione** [*delamination*] Asportazione di materiale superficiale di un corpo per varie cause (attrito, usura, ecc.). [43]

**Duttilità** [*ductility*] Proprietà caratteristica dei materiali duttili, cioè di quei materiali che assumono deformazioni permanenti notevoli sotto l'azione di sole forze di trazione; dipende dalla temperatura, dalla presenza di impurezze, dalle modalità di lavorazione e dai trattamenti termici subiti dal materiale. [43]

**Elemento tecnico** [*technical element*] Prodotto edilizio più o meno complesso capace di svolgere completamente o parzialmente funzioni proprie di una o più unità tecnologiche. Componente caratterizzante un sub-sistema tecnologico. [53]

**Epossidico** [*epoxy*] Si dice di gruppo contenente un atomo di ossigeno che fa da ponte tra due atomi di carbonio. o di sostanza o composto che contiene uno o più gruppi epossidici: resine epossidiche. [45]

**Estrusione** [*extrusion*] In tecnologia meccanica, lavorazione per deformazione plastica eseguita su materiali metallici al fine di ottenere barre, tubi, profilati vari, capsule; si effettua esercitando sul materiale informe (*massello*), posto in un robusto contenitore cilindrico, elevate forze di compressione per il tramite di un punzone (*mandrino pressatore*) collegato a potenti presse idrauliche, cosicché il materiale, spinto dal mandrino in una matrice o in una filiera, si deforma assumendo la forma voluta. In Autodesk Revit, funzione che crea un solido 3D mediante l'estrusione di una forma 2D o di un profilo. Quando si disegna una forma 2D, questa viene utilizzata come base per una forma 3D estrusa tra un punto iniziale e un punto finale. [43]

**Fibre aramidiche** [*aramid fiber*] Fibre ottenute per lavorazione di poliammidi aromatiche, da cui deriva il nome (ARomatic polyAMIDes). Sono caratterizzate da una

elevata resistenza a trazione (3600 MPa, paragonabile a quella delle fibre di carbonio e circa 10 volte superiore a quella dell'acciaio), da un basso peso specifico (che comporta una maggior resistenza specifica rispetto al carbonio) e soprattutto da un'elevata resistenza a taglio e agli impatti (non a caso sono usate nei giubbotti antiproiettile). Le fibre aramidiche vengono applicate più alle murature e al legno che al cemento armato, a causa del loro modulo elastico non elevatissimo (circa 135 GPa, inferiore ad acciaio e fibre di carbonio), e della loro elevata duttilità, caratteristiche molto utili specie nel campo dei rinforzi sismici. La resistenza a taglio, inoltre, le rende meno sensibili all'eventuale presenza di irregolarità e spigoli, che, nelle applicazioni delle fibre di carbonio, devono invece essere rigorosamente smussati. Per contro, le fibre aramidiche presentano maggiore assorbimento di acqua (che provoca, a sua volta, fenomeni viscosi) e maggiore sensibilità a variazioni di PH e radiazioni UV, per cui devono essere adeguatamente protette o eventualmente applicate in combinazione con altri tipi di fibre (rinforzi ibridi).

**Freccia** [*subsidence*] Distanza verticale tra la chiave di volta e la corda di un arco.

**Impalcato** [*deck*] Nella tecnica delle costruzioni, struttura di copertura costituita da un tavolato sorretto da travi di legno, per lo più per formare un solaio o un soffitto; anche, l'insieme delle strutture lignee (o metalliche) di cantiere occorrenti all'esecuzione di opere murarie. [43]

**Incannicciatura** [*lathing*] Struttura di canne legate o intrecciate con cui si coprono le travi del soffitto e sulla quale si esegue l'intonacatura. [54]

**Laterizio** [*brick*] Materiale da costruzione, costituito sostanzialmente di argilla opportunamente lavorata e sottoposta a cottura. [55]

**LOD** [*LOD*] “Livello di definizione” o “Livello di sviluppo” (*Level Of Development*) che il modello BIM deve raggiungere secondo le necessità finali individuate dal committente del progetto. Per ciascuna fase del progetto è di fondamentale importanza che risulti ben definito il livello di dettaglio richiesto, sia per informazioni grafiche e geometriche, che di attributi. Nel modello BIM possono convergere molte informazioni, ed è importante quindi che risiedano nel modello quelle utili al committente ed utilizzate dai diversi professionisti che collaborano al progetto, nelle diverse fasi della

progettazione. Quindi il livello di dettaglio del modello BIM aumenta man mano che il progetto procede: nella prima fase le informazioni che caratterizzano il modello solitamente sono quelle relative alla situazione esistente, mentre nelle fasi successive si passa da un semplice modello di concetto ad un modello virtuale reso reale grazie ad un livello dettagliato e, di fatto, costruttivo. La pratica progettuale prevede in effetti uno sviluppo di informazioni e geometrie a diverse velocità, e questi aspetti possono provenire dai diversi collaboratori del team di progetto, e il loro sviluppo può passare dal committente, ai consulenti, al contraente e fornitori e, infine, di nuovo al committente. [56]

