

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA*  
**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA**

**TESI DI LAUREA**

**in**

**Recupero e conservazione degli edifici**

**Chiesa di San Paolo in Monte a Bologna:  
un criterio di classificazione BIM come ausilio alla  
progettazione della messa in sicurezza.**

CANDIDATO

Simone Tamburri

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Giovanni Mochi

CORRELATORI:

Prof. Ing. Simone Garagnani  
Arch. Caterina Poggioli

Anno Accademico 2015/16

Sessione III







*Ai miei nonni*



## *Ringraziamenti*

*Desidero ringraziare il prof. Ing. Giovanni Mochi che ha seguito con disponibilità e grande interesse la redazione del seguente lavoro, guidandolo con sapienza. Un sentito ringraziamento anche all'Ing. Simone Garagnani per tutto l'aiuto fornito durante le fasi di lavoro, per l'entusiasmo dimostrato e per la grandissima disponibilità mostrata durante tutto il percorso di studi. Un ringraziamento particolare all'Arch. Caterina Poggioli, che ha iniziato questo lavoro, per avermi dato accesso a tutta la documentazione da lei raccolta e prodotta, consigliato durante il lavoro e seguito con coinvolgimento.*

*Un ringraziamento va anche ai frati del convento dell'Osservanza, in particolar modo a Frate Daniele e Frate Franco, i quali ci hanno sempre accolto calorosamente durante i numerosi sopralluoghi ed aiutato nella ricerca presso il loro archivio storico.*

*Proseguo con il personale dell'Archivio di Stato di Bologna, della Biblioteca dell'Archiginnasio e della Biblioteca di San Giorgio in Poggiale.*

*Desidero ringraziare inoltre i miei tutti i miei compagni di corso, specialmente: Sara, Silvia, Marti, Vale S., Anna, Bonny, Flos. Un ringraziamento particolare va a Vale R. e Ricky con i quali ho condiviso le ultime fatiche di Scienza e Tecnica. Un enorme ringraziamento va a quello che è stato recentemente definito lo "Zoccolo duro" (cit.): Deme, Fede e France. Grazie al loro aiuto sono riuscito ad arrivare fin qua e spero arriveremo ben oltre.*

*Ringrazio tutti gli amici di sempre, assieme ai quali sono cresciuto: Nico, Riky, Boni, Pillo, Daddy, Mirro, Giamma, Giaka, Paccia, Giorgia, Giulia, Vale B., Vale F., Alessia, Silvia, Alice,*

*Meri, Elisa, Andrea e Anna.*

*Ringrazio inoltre Laffi, Benfe, Simo, Mitch, Ansa e Cervo con i quali ci siamo divertiti negli anni del liceo e, nonostante siamo un po' sparsi, continuiamo a farlo.*

*Proseguo ringraziando le amicizie più recenti, ma non per questo meno importanti: Ste, Sofy, Marti, Taso, Giulia, Alberto, Totta, Gio, Sofi, Luca, Eli.*

*Desidero ringraziare la mia fidanzata Mary, con tutta la sua famiglia Aurora, Santino, Carlo e Gabriella. Lei ha continuato ad incoraggiarmi in questi ultimi, eterni, anni di studio e pazientemente aspettato.*

*Ringrazio la mia famiglia tutta. La "zia Nina", gli zii Maria, Massimo, Patrizia e Dante, in particolar modo quest'ultimo per il costante supporto strumentale e soprattutto di conoscenze. I miei genitori che, come han detto loro stessi, mi hanno "supportato e sopportato", spronato, educato, amato e mai fatto mancare nulla.*

*Infine ringrazio i miei nonni, in particolare la "nonna Nora" e "il nonno (Giovanni)", ai quali dedico questo lavoro.*

*Scusate l'attesa.*



# Indice

<b>Elenco delle immagini</b>	<b>xiii</b>
------------------------------	-------------

<b>Abstract</b>	<b>xix</b>
-----------------	------------

## Parte 1

<b>Capitolo 1 - Introduzione</b>	<b>3</b>
----------------------------------	----------

1.1 - Definizione del problema	4
--------------------------------	---

1.2 - Obiettivi	5
-----------------	---

1.3 - Metodologia	7
-------------------	---

1.4 - Sintesi dei capitoli	8
----------------------------	---

<b>Capitolo 2 - Building Information Modeling</b>	<b>13</b>
---	-----------

2.1 - Panoramica del capitolo	14
-------------------------------	----

2.2 - Introduzione	14
--------------------	----

2.3 - Definizione Building Information Modeling	17
---	----

2.4 - Evoluzione della modellazione digitale	20
--	----

2.5 - Modellazione parametrica di edifici	25
---	----

2.6 - Classificazione dei software BIM	29
--	----

2.7 - Punti di forza e criticità dell'approccio BIM	30
---	----

2.8 - Applicazioni del processo BIM al patrimonio edilizio esistente	34
---	----

<b>Capitolo 3 - San Paolo in Monte</b>	<b>39</b>
--	-----------

3.1 - Panoramica del capitolo	40
-------------------------------	----

3.2 - Prime presenze francescane a Bologna	40
3.3 - Insediamento dei Frati Minori Osservanti	43
3.4 - Il Cinquecento	52
3.5 - Il Seicento e il Settecento	53
3.6 - Invasione Napoleonica e ricostruzione	58
3.7 - Architettura della Chiesa di San Paolo in Monte	63
<b>Capitolo 4 - Tecniche di rilievo</b>	<b>71</b>
4.1 - Panoramica del capitolo	72
4.2 - Laser scanner	72
4.3 - Fotogrammetria digitale	77
<b>Capitolo 5 - Autodesk Revit</b>	<b>81</b>
5.1 - Panoramica del capitolo	82
5.2 - Caratteristiche di Autodesk Revit	82
5.3 - Flusso di lavoro	85
5.4 - Famiglie	86
5.5 - Organizzazione del file di progetto	89
5.6 - Concetti di tipo e istanza	92
5.7 - Vincoli	93
<b>Parte 2</b>	
<b>Capitolo 6 - Modellazione Semantica</b>	<b>97</b>
6.1 - Panoramica del capitolo	98
6.2 - Definizione	98
6.3 - Modellazione semantica	101
<b>Capitolo 7 - Realizzazione del modello</b>	<b>105</b>

7.1 - Panoramica del capitolo	106
7.2 - Modellazione degli elementi principali	106
7.3 - Creazione delle famiglie	110
7.4 - Modellazione dei decori	130
7.5 - Ulteriori difficoltà incontrate	132
<b>Capitolo 8 - Documentazione del modello</b>	<b>135</b>
8.1 - Panoramica del capitolo	136
8.2 - Individuazione ed inserimento delle informazioni	136
8.3 - Realizzazione delle viste di disegno	142
<b>Parte 3</b>	
<b>Capitolo 9 - Rilievo dello stato di danno</b>	<b>147</b>
9.1 - Panoramica del capitolo	148
9.2 - Teoria dei macroelementi	148
9.3 - Linee guida per la valutazione del rischio sismico	155
9.5 - Rilievo dello stato di danno	184
<b>Capitolo 10 -Inserimento del rilievo delle lesioni</b>	<b>187</b>
10.1 - Panoramica del capitolo	188
10.2 - Processo di creazione dei macroelementi	188
10.3 - Inserimento delle lesioni	193
10.4 - Creazione degli abachi	200
10.5 - Definizione dell'indice di vulnerabilità statica	211
<b>Capitolo 11 -Conclusioni</b>	<b>219</b>
11.1 - Panoramica del processo proposto	220
11.2 - Potenzialità del processo BIM	221

11.3 - Criticità e sviluppi futuri	223
<b>Bibliografia</b>	<b>227</b>
<b>Allegato A</b>	<b>I</b>
<b>Allegato B</b>	<b>XXV</b>

# Elenco delle immagini

Fig. 1 - Una serie di funzioni per la generazione di forme regolari (Eastman, 2011, pag. 33)	21
Fig. 2 - Struttura concettuale della famiglia di un oggetto muro (Eastman, 2011, pag. 41)	23
Fig. 3 - Tabella delle famiglie standard disponibili nei software BIM (Eastman, 2011, pag. 47)	27
Fig. 4 - Principali formati di interscambio (Eastman, 2011, pag. 109)	34
Fig. 5 - Foto della facciata della chiesa di San Paolo in Monte (Arch. Poggioli, 2016)	40
Fig. 6 - Disegno della città di Bologna, 1773 (A.S.B. 2/6064, n°1)	41
Fig. 7 - “La vecchia chiesa dell’Osservanza”, collezione d’arte Cassa di Risparmio (G. Fancelli 1795)	46
Fig. 8 - Pianta di tutta la clausura del convento (Archivio S. Paolo in Monte, Lib. VI, Vol. I, n. 7)	49
Fig. 9 - Interno della chiesa di S. Paolo in Monte, Museo dell’Osservanza (N. Descarani, 1836)	52
Fig. 10 - Pianta del piano terra del covento, anno 1773 (A.S.B. 11/6073, n. 9)	54
Fig. 11 - Pianta del piano primo del convento, anno 1773 (A.S.B. 11/6073, n. 7)	55
Fig. 12 - Pianta esplicativa degli ampliamenti e ricostruzioni (Poli, 1999, Pag. CXI)	57
Fig. 13 - Ricostruzione assonometrica del convento prima dell’800 (Poli, 1999, Pag. CXIV)	59
Fig. 14 - Veduta della nuova chiesa di S. Paolo in Monte, museo dell’Osservanza (G. Termanini)	61
Fig. 15 - Particolare della decorazione originale (Arch. Poggioli, 2016)	69
Fig. 16 - Particolare della decorazione originale (Arch. Poggioli, 2016)	69
Fig. 17 - Esempio di Laser Scanner, Faro Focus3D X330 HDR (www.faro.com)	73
Fig. 18 - Nuvola di punti ottenuta dal rilievo (Ing. Garagnani, Arch. Poggioli, 2016)	74
Fig. 19 - Registrazione della nuvola di punti	77
Fig. 20 - Logo Autodesk Revit 2016 (Autodesk)	83
Fig. 21 - Esempio di griglia strutturale e livelli	86
Fig. 22 - Ambiente di lavoro dell’editor di famiglie	88
Fig. 23 - Opzioni disponibili per la configurazione delle viste	91
Fig. 24 - Grafico 3D per la descrizione semantica di un edificio (De Luca, 2007)	100
Fig. 25 - Esempio di suddivisione semantica di alcuni elementi della facciata	103
Fig. 26 - Griglie e livelli realizzati per la costruzione del modello	107
Fig. 27 - Volumetria iniziale del modello, con famiglie “segnaposto”	109
Fig. 28 - Modifica della stratigrafia di una famiglia muro	113

Fig. 29 - Posizionamento dei muri con Linea di ubicazione: Superficie di finitura esterno	114
Fig. 30 - Foto della porta delle navate laterali (Arch. Poggioli, 2016)	116
Fig. 31 - Famiglia dell'anta, modello generico basato su superficie	117
Fig. 32 - Piani e linee di riferimento per l'apertura parametrica dell'anta	118
Fig. 33 - Famiglia completa della porta delle navate laterali	119
Fig. 34 - Differenza di comportamento tra pilastro strutturale (a) ed architettonico (b)	120
Fig. 35 - Famiglia della colonna interna, livello di dettaglio: basso (a), medio (b), alto (c)	121
Fig. 36 - Famiglia della volta a botte, modello generico basato su linea	122
Fig. 37 - Foto della volta in corrispondenza delle aperture (Arch. Poggioli, 2016)	123
Fig. 38 - Famiglia della volta in corrispondenza delle aperture. Sono evidenziati i solidi di sottrazione	124
Fig. 39 - Famiglia dei cassettoni, modello generico basato su superficie	124
Fig. 40 - Famiglia della volta a cassettoni	125
Fig. 41 - Estrusione su percorso errata	126
Fig. 42 - Famiglia del catino absidale	127
Fig. 43 - Famiglia della voltina della navata laterale	127
Fig. 44 - Modello dell'arco trionfale isolato	128
Fig. 45 - Famiglie delle capriate palladiana (a), composta (c) e delle travi rinforzate (b)	129
Fig. 46 - Famiglia del decoro dell'abside. In blu la mesh ottenute per fotogrammetria	130
Fig. 47 - Famiglia delle mensole del presbiterio. In celeste la mesh ottenuta per fotogrammetria	131
Fig. 48 - Localizzazione del progetto	138
Fig. 49 - Finestra di gestione dei materiali	139
Fig. 50 - Confronto tra la nuvola di punti ed il modello tridimensionale	140
Fig. 51 - Esploso assonometrico dei macroelementi della chiesa	151
Fig. 52 - Ribaltamento della facciata (D.P.C., 2011)	161
Fig. 53 - Meccanismi in sommità della facciata (D.P.C., 2011)	162
Fig. 54 - Meccanismi nel piano della facciata (D.P.C., 2011)	163
Fig. 55 - Protiro (D.P.C., 2011)	163

Fig. 56 - Risposta trasversale dell'aula (D.P.C., 2011)	164
Fig. 57 - Meccanismi di taglio nelle pareti laterali (D.P.C., 2011)	165
Fig. 58 - Risposta longitudinale del colonnato (D.P.C., 2011)	166
Fig. 59 - Volte della navata centrale (D.P.C., 2011)	166
Fig. 60 - Volte delle navate laterali (D.P.C., 2011)	167
Fig. 61 - Ribaltamento delle pareti del transetto (D.P.C., 2011)	168
Fig. 62 - Meccanismi di taglio nelle pareti del transetto (D.P.C., 2011)	169
Fig. 63 - Volte del transetto (D.P.C., 2011)	170
Fig. 64 - Archi trionfali (D.P.C., 2011)	170
Fig. 65 - Lanterna - Tamburo (D.P.C., 2011)	171
Fig. 67 - Ribaltamento dell'abside (D.P.C., 2011)	172
Fig. 66 - Lanterna (D.P.C., 2011)	172
Fig. 68 - Meccanismi di taglio nell'abside (D.P.C., 2011)	173
Fig. 69 - Volte dell'abside (D.P.C., 2011)	174
Fig. 70 - Elementi di copertura dell'aula (D.P.C., 2011)	175
Fig. 71 - Elementi di copertura del transetto (D.P.C., 2011)	176
Fig. 72 - Elementi di copertura dell'abside (D.P.C., 2011)	177
Fig. 73 - Ribaltamento delle cappelle (D.P.C., 2011)	178
Fig. 74 - Meccanismi di taglio nelle cappelle (D.P.C., 2011)	178
Fig. 75 - Volte delle cappelle (D.P.C., 2011)	179
Fig. 76 - Irregolarità plano-altimetriche (D.P.C., 2011)	180
Fig. 77 - Aggetti (D.P.C., 2011)	181
Fig. 78 - Torre campanaria (D.P.C., 2011)	182
Fig. 79 - Cella campanaria (D.P.C., 2011)	183
Fig. 80 - Assonometria della chiesa a colori falsati per l'evidenziazione dei macroelementi	191
Fig. 81 - Macroelementi isolati come ausilio all'analisi delle lesioni	192
Fig. 82 - Lesione realizzata utilizzando lo strumento decalcomania	193
Fig. 83 - Lesione realizzata tramite la modifica del profilo del muro	194
Fig. 84 - Lesione realizzata utilizzando lo strumento dividi superficie	195

## Elenco delle immagini

Fig. 85 - Famiglia di una lesione su muro, con andamento differente tra interno ed esterno del muro	198
Fig. 86 - Famiglia di una lesione su superficie curva, in blu sono evidenziati i solidi di sottrazione	199
Fig. 87 - Estratto dell'abaco delle lesioni relativo al macroelemento ME02 facciata principale	203
Fig. 88 - Abaco dei macroelementi	204
Fig. 89 - Abaco dei meccanismi di danno di tipo sismico	206
Fig. 90 - Abaco di calcolo per l'indice di vulnerabilità sismica. Sono mostrati tutti i parametri	209
Fig. 91 - Abaco di calcolo dell'indice di vulnerabilità sismica	211
Fig. 92 - Abaco dei meccanismi di danno di tipo statico-geotecnico	212
Fig. 93 - Abaco di calcolo dell'indice di vulnerabilità statica-geotecnica	212

## **Allegati**

Fig. 94 - Pianta della Chiesa	II
Fig. 95 - Pianta della Chiesa con sezioni	III
Fig. 96 - Pianta dell'orditura della copertura	IV
Fig. 97 - Pianta ipografica delle volte	V
Fig. 98 - Prospetto Est, facciata della chiesa	VI
Fig. 99 - Prospetto Nord, facciata laterale della chiesa	VII
Fig. 100 - Prospetto Ovest, abside della chiesa	VIII
Fig. 101 - Sezione AA'	IX
Fig. 102 - Sezione BB'	X
Fig. 103 - Sezione CC'	XI
Fig. 106 - Sezione DD'	XII
Fig. 105 - Sezione EE'	XIII

Fig. 107 - Sezione FF'	XIV
Fig. 108 - Sezione GG'	XV
Fig. 109 - Sezione HH'	XVI
Fig. 110 - Sezione II'	XVII
Fig. 111 - Sezione LL'	XVIII
Fig. 112 - Vista assonometria della chiesa	XIX
Fig. 113 - Spaccato assonometrico dall'alto	XX
Fig. 114 - Spaccato assonometrico longitudinale	XXI
Fig. 115 - Vista prospettica dell'interno dall'altare	XXII
Fig. 116 - Vista prospettica dell'interno dall'ingresso	XXIII
Fig. 117 - Vista prospettica della facciata della chiesa	XXIV
Fig. 118 - Pianta della chiesa con le lesioni evidenziate	XXVI
Fig. 119 - Pianta ipografica delle volte con le lesioni evidenziate	XXVII
Fig. 120 - Prospetto Est, facciata della chiesa con le lesioni evidenziate	XXVIII
Fig. 121 - Prospetto Nord, facciata laterale della chiesa con le lesioni evidenziate	XXIX
Fig. 122 - Prospetto Ovest, abside della chiesa con le lesioni evidenziate	XXX
Fig. 123 - Sezione AA' con le lesioni evidenziate	XXXI
Fig. 124 - Sezione BB' con le lesioni evidenziate	XXXII
Fig. 125 - Sezione CC' con le lesioni evidenziate	XXXIII
Fig. 126 - Sezione DD' con le lesioni evidenziate	XXXIV
Fig. 127 - Sezione EE' con le lesioni evidenziate	XXXV
Fig. 128 - Sezione FF' con le lesioni evidenziate	XXXVI
Fig. 129 - Sezione GG' con le lesioni evidenziate	XXXVII
Fig. 130 - Sezione HH' con le lesioni evidenziate	XXXVIII
Fig. 131 - Sezione II' con le lesioni evidenziate	XXXIX
Fig. 132 - Sezione LL' con le lesioni evidenziate	XL



# **Abstract**

---

L'utilizzo di processi legati al Building Information Modeling (BIM) è di grande attualità. La sua applicazione a realtà come quella italiana, caratterizzata principalmente da edifici storici e monumentali, è ancora tutta da esplorare. Si vuole quindi proporre un metodo per la realizzazione di modelli BIM del patrimonio storico, ai quali introdurre le informazioni relative allo stato di danno rilevato per la valutazione del rischio sismico.