**Manicotto** [*sleeve*] Nome di pezzi in forma di cilindro cavo, con funzioni di protezione o di collegamento tra altri tubi o pezzi metallici. [57]

**Marmetta** [*marble tile*] Mattonella di graniglia utilizzata per il rivestimento di pavimenti.

**Materiale lapideo** [*stone material*] Di pietra, fatto di pietra, che ha la natura della pietra.

**Modulo di Young** [*modulus of elasticity* o *Young's modulus*] Detto anche *modulo di elasticità*, è una grandezza i cui valori dipendono dal materiale considerato e che esprime la propensione dei materiali ad allungarsi o ad accorciarsi a seguito dell'azione di una forza di carico. [58]

**Momento flettente** [*bending moment*] Coppia di due vettori forza, paralleli ed aventi verso opposto, aventi punti di applicazione a una distanza non nulla.

**Momento ribaltante** [*overturning moment*] Vedasi “Momento flettente”. La differenza sta nel fatto che tale momento porta ad un ribaltamento della struttura soggetta.

**Monoliticità** [from *monolithic*] Da “monolitico”, costituito di un sol blocco di pietra. *Estens.*, nella tecnica, di strutture fatte di parti unite assieme e non distaccabili. [43]

**Muratura a sacco** [*core walls*] Tipo di muratura che si ritrova usata di frequente per la costruzione di edifici storici e opere difensive, consistente in due paramenti (muri)

realizzati in pietra o mattoni paralleli e distanziati fra loro (aventi la funzione di cassero di contenimento e finitura superficiale), riempiti all'interno con una miscela di pietrisco e avanzi di lavorazione dei paramenti, legati da malta di cemento o di calce. Il nome deriva dal fatto che i due muri costituiscono una specie di sacco nel quale viene versato il riempimento. [59]

**Ondametro** [*wavemeter*] strumento per misurare la frequenza delle onde elettromagnetiche. [45]

**Palombella** [-] Travetto di legno fissato per una parte al puntone dell'orditura del tetto a falde e per l'altra sporgente oltre il filo esterno del muro all'altezza della linea di gronda, necessario per costruire la struttura portante della parte di tetto aggettante rispetto al muro esterno. [60]

**Percolamento** o percolazione [*percolation*] Lento passaggio di un liquido attraverso un solido ad azione filtrante, allo scopo di suscitare reazioni chimiche o di sciogliere sostanze contenute nella massa solida. [54]

**Piattabanda** [*lintel*] Elemento strutturale in muratura di mattoni o in pietra da taglio, usato per delimitare superiormente vani di porte o di finestre di luce, non molto grande, scaricando il peso della muratura sovrastante sui fianchi del vano. Per aumentare la stabilità delle p. in mattoni è opportuno eseguire l'intradosso con una piccola monta sagomandolo poi secondo l'orizzontale con aggiunta di malta. Impropriamente sono anche denominati p. gli architravi di ferro o cemento armato, posti sopra i vani aperti nei muri portanti; tali strutture non esercitano sulle spalle dei vani alcuna spinta orizzontale, ma trasmettono soltanto forze verticali. [18]

**Piedritto** [*pier*] In architettura, qualsiasi struttura resistente verticale, con funzione di sostegno.

**Polietilene** [*polyethylene*] Materiale plastico ottenuto per polimerizzazione dell'etilene, impiegato nella fabbricazione di materiali elettrici, di rivestimenti isolanti, di sacchetti ecc. [54]



**Pozzolana** [*pozzolana*] Materiale piroclastico incoerente, emesso dal vulcano nella fase esplosiva e come tale costituito principalmente da piccolissimi granuli vetrosi, più o meno porosi, a cui si accompagnano piccoli cristalli di minerali diversi. La composizione mineralogica delle p. è mal definita; molto varia è quella chimica: predominano la silice e l'allumina (60-90%); le p. hanno fondamentalmente carattere acido; sono in grado di fissare calce formando composti di tipo idraulico. Per questa loro proprietà, impastate con calce formano malte, adatte come leganti idraulici e resistenti all'azione di acque aggressive. [43]

**Pressoflessione** [*combined compressive and bending stress*] Sollecitazione (detta anche sforzo normale eccentrico) che nasce nella sezione trasversale di una struttura monodimensionale (trave o pilastro) quando questa è soggetta a uno sforzo assiale di compressione il cui punto di applicazione (centro di pressione) non coincide con il baricentro della sezione (sforzo normale semplice). Quando lo sforzo normale è di trazione si parla di tensoflessione. [50]

**Primer** [*primer*] Rivestimento applicato a una superficie per prepararla ad una vernice o ad un altro rivestimento o adesivo. [61]

**Pultrusione** [*pultrusion*] (dall'inglese pull + extrusion, ovvero "estrusione per trazione") è un processo continuo utilizzato per produrre profilati polimerici rinforzati. Le fibre di rinforzo, quali possono essere ad esempio la fibra di vetro e la fibra di carbonio, vengono prelevate dalla cantra (carrello con intelaiatura per sostenere i rocchetti di alimentazione dell'orditoio) e fatte passare attraverso un cosiddetto bagno di impregnazione dove vengono legate alla matrice della resina. Successivamente la trazione tira le fibre già impregnate della resina facendole passare attraverso un pettine con funzione di guida e imboccandole in una stazione di preformatura, che è una filiera non riscaldata che conferisce al profilato le dimensioni desiderate, schiacciando e compattando le fibre. Ora queste vengono fatte entrare in uno stampo riscaldato (*curing die*) avente la forma della sezione del prodotto finale desiderato. L'alta temperatura del die favorisce la polimerizzazione della resina stessa. Questo cambio di temperatura non è però immediato: all'interno del forno sono infatti presenti 3 zone a differente temperatura (zona di preriscaldamento, zona di gelificazione, zona a elevata temperatura). All'uscita dal forno il profilato viene trasportato fino ad una zona di taglio dove viene

opportunamente tagliato da lame che lo dimensionano. Alla fine della macchina di pultrusione troviamo il sistema di trazione, posto abbastanza lontano rispetto al forno di cura, in modo da permettere un raffreddamento ottimale al profilato, per evitare deformazioni in fase di ammorsamento. [62]

**Radiotrasparenza** [*radiolucency*] Trasparenza di un tessuto normale o patologico ai raggi X e  $\gamma$ . [43]

**Rasatura** [*skimming*] In edilizia, spianamento dell'intonaco grezzo. [54]

**Scaglia** [*chip*] Piccola scheggia di pietra o di marmo che si stacca dal blocco nello sgrossarlo o lavorarlo. [43]

**Scagliola** [*plaster of Paris*] Varietà di gesso puro, cotto, impastato con soluzione collosa e ridotto in finissima polvere, usato per modellare e per fare lavori di stucco. [63]

**Scapolo** [-] Pietra grezza, angolosa e irregolare, usata nelle costruzioni civili spec. per l'esecuzione di vespai di sottofondo.

**Sistema trilitico** [*trilithon*] o trilita (dal greco *tri* - tre, *lithos* - pietra) è una struttura formata da due grandi pietre disposte in verticale e una terza pietra appoggiata orizzontalmente sopra di esse, a formare una sorta di portale. È una struttura piuttosto comune nei monumenti megalitici; fra gli esempi più celebri si possono citare Stonehenge e i templi preistorici di Malta. Il sistema trilitico è inoltre alla base degli ordini architettonici classici, dove i sostegni verticali sono rappresentati dalla colonna (composta di capitello, fusto e base) e l'elemento orizzontale dalla trabeazione (costituita da cornice, fregio e architrave). Nel sistema trilitico si ha una trasmissione dei pesi in modo abbastanza semplice: il peso dell'elemento orizzontale si divide in due carichi equivalenti che si scaricano sui due piedritti. I piedritti, per effetto di questi pesi sovrastanti vengono ad essere sollecitati a compressione: ossia, il carico che li sovrasta determina sui piedritti un fenomeno di schiacciamento, fenomeno che viene contrastato dalla capacità di resistenza del materiale che costituisce le strutture. [43] [64] [65] [66] L'elemento orizzontale, rispetto ai piedritti, viene sollecitato da una diversa sollecitazione, che prende il nome di flessione: ossia, dato che l'elemento è appoggiato solo agli estremi, al centro tende ad inflettersi verso il basso. Per effetto di ciò, all'interno avremo che le

fibre superiori tendono a schiacciarsi – sono quindi soggette a compressione – mentre le fibre inferiori tendono a dilatarsi – sono cioè soggette a trazione. [67]

**Staffatura** [*bracket*] Nelle costruzioni di legno e di ferro, elemento di forma diversa destinato a collegare o tenere unite le parti di una struttura; si usa in particolare nelle opere di legno, di carpenteria o di mobilio, per rafforzare l’innesto dei vari elementi o assicurarne il collegamento, come nei nodi di una capriata o di un’impalcatura. Si chiama staffatura il sistema di consolidamento di una struttura muraria, consistente nell’applicazione di staffe metalliche nelle parti soggette a sollecitazioni pericolose. [43]

**Superficie di rotazione o di rivoluzione** [*surface of rotation or revolution*] In geometria, una superficie ottenuta ruotando una curva (detta *generatrice* o *profilo*) attorno ad una retta (*l'asse di rotazione*).

**Termocamera** [*thermal imaging camera*] telecamera o fotocamera a raggi infrarossi che permette di individuare al buio persone o cose grazie al calore che emettono. [45]

**Tissotropico** [*thixotropic*] Da *tissotropia*, fenomeno per cui certe masse gelatinose possono passare, se agitate o sottoposte a vibrazioni, allo stato liquido, coagulando di nuovo al cessare dell'azione meccanica. [63]

**Tondino** [*rebar*] Profilato di ferro a sezione circolare, di piccolo diametro, usato come armatura nel cemento armato. [54]

**Trasduttore** [*transducer*] Nel linguaggio tecnico e scientifico, apparecchio o dispositivo per la trasduzione di energia, con o senza conversione di questa in una forma diversa.