Il processo comincia dallo studio di un rilievo tradizionale, composto da rappresentazioni bidimensionali, nonché dallo studio dell'edificio da documentare, tramite sopralluoghi e ricerca d'archivio. Prosegue con un'analisi di tipo semantico della costruzione, utile a comprendere le componenti da modellare. A questa segue la realizzazione del modello tridimensionale dell'edificio. Parallelamente alla modellazione del fabbricato, si inseriscono all'interno del modello tutte le informazioni rilevate, o già disponibili presso gli archivi delle pubbliche amministrazioni. È in questo modo possibile raccogliere tutte le conoscenze, di qualunque ambito, all'interno del modello. Infine si costruiscono le famiglie necessarie all'inserimento delle lesioni rilevate, rendendo possibile un'analisi più accurata, ed il calcolo dell'indice di vulnerabilità definito dalle linee guida del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Il risultato del processo è quindi un modello tridimensionale che raccoglie al suo interno, oltre alle informazioni riguarda la geometria dell'edificio, dettagli riguardo i materiali, i metodi di costruzione, informazioni storiche e riguardo lo stato di danno. Sarà quindi possibile utilizzarlo come "indice" di accesso a tali informazioni; sarà possibile anche generare la documentazione necessaria (disegni ortografici, assonometrici, tabelle, ecc.)

all'analisi e conservazione dell'edificio. Il modello risultante è stato confrontato con la nuvola di punti ottenuta dal rilievo per verificarne la precisione geometrica.



# Parte 1

---



# **Capitolo 1 - Introduzione**

---

## 1.1 - Definizione del problema

La presente Tesi ha come oggetto l'applicazione del metodo BIM per la conoscenza e documentazione di un edificio esistente, ossia la Chiesa di San Paolo in Monte all'Osservanza.

Lo scopo dello studio qui condotto e illustrato è quindi quello di applicare il processo del Building Information Modeling, nato negli Stati Uniti d'America in un contesto culturale e con un patrimonio edilizio totalmente differente da quello italiano, su un edificio di carattere monumentale. La particolarità del BIM, come più compiutamente illustrato successivamente, è la possibilità di gestire a tutto tondo l'intero ciclo di vita di un edificio. Il suo limite però è che è stato ideato per la progettazione di nuove costruzioni di tipo prefabbricato e ripetibili. L'applicazione ad edifici del patrimonio esistente, sia monumentale con un rilievo storico-artistico, sia di edilizia popolare, è una branca di studio ancora aperta e l'applicazione del metodo BIM si rivela molto complicata. Questo a causa sia della complessità geometrica degli edifici di tipo monumentale, sia delle trasformazioni che le costruzioni storiche hanno subito nel tempo, rendendole uniche.

Si vuole fare rilevare che la ricerca condotta parte da un rilievo architettonico già eseguito; si hanno quindi a disposizione tutte le rappresentazioni bidimensionali tradizionali quali piante prospetti e sezioni, un dettagliato archivio fotografico ed il rilievo dello stato di danno.

Pertanto lo studio in questione per prima cosa si proporrà di approfondire il materiale disponibile tramite sopralluoghi e ricerca d'archivio per comprendere lo sviluppo storico dell'edificio in analisi. Seguirà quindi la modellazione del fabbricato, per mezzo

del software Autodesk Revit 2016, in tutte le sue componenti.

Successivamente si aggiungerà al modello la parte di documentazione che rende il metodo BIM tanto potente, in modo da fare comprendere al lettore tutte le potenzialità di questa tecnologia ancora in fase di sviluppo.

Nell'ultima parte della tesi, si inseriranno all'interno del modello le lesioni rilevate sull'edificio, sia a livello puramente grafico, in modo da poter interpretare più agevolmente le cause scatenanti tali lesioni grazie ad una visualizzazione tridimensionale interattiva, sia inserendo tutte le informazioni necessarie al loro studio. Infine, grazie alle informazioni inserite all'interno del modello BIM, si calcolerà l'indice di vulnerabilità sismica, così come definito dalle linee guida del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, e si proporrà un indice di vulnerabilità statica-geotecnica.

## **1.2 - Obiettivi**

Il fine della presente tesi è quello di proporre un metodo BIM per la modellazione e la generazione di documentazione di edifici storici a partire da un rilievo architettonico. Il metodo viene illustrato tramite la sua applicazione alla Chiesa di San Paolo in Monte di Bologna detta dell'Osservanza, ma è teoricamente applicabile a qualunque edificio di carattere storico. Si deve tenere presente che, specialmente nel caso dell'edilizia storica, ogni edificio ha le proprie caratteristiche che lo rendono unico, con le problematiche che ne derivano.

Gli obiettivi sono i seguenti:

- Sviluppare un flusso di lavoro che permetta una modellazione semantica (cap. 4) dell'edificio oggetto di studio.
- Costruire gli oggetti tridimensionali necessari, come famiglie personalizzate, analizzando di volta in volta se sia necessario renderle parametriche e fino a che punto, in funzione della loro possibilità di riutilizzo ed i parametri necessari ad un corretto funzionamento della famiglia.
- Sviluppare un flusso di lavoro per una modellazione accurata e rapida.
- Inserire all'interno del modello informazioni che vadano oltre la pura rappresentazione geometrica.
- Analizzare l'edificio e suddividerlo in macroelementi (cap. 9).
- Inserire all'interno del modello tutte le informazioni rilevate riguardo le lesioni presenti nell'edificio.
- Sviluppare un metodo di lavoro che semplifichi le operazioni di analisi dello stato di danno e sia di ausilio al calcolo dell'indice di vulnerabilità sismica LV1 (cap. 9).
- Introdurre un indice di vulnerabilità statica-geotecnica, analogo a quello di vulnerabilità sismica, che tenga conto dei meccanismi di danno attivati, o attivabili, di origine geotecnica.

### 1.3 - Metodologia

La metodologia utilizzata è varia. Si parte dallo studio delle tecniche utilizzate nel rilievo per comprendere l'affidabilità ed il livello di dettaglio raggiunti, anche con alcuni sopralluoghi in loco. Si effettueranno ricerche d'archivio, in particolar modo presso l'Archivio di Stato di Bologna, la Biblioteca dell'Archiginnasio, e la Biblioteca di San Giorgio in Poggiale, consultando testi storici, i disegni catalogati e le foto d'archivio presenti. Di pari passo si effettueranno studi sul metodo BIM e sui risultati raggiunti fino ad ora dalla ricerca, sull'applicazione del suddetto metodo agli edifici storici, ovvero il metodo dell'Historic Building Information Modeling (HBIM) sviluppato da C. Dore e M. Murphy (cap. 2). Si procederà quindi alla modellazione tramite software e all'inserimento di informazioni documentarie. Infine si procederà all'analisi del sistema costruttivo dell'edificio, scomponendolo in parti dal comportamento unitario, dette macroelementi, fase necessaria allo studio delle vulnerabilità della costruzione. Si inseriranno poi, all'interno del modello, le rappresentazioni grafiche delle lesioni in modo tale da poter permettere un'analisi attenta e di maggior completezza grazie ad una visualizzazione tridimensionale interattiva. Ogni lesione sarà corredata da tutte le informazioni raccolte in fase di rilievo, che possano aiutare a comprenderne le cause scatenanti. Infine si calcolerà l'indice di vulnerabilità sismica, seguendo le direttive delle linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, e, analogamente, si introdurrà un indice di vulnerabilità statica-geotecnica.

## **1.4 - Sintesi dei capitoli**

### **Capitolo 2 - Building Information Modeling**

Lo scopo del presente capitolo è quello di fornire al lettore una breve presentazione del metodo BIM. Si inizia analizzando la situazione attuale dell'industria edilizia evidenziandone le criticità. Successivamente si definisce il concetto di BIM, inteso come acronimo di Building Information Modeling, usato per descrivere un'attività piuttosto che un modello o un software (BIM come Building Information Model). Il BIM infatti rappresenta un'attività umana, lungo tutto il processo edilizio, che coinvolge tutti gli attori che ad esso prendono parte.

Si descrive poi l'evoluzione della modellazione digitale fino all'applicazione dei sistemi BIM, evidenziandone pregi e criticità. Infine si descrive brevemente lo stato attuale della ricerca sull'applicazione del metodo BIM al patrimonio esistente.

### **Capitolo 3 - La chiesa di San Paolo in Monte**

Successivamente si fornisce un inquadramento storico dell'edificio oggetto di studio. Si illustra la fondazione del primo nucleo conventuale da parte dei frati minori, seguendone l'evoluzione attraverso i secoli fino alla distruzione in età napoleonica. Si continua poi la trattazione con la ricostruzione, avvenuta grazie a benefattori, e la descrizione della chiesa nella sua configurazione attuale.

#### **Capitolo 4 - Tecniche di rilievo**

Nel presente capitolo si vogliono descrivere brevemente gli strumenti utilizzati per effettuare il rilievo dell'edificio, nonostante questo fosse già stato eseguito quando si sono cominciati i lavori per la presente tesi. Sono descritti quindi strumenti e processi necessari ad effettuare un rilievo tramite laser scanner e fotogrammetria. In particolare, con questa seconda tecnologia, si sono rilevati alcuni elementi di decoro di particolare interesse, i quali, durante il rilievo dell'edificio, erano stati solamente abbozzati.

#### **Capitolo 5 - Lo strumento Autodesk Revit**

Si passa quindi a descrivere le caratteristiche e le funzionalità del software adottato per la modellazione, ossia Autodesk Revit. Si fornisce inizialmente una panoramica del software in quanto tale e dei requisiti necessari al suo funzionamento. Per arrivare a descrivere il flusso di lavoro necessario ad un suo corretto utilizzo e alle peculiarità degli oggetti in esso modellabili e degli strumenti disponibili.

#### **Capitolo 6 - Modellazione Semantica**

La prima operazione necessaria alla modellazione di un edificio tramite un software BIM è la sua scomposizione in componenti elementari. Questa fase, per quanto sottintesa ed effettuata magari solo mentalmente, risulta fondamentale per una modellazione accurata e meno soggetta ad errori. Si descrive quindi cosa significa scomporre semanticamente un edificio, per poi mostrare come questo concetto sia stato applicato al caso in esame.

## Capitolo 7 - Realizzazione del modello BIM

Scomposto l'edificio in tutte le sue componenti, è quindi possibile procedere con la sua modellazione tridimensionale. Nel presente capitolo viene descritto l'approccio utilizzato ed il flusso di lavoro scelto per ottimizzare i tempi necessari ad una modellazione che risulti accurata. Vengono inoltre illustrate le tecniche adottate per realizzare alcune delle famiglie, prese ad esempio tra tutte quelle costruite, ritenute più significative alla comprensione del processo. Si è analizzata la costruzione di un muro, una porta, una colonna, una volta ed una capriata. Infine si chiude con la descrizione del lavoro svolto per realizzare i modelli dei decori tramite fotogrammetria e alcune tra le difficoltà maggiori incontrate.

## Capitolo 8 - Documentazione

Si è poi descritto come all'interno di un modello BIM sia possibile inserire differenti tipi di informazioni riguardanti l'edificio, descrivendo anche il procedimento utilizzato. Si è inoltre mostrato come sia possibile all'interno di software BIM generare i disegni architettonici tradizionali di pianta, prospetto e sezione, tutt'ora alla base dello scambio di informazioni tra i soggetti coinvolti nel processo edilizio.

## Capitolo 9 - Analisi delle lesioni

Nel presente capitolo vengono introdotti i concetti di *macroelemento* e di *meccanismo di danno*, necessari per l'analisi dei danni causati dal sisma e ad un corretto progetto di messa in sicurezza. Vengono anche descritte le linee guida emanate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti per la valutazione e

riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, illustrando in particolare la loro applicazione alle chiese. Definendo i 28 meccanismi di danno possibili, e, da questi, la possibilità di calcolare l'indice di vulnerabilità sismica (LV1).

## **Capitolo 10 - Inserimento del rilievo delle lesioni nel modello BIM**

Si descrivono quindi le strategie utilizzate per riuscire ad inserire le informazione acquisite durante il rilievo dello stato di danno all'interno del modello BIM. In particolare si analizzano il modo con cui si sono realizzate le famiglie delle lesioni (con tutte le problematiche incontrate durante il lavoro) e gli abachi riassuntivi del rilievo. Infine si calcola l'indice di vulnerabilità sismica e se ne propone uno, totalmente analogo, di vulnerabilità statica-geotecnica.

## **Capitolo 11 - Conclusioni**

Infine si valuta se il lavoro svolto ha raggiunto gli obiettivi che ci si era prefissati, andando ad esporre pregi e difetti di tale metodologia. Si descrivono alcune delle potenzialità e dei vantaggi ottenibili da una piena applicazione del processo BIM. Per ultimo si analizzano le principali difficoltà incontrate suggerendo alcune implementazioni, a livello del software, per semplificare questo procedimento.



## **Capitolo 2 - Building Information Modeling**

---

## 2.1 - Panoramica del capitolo

Lo scopo del presente capitolo è quello di fornire al lettore una breve presentazione del metodo BIM. Inizialmente si analizza, in sintesi, la situazione attuale dell'industria edilizia, successivamente si vuole definire il concetto di processo BIM. Si procede poi con una sintetica esposizione dell'evoluzione della modellazione digitale per arrivare all'applicazione dei sistemi BIM nella modellazione di edifici, evidenziandone pregi e criticità. Infine si analizza lo stato attuale della ricerca sull'applicazione del BIM al patrimonio esistente, presentando il metodo dell'Historic Building Information Modeling, HBIM.

## 2.2 - Introduzione

Il settore della progettazione edilizia, nonostante il grande sviluppo tecnologico avvenuto negli ultimi secoli, non si è evoluto in maniera significativa quanto altre industrie, si pensi all'informatica. Dai progetti realizzati disegnando su carta si è passati ad una rappresentazione digitale tramite i sistemi CAD, grazie alla diffusione dei personal computer. Il settore edilizio dagli anni '60 ad oggi non è riuscito a godere a pieno dei vantaggi generati dallo sviluppo tecnologico, specialmente in ambito informatico. Studi di produttività, effettuati da istituti americani (CIFE, 2007; Gallaher et al., 2004) indicano che questa è rimasta praticamente costante nel tempo, mentre negli altri settori si è visto un aumento quasi esponenziale. Questo per numerosi motivi:

- La maggior parte degli studi tecnici è composta da meno

di 5 persone, rendendo così difficili gli investimenti in nuove tecnologie sia a causa dell'elevato costo d'ingresso sia per la specializzazione che spesso richiedono.