**Trefolo** [*strand*] Insieme di fili intrecciati che costituisce una fune o un cavo metallico.

**Unità tecnologica** [*technological unit*] Insieme di elementi tecnici che rappresentano funzioni finalizzate al soddisfacimento di esigenze dell’utenza. [68]

**Uso Fiume** [-] Tipologia di smusso delle travi lignee, caratterizzata dal fatto che le dimensioni esterne della sezione trasversale della trave rimangono costanti lungo tutta la lunghezza della stessa. Si contrappone alle travi ad uso Trieste, in quanto in quest'ultime le dimensioni esterne della sezione trasversale seguono l'affusolarsi del ceppo.

**Volta** [*vault*] Struttura di copertura di ambienti architettonici, caratterizzata dalla curvatura, concava all'interno, delle sue superfici. Le v. si distinguono in base alla forma geometrica della superficie d'intradosso. Quando tale superficie è unica la v. si dice semplice, quando invece è costituita da più superfici variamente intersecantisi è detta composta. [43]

**Volta a botte** [*barrel vault*] Uno tra i sistemi più semplici e diffusi di copertura non piana, tipica dell'architettura mediterranea, utilizzata per coprire spazi più o meno ampi, di forma genericamente rettangolare, evitando l'uso di manufatti in legname come travi, correnti, tavole. La volta a botte, che rientra nella grande categoria delle volte semplici (costituite cioè da superfici appartenenti ad un unico solido, a differenza delle volte complesse, costituite da superfici appartenenti a corpi solidi diversi), è un elemento tridimensionale, ottenuto geometricamente, dallo sviluppo di una superficie nello spazio, più precisamente dalla traslazione o rotazione di una curva direttrice (profilo dell'arco) lungo una retta generatrice. La volta a botte, quindi, deriva dall'arco, che è una struttura bidimensionale: in sostanza, l'unione di più archi nel senso dello spessore (definito "generatrice") dà luogo alla volta. In linea generale la volta a botte, che rientra nelle superfici coniche, nasce, come tutte le strutture voltate, per coprire edifici con struttura portante in muratura o pietra, e pertanto essa stessa ne assume il medesimo impianto strutturale. Non dividendosi in campate (spazio tra due o più elementi portanti di una struttura), la volta a botte non ha la necessità di avere un rapporto contenuto tra lunghezza e larghezza, ma può estendersi teoricamente all'infinito in lunghezza (o profondità) data una certa apertura (campo o luce). [69]

## Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.1</b> - Murature antiche di spessore diverso, figura tratta da [2] .....   | 9  |
| <b>Figura 1.2</b> - Sezione di un esempio di edificio storico in muratura, immagine tratta da [3].....   | 15 |
| <b>Figura 1.3</b> - Volta a botte (sinistra) e volta a sesto ribassato (destra), immagine tratta da [5] .....  | 17 |
| <b>Figura 1.4</b> - Volta a vela, immagine tratta da [5] .....   | 18 |
| <b>Figura 1.5</b> – Unghie e fusi cilindrici, immagine tratta da [6] .....   | 19 |
| <b>Figura 1.6</b> - Volta a padiglione, immagine tratta da [5] .....   | 20 |
| <b>Figura 1.7</b> - Volta a crociera, immagine tratta da [5] .....   | 21 |
| <b>Figura 1.8</b> - Volta a schifo, immagine tratta da [7] .....   | 22 |
| <b>Figura 1.9</b> - Sezione di scala costruita con sistema romano, immagine tratta da [8] .....  | 23 |
| <b>Figura 1.10</b> – Pianta di scala costruita con sistema romano, immagine tratta da [8] .....  | 24 |
| <b>Figura 1.11</b> - Formazione progressiva di un arco di scarico al di sopra di una piattabanda (da <i>a</i> a <i>c</i> ), immagine tratta da [9] ..... | 27 |
| <b>Figura 2.1</b> - Tipica composizione di un solaio di legno, immagine tratta da [11] .....   | 40 |
| <b>Figura 2.2</b> – Pianta e sezione di solaio a semplice orditura, immagine tratta da [12] .....  | 41 |
| <b>Figura 2.3</b> - Solaio a doppia orditura, immagine tratta da [12] .....  | 42 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.4</b> - Travi secondarie in asse fra di loro, immagine tratta da [12] .....  | 43 |
| <b>Figura 2.5</b> - Travi secondarie sfalsate tra di loro, immagine tratta da [12] .....   | 43 |
| <b>Figura 2.6</b> - Sezione di trave principale con intagli per l'appoggio delle travi secondarie in solaio a doppia orditura, immagine tratta da [12] ..... | 44 |
| <b>Figura 2.7</b> - Scarpa in lamierino d'acciaio, immagine tratta da [13] .....   | 45 |
| <b>Figura 3.1</b> - Porzione di muratura portante in mattoni pieni .....   | 47 |
| <b>Figura 3.2</b> - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "muratura portante" .....   | 48 |
| <b>Figura 3.3</b> - Volta a botte in mattoni pieni .....   | 49 |
| <b>Figura 3.4</b> - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "volta a botte" .   | 50 |
| <b>Figura 3.5</b> - Intradosso di solaio in legno a doppia orditura.....   | 50 |
| <b>Figura 3.6</b> - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "intradosso ligneo" .....   | 51 |
| <b>Figura 3.7</b> - Intradosso di solaio in legno a doppia orditura.....   | 52 |
| <b>Figura 3.8</b> - QRcode dello stato di fatto dell'unità tecnologica "intradosso ligneo" .....   | 53 |
| <b>Figura 4.1</b> - Evoluzione dello schiacciamento di una porzione di muratura storica all'aumento delle tensioni verticali, immagine tratta da [18] .....  | 56 |
| <b>Figura 4.2</b> - Distacco tra pareti ortogonali e lesioni sul solaio ordito parallelamente alla parete di facciata, immagine tratta da [19].....          | 60 |
| <b>Figura 4.3</b> - Formazione di arco di scarico sopra piattabanda e lesione sotto trave per schiacciamento a destra, immagine tratta da [20] .....         | 61 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 4.4</b> - Spinta delle volte sulla muratura, con individuazione della massima inflessione della stessa e del centro di spinta a seconda del livello, immagine tratta da [21]<br>..... | 62 |
| <b>Figura 4.5</b> - Depressione su volta causata dal distacco della parete di facciata, immagine tratta da [21] .....   | 63 |
| <b>Figura 4.6</b> - Disgregazione del paramento murario, immagine tratta da [22] ...  | 67 |
| <b>Figura 4.7</b> - Disgregazione del paramento murario, immagine tratta da [23] ...  | 67 |
| <b>Figura 4.8</b> - Ribaltamenti rigidi, immagine tratta da [24] .....  | 68 |
| <b>Figura 4.9</b> - Ribaltamento con trascinamento, immagine tratta da [25] .....   | 69 |
| <b>Figura 4.10</b> - Flessione orizzontale di parete ben ancorata, immagine tratta da [25]<br>.....   | 70 |
| <b>Figura 4.11</b> - Flessione orizzontale di parete ben ancorata, immagine tratta da [25]<br>.....   | 70 |
| <b>Figura 4.12</b> - Flessione verticale, schema del cinematismo, immagine tratta da [25]<br>.....  | 71 |
| <b>Figura 4.13</b> - Flessione verticale, immagine tratta da [25] .....   | 72 |
| <b>Figura 4.14</b> - Flessione verticale, immagine tratta [25].....   | 72 |
| <b>Figura 4.15</b> - Comportamento nel piano di parete senza catene, immagine tratta da [26].....   | 73 |
| <b>Figura 4.16</b> - Comportamento nel piano di parete senza catene, immagine tratta da [27].....   | 74 |
| <b>Figura 4.17</b> - Taglio per fessurazione diagonale in fasce di piano, immagine tratta da [28].....  | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 4.18</b> - Taglio per fessurazione diagonale in maschi murari, immagine tratta da [28].....  | 76  |
| <b>Figura 4.19</b> - Taglio per fessurazione diagonale in maschi murari, immagine tratta da [28].....  | 76  |
| <b>Figura 4.20</b> - Taglio per fessurazione diagonale in maschi murari, immagine tratta da [28].....  | 77  |
| <b>Figura 4.21</b> - Taglio per scorrimento, immagine tratta da [29] .....   | 78  |
| <b>Figura 4.22</b> - Taglio per scorrimento, immagine tratta da [29] .....   | 78  |
| <b>Figura 4.23</b> - Rottura a pressoflessione complanare, immagine tratta da [28] ..  | 79  |
| <b>Figura 4.24</b> - Fessurimetro da parete, immagine tratta da [31] .....   | 85  |
| <b>Figura 5.1</b> - Estremità di catena ancorata con piastra e bullone, immagine tratta da [32].....   | 90  |
| <b>Figura 5.2</b> - Estremità di catena ancorata con capochiave e paletto, immagine tratta da [33] .....   | 91  |
| <b>Figura 5.3</b> - Sezione di catena aderente a muratura con profilo a L in corrispondenza di ancoraggio con piastra in caso di esterno accessibile, immagine tratta da [34]..... | 92  |
| <b>Figura 5.4</b> - Sezione di catena aderente a muratura con profilo a L in corrispondenza di ancoraggio in caso di esterno inaccessibile, immagine tratta da [34]92              |     |
| <b>Figura 5.5</b> - Fasi di un materiale composito .....   | 93  |
| <b>Figura 5.6</b> - Fiocchi in fibra di vetro (sopra) e fibra di carbonio (sotto), immagine tratta da [35] .....   | 101 |
| <b>Figura 5.7</b> - Esempio di rimozione di mattoni degradati, immagine tratta da [37] .....   | 106 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 5.8</b> - Sostituzione di mattoni degradati con mattoni sani, immagine tratta da [37].....                            | 106 |
| <b>Figura 5.9</b> - Cordolo in c.a., immagine tratta da [38] .....  | 109 |
| <b>Figura 5.10</b> - Cordolo in muratura armata, immagine tratta da [38] .....  | 110 |
| <b>Figura 5.11</b> - Particolare costruttivo di cordolo in acciaio collegato a muratura e solaio, immagine tratta da [38] ..... | 111 |
| <b>Figura 5.12</b> - Prospetto di architrave con profili metallici, immagine tratta da [39] .....                               | 113 |
| <b>Figura 5.13</b> - Sezione di architrave con profili metallici, immagine tratta da [39] .....                                 | 113 |
| <b>Figura 7.1</b> – Vista in sezione della volta a botte in modalità “ombreggiato” (Autodesk Revit) .....                       | 119 |
| <b>Figura 7.2</b> – Modellazione sospesa degli elementi di rinforzo della volta (Autodesk Revit) .....                          | 120 |
| <b>Figura 7.3</b> – Irrealismo della texture del materiale muratura in modalità “realistico” (Autodesk Revit) .....             | 121 |
| <b>Figura 7.4</b> – Vista 3D del modello in modalità “ombreggiato” (Autodesk Revit) .....                                       | 122 |
| <b>Figura 7.5</b> - Finestra d’impostazione dei parametri per l’esportazione di un’animazione (Navisworks).....                 | 124 |
| <b>Figura 7.6</b> – QRcode del video elaborato col comando Animator .....   | 125 |
| <b>Figura 7.7</b> – Sovrapposizione degli strati senza interferenze (Autodesk Revit) .....                                      | 126 |
| <b>Figura 7.8</b> - Sovrapposizione degli strati con interferenze (Navisworks) .....  | 126 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 7.9</b> - QRcode del video con l'apparizione degli strati fluidi dal basso . | 127 |
| <b>Figura 7.10</b> – Perdita delle stratigrafie (SketchUp).....                        | 128 |
| <b>Figura 7.11</b> – Conservazione delle stratigrafie (SketchUp) .....                 | 129 |
| <b>Figura 7.12</b> – Interfaccia della funzione Timeliner (Navisworks) .....           | 130 |
| <b>Figura 8.1</b> - Scomposizione gerarchica del problema nell'AHP.....                | 134 |
| <b>Figura 8.2</b> - Scomposizione gerarchica del problema della modellazione 3D        | 136 |
| <b>Figura 8.3</b> - Scomposizione gerarchica del problema dell'elaborazione video      | 140 |
| <b>Figura 8.4</b> - Scomposizione gerarchica del problema del passaggio dei file ..    | 144 |