- Meno della metà dei progetti si occupa di nuova costruzione, per la maggior parte si tratta di manutenzione o interventi sull'esistente, rendendo più difficile l'utilizzo di metodi ad alto impiego di capitale.
- L'impiego di nuove metodologie sia nella progettazione sia nelle costruzioni è molto lento e limitato inizialmente solo alle grandi aziende. Inoltre si hanno tecnologie frammentate e spesso per comunicare tra soggetti differenti serve passare tramite file di interscambio o documenti cartacei. E' il caso delle amministrazioni pubbliche, le quali hanno la necessità di ottenere un archivio uniforme.
- Mentre nelle altre industrie si fissano obiettivi a lungo termine, nell'edilizia spesso gli attori coinvolti in un progetto si incontrano per il tempo strettamente necessario ad eseguirlo, senza ulteriori contatti futuri, rendendo impossibile una programmazione a lungo termine.

Attualmente il processo della progettazione edilizia è principalmente basato su sistemi CAD, spesso frammentato in quanto ogni azienda produttrice di software utilizza un file proprietario. Inoltre è ancora dipendente da modi di comunicazione su carta o tramite file di interscambio, i quali però non contengono informazioni aggiuntive alla geometria dei disegni stampati. L'utilizzo di questo sistema comporta spesso errori ed omissioni, i quali diventano spesso causa di imprevisti come costi aggiuntivi, ritardi, che possono portare a in cause tra le parti. Gli sforzi compiuti per evitare questo genere di imprevisti sono stati:

cambiare l'organizzazione strutturale del metodo di progettazione, l'uso di tecnologia real-time, come spazi web per la condivisione di disegni e documenti, e l'implementazione di strumenti 3D nei software CAD. Nonostante queste tecnologie abbiano migliorato le tempistiche per lo scambio di informazioni, hanno fatto poco per ridurre le problematiche descritte prima.

Uno dei più comuni problemi associati alla comunicazione 2D durante la fase di progettazione è la grande quantità di tempo e risorse necessarie per generare le informazioni chiave richieste per un determinato progetto (la stima dei costi, analisi energetiche, dettagli strutturali, ecc.) perchè che per effettuare una progettazione di qualità sarebbe necessario effettuare queste analisi all'inizio della fase progettuale, in modo da potere apportare le correzioni necessarie, innescando un procedimento iterativo. Tuttavia data la complessità di effettuare già nelle fasi preliminari della progettazione le analisi in questione, queste vengono eseguite soltanto a progettazione conclusa. Il risultato è che spesso bisogna adottare dei compromessi rispetto al progetto originale per contenere tempi e costi.

L'introduzione della metodologia BIM produce numerosi vantaggi. Però per ottenere un vero beneficio dall'utilizzo del processo BIM è necessario ripensare tutto il ciclo di vita dell'edificio, dalla progettazione alla manutenzione, includendo tutti gli attori nel processo. Il BIM permette una rivalutazione dell'utilizzo dell'informatica nel settore delle costruzioni, facendo compiere quello step evolutivo che è mancato fino ad ora. I soggetti interessati sono tutti quelli che appartengono all'industria edilizia: immobiliari, proprietari, finanziarie, architetti, ingegneri, costruttori, manutentori, ecc. Il BIM muove il settore da una

forma di comunicazione basata su carta (modelli 3D, disegni CAD 2D, render, fogli di calcolo ecc) verso un flusso integrato e interoperabile dove i compiti dei diversi attori coinvolti vengono confluire in un processo collaborativo coordinato. Si creano dei modelli realistici tramite un processo ripetibile e verificabile che riduca i rischi e permetta di effettuare in un qualsiasi momento della progettazione, analisi e simulazioni tese a migliorare la qualità delle scelte progettuali.

### **2.3 - Definizione Building Information Modeling**

Il termine BIM è l'acronimo di Building Information Modeling, anche se spesso utilizzando l'espressione BIM ci si riferisce al modello tridimensionale, trasformandolo nell'acronimo di Building Information Model. Tuttavia in tutta la narrativa con il termine BIM ci si riferisce non ad un oggetto, un modello tridimensionale, o ad uno specifico software, ma al processo umano che coinvolge più attori e provoca cambiamenti nella progettazione, costruzione e gestione degli edifici.

Di seguito si propongono alcune definizioni di BIM:

- National Building Information Modeling Standard (NBIMS): BIM è migliorare i processi di pianificazione, progettazione, costruzione e manutenzione usando modelli di informazioni standardizzati e machine-readable, ovvero processabili automaticamente da un computer, per ogni edificio, nuovo o vecchio, che contengano tutte le informazioni appropriate create o ottenute riguardo l'edificio, in un formato utilizzabile lungo tutta la sua vita

utile.

- BIModeling Iso 29481-2: “Unire i diversi set di informazione usati nelle costruzioni in un ambiente d’informazione comune, riducendo, e spesso eliminando, il bisogno di molti tipi di documentazione cartacea correntemente in uso”.
- BIM NBIMS (national building information model standard - US): “Rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un edificio, che serva come risorsa di conoscenza condivisa, che funga da base affidabile per le decisioni necessarie durante il suo ciclo di vita”.
- BIM Australian national guidelines for digital modeling: “Ad un modello servono due caratteristiche fondamentali per essere considerato BIM: la prima è che sia una rappresentazione tridimensionale di un edificio basato su oggetti; la seconda è che includa nel modello informazioni o proprietà degli oggetti oltre la loro rappresentazione grafica”.

Il principio del Building Information Modeling si è configurato, dalla sua introduzione, come un processo nel quale è centrale lo scambio di informazioni. In generale, si può dire che lo scambio di informazioni che avviene con un’interazione tra diversi attori determina un procedimento BIM (Building Information Modeling). Quando, invece, un modello computerizzato contiene una geometria precisa e dati utili al supporto della costruzione, fabbricazione, realizzazione dell’edificio e della sua manutenzione, si suppone sia un modello BIM (Building Information Model). I modelli così generati diventano il momento di attuazione del processo BIM, lo strumento attraverso il quale avviene lo scambio di informazioni tra

i protagonisti coinvolti nella progettazione e gestione dell'edificio durante il suo intero ciclo di vita.(Eastman C., 2011)

Questa dicotomia processo/modello può però generare confusione. Oggigiorno il termine BIM è molto popolare e di grande fascino, BIM è una espressione di grande attrattiva e viene utilizzata da numerose aziende produttrici di software per descrivere e pubblicizzare i loro prodotti. La definizione di tecnologia BIM come si è visto è molto soggettiva e tende a creare confusione. E' necessario fare allora un po' di chiarezza indicando cosa NON è un modello BIM:

- Modelli che contengono informazioni 3D ma nessuno, o pochi, attributi; questi sono modelli utilizzati per la visualizzazione, ma non danno supporto all'integrazione di informazioni o analisi del progetto. Come possono essere i modelli realizzati con software quali Google SketchUp o Autodesk 3DS Max.
- Modelli non parametrici, rendendo così l'applicazione di cambiamenti molto laboriosa. Non danno inoltre una protezione contro inesattezze o inaccurately nella rappresentazione del modello, dovute alla necessità di aggiornare manualmente ogni disegno a seguito di modifiche al progetto.
- Modelli composti da riferimenti multipli a file 2D che devono essere combinati.
- Modelli che permettono di effettuare modifiche in una vista che non vengono automaticamente riportate nelle altre.

Tutti i sistemi CAD generano file digitali che consistono primariamente in vettori, stili di linea e layer. Man mano che questi sistemi sono stati sviluppati, si sono aggiunte informazioni

addizionali a questi file; con l'introduzione dei modelli 3D, sono stati aggiunti strumenti per la definizione di superfici complesse. Via via che i sistemi CAD sono diventati più intelligenti e un maggior numero di utenti chiedeva di condividere informazioni associate ad un dato progetto, il problema si è spostato dai disegni dalle immagini 3D ai dati stessi. Un modello di un edificio prodotto da uno strumento BIM può supportare diverse viste dei dati contenuti in un disegno, che siano 2D o 3D. Un modello può essere descritto dal suo contenuto (quello che l'oggetto descrive) o dalle sue capacità (che tipo di requisiti può supportare). Il secondo approccio è preferibile in quanto definisce cosa si può fare con un modello piuttosto che come il database è stato costruito.

## **2.4 - Evoluzione della modellazione digitale**

Sin dagli anni '60, la modellazione virtuale di geometrie tridimensionali è stata un'importante area di ricerca. Il suo sviluppo aveva numerosi campi d'applicazione tra cui l'industria cinematografica, quella dei videogiochi e la progettazione industriale, meccanica ed edilizia. Le prime forme poliedriche potevano essere composte in un'immagine con una serie limitata di figure parametrizzate e scalabili, ma nel campo della progettazione era necessaria la capacità di creare e modificare facilmente forme complesse. Un grande passo in avanti venne fatto negli anni '70 quando tre diversi gruppi di studio di altrettante università (Cambridge, Stanford, Rochester) raggiunsero l'obiettivo di creare e modificare solidi 3D arbitrari, pratica che poi venne chiamata Modellazione Solida. (Eastman, 1999)

Inizialmente furono sviluppate due metodologie di modellazione solida e queste entrarono in competizione per diventare il futuro standard. Queste erano l'approccio Boundary Representation (B-Rep), in cui le forme venivano rappresentate come serie di superfici orientate, limitate e chiuse in modo da formare un volume. Vennero sviluppati funzioni computazionali per poter creare queste figure con dimensioni variabili tramite parametri; inizialmente si poteva disporre di box, ossia parallelepipedi, coni, sfere, piramidi, cilindri, ecc. (Fig. 1). Inoltre era possibile creare estrusioni e rivoluzioni e combinare le forme tramite unioni, intersezioni e sottrazioni, ovvero le cosiddette operazioni booleane. In questo modo era possibile creare forme complesse.

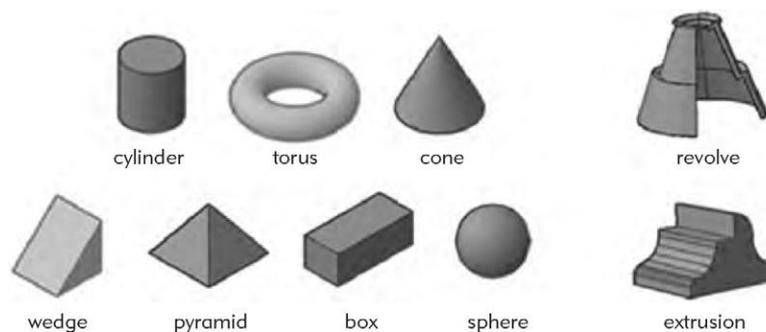


Fig. 1 - Una serie di funzioni per la generazione di forme regolari (Eastman, 2011, pag. 33)

L'approccio alternativo è chiamato Constructive Solide Geometry (CSG); in questo caso le figure sono rappresentate come un set di funzioni che definisce il poliedro primitivo simili all'approccio B-Rep. Queste funzioni sono poi combinate in espressioni algebriche, ancora tramite operazioni booleane. La principale differenza tra l'approccio CSG e l'approccio B-Rep è che col metodo CSG viene memorizzata una formula algebrica per definire la figura, mentre nel B-Rep si memorizza il risultato come la definizione di una serie di operazioni tra oggetti. La differenza

è sostanziale: nel CSG gli elementi possono essere modificati e rigenerati su richiesta. Questa modalità di rappresentare le forme tramite una stringa di testo era molto compatta, ma necessitava di qualche secondo di calcolo sulle macchine dell'epoca. D'altra parte le B-Rep erano eccellenti per l'interazione diretta, rendering, animazioni e per controllare conflitti spaziali.

In una prima fase i due metodi erano in competizione per determinare quale fosse l'approccio migliore, ma presto ci si rese conto che dovevano essere combinati. Unendo i due approcci era quindi possibile editare le forme tramite l'approccio CSG e utilizzare l'approccio B-Rep per la visualizzazione. Oggigiorno molti degli strumenti di modellazione parametrica a disposizione incorporano entrambi gli approcci.

Con l'evolversi dei sistemi di modellazione e l'aumento della potenza di calcolo a disposizione, si iniziò a sentire la necessità di poter associare materiali ed altre proprietà alle forme. Ciò avrebbe permesso di effettuare analisi, o determinare volumi e pesi. Ma aggiungendo proprietà agli oggetti si presentò un problema concettuale: quando una forma è composta da più solidi, tramite operazioni booleane, ma con materiali diversi, come ci si sarebbe dovuti comportare? Questo dilemma portò alla consapevolezza che il principale utilizzo delle operazioni booleane era quello di incorporare funzionalità ad una figura primaria. Un oggetto definito come funzionalità, inserito in un oggetto principale, è posizionato relativamente a quell'oggetto; l'oggetto-funzione può quindi essere in seguito rinominato, referenziato e modificato. Anche questa è diventata una caratteristica fondamentale della modellazione parametrica, si pensi a porte e finestre in un muro.

La modellazione di edifici basata su solidi 3D fu sviluppata

per la prima volta tra gli anni '70 e '80 con l'introduzione dei sistemi CAD; la modellazione solida nei sistemi CAD aveva un grande potenziale, ma era limitata dalla potenza di calcolo dei computer e dal loro costo. Inoltre progettare in tre dimensioni era concettualmente alieno a molti, se non a tutti, i progettisti dell'epoca, abituati a lavorare in due dimensioni. Le industrie meccaniche e aerospaziali compresero subito la potenzialità di questi nuovi strumenti, mentre l'industria edilizia preferì adottare dei semplici disegnatori bidimensionali quali AutoCAD, Microstation, MiniCAD.

Un ulteriore passo nell'evoluzione dal CAD alla modellazione parametrica è stata la comprensione che figure multiple possono condividere i parametri. Ad esempio i confini di un muro sono definiti da pavimento, soffitto ed altri muri che lo limitano, quindi come vengono connessi gli oggetti ne determina la forma (Fig. 2); in altri casi la forma non è generata dalla relazione con altri oggetti ma globalmente, come può accadere con le griglie strutturali. Inizialmente questa capacità venne inserita solo a livello di generazione delle forme, ma non era ancora una completa

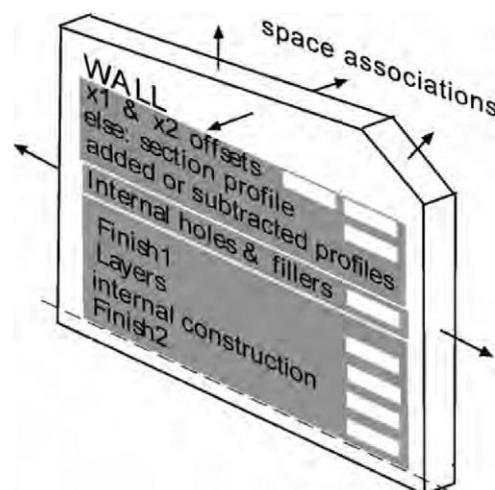


Fig. 2 - Struttura concettuale della famiglia di un oggetto muro (Eastman, 2011, pag. 41)

modellazione parametrica. Solo successivamente i parametri che definiscono una forma poterono essere automaticamente rivalutate e la forma rigenerata. Siccome un cambiamento in una forma poteva influenzarne altri in altre forme, si rese necessario lo sviluppo di un “risolutore” capace di analizzare i cambiamenti ed applicarli nell’ordine più efficiente. Questa abilità è la normalità negli odierni sistemi BIM. Infine molti sistemi BIM moderni supportano relazioni parametriche con superfici e curve poligonali complesse, come splines e B-Splines non uniformi (NURBS).

I software di modellazione parametrica possono essere tali a diversi livelli. Al livello più semplice c’è la definizione di forme complesse tramite qualche parametro. Questa è spesso chiamata modellazione solida parametrica; le modifiche consistono nell’apportare cambiamenti ai parametri e rigenerare l’oggetto su richiesta dell’utente. Un primo sviluppo è l’aggiornamento automatico degli oggetti ogni volta che i parametri vengono modificati, con gli aggiornamenti effettuati in un ordine prefissato. Infine se l’ordine di aggiornamento viene automaticamente determinato in base alla disposizione e alla relazione degli oggetti, si può parlare di piena modellazione parametrica.

Ricapitolando, ci sono numerose caratteristiche di modellazione parametrica, alcune comprese nei modellatori BIM, altre no:

- Generalità delle relazioni parametriche, che supportano idealmente tutte le funzioni algebriche e trigonometriche.
- Supporto a condizioni di ramificazione e scrittura di regole che possono associare diverse funzioni ad un oggetto.
- Fornire collegamenti tra gli oggetti e la capacità di creare queste connessioni liberamente.