## Indice delle tabelle

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tabella 6.1</b> - Descrizioni dei codici degli elaborati .....  | 116 |
| <b>Tabella 8.1</b> - Scala di valutazione a 9 punti .....  | 134 |
| <b>Tabella 8.2</b> - Matrice di confronto fra criteri per la modellazione 3D.....  | 137 |
| <b>Tabella 8.3</b> - Matrice di confronto col criterio "apprendibilità" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato B .....   | 138 |
| <b>Tabella 8.4</b> - Matrice di confronto col criterio "intuitività" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato C .....      | 138 |
| <b>Tabella 8.5</b> - Matrice di confronto col criterio "interoperabilità" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato D ..... | 138 |
| <b>Tabella 8.6</b> - Matrice di confronto col criterio "tempo" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato E.....             | 138 |
| <b>Tabella 8.7</b> - Matrice di confronto col criterio "risultato" per la modellazione 3D e relativi autovettore V e autovettore normalizzato F .....        | 138 |
| <b>Tabella 8.8</b> - Matrice di confronto fra criteri per l'elaborazione video .....   | 141 |
| <b>Tabella 8.9</b> - Matrice di confronto col criterio "apprendibilità" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato B..... | 142 |
| <b>Tabella 8.10</b> - Matrice di confronto col criterio "intuitività" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato C .....  | 142 |
| <b>Tabella 8.11</b> - Matrice di confronto col criterio "realismo" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato D.....      | 142 |
| <b>Tabella 8.12</b> - Matrice di confronto col criterio "tempo" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato E .....        | 142 |

**Tabella 8.13** - Matrice di confronto col criterio "risultato" per la elaborazione video e relativi autovettore V e autovettore normalizzato F ..... 142

**Tabella 8.14** - Matrice di confronto fra criteri per il passaggio dei file..... 144

**Tabella 8.15** - Matrice di confronto col criterio " intuitività " per il passaggio dei file e relativi autovettore V e autovettore normalizzato B..... 145

**Tabella 8.16** - Matrice di confronto col criterio "tempo" per il passaggio dei file e relativi autovettore V e autovettore normalizzato C..... 145

**Tabella 8.17** - Matrice di confronto col criterio "risultato" per il passaggio dei file e relativi autovettore V e autovettore normalizzato D..... 145

## Riferimenti normativi

La presente tesi si ripropone di analizzare interventi strutturali su edifici esistenti, senza però andare a variare quella che era la struttura preesistente. Si tratta quindi solo di interventi di riparazione o interventi locali.

A tal proposito si è quindi fatto riferimento solamente a interventi del tipo descritto nelle NTC 2018 al § 8.4.1.

Sul supplemento ordinario n. 5 alla Gazzetta ufficiale n. 35 dell'11 febbraio 2019.

Per quanto riguarda le caratteristiche e le proprietà della muratura, si è fatto riferimento al § 11.10., sempre delle NTC 2018.

Per tutte le indicazioni non trovate all'interno delle NTC invece, si è fatto riferimento alle tipologie di normative e linee guida indicate al capitolo 12 delle NTC.

Ad esempio, un'altra normativa a cui si è fatto più volte riferimento, per quanto riguarda specificatamente i materiali fibrorinforzati, è stato il CNR-DT 200 R1/2013, ovvero le *“Istruzioni per la Progettazione, l'esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”*. Si è fatta particolare attenzione al capitolo 5 di tale documento.

Sempre in materia di materiali compositi si è fatto riferimento rispettivamente, per quanto riguarda gli FRP, alle *Linee Guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di Strutture di cemento armato, cemento armato precompresso e murarie mediante FRP*, approvato durante la riunione del 24 luglio 2009 dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Mentre per gli FRCM si è fatto riferimento alle *Linee Guida per l'identificazione, la qualificazione ed il controllo di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica, denominati FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), impiegati per il consolidamento strutturale*, approvate con Decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n. 1 dell'8 gennaio 2019.

UNI 8290: Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.

Per quanto riguarda l'elaborazione degli elaborati grafici, ovvero delle schede e delle tavole, si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 3098:2015 (*Documentazione tecnica di prodotto – Scrittura*) per la scrittura, alla UNI EN ISO 128-20:2002 (*Disegni tecnici - Principi generali di rappresentazione - Convenzioni di base delle linee*) per le linee e alla UNI EN ISO 5457:2010 (*Documentazione tecnica di prodotto - Formati e disposizione degli elementi grafici dei fogli da disegno*) per la squadratura e la piegatura dei fogli.

Regio Decreto Legge del 22 novembre 1937, n. 2105, per la definizione delle caratteristiche che un edificio in muratura deve avere per poter essere definito di terza classe.

## Ringraziamenti

Innanzitutto, ringrazio il prof. Caldera per l'estrema pazienza e disponibilità nei miei confronti nonché per la sua pacatezza durante le revisioni.

Ringrazio l'ing. Villa per le dritte fornitemi su BIM e affini.

Un sentito ringraziamento va a Paolo Roffina per la sua cordiale disponibilità e per avermi accolto in azienda, insieme ad Andrea e Nicola, per la mia esperienza di tirocinio con estrema cordialità e amicizia. Grazie a tutti e tre per le divertenti e formative giornate passate assieme.

Ringrazio poi gli "Ignegnéri", per avermi accompagnato nei lavori di gruppo svolti durante la magistrale e per le giornate e nottate passate assieme. Anche se ci sono stati momenti di tensione, alla fine ce l'abbiamo fatta. L'unione fa la forza.

In particolare, vorrei ringraziare Nik. Un capitolo di questa tesi è anche merito del suo ingegno.

Voglio ringraziare anche Roberto, che mi è stato di guida e compagnia durante l'esperienza di tirocinio e durante la stesura della tesi. Grazie mio caro "tutor aziendale".

Ringrazio anche Mauro. Il tuo aiuto è stato fondamentale durante il corso di Sismica.

Ringrazio Rodrigo, Angelica, Sofia, Elena e Chiara. Con voi è sempre fantastico ritrovarsi, ma è anche solo stupendo scriversi per messaggio o scrivere assieme messaggi a persone con un certo ruolo istituzionale. Grazie per i bei momenti passati assieme; spero che comunque la distanza non ci separi mai.

Grazie ad Albi, oltre che per la sua amicizia, anche per avermi aiutato con i QRcode di questa tesi.

Voglio ringraziare tutti gli "Informatici", amici prima di Albi e poi miei, per NON avermi aiutato durante il tirocinio, a parte Mauro. Grazie Mauro.

E poi devo ringraziare Marco. In questo ragazzo casertano, che si dichiara napoletano, ma che ha accento romano, non ho trovato solo un amico, ho trovato una persona speciale. Una persona che mi è stata accanto in molti momenti difficili (di cui, aveva ragione lui, adesso stiamo ridendo), ma anche in molti momenti di ordinario relax. Ha saputo darmi consigli importanti e ascoltarmi ripetere prima degli esami orali fino a notte inoltrata, sapendo che però io avrei saputo ricambiare adeguatamente, distraendolo prepotentemente nei momenti in cui avrebbe invece avuto bisogno di maggiore concentrazione. Anche se mi devi molti bicchieri d'acqua e caffè, grazie di tutto vecchio amico, grazie di esserci. Cordialmente ti porgo i miei ringraziamenti.

Ma la mia esperienza al Politecnico, almeno in questi ultimi due anni, non sarebbe stata la stessa cosa senza una persona speciale: Agne. La persona senza la quale sicuramente a quest'ora starei preparando ancora una sfilza di esami; non so se ne rende conto o non se ne rende conto, ma io sì. Sei stata la mia salvezza, il mio metodo di studio fatto a persona. Studiando "assieme" sicuramente ci stressavamo ma non ci annoiavamo, era un continuo sclero ma anche un continuo ridere. È stata dura, ma ce l'abbiamo fatta alla grande direi. Quindi grazie per aver condiviso con me questa esperienza, grazie per avermi insegnato molti nuovi modi di dire (almeno 67) e grazie a te, per i nuggets. Comunque sia... grazie. Così, in generale.