- Utilizzo di parametri globali o esterni per controllare la disposizione o la selezione degli oggetti.
- Abilità di estendere o aumentare le esistenti classi di oggetti parametrici, in modo che possano assumere comportamenti non forniti in origine.

La modellazione parametrica è un metodo molto potente di creare e modificare la geometria degli oggetti. Senza di essa, la generazione di modelli sarebbe estremamente scomoda e soggetta ad errori. Progettare un edificio che, per quanto semplice, contiene centinaia o migliaia di oggetti può essere quasi impossibile senza un sistema che permetta un'efficiente modifica ed aggiornamento automatico delle modifiche apportate in un oggetto a tutte le sue istanze presenti nel disegno.

## **2.5 - Modellazione parametrica di edifici**

Il concetto di oggetto parametrico è quindi centrale per la comprensione del BIM e la sua differenziazione dagli oggetti tridimensionali tradizionali. Un oggetto BIM parametrico per essere definito tale, deve avere le seguenti caratteristiche:

- Consistere di definizione geometrica con informazioni e regole associate;
- La geometria è integrata in maniera non ridondante e non permette incongruenze; piante e prospetti dell'oggetto risultano sempre coerenti, le viste non possono essere "falsificate";
- Le regole parametriche dell'oggetto automaticamente modificano la geometria associata;

- Gli oggetti possono essere definiti a diversi livelli di aggregazione, in modo che si possa ad esempio definire un muro come insieme dei suoi componenti (cambiando il peso di un strato cambia il peso del muro);
- Le regole applicate agli oggetti possono identificare quando una particolare modifica rende l'oggetto impossibile da generare;
- Gli oggetti hanno la capacità di collegarsi, ricevere, trasmettere o esportare serie di attributi ad altre applicazioni o modelli.

Quindi il fatto di creare e poter disporre di oggetti parametrici è un grande vantaggio a livello di risparmio di tempo durante la progettazione. Si possono infatti creare librerie di oggetti adattabili a numerose situazioni e quindi riutilizzabili. Di librerie ne esistono di già pronte in dotazione con i vari software, ma, per quanto possano andare bene in una prima fase di approccio al BIM e per il suo apprendimento, successivamente si renderà necessario l'uso di oggetti creati ad hoc per i singoli progetti.

Tutti gli strumenti di progettazione BIM attuali (Autodesk Revit, Bentley Architecture, Graphisoft ArchiCAD, Nemetschek Vectorworks, Gehry Technology's Digital Project, Tekla Structures, ecc.) derivano dalle capacità di modellazione di oggetti parametrici sviluppata dall'industria meccanica. Nella modellazione parametrica, invece di progettare un'istanza di un elemento dell'edificio, come una particolare porta o muro, il progettista deve prima definire la classe o famiglia di quell'elemento composto da un misto di geometrie fisse e parametriche, una serie di relazioni e regole che controllano i parametri che permettono la generazione degli elementi. Mentre nei tradizionali modellatori tridimensionali

CAD ogni aspetto della geometria degli elementi deve essere controllato manualmente dall'utente, la forma e la geometria risultanti di un oggetto parametrico si adattano automaticamente ai cambiamenti del contesto e alle scelte dell'utente.

<b>BIM DESIGN Tool</b>					
<b>Base Objects</b>	<b>ArchiCAD v14</b>	<b>Bentley Architecture v8.i</b>	<b>Revit Architecture v2011</b>	<b>Vectorworks 2010</b>	<b>Digital Project V1, R4, SP 7</b>
Site model	Mesh tool, site objects	(Contoured model)	(Topo surface) & site objects	In Landmark product	Surface model
Space definition	■ (manual)	■ (manual)	■ (automatic)	■ (manual)	■ (automatic)
Wall	■	■	■	■	■
Column	■	■	■	■	■
Roof	■	■	■	■	
Stair	■	■	■	■	■
Slab	■	■	■	■	■
Zone	Zone	Zone	Area	Area	
Beam	■	■	■	■	■
Unique Objects for Each Platform	Cast-in-place, precast concrete, steel, masonry, thermal & moisture, furnishings, equipment, conveying systems, plumbing, HVAC, electrical, site	Curtain walls, truss, plumbing, toilet accessories, handrails, shelving, shaft	Area, component, ceiling curtain system, curtain grid, mullion, truss, beam system foundation items, ramp, railing	Window wall, mech. equipment, kitchen cabinet, railing, elevator, escalator, rail, pipe fittings, duct fittings, mechanical equipment	Pipe, duct, mech. equipment, railings, opening, opening profile construction equipment

Fig. 3 - Tabella delle famiglie standard disponibili nei software BIM (Eastman, 2011, pag. 47)

Concettualmente i software di modellazione BIM sono una variazione dei sistemi di modellazione parametrica basati sugli oggetti. Sono differenti perché hanno le loro serie di classi di oggetti predefinite, ognuna con differenti possibilità di comportamento programmate al suo interno. In aggiunta alle famiglie fornite dallo sviluppatore, numerosi siti web rendono disponibili famiglie da scaricare pronte all'uso, come moderno equivalente delle librerie di blocchi 2D. I comportamenti preimpostati degli oggetti BIM identificano come possono essere collegati in gruppe automaticamente adattare la loro struttura quando cambia il

contesto in cui sono inseriti. E' quindi importante che gli utenti possano estendere questa libreria di classi di oggetti, eventualmente creandone di nuove, per rispondere ad esigenze non previste dagli sviluppatori del software.

Esiste una distinzione tra quegli oggetti che interagiscono con altri, come muri, travi, colonne, solette, i quali hanno un comportamento complesso e sono il cuore di uno strumento BIM, e gli altri oggetti per i quali non è necessario un comportamento parametrico. Questa seconda categoria può essere creata più facilmente e viene spesso resa disponibile come un'aggregazione di librerie esterne indipendenti da altri oggetti caricabili nel modello per fasi successive. Una terza classe di oggetti è quella dei prodotti commerciali che sono realizzati su misura per il loro contesto. Questi possono essere oggetti parametrici semplici o complessi, ma la cui realizzazione necessita della stessa cura con cui vengono definiti gli oggetti principali di uno strumento BIM. Progettisti e costruttori spesso realizzano le loro proprie classi di oggetti o si affidano ad oggetti più semplici non parametrici che però devono di continuo essere adattati manualmente.

Un'ulteriore differenza funzionale tra un modellatore BIM e un modellatore parametrico di terze parti è la necessità di rappresentare esplicitamente gli spazi racchiusi dagli elementi dell'edificio. Fino a poco tempo fa, con i soli sistemi CAD, non si erano in grado di rappresentare gli spazi, se non utilizzando poligoni disegnati dall'utente a cui veniva assegnato un nome. Oggi la maggior parte dei software BIM rappresenta automaticamente gli spazi generando un solido definito dall'intersezione dei muri con il pavimento. Questo poligono viene poi estruso fino a raggiungere l'altezza del soffitto. Il vecchio metodo CAD ha

le solite debolezze già descritte, il nuovo metodo non è perfetto, ma è comunque un'evoluzione. Ad esempio funziona per pareti verticali e solette piatte, ma ignora le variazioni in altezza dei muri e non può adattarsi a soffitti inclinati.

Infine è necessario che i software BIM incorporino uno strumento di esportazione dei disegni tecnici tradizionali di proiezione ortogonale, in quanto questi sono ancora al centro dell'industria costruttiva. Le rappresentazioni architettoniche, che siano piante, prospetti o sezioni, non sono delle semplici proiezioni ortogonali, ma si basano su una precisa e complessa serie di convenzioni grafiche; inoltre ogni azienda spesso adotta delle sue convenzioni. Queste devono essere implementate nei sistemi BIM, con la possibilità di essere personalizzate, per fornire un buon strumento di esportazione di disegni.

## **2.6 - Classificazione dei software BIM**

La maggior parte dei software BIM ha anche interfacce per altre operazioni oltre la modellazione, come rendering, analisi energetiche, stima dei costi e così via; si fa quindi una distinzione gerarchica tra i vari tipi di software BIM:

- **STRUMENTO BIM:** un'applicazione con un compito specifico che produce un preciso risultato; possono esserli gli strumenti per la generazione del modello, produzione di disegni, stima dei costi, analisi energetica, rendering. Il risultato ottenuto è spesso autonomo.
- **PIATTAFORMA BIM:** un'applicazione, di solito per la progettazione, che genera dati per scopi multipli.

Fornisce un modello che ospita le informazioni sulla piattaforma. Solitamente le piattaforme BIM incorporano più funzionalità date dagli strumenti.

- **AMBIENTE BIM:** la gestione dei dati di una o più flussi di informazioni che integrano le applicazioni all'interno di un'organizzazione. Spesso gli ambienti BIM non sono progettati, ma crescono in funzione delle necessità dell'azienda. Gli ambienti BIM danno l'opportunità di gestire una varietà molto più ampia di informazioni rispetto al solo modello, come video, immagini, registrazioni audio, email ecc.

Mentre gli strumenti BIM mancano della struttura e delle regole per il corretto aggiornamento e gestione di un progetto, le piattaforme BIM hanno le caratteristiche sufficienti a reggere le operazioni tipiche della progettazione, come creazione di oggetti parametrici, modifica e aggiornamenti. Vengono spesso utilizzate al posto degli ambienti BIM.

## **2.7 - Punti di forza e criticità dell'approccio BIM**

Nonostante il modello BIM incorpori la geometria completa dell'edificio e dei suoi sistemi, e gli oggetti che lo compongono abbiano proprietà ed informazione che vanno ben al di là della semplice rappresentazione bidimensionale o tridimensionale, i disegni tecnici continueranno ad essere necessari ancora per qualche tempo. L'attuale processo costruttivo è tutt'ora centrato sulle rappresentazioni principalmente bidimensionali, che siano cartacee o digitali. Se uno strumento BIM non supportasse

un'efficiente strumento di esportazione di disegni, i benefici dei sistemi BIM verrebbero notevolmente ridotti. Con i sistemi BIM, ogni oggetto è rappresentato una sola volta nel modello. Grazie a questa modalità di rappresentazione non ridondante, tutti i disegni, analisi e rappresentazioni di ogni tipo estratte da uno stesso modello sono coerenti. Soltanto questa caratteristica risolve notevoli problematiche e fonti di errori. Con il sistema tradizionale di disegno architettonico bidimensionale, ogni modifica o aggiunta, deve essere ripetuta manualmente su ogni disegno elaborato dal progettista, col risultato di potenziali errori umani non aggiornando correttamente tutte le viste. Uno studio americano ha analizzato che, nell'ambito della progettazione di strutture prefabbricate in cemento armato, questo genere di errori incida approssimativamente per l'1% dei costi di costruzione (Sacks et al., 2003).

Un problema che molti utenti incontrano è la scalabilità, ovvero la gestione di file e modelli di grandi dimensioni. Nei sistemi BIM qualsiasi modello può assumere elevate dimensioni, in quanto queste dipendono sia dalla estensione geometrica dell'edificio, sia dal livello di dettaglio con cui viene modellato. Quando un modello diventa troppo grande, le operazioni diventano lente, e anche semplici modifiche possono diventare laboriose. I modelli parametrici incorporano regole che relazionano la geometria o altri parametri di un oggetto con quelli di altri oggetti. Ad ogni modifica apportata, si rende quindi necessario aggiornare il modello; questi aggiornamenti, in base al tipo di relazione interessata, possono richiedere aggiornamenti locali o a volte di tutto il modello. Inoltre è complicato dividere un progetto in più parti per svilupparle separatamente e mantenere un sistema gerarchico di regole. Il

problema diventa quindi di memoria del computer. La soluzione più semplice per la gestione degli aggiornamenti dei parametri è caricare tutto il progetto in memoria. Se le regole si propagassero attraverso più file, ovvero aggiornando un oggetto in un file si aggiornassero in automatico in tutti gli altri file interessati, il limite di dimensione dei progetti sarebbe risolto. Soltanto alcuni sistemi BIM supportano questo tipo di propagazione; tuttavia grazie all'aumento della potenza di calcolo, al relativo abbassamento di prezzo delle componenti dei moderni computer, alle architetture a 64 bit dei processori e dei sistemi operativi, questi limiti si stanno notevolmente riducendo. Nonostante la graduale scomparsa di queste restrizioni, parallelamente si sta verificando l'aumento di interesse a realizzare modelli sempre più dettagliati e complessi, creando così un circolo vizioso.

Una delle maggiori sfide ancora irrisolte del BIM è, come la definisce Chuck Eastman, l'interoperabilità (interoperability); ovvero l'abilità di scambiare informazioni tra applicazioni, in modo da rendere più fluido il flusso di lavoro e facilitare l'automazione delle operazioni. Lo scambio di dati è fondamentale per evitare di ricreare manualmente informazioni già inserite in un altro software. La copia manuale, oltre ad essere fortemente soggetta ad errori, scoraggia un processo iterativo di progettazione per la soluzione delle problematiche più complesse, portando spesso ad un risultato meno qualitativo. Si è ormai abituati ad uno scambio di geometrie tra i diversi software di modellazione molto efficiente. Lo scambio di dati tra modelli BIM appare più complicato in quanto si è passati dalla modellazione di forme e geometrie pure alla modellazione di oggetti, i quali devono avere le caratteristiche delle controparti nella realtà e presentano delle

relazioni tra loro. Il modello quindi deve contenere molte più informazioni di un file CAD. Solitamente lo scambio di dati tra diversi software di modellazione avveniva tramite un sistema basato su file, ovvero esportando e importando la sola geometria, come ad esempio tramite il formato DXF (Drawing eXchange Format). Un altro metodo molto importante è tramite un collegamento diretto, quindi senza la necessità di esportare e importare un file nuovo, tra i software sfruttando le API (Application Programming Interfaces). Dalla fine degli anni '80 si sono iniziati a sviluppare i data models per favorire gli scambi di prodotti ed oggetti tra le diverse industrie. I principali data models nel campo dell'edilizia sono IFC (Industry Foundation Classes), per la pianificazione, progettazione, costruzione e gestione; CIS/2 (CIM steel Integration Standard version 2), limitato alla progettazione strutturale in acciaio e alla fabbricazione; gbXML (Green Building eXtensible Markup Language), indirizzato alle analisi energetiche. Tutti questi modelli contengono informazioni riguardo la geometria, le relazioni, i processi, i materiali, le performance e altre proprietà necessarie alla progettazione e costruzione. Si rende però necessario verificare volta per volta l'effettiva compatibilità tra i software utilizzati. La sfida dell'interoperabilità rimane ancora aperta per realizzare un'affidabile integrazione sia tra piattaforme BIM che tra una piattaforma BIM e software dedicati, come possono essere quelli di calcolo strutturale, analisi energetica ecc.

**Image (Raster) Formats**

JPG, GIF, TIF, BMP, PNG, RAW, RLE

Raster formats vary in terms of compactness, number of possible colors per pixel, transparency, compression with or without data loss

**2D Vector Formats**

DXF, DWG, AI, CGM, EMF, IGS, WMF, DGN, PDF, ODF, SVG, SWF

Vector formats vary regarding compactness, line formatting, color, layering and types of curves supported; some are file-based and others use XML.

**3D Surface and Shape Formats**

3DS, WRL, STL, IGS, SAT, DXF, DWG, OBJ, DGN, U3D PDF(3D), PTS, DWF

3D surface and shape formats vary according to the types of surfaces and edges represented, whether they represent surfaces and/or solids, material properties of the shape (color, image bitmap, and texture map), or viewpoint information. Some have both ASCII and binary encodings. Some include lighting, camera, and other viewing controls; some are file formats and others XML.

**3D Object Exchange Formats**

STP, EXP, CIS/2, IFC

Product data model formats represent geometry according to the 2D or 3D types represented; they also carry object type data and relevant properties and relations between objects. They are the richest in information content.

AecXML, Obix, AEX, bcXML, AGCxml

XML schemas developed for the exchange of building data; they vary according to the information exchanged and the workflows supported.

V3D, X, U, GOF, FACT, COLLADA

A wide variety of game file formats vary according to the types of surfaces, whether they carry hierarchical structure, types of material properties, texture and bump map parameters, animation, and skinning.

SHP, SHX, DBF, TIGER, JSON, GML

Geographical information system formats vary in terms of 2D or 3D, data links supported, file formats and XML.

Fig. 4 - Principali formati di interscambio (Eastman, 2011, pag. 109)

## 2.8 - Applicazioni del processo BIM al patrimonio edilizio esistente

Come detto in precedenza, il metodo BIM è nato per la progettazione ex-novo. La sua applicazione a casi di edifici esistenti, o addirittura edifici di carattere monumentale, è tutt'ora una sfida aperta. Tuttavia sia in ambito accademico che in quello professionale si inizia ad utilizzare il BIM per la realizzazione di progetti e la gestione di edifici storici. Negli ultimi anni sono

stati fatti diverse ricerche in questa direzione; su tutte S. Fai, J. E. Nieto e il gruppo di lavoro C. Dore, M. Murphy. Questo ambito desta molto interesse proprio per la natura stessa del metodo BIM, ovvero lo scambio di informazioni. Nel caso del patrimonio esistente, ed ancora più negli edifici con carattere storico monumentale, la completa conoscenza del manufatto, l'accuratezza delle informazioni raccolte, e la possibilità di accedervi facilmente è fondamentale. Il processo BIM permette tutto questo, si rende possibile la raccolta delle informazioni note, spesso disseminate in numerosi archivi eterogenei, e relazionarle tra loro, utilizzando il modello geometrico come un indice dei contenuti. Partendo dal modello BIM, che al suo interno già contiene numerose informazioni riguardo alla caratterizzazione degli oggetti e alle relazioni tra di essi, si possono aggiungere, strutturandole, tutte le informazioni di carattere storico e documentale. E' possibile inserire conoscenze sulle configurazioni dell'edificio presenti e passate, relazionare conoscenze tangibili ed intangibili.

Il primo passo per la realizzazione di un modello BIM con questo scopo è quello della discretizzazione dell'edificio e l'identificazione delle sue componenti in funzione delle classi di oggetti disponibili all'interno del software e che verranno in un secondo tempo arricchite con i dati raccolti. Successivamente si dovrà procedere per livelli di sviluppo cominciando da una generica rappresentazione dell'edificio, eventualmente anche bidimensionale, fino ad arrivare ad una varietà di informazioni grafiche e documentali collegate al modello tridimensionale.

Spesso nell'ambito degli interventi sull'esistente il punto di partenza è un rilievo effettuato tramite laser scanner. Questo perché in una maniera piuttosto semplice e rapida si ottiene un

rilievo ad altissimo dettaglio, necessario quando si ha a che fare con beni monumentali. Ottenuta la nuvola di punti si pone però una triplice questione:

- Come derivare dalla nuvola di punti degli oggetti tridimensionali. Si deve infatti passare da singoli punti nello spazio a vettori, superfici e solidi, riconoscendone i bordi.
- Come caratterizzare tali oggetti. Infatti nei modellatori BIM ogni oggetto, oltre ad essere parametrico, ha una propria identità; non si tratta infatti di semplici volumi, ma di muri, porte, finestre, ecc. Sono vere e proprie controparti degli oggetti reali con proprietà differenti l'uno dall'altro.
- Come e quanto rendere parametrici tali oggetti. Nel caso di edifici storici spesso gli elementi sono unici e non è detto che convenga realizzarne un modello totalmente parametrico. Si deve quindi effettuare la scelta se generalizzare, ovvero realizzare un modello parametrico dell'oggetto che possa adattarsi a più situazioni ma che rispecchi accuratamente la realtà, o se tipizzare, cioè realizzare un modello accurato di volta in volta.

La ricerca più avanzata nella direzione di un automatismo tra nuvola di punti e modello BIM è quella del cosiddetto Historic Building Information Modeling, HBIM, condotta da C. Dore e M. Murphy. Il loro tentativo è quello di creare una libreria di oggetti parametrici da mappare su una nuvola di punti rilevata. La loro ricerca si è basata sulla ricostruzione di facciate di edifici neoclassici del XVIII secolo di Dublino. Il procedimento si basa sulla costruzione di una libreria di

oggetti parametrici creati a partire dai trattati di architettura. Studiando i manuali di disegno architettuale realizzati da architetti britannici come Campbell, Gibbs e Ware sulla base dei lavori di Palladio, Vignola, Serlio, Leon Battista Alberti e Vitruvio, hanno ricavato regole matematiche per la generazione degli elementi architettonici. Grazie a queste relazioni hanno creato una libreria di oggetti parametrici tramite il linguaggio GDL (Geometric Descriptive Language) ed il software ArchiCad. Il passaggio successivo è quello di posizionare gli elementi sulla nuvola di punti.



## **Capitolo 3 - San Paolo in Monte**

---

### 3.1 - Panoramica del capitolo

Nel presente capitolo si espone un breve resoconto sulla fondazione ed evoluzione del complesso di San Paolo in Monte (Fig. 5), oggetto dello studio della presente tesi. Si inizierà illustrando la fondazione del primo nucleo conventuale da parte dei frati minori, seguendone l'evoluzione fino alla distruzione avvenuta a causa dell'invasione napoleonica. Infine si descriverà la configurazione attuale del complesso.



Fig. 5 - Foto della facciata della chiesa di San Paolo in Monte (Arch. Poggioli, 2016)

### 3.2 - Prime presenze francescane a Bologna

Le prime presenze francescane a Bologna si fanno risalire agli inizi del XIII sec, quando nel 1209 San Francesco vi inviò il Beato Bernardo da Quintavalle. Questi venne inizialmente osteggiato dalla popolazione bolognese che discriminò il frate a causa del suo abbigliamento; soltanto il giudice Nicolò Pepoli, letta la Regola francescana, ne comprese il valore spirituale e accolse il frate.

Il giudice Pepoli ospitò inizialmente il frate ed i suoi compagni nella propria casa e costruì loro un luogo in cui vivere assieme. Col tempo le prediche del Beato Bernardo da Quintavalle conquistarono i bolognesi a tal punto da indurre il frate a tornare da San Francesco chiedendogli di inviare altri frati al posto suo, in quanto temeva le tentazioni che potessero nascere dalla sua fama.



Fig. 6 - Disegno della città di Bologna, 1773 (A.S.B. 2/6064, n°1)

Nelle cronache bolognesi si dice che inizialmente i frati dimorassero presso Santa Maria delle Pugliole nelle vicinanze di porta Stiera, l'attuale via Polese; probabilmente fu questo il luogo dato al Beato Bernardo da Quintavalle dal giudice Pepoli. Successivamente lo stesso San Francesco si recò a Bologna accolto con onore da tutta la città.

Negli anni 1223 - 1227 visse a Bologna anche Sant'Antonio

da Padova, il quale venne incaricato da San Francesco di insegnare teologia. Durante il suo soggiorno, tradizione vuole che Sant'Antonio si ritirasse spesso in preghiera presso un eremo, già utilizzato da San Francesco durante la sua permanenza, sul colle dell'Osservanza vicino al Santuario della Madonna del Monte. Di questo eremo utilizzato dai due santi, si conserva ancora una cella a ricordo all'interno del convento.

Questa ipotesi di un primo insediamento francescano risalente alla prima metà del XIII secolo, venne però smentita dall'Azzoguidi, frate minore conventuale, il quale riteneva che la prima presenza francescana risalisse all'insediamento osservante del 1403. E' infatti noto che Sant'Antonio venne inviato a predicare presso Montepaolo, comunemente identificato con un convento nel comune di Dovadola nei colli forlivesi. Ma alcuni cronachisti come Flaminio da Parma, Francesco Gonzaga e p. Giovan Francesco Malazappi da Carpi, avanzarono l'ipotesi che potesse trattarsi proprio del convento detto dell'Osservanza, ma denominato San Paolo in Monte. (Gonzaga, 1603; Flaminio da Parma, 1760; Wadding, 1625)

Successivamente anche il superiore provinciale padre Carlo Francesco da Bologna, in una relazione inviata al Ministro Generale nel 1827, riaffermò ufficialmente la presenza di insediamenti francescani databili al XIII secolo. A rafforzare questa ipotesi viè il recente ritrovamento, durante uno scavo, di alcune ceramiche e vasellame con stemmi francescani databili ai secoli XIII/XIV.

### 3.3 - Inseediamento dei Frati Minori Osservanti

La prima testimonianza ufficiale di uno stabilimento dei Frati Minori dell'Osservanza sul colle risale però al 1403 quando papa Bonifacio IX, con bolla del 23 marzo, concesse la facoltà al frate B. Giovanni da Stroncone, coadiutore del Beato Paolo da Trinci nel promuovere la riforma Osservante, di ricevere in dono o eredità due eremi e di trasformarli in conventi. Questi venne invitato dal giurista Antonio da Budrio a realizzare a Bologna uno di questi conventi; il frate si stabilì quindi sulla cima di un colle boscoso fuori dalla città, vicino al Santuario della Madonna del Monte, nella parrocchia di San Mamante o San Mamolo. Qui i frati realizzarono una piccola ed umile abitazione per sé ed i suoi confratelli. La scelta del frate B. Giovanni da Stroncone ricadde su questo luogo probabilmente grazie al fatto che la tradizione lo volesse sede degli eremitaggi di Sant'Antonio. I frati osservanti cercavano infatti di recuperare gli eremi trascurati dall'Ordine.

Si ricorda inoltre che i frati non aderenti alla riforma Osservante sancita nel 1403, verranno poi chiamati "Conventuali" e gli Osservanti "eremiti della stretta Osservanza". Per eremosi intendeva una dimora isolata dai centri abitati, solitamente di piccole dimensioni, mentre per convento si considerava una dimora religiosa all'interno o nei pressi della città, e di una certa grandezza. La denominazione della riforma diede poi il nome comunemente e tutt'ora utilizzato per il convento, detto appunto "dell'Osservanza".

Si riporta di seguito il testo della bolla papale di concessione.

*Bolla di Bonifacio IX del 23 marzo 1403*

*Bonifacius Ep(iscop)us servus servorum(m) Dei. Dilectis filiis*

*Ioan(n)i de Stronconio, et alijs Fr(atri)bus or(din)is Minoru(m) in Provincia S(anc).<sup>ti</sup> Franc(is).<sup>ci</sup> et Tuscia(e), im(m)emorem dicti ord(in)is constitu-tis, salute(m) et Ap(osto)licam benedictione(m). Sacra(e) v(estra)a(e) Religionis, sub qua devotum, ac sedulum exhibitis D(omi)nu(m) famulatu(m), promeretur honestas, ut votis v(es)tris, illis pra(e)sertim, per qua(e) divinus cultus augeri, et v(es)tra Religio propagari valeat, favorabilit(er) annuamus. V(es)tris ig(itu)r in hac parte supplicationibus inclinati, tibi fili Joan(n)es (ut asseris) Vicarius dilecti filij Henrici de Asti, Ministri Gen(er)alis or(din)is Fr(atr)um Minoru(m) super certa loca, sive heremitoria solitaria, et devota pr(ae)dicti or(din)is in Prov(inci).<sup>a</sup> S(anc).<sup>ti</sup> Fra(ncis).<sup>ci</sup> et Thuscia(e), s(ecund)um morem dicti ord(in).<sup>is</sup> consistentia, per eundem Ministru(m) deputatus existis, ac tuo in huiusmodi officio successorj, Necno(n) vobis filij alij Fr(atr)es recipiendi duo loca, seu heremitoria pro usu et habitatione v(est)ris in Italia, ad hoc Diocesani loci, vel alicuius alterius licentia minime requisita, si loca, sive hemitoria huiusmodi, vobis simul ac successive largitione fidelium concedantur, et etiam, sive sine Clerici vel laici, qui vobis illa concesserint, et in utroq(u)e ip(so)rum locoru(m) dummodo ad hoc sint congrua et honesta, et vobis videatur fundandi, aedificandi, et construendi sing(u)las Ecc(lesi)as cum coemeterio, campanili, campanea, domibus, et alijs necessarijs officinis, et loca ip(s)a perpetuo h(abe)ndi, et retinendi, felicitatis recordationis Bonifacij Papa(e) octavi ra(e)decessoris n(ost)ri, prohibente ne Fr(atr)es or(din).<sup>is</sup> Mendicantiu(m), in aliqua Civitate, Castro aut Villa, seu alio loco quocunque ad hahitandu(m), domos, vel loca qua(e) cuncunque (sic) de novo recipere pra(e)sumant absq(ue) Ap(osto)lica(e) Sedis licentia speciali faciente plena(m) et espressa(m)*

*de inhibitione huiusmodi mentione(m), et qualibet alia eiusdem Sedis Constitutione contraria nequaquam) ohstante, iure tamen parochialis Ecc(lesi)a(e), et cuiuslibet alterius in omnibus sempre alvo, plenam et libera(m) tenore prae(sen)tium licentia(m) elargimur. Volentes et vobis auctoritate Ap(ostoli).<sup>ca</sup> concede(n)tes, quod vos, vel alij Fr(atr)es dicti or(din).<sup>is</sup> qui in dicti locis pro tempore residebunt, gaudeatis, et gaudeant o(mn)ibus privilegijs, indulgentijs gratijs, exemptionibus, et liberatibus, quibus vos, et alij Fr(at)res eiusdem or(din).<sup>is</sup> ex concessionibus Ap(osto)licis gaudeant, seu et(iam) potiuntur. Nulli ergo o(mn)inmo ho(m)i(nu(m)) liceat hanc pagina(m) n(ost)ra(m) concessionis, et voluntatis infingere, vel ei ausu temerarii contraere. Si quis aut(em) hoc attentare pra(e)sumpserit, indignatione(m) o(min)ipotentis Dei, et Beatoru(m) Petri et Pauli Ap(osto)lorum eius se noverit incussurum. Datu(m) Roma(e) apud S(anc).<sup>tum</sup> Petru(m) X. Kal(endas) Ap(ri).<sup>lis</sup> Pont(ificatu)s n(ost)ri an(n)o quarto [decimo].*

*R(registra).<sup>ta</sup> grat(is) pro Deo, de Man (da).<sup>to</sup> D(omi)ni n(ost)ri P(a)p(ae).*

*Ja(cobus) (?) Angelus. (A.S.B., Serie 12/6074, L.I, Vol. I, 1403)*

Questo primo insediamento risultò però presto insufficiente ad accogliere il numero crescente di frati, per cui il giurista Antonio da Budrio nel 1406 donò ai Minori Osservanti un terreno, di fronte alla casa attuale, su cui poter costruire la chiesa e una casa da trasformare in convento, col patto che i frati edificassero la chiesa dedicata a San Paolo ed ivi vivessero secondo la regola francescana. La dedica a San Paolo, secondo P. Fernando da Bologna, è da attribuire al fatto che su questo colle esisteva già

una chiesa dedicata a San Paolo Apostolo dei confratelli detti del Bottazzo, ceduta ai frati per fabbricare la loro chiesa. Nel 1409, Papa Alessandro V, tramite una bolla datata 9 Dicembre, concesse ai frati la licenza di abbandonare la vecchia casa e di costruirne una nuova e più adatta ai loro bisogni, dotata di Chiesa, campanile, cimitero, chiostro con le officine, e di trasferirvisi.



Fig. 7 - "La vecchia chiesa dell'Osservanza", collezione d'arte Cassa di Risparmio (G. Fancelli 1795)

Di seguito la trascrizione della suddetta bolla.

*Bolla dell'antipapa Alessandro V (1 dicembre 1409)*

*Alexander Ep(iscop)us servus servoru(m) Dei. Dilectis filijs  
Ministro Prov(inci).<sup>a(e)</sup> Thuscia(e) s(ecundu)m morem dicti ord(in).*

*is*

*Salutem et Ap(ostoli).<sup>cam</sup> ben(edictionem). Sincera(e)  
devotionis affectus quem ad nos, et Roman(um) gentis Ecc(elsi)am,*

*ac Religionis honestas, sub qua in humilitatis sp(irit)um devotu(m) redditis altiss(im).<sup>o</sup> famulatu(m), promeretur, ut ad ea favolabili(ter) intendamus, qua(e) vobis fore co(n)spicimus opportuna (sic). Sane petitio pro parte v(est)ra nobis nuper exhibita (sic) continebat, quod de quada(m) domo iuxta Bonomia(m) infra Parochiam S(anc).<sup>ti</sup> Mama(e) consistente, alias pro usu et habitatione v(est)ris, vigore quorundam literaru(m) quonda(m) Bonifacij in sua obedientia noni nuncupati, vobis concessa, quam construere, et aedificare incepistis, et qua(e) nondu(m) h(abe)t Ecc(lesi)am, et co(e)meteriu(m), cum sit nimis arcta et inhabilis pro v(est)ri usu et habitatione praedictis, ad quendam locu(m) in opposito dicta(e) domus consistente, et per non(n)ullus devotos cives Bononienses vobis Liberali(ter) (donatum) [parola cancellata] pro v(est)ris usu et habitatione pra(e)dictis congruu(m) et honestu(m) transire, et illic novam domu(m) pro eisdem usu et habitatione v(est)ris, cu(m) Ecc(lesi)a, seu oratorio, campanili, campana, co(e)meterio, claustro, domibus, et alijs necessariis officinis construere, et aedificare, et propterea domu(m) pra(e)dictam direre, ac lapides, et coementu(m) nec no(n) alias eius materias in aedificationem et constructione(m) huiusmodi nova(e) domus convertere desideratis, si ad hoc Sedis Ap(ostoli)ca(e) accedat assensus. Quare pro parte v(est)ra nobis fuit humiliter supplicatu(m), ut vobis perficiendi pra(e)missam licentiam concedere de speciali gratia dignaremur. Nos itaq(ue) huiusmodi supplicationibus inclinati, vobis faciendi pra(e)missa, Dioecesani loci, et cuiuscunque alterius licentia super hoc minime requisita. Constitutioni felicis recordationis Bonifacij Papa(e) octavi pra(e)decessoris n(ost)ri prohibente ne ord(in).<sup>is</sup> Mendica(n)tiu(m) Fr(atr)es in aliqua Civitate, Castro vel Villa, seu alio loco quocunq(ue) domos, sive loca de novo recipere, seu*

*etiam recepta mutare pra(e)suma(n)t, absq(ue) licentia eiusdem Sedisspeciali, facient plena(m) et espressa(m) de prohibitione huiusmodi me(n)tione(m), et alijs contrarijs nequaquam obstantibus. Iure tamen Parochialis Ecc(les)ia(m), et alterius cuiuslibet, in omnibus sempre salvo, plena(m) et libera(m) vobis tenore pra(e)se(n)tiu(m) concedimus facultatem. Et nihilominus voibz indulgimus, quod locus ip(s)i noviter construendus postquam Fr(atr)es or(din).<sup>is</sup> v(est)ri codicillum se transtulerint moraturi, ac persona(e) in eo dege(n)tes, pro tempore o(mn)ibus privilegijz, libertatibus et im(m)unitatibus, quibus domus antiqua pra(e)dicta, et degentes in ip(s)a, et caeteri Fr(atr)es dicti or(din).<sup>is</sup> gaudent, et etuntur, ac gaudebant, et utebantur, libere uti valeant et gauder(e). Nulli ergo o(mn)ino jo(m)inu(m) liceat hanc pagina(m) n(ostr)am concessionis infringere, vel ei ausu temerario contraire. Si quis aut(em) hoc attentare praesumpserit, indignatione(m) o(mn)ipote(n)tis Dei, et Beatoru(m) Petri et Pauli Ap(osto)loru(m) eius se noverit incururu(m).*

*Datum Pistorij V. K(a)l(endas) Decem(b).<sup>ris</sup> Pont(ificatu).<sup>s</sup> n(ost)ri anno primo. (A.S.B., Serie 12/6074, L.I, Vol. 2, 1409)*

La chiesa ed il convento furono completati entro il 23 dicembre del 1417, mentre era superiore padre Ludovico da Bologna. Nello stesso anno, i monaci Olivetani di San Michele in Bosco, in qualità di legittimi eredi del giurista Antonio da Budrio, rinunciarono a favore dei frati Minori Osservanti di San Paolo in Monte, a tutti i diritti che potessero avere su quel campo in cui era stata edificata la Chiesa.

In poco tempo, complice la sua posizione centrale tra l'Emilia e la Romagna, perché sorto in una città famosa per la sua Università e assai importante per il suo movimento culturale

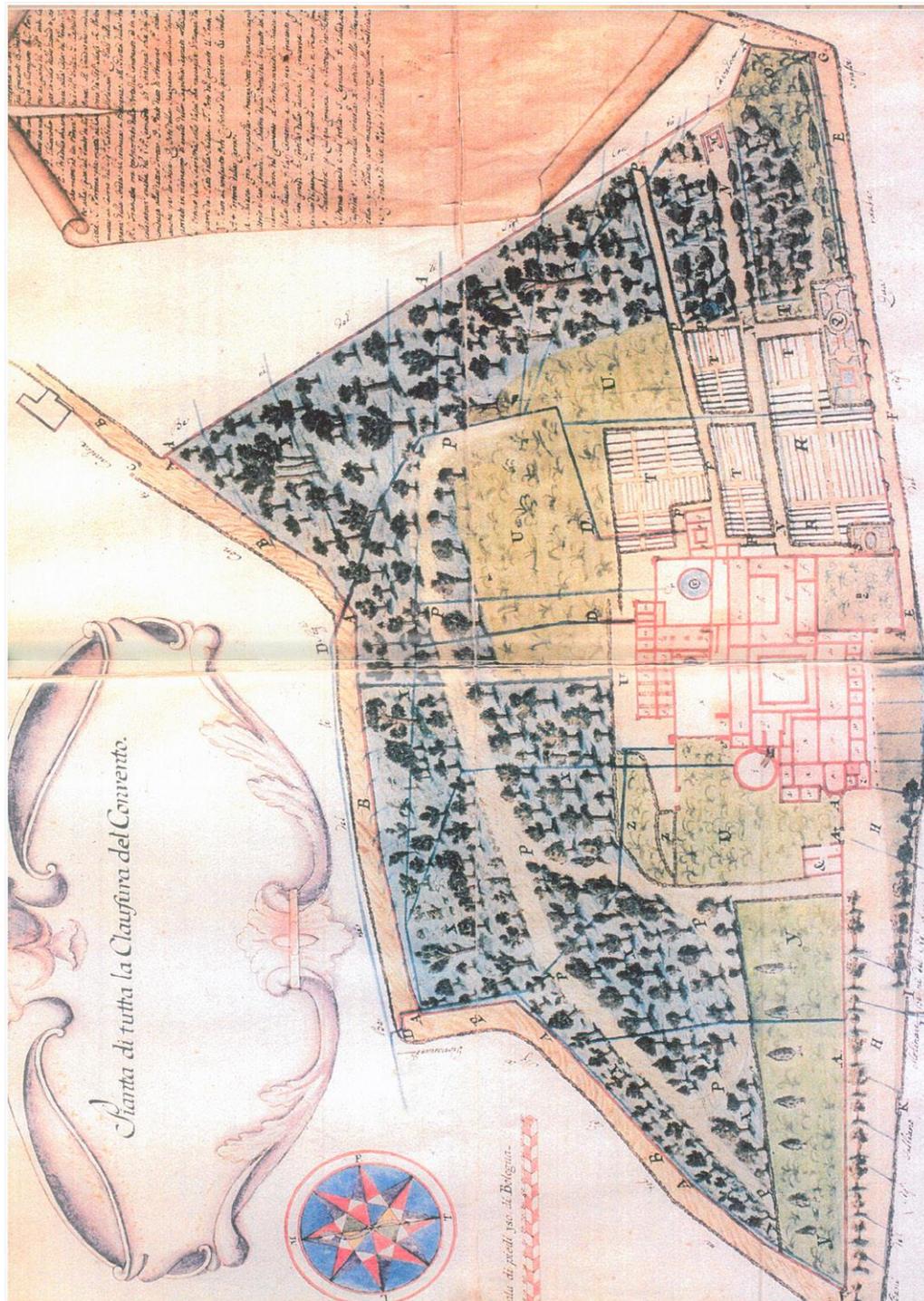


Fig. 8 - Pianta di tutta la clausura del convento (Archivio S. Paolo in Monte, Lib. VI, Vol. I, n. 7)

e religioso, il convento assunse grande prestigio al punto da ospitare nel maggio del 1431 il primo Capitolo Generale della Riforma Osservante; vi parteciparono fra gli altri San Giovanni da Capestrano e San Bernardino da Siena, già recatosi all'Osservanza durante la quaresima del 1423 o 1424, il quale donò ai frati la preziosa immagine toscana della Madonna delle Grazie.

In quella occasione Papa Eugenio IV impose che fossero eletti sei predicatori tra i più celebri e che questi venissero lasciati liberi da ogni ufficio, in modo tale da essere pronti ai suoi ordini nella lotta contro le eresie e l'impero ottomano. Vennero scelti, S. Giovanni da Capestrano, S. Giacomo della Marca, B. Alberto da Sarteano, P. Bartolomeo Giamense, Giacomo Primadazie P. Lodovico da Bologna, per essere inviati in tutto il mondo per spronare i sovrani e i popoli contro l'invasione turca. San Giovanni da Capestrano venne nuovamente incaricato, durante il capitolo generale del 1455, di sostenere la crociata contro i turchi che avevano conquistato Costantinopoli. L'avanzata ottomana venne fermata l'anno successivo a Belgrado, ed il santo morì pocodopo.

Sebbene il convento fosse in un luogo ameno e salubre, tuttavia, si trovava in un luogo decentrato rispetto alla città, non risultando quindi comodo per i frati che dovevano svolgere la loro missione spirituale fra la gente o il loro magistero all'Università, anche perché all'epoca non esisteva ancora la strada odierna. Il papa Nicolò V nel 1447, concesse ai frati del convento di avere un luogo in città senza campana e campanile per la cura dei frati infermi, contraddicendo la bolla di papa Bonifacio che aveva proibito ai frati la costruzione di conventi all'interno della città. Venne quindi identificato dal Vicario Generale Giacomo Primadizzi

il luogo di Sant'Anna, nella parrocchia di San Mamolo presso le mura della città. L'8 dicembre 1450 si rese necessario l'acquisto di un terreno attiguo all'abbazia di San Procolo.

L'influenza crescente del convento è testimoniata dal fatto che nel 1473 il B. Michele Carcano da Milano scese dal convento dell'Osservanza per predicare a favore della fondazione del "Mons Pietatis", il monte di pietà divenuto poi la Banca del Monte. L'efficacia della sua azione determinò, il 22 aprile 1473, la nascita del Monte di Pietà di Bologna.

Nel 1475 papa Sisto IV concesse ai frati dell'Osservanza di acquistare la chiesa con annesso convento costruita dai monaci basiliani nel 1300, appena fuori porta San Mamolo. La chiesa venne acquistata in cambio di un Oratorio dedicato a Sant'Antonio da Padova in parrocchia Santa Margherita; vennero inoltre effettuati lavori, che termineranno nel 1488, di riadattamento del convento e della chiesa per rispondere alle esigenze dei frati, dedicando quest'ultima alla Santissima Annunziata. Da semplice ospizio che doveva servire alla comodità dell'Osservanza, diventò il convento principale ed uno dei più celebri dell'ordine; di conseguenza San Paolo in Monte si trasformò in luogo di ritiro e di preghiera. (Poli, Rubbini, 1999)

### 3.4 - Il Cinquecento

Già nel secondo decennio del XVI secolo la chiesa e il convento di San Paolo in Monte affrontarono l'inizio di un periodo di decadenza ed abbandono. In un verbale del 16 maggio 1511 si trova infatti scritto "Si faccia il Guardiano del luogo superiore di San Paolo in Monte", disposizione ripresa nel 1516 e diventata successivamente una prassi.



Fig. 9 - Interno della chiesa di S. Paolo in Monte, Museo dell'Osservanza (N. Descarani, 1836)

Questo fa intendere che vi fosse un guardiano anche per il luogo inferiore del convento, ovvero la chiesa della SS. Annunziata; da questo momento in poi i conventi saranno formalmente distinti. Mentre l'Annunziata diventerà, grazie alla vicinanza alle istituzioni cittadine tra cui l'Università, sede di uno Studio

Generale dell'Ordine, l'Osservanza tornerà alla sua funzione originaria, cioè di eremo, ospitando una dozzina di frati. Durante questo periodo, vennero spostate in una posizione più accessibile alla devozione dei fedeli sia la tavola col "Nome di Gesù" di San Bernardino, che la "Crocifissione" di Orazio di Jacopo.

### **3.5 - Il Seicento e il Settecento**

Dal 1601 il convento dell'Osservanza fu assegnato ai frati Minori Riformati, separati dai frati Minori Conventuali dalla riforma del 1517. In breve tempo il convento tornò ai fasti del XV secolo, al punto da diventare Curia Provinciale, infermeria e casa di studi, dotato inoltre di una importante biblioteca ed archivio, contenente libri preziosi, codici e antiche pergamene.

I beni della chiesa non erano però soltanto materiali, infatti essa custodiva anche numerose reliquie, tra cui memorie di Gesù Cristo, San Pietro, San Paolo, San Francesco, Sant'Antonio nonché di San Giovanni da Capestrano che soggiornò presso il convento.

Tra le opere principali effettuate in questo periodo è da annotare la realizzazione del muro di recinzione e della cisterna per l'acqua nel 1609, grazie alle donazioni della famiglia Savignoni Ravaglia, la quale oltre alle necessità dei frati soddisfaceva anche quelle delle famiglie contadine dei paraggi.

Agli inizi del 1600 sorsero anche alcuni dissidi con il complesso della SS. Annunziata. Questi derivavano dal fatto che i due conventi, eretti a breve distanza uno dall'altro, ospitavano entrambi i frati minori, ordine mendicante. Ciò portò i frati dei due conventi a contendersi il territorio da visitare durante le elemosine.

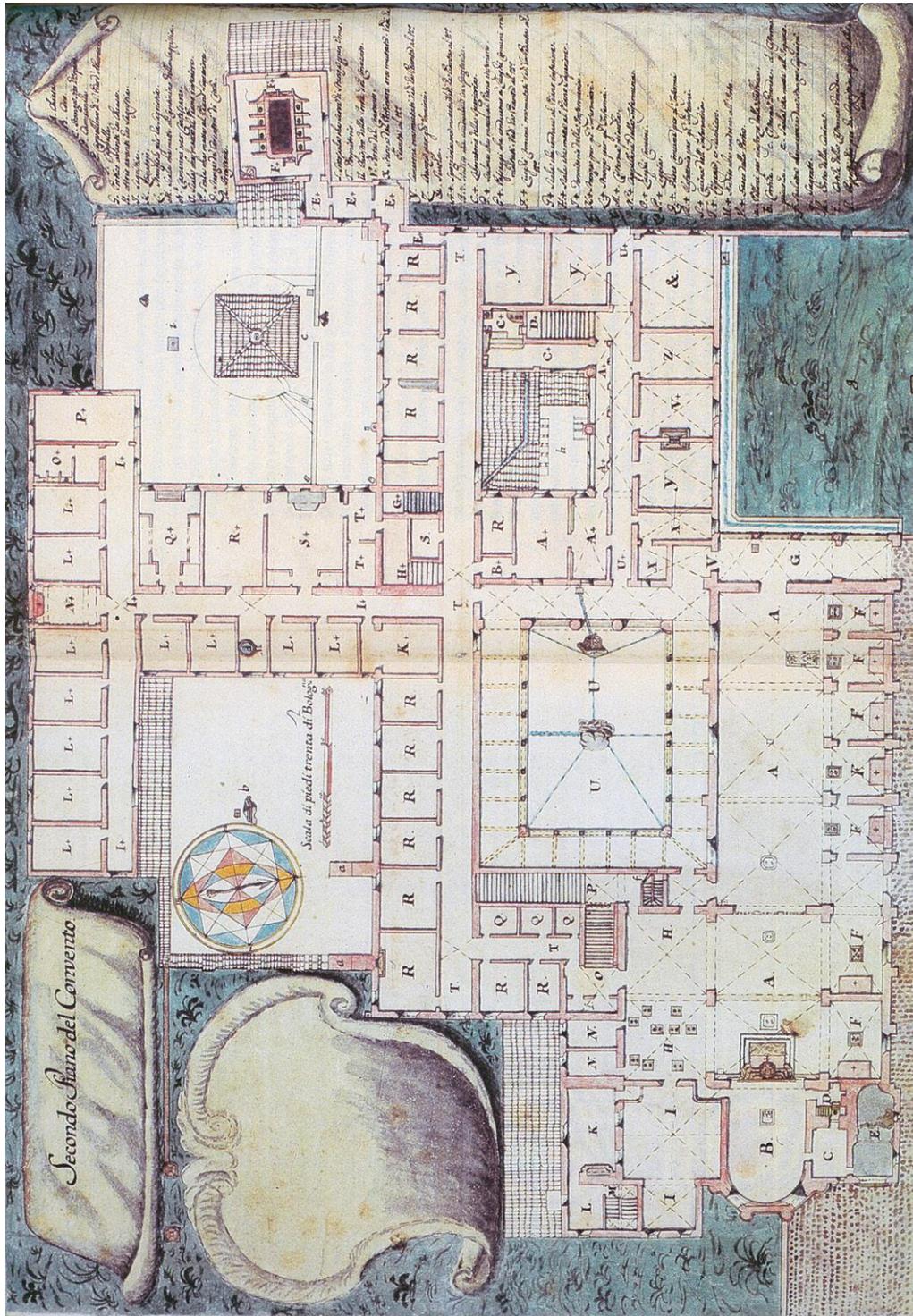


Fig. 10 - Pianta del piano terra del convento, anno 1773 (A.S.B. 11/6073, n. 9)

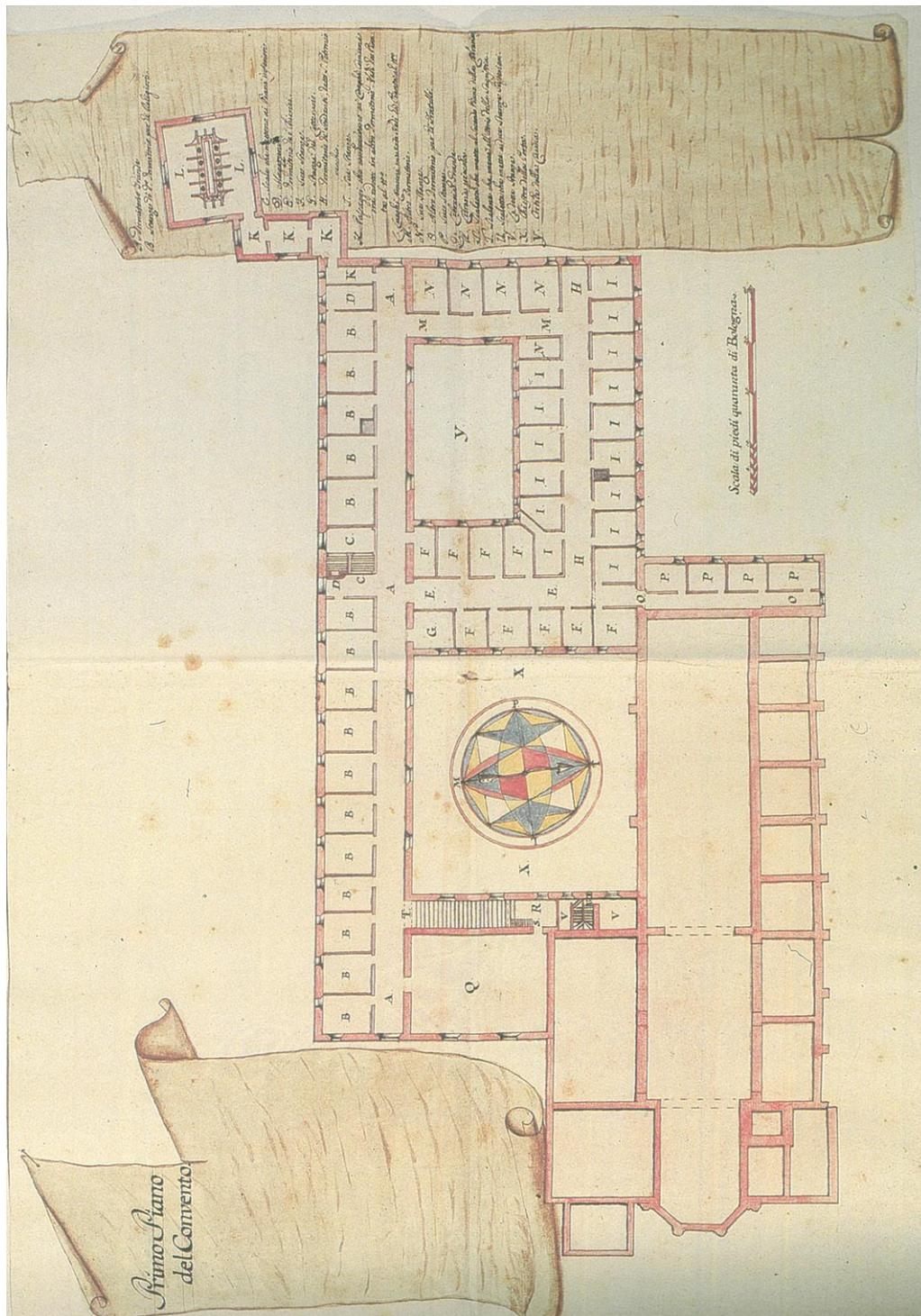


Fig. 11 - Pianta del piano primo del convento, anno 1773 (A.S.B. 11/6073, n. 7)

La questione venne risolta nel 1604 con una disposizione da parte dell'Ordine che prevedeva che entrambi i conventi potessero elemosinare nel medesimo territorio senza dovere nulla l'uno all'altro.

Nel 1660 fu realizzata la strada che conduce alla Chiesa di San Paolo in Monte, così come la si conosce ora, per volontà del cardinale Girolamo Farnese che affidò il progetto all'architetto Paolo Canali. Il lavoro, che aveva comportato un notevole dispendio di denaro, fu compiuto con grande attenzione e con particolari accorgimenti tecnici per non far “*guastare dalle acque la bella strada*” che consentiva di raggiungere agevolmente la chiesa di Mezza Ratta, la Madonna del Monte e la chiesa di San Paolo in Monte.

A tal fine furono realizzati degli incassamenti per far defluire le acque e si costruirono chiaviche e fossi. Era quindi necessario che la strada fosse rispettata e mantenuta praticabile; perciò il 5 maggio 1662 lo stesso cardinal Farnese firmò un bando sopra la manutenzione e conservazione della strada nuova dell'Osservanza. In esso si faceva assoluto divieto agli abitanti delle adiacenze “*ad innovare cosa alcuna in detta strada, né a rompere condotti, chiaviche e bossi ... né a tagliare alberi di qualunque sorte*”; la pena a chi violava le disposizioni fu fissata in 100 scudi d'oro.

Nel 1983 sono stati realizzati lavori di ripristino del percorso pedonale acciottolato ed è stata ristrutturata l'antica strada in occasione dell'VIII centenario della nascita di San Francesco.

Nel secolo XVIII soggiornò presso l'Osservanza S. Leonardo da Porto Maurizio, probabilmente il principale esponente della riforma, nonché famoso predicatore e diffusore della pratica religiosa della via Crucis.

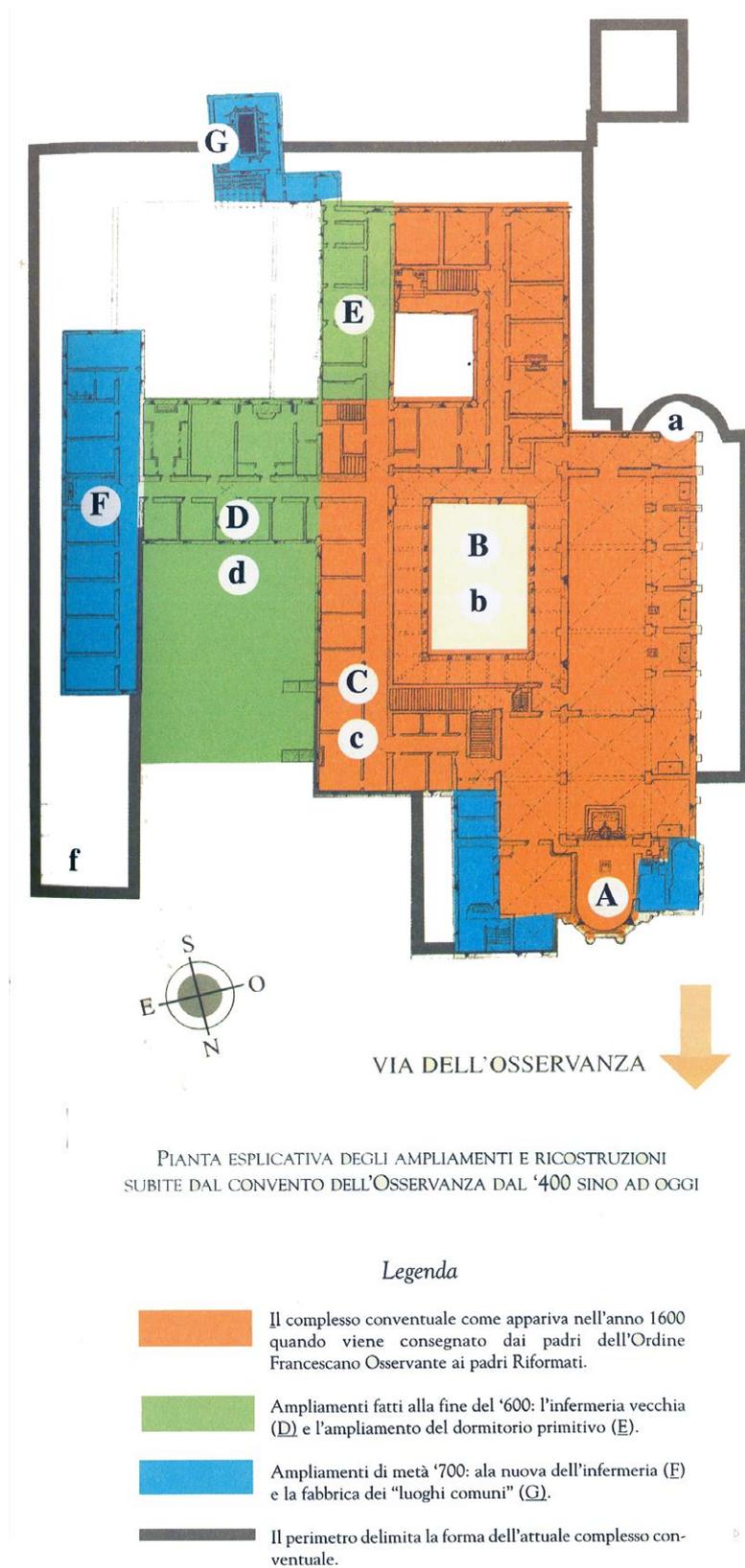


Fig. 12 - Pianta esplicativa degli ampliamenti e ricostruzioni (Poli, 1999, Pag. CXI)

Tutt'ora il convento custodisce alcune sue reliquie ed in suo ricordo, nel 1761, poco dopo la sua morte, fu eretta la grande croce di pietra ai piedi della salita, in sostituzione di quella in legno. Successivamente nel 1771 vennero costruiti anche i 14 pilastri della Via Crucis con bassorilievi in terracotta che raffigurano gli avvenimenti della "via dolorosa", ad opera di Gaetano Pignoni. Il 26 maggio 1779 il grande Luigi Galvani vestì l'abito del Terzo Ordine Francescano.

### **3.6 - Invasione Napoleonica e ricostruzione**

Con l'inizio del XIX secolo, e l'arrivo delle truppe Napoleoniche a Bologna il 18 giugno 1796, si applicarono anche in Italia, ed a Bologna, i principi di libertà, uguaglianza e fratellanza nati con la rivoluzione francese, ma in questa occasione i francesi ne approfittarono per appropriarsi dei tesori artistici di chiese e palazzi, vuotando anche con esose imposizioni le tasche dei cittadini e le casse dei Monti di Pietà. Da questo saccheggio non scamparono i religiosi, che nel 1810, previo lo sfratto, si videro tutto assegnato al demanio. Anche il complesso di San Paolo in Monte rientrò nel novero delle soppressioni. L'avvocato Antonio Aldini, deputato della Repubblica Cisalpina e fedele di Napoleone, per ingraziarsi il generale francese, acquisì sia la chiesa dell'Osservanza sia quella della Madonna del Monte nel 1811 per costruire l'adiacente Villa Aldini, come destinazione dei soggiorni bolognesi di Napoleone. Aldini distrusse le due chiese per ricavare il materiale destinato alla nuova costruzione. Dell'antica chiesa di S. Paolo in Monte non rimase quasi nulla, mentre Napoleone non

mise mai piede nella villa voluta in suo onore da Aldini in quanto il progetto non fu mai completato.

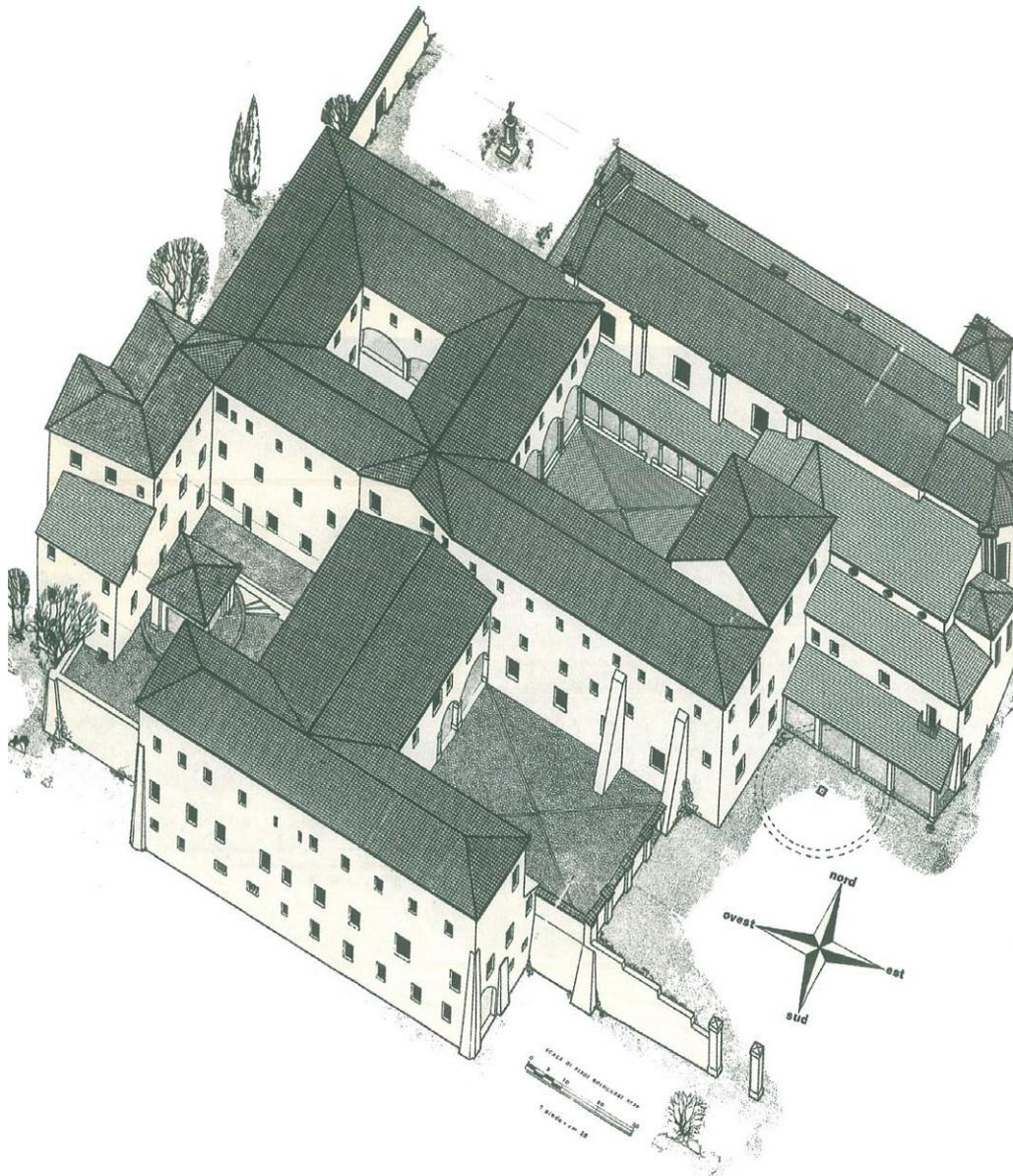


Fig. 13 - Ricostruzione assonometrica del convento prima dell'800 (Poli, 1999, Pag. CXIV)

Terminata la bufera napoleonica, i religiosi dispersi si raccolsero in un convento a San Lazzaro di Savena, in attesa di ritornare alla loro Osservanza. Quel che rimase del grande complesso dell'Osservanza fu acquistato nel 1824 dalla signora Rosa Facci

Baccilieri che lo riconsegnò ai Frati Minori. Su impulso del padre guardiano Leopoldo Bassi nel 1826, e grazie alle donazioni dei bolognesi, fu avviata la ricostruzione della chiesa.

Il 18 giugno 1826 si svolse la cerimonia della benedizione e posa della prima pietra, compiuta dal cardinale Carlo Opizzoni, sopra i fondamenti della vecchia chiesa, ma con la facciata rivolta a levante. Da un estratto della Gazzetta di Bologna dell'epoca (Gazzetta di Bologna, n. 49, 20 Giugno 1826) si apprende che la prima pietra fu posata in un luogo destinato nel mezzo della curva del coro e recava l'incisione:

“LAPIS · SACER · AVSPICALIS  
A · KAROLO · OPPIZZONIO · CARD · ARCHIEP · AEDI  
· FRATRVM · FRANCISCALIVM · REFORMATOR · IN ·  
HONOREM · PAVLLI · APOST ·  
A · SOLO · RESTITVENDAE SOLLEMNIB ·  
CAERIMONIIS · STATVTVS XIII · K · IVL  
· A · MDCCCXXVI“

Il progetto della nuova chiesa, realizzato dall'architetto Vincenzo Vannini, prevedeva una struttura basilicale a tre navate di stile neoclassico, con soffitto a plafone, che portava cinque quadri del pittore Filippo Pedrini, e sei altari laterali con quadri e sottoquadri di Carlo Bononi, della scuola veneziana, del Boccalini, di Alessandro Franceschi, di Elisabetta Sirani, di Carlo Cignani, di M. A. Colonna, della Gargallo, di Girolamo Gatti e Barbara Burini; inoltre i quadri appartenenti alla vecchia chiesa distrutta vennero conservati nella nuova o nel convento. Sul fronte è stato aggiunto un antitempio con due laterali alla Palladiana, che danno ingresso uno al convento, e l'altro alla cappella di San Pietro d'Alcantara.

Il 13 luglio 1828 si svolse la cerimonia di consacrazione della chiesa di San Paolo in Monte, “davanti alla gioia ed esultanza di tutta la Famiglia Religiosa Francescana, nonché dei benefattori e fedeli”. (Borsello, 1828)



Fig. 14 - Veduta della nuova chiesa di S. Paolo in Monte, museo dell'Osservanza (G. Termanini)

Il 4 agosto dello stesso anno, i frati fecero ritorno all'Osservanza in processione da San Lazzaro, facendole riacquistare l'antico splendore, divenendo in breve tempo il Convento principale della Provincia di Santa Caterina da Bologna sede del Ministro Provinciale. Nel 1857, mentre Papa Pio IX si trovava a Bologna, volle onorare di una sua visita la Chiesa e il Convento dell'Osservanza.

Nel 1867, a seguito della soppressione degli ordini religiosi da parte del regno d'Italia, i frati furono nuovamente dispersi, ma riuscirono a salvare la ricca biblioteca. Rientrarono stabilmente al convento nel 1880, e, quando l'Osservanza divenne sede di

uno dei primi collegi serafici d'Italia, il complesso fu riscattato definitivamente. Fu inoltre riportata alla venerazione dei fedeli la Beata Vergine delle Grazie detta di San Bernardino, la quale viene celebrata con la staffetta dell'Osservanza, un corteo storico secondo la consuetudine iniziata da Annibale Bentivoglio nel 1443. Al loro ritorno nel 1880, i frati constatarono che il soffitto della chiesa era in condizioni di grande degrado: infiltrazioni d'acqua, lesioni, distacchi. Nel 1884 fu quindi rifatto il soffitto con l'attuale copertura a volta, sostituendo quello a plafone.

Fino al 1925 gli alunni accolti dal Collegio Serafico potevano essere al massimo 25; ma date le numerose richieste d'ammissione, padre Alfonso Pagani, Ministro Provinciale, nel 1924 decise l'ingrandimento del collegio. Si abbattono i muri di alcune piccole celle e venne sopraelevato un braccio del convento, adattando dormitori, aule scolastiche, ecc. Nel 1926 ai "fratini studenti" si aggiunsero i "fratini artigianelli", ragazzi che, imitando san Francesco, non salivano al sacerdozio, ma abbracciavano la vita francescana e imparavano mestieri per soddisfare le necessità del convento.

Il periodo bellico 1943-1945 portò ad un arresto dello sviluppo del convento dell'Osservanza. In seguito al bombardamento di Bologna del 25 luglio 1945 il collegio fu costretto a sfollare. Inoltre il primo dicembre 1944 il complesso dell'Osservanza fu colpito da un'incursione aerea che portò al crollo di un'ala del convento. Terminata la guerra si pensò alla ricostruzione e all'ampliamento per ospitare l'accresciuto numero dei frati. Successivamente, esigenze logistiche imposero trasformazioni, spesso affrettate, che modificarono notevolmente l'architettura del convento.

Negli anni 1950 - 1960 si impose una radicale ristrutturazione

del collegio, che modificò totalmente il profilo architettonico dell'Osservanza. Si effettuò il completamento della facciata della chiesa, con l'aggiunta del porticato di destra. Il vasto terreno conventuale, ancora circondato in grande parte da un muraglione del secolo XVI, è articolato in spazi campestri, ortivi e frutteti, coltivati dagli stessi frati. Dietro la chiesa, in fondo ad un bel viale di cipressi, una cappella del 1929 custodisce una statua di S. Leonardo da Porto Maurizio. Lateralmente al tempio, un'altra cappella, oggi nascosta dalla ricostruita loggetta di ponente, ricorda la sosta di S. Antonio da Padova.

### **3.7 - Architettura della Chiesa di San Paolo in Monte**

Alla fine del XIII secolo il complesso del convento di San Paolo in Monte era una struttura ben organizzata. Osservando la pianta che riproduce tutti gli edifici del complesso, si nota come nel corso degli anni il convento si sia evoluto ed espanso fino ad ottenere un livello di autosufficienza esemplare. Si possono riconoscere infatti per ogni locale la propria destinazione d'uso. La chiesa, in particolare, si presenta con una unica navata con alcune cappelle laterali. Si ha un'unica raffigurazione dell'esterno, dovuta a Pietro Fancelli, la quale non aggiunge grandi informazioni, ma mostra come si presentasse la chiesa ad un visitatore giunto in cima al colle (Fig. 7, pag. 46). All'interno del Museo del convento è conservato anche un dipinto degli interni opera di N. Descarani, "Interno della chiesa di San Paolo in Monte" (Fig. 9, pag. 52), ma non è attendibile come rappresentazione realistica della configurazione dell'epoca, in quanto fu dipinto nel 1836 basandosi

sui manoscritti disponibili.

### **Soppressione e distruzione della chiesa originale**

Durante la visita a Bologna di Napoleone tra il 21 e il 25 giugno 1805, questi visitò spesso i colli bolognesi per ammirare il panorama che gli ricordava quello visibile dalla villeggiatura imperiale di Vienna, il castello di Schönbrunn. Napoleone, amando il paesaggio e le pitture da esso ispirate conservate nella Rotonda, come riporta Giuseppe Bosi nei suoi racconti, affermò “[...] non conosco luogo di questo più atto ad innalzarvi una casa di piacere per il Re d’Italia”. Questa aspirazione divenne realtà quando il conte Antonio Aldini, nominato Segretario di Stato, decise di costruire una villa in forme classiche in onore dell’imperatore. Del complesso della Madonna del Monte si salvò giusto la Rotonda che venne inglobata nel nuovo edificio, mentre la chiesa di San Paolo e parte del convento vennero demolite per recuperarne i materiali da destinare alla costruzione della villa.

### **Ricostruzione del 1828**

A seguito dell’acquisto e della successiva donazione di ciò che rimaneva della chiesa da parte della benefattrice Rosa Facci Baccillieri, i frati furono in grado di intraprendere la ricostruzione della chiesa. La Gazzetta di Bologna annunciò che il 18 giugno 1826 era stata celebrata la cerimonia di posa della prima pietra alla presenza del cardinale Arcivescovo Carlo Opizzoni.

Per la ricostruzione venne incaricato dal padre Guardiano l’architetto Vincenzo Vannini, il quale si trovò di fronte ad una prova impegnativa. Doveva infatti ricostruire la chiesa con la prescrizione di riutilizzare le fondazioni della fabbrica precedente.

I frati affrontarono l'onere della ricostruzione soprattutto grazie alle offerte dei fedeli, non soltanto in denaro o materiali ma anche in prestazioni lavorative, dato che la posizione in cima al colle rendeva difficile l'approvvigionamento dei materiali da costruzione. Vannini scelse di capovolgere l'orientamento della chiesa, in modo da avere il fronte rivolto verso la strada di accesso, aprendosi ai visitatori con un ampio piazzale; la chiesa originaria infatti rivolgeva l'abside a chi vi giungeva dalla salita, questo perché si erano rispettate le regole liturgiche che imponeva l'orientamento ad oriente, in modo che il sacerdote, posto dietro l'altare e rivolto verso i fedeli, potesse guidare il gregge sorretto dalla luce della fede. All'interno, decise di creare un ambiente solenne di tipo basilicale. Progettò un vano ritmato dalla successione di moduli che definiscono gli elementi strutturali.

A causa degli interventi effettuati sulla chiesa nel tempo, oggi non si ha più la percezione dello spazio proposto da Vannini. La navata principale era in origine coperta da un soffitto piano a cassettoni, dorato e decorato con rosoni dipinti e cinque compartimenti centrali, i quali accoglievano i dipinti ad olio di Filippo Pedrini *“Le Quattro virtù cardinali”*, ed al centro *“San Francesco in adorazione della Immacolata Concezione”*.

La chiesa progettata da Vannini si presentava quindi come una chiesa ad aula unica con un alto soffitto, illuminata da finestroni sul perimetro, affiancata da due strette navate minori più basse rispetto al corpo centrale. Lo spazio risultava così diviso in tre navate, una centrale principale, e due laterali minori, rialzate di un gradino rispetto a quella centrale e di altezza minore. La navata centrale era scandita da quattro colonne per lato, di ordine tuscanico con basi ottagonali, che sostenevano una trabeazione

continua, di poco aggettante, ornata da dentelli. Lungo le navate laterali, nelle pareti esterne e centrati tra le colonne, si trovavano gli altari laterali.

Vi era l'intento di ottenere un effetto illusionistico di maggior profondità ed imponenza; tentativo duramente criticato dagli scritti di padre Lucantonio: *“Il disegno di questa Chiesa fu invenzione, come dissi, del Sig. Vannini (sic), il quale per distinguersi nelle prime sue produzioni, pretese di copiare la Chiesa di S. Maria Maggiore di Roma, ma oh quanto informemente! Tuttavia spalleggiato da alcuni Secolari gli riuscì di sorprendere il Povero P. Guard. Leopoldo, e fargli adottare a preferenza questo nuovo disegno, i frati tutti della Comunità non vi ebbero la minima influenza.”* E ancora *“Nel mezzo della nave, quattro per parte si distribuiscono le colonnate maggiori, e nell'interno del loggiato hanno di prospetto mezzi pilastri quadrati, che sostengono il soffitto dell'istesso loggiato, e dividono gli altari minori, giacché in questa chiesa non vi sono Cappelle propriamente dette tali e interne: ma un loggiato o portico seguito fiancheggia la navata sotto il Presbiterio: Quindi nasca, che dovendosi collocare sei Altari Minori, questi sono collocati in mezzo allo spazio, che divide un pilastrone, e l'altro: Cosa invero nuova nelle Chiese di Bologna, e quel che è più per essersi dovuto stare sui fondamenti della chiesa vecchia i basamenti della gran colonna hanno rubato in gran parte lo spazio interno delle Cappelle vecchie, onde nella nuova idea di un porticato seguito restano naturalmente gli Altari bassi, stretti e troppo vicini, non avendo che un intercolonnio intermedio, lo che reca in un modo ai Celebranti, che quasi si toccano, e in concorrenza s'imbroglia. [...] si tratta di un disegno di Chiesa tutto nuovo e per niente adattato al nostro fare.”*

L'altare, opera dello scaglionista Vincenzo Ansaloni, è posizionato in uno spazio sormontato da una volta a botte con lacunari, sorretta da quattro colonne isolate, sporgenti rispetto alla teoria delle colonne della navata. Per esaltare il gioco di ombre nei lacunari e la loro profondità, Vannini introdusse due finestre contrapposte alle reni degli arconi.

Alle spalle dell'altare, dopo un piccolo spazio sempre coperto da una volta a botte con cassettoni, si trovava il coro absidale, sormontato da un catino con costoloni i quali si incontrano in un cerchio in sommità. Anche questa semicupola è decorata tra un costolone e l'altro da cassettoni di minor profondità. Al centro dell'abside, all'altezza dell'imposta della copertura, vi era una decorazione composta da due angeli in stucco, realizzati da Alessandro Franceschi, che sorreggevano un oculo che illuminava per trasparenza un dipinto posto nella cornice circolare. In origine vi era uno Spirito Santo in forma di colomba, oggi sostituito dal monogramma di Cristo all'interno del sole raggiato, simbolo di San Bernardino.

Per quanto riguarda l'esterno la facciata della chiesa si presentava con un disegno simmetrico. Al centro vi era un pronao scandito da quattro colonne che sorreggono un timpano triangolare immediatamente sotto ad un finestrone tripartito. Ai lati due corpi bassi porticati ne prolungano la facciata aumentandone la monumentalità. Da questi si accede a destra alla cappella di San Pietro d'Alcantara, da quello di sinistra al convento.

Padre Lucantonio descrisse anche la chiesa al momento della conclusione dei lavori nel 1828: “[...] *l’altissimo soffitto, tutto seguito (cioè senza interruzioni) e solamente intersecato dalle travi grosse che servono da volto, e da chiave, che legano*

*tutto. E' egli pure contornato da cassettoni dipinti con rosoni nel mezzo. Nel centro poi si veggono altri cinque cassettoni, assai più grandi degli altri, ognuno dei quali contiene un quadro bislungo, rappresentante una figura al naturale dipinta ad olio con vivissimi colori, opera del Professor Pedrini. Quattro esprimono le Virtù Cardinali, e quello di mezzo, il P. S. Francesco, che adora l'Immacolata Concezione. Il resto del soffitto colle travi è dipinto a chiaro scuro, con stelle, quadrature, ad altri ornamenti, con le cornici dei quadri dorate. Questo magnifico soffitto è sostenuto da quattro mezzi pilastri nel mezzo della navata e da altri quattro negli angoli, scannellati a fresco [...] Per mantenere poi saldo, e difendere dalle acqua il soffitto, e i volti di tutta la chiesa, aldisopra resta tutto coperto da tavelle di pietra murate (coperturain tegole in cotto ed embrici). Otto grandi colonne, e rotonde colonne d'ordine toscano, scanellate a chiaro scuro con capitelli e basamenti bianchi sostengono tutto il peso della navata sotto l'architrave del cornicione."*

L'interno della chiesa appariva molto diverso da come è oggi, scandito nelle diverse parti da un colore uniforme in due toni. Il progetto neoclassico di Vannini prevedeva un ambiente molto luminoso dove le colonne e le paraste erano decorate illusionisticamente con scanalature, basi e capitelli di colore bianco ad imitare il marmo.

Una importante modifica al progetto originario del Vannini venne effettuata nel 1884. A seguito del secondo allontanamento dei frati dal convento, a causa di infiltrazioni d'acqua dovute al manto di copertura sconnesso, il soffitto a cassettoni presentava gravi lesioni e distacchi. A causa probabilmente della spesa ingente necessaria al restauro delle decorazioni, si scelse di sostituire il

soffitto piano con una copertura a volta in arelle. Altrettanto venne



Fig. 15 - Particolare della decorazione originale (Arch. Poggioli, 2016)



Fig. 16 - Particolare della decorazione originale (Arch. Poggioli, 2016)

fatto per le navate minori, dove i soffitti piani furono sostituiti

da voltine a padiglione. In questa operazione forse vi è anche un rifiuto per gli spazi troppo grandi e magnificenti voluti da Vannini, assumendo il carattere di censura. Ancora oggi è possibile vedere, accedendo al sottotetto, le parti terminali delle lesene e la fasciaa dentelli che costituiva il bordo del cassettonato. (Fig. 15 e 16, pag. 69)

Attorno al 1950, a causa di gravi cedimenti delle fondazioni, e delle conseguenti lesioni, si demolì il porticato di destra e la piccola cappella. Per continuare la venerazione a Sant'Antonio, che aveva sostituito San Pietro d'Alcantara nel culto della cappellina, venne realizzato a fianco della chiesa un piccolo edificio in blocchi di pietra serena. Nel 1988 vennero eseguiti lavori per contrastare il cedimento differenziato delle fondazioni che interessavano il lato destro della navata e la navata minore. Vennero posti in opera dodici pali a rinforzo delle fondazioni e consolidata la copertura lignea; inoltre venne tirantato il grande cornicione in stucco. Nella stessa occasione venne rifatto anche il pavimento interno con una veneziana a disegno. Soltanto alla fine del secolo scorso fu possibile ripristinare il disegno originale del fronte con la ricostruzione del porticato di destra, riutilizzando gli elementi di arenaria originali che erano stati conservati. (Biagi, Gandolfi, 2009)

## **Capitolo 4 - Tecniche di rilievo**

---

## 4.1 - Panoramica del capitolo

Nel presente capitolo si descrivono brevemente gli strumenti utilizzati per effettuare il rilievo dell'edificio. Si ricorda che il rilievo dell'edificio non è stato eseguito dallo scrivente, ma durante lo svolgimento della presente tesi sono stati effettuati numerosi sopralluoghi. Inoltre è stato effettuato il rilievo tramite fotogrammetria di alcuni elementi di decoro di particolare interesse.

## 4.2 - Laser scanner

Il laser scanner (Fig. 17) è uno strumento che automaticamente misura le coordinate tridimensionali di uno spazio, in uno schema sistematico ad alta qualità. Il raggio laser è diretto verso un oggetto da un emittente di cui si conoscono le coordinate nello spazio e l'orientamento, in modo che l'inclinazione dei