E dopo aver ringraziato gli amici conosciuti al Politecnico, devo ringraziare gli amici di una vita.

Grazie a Luci, il mio amato compagno di banco delle superiori. Grazie per la tua attenzione ad alcuni aspetti di questa tesi e grazie per il tuo affettuoso annale bullismo.

Voglio ringraziare ancora una volta Andrea, un amico che purtroppo vedo di rado, ma sempre volentieri. Non solo mi avevi aiutato durante la triennale, ma anche durante questo ultimo percorso hai saputo darmi importanti consigli. Grazie.

Poi voglio ringraziare la mia grande amica Bina, una delle donne più forti che conosca. Sei un grande esempio di forza d'animo e di educazione. Inoltre, sei un'ottima allieva musicale e una grande amica, sempre disponibile. Anche la tua amicizia è stata un contributo importante per il conseguimento di questo risultato. Grazie.



Poi, anche se non vorrei farlo, devo ringraziare gli “ammazza-balotte”, o “le sillabe”, come preferisce chiamarli mio padre: Albi, Anto, Corra, Fede, Fra, Gege, e Sisa. Siete una banda di derelitti, disadattati e irrefrenabili cialtroni (come me), che da molti anni allietano le mie giornate. Sicuramente vi ritengo fra gli amici più cari che ho. Grazie.

Uno speciale ringraziamento va alla BC, che è composta da amici fraterni e geniali. Siamo cresciuti assieme e questo mio risultato lo dedico anche a voi che mi siete sempre stati accanto.

Dopodiché, ringrazio i miei parenti, vicini e lontani. Nonni, zii e cugini avete gioito ad ogni mio risultato, anche il più piccolo, e ve ne sono grato. Mi ha dato la forza di andare avanti fino in fondo.

Tra i parenti ringrazio anche Lili, che ormai è di casa. Grazie per il tuo affetto, per avermi aiutato nei momenti in cui avevo bisogno di tempo per studiare e grazie perché ogni volta che ottengo un risultato e te lo comunico, non so perché, vedo l’orgoglio nei tuoi occhi e questo mi fa un immenso piacere.

Grazie a mio fratello Simone. Grazie per avermi aiutato quando avevo bisogno di un ottimo traduttore, come ad esempio per l’abstract di questa tesi, e grazie per avermi sopportato e supportato in tutti questi anni come fratello, forse non perfetto, ma fratello. Sono contento del percorso che hai intrapreso e dei risultati eccellenti che stai conseguendo, come sempre hai fatto. Invidio la tua abilità nello studio; forse ne avessi avuta altrettanta anche io, questa laurea l’avrei ottenuta prima e meglio, ma va bene così. Anche se gli studi ci separano sappi che ti voglio un bene immenso.

Infine, voglio ringraziare i miei genitori, Silvana e Marco, a loro devo tutto. Loro sono quelli che mi hanno messo al mondo e che mi hanno accompagnato sempre fino a questo traguardo importante. Sono le uniche persone da cui ormai accetto lezioni di vita e le uniche che stimi pienamente. Penso che non avrei mai potuto chiedere dei genitori migliori; mi ritengo molto fortunato. Grazie di esistere.

Vorrei aggiungere anche un piccolo ringraziamento alla mia “sorellina”, il mio cane Peggy. Lei, forse inconsapevolmente, mi ha saputo distrarre da momenti tristi o anche solo noiosi e quindi ha dato anche lei il suo contributo a importante questo risultato.

Vorrei aggiungere, infine, delle dediche. Infatti, vorrei dedicare questo mio traguardo a mio nonno Orlando, cercando di immaginare che cosa avrebbe detto di suo nipote che ora oltre ad essere “l’uomo coi baffi” si accinge ad essere “ingegnere”.

E infine vorrei dedicare tutto questo alla mia Lunetta, che quasi un anno fa è andata a scodinzolare in cielo.

Grazie.

## **Allegati**

Di seguito vengono riportati gli allegati della presente tesi. Si tratta di schede antologiche e di tavole grafiche. Ogni unità tecnologica può essere rinforzata con diverse tipologie di procedure tecniche d'intervento. Per ogni tipo di procedura sono state redatte quindi una scheda e una tavola.

Ogni scheda antologica si occupa di spiegare sommariamente l'intervento ed elencare l'ordine procedurale delle fasi che lo compongono. In ogni scheda sono riportate una vista 3D del modello esploso e uno spaccato assonometrico del modello a seguito dell'intervento, per la facile individuazione di tutti gli strati e gli elementi coinvolti nell'intervento.

Ogni tavola grafica invece riporta diverse tipologie di viste (piante, sezioni, assonometrie, ecc.) a seconda dell'unità tecnologica e quindi sia della sua tipologia che della sua dimensione. Ogni elemento di rinforzo è stato disegnato in colore rosso ed è indicato da etichette che riportano ad una legenda esplicativa.

Sia le schede che le tavole contengono un QRcode che, se inquadrato con appropriato dispositivo mobile, permette di accedere al modello tramite l'applicazione A360 dell'Autodesk o di visionare il video dimostrativo dell'iter procedurale su YouTube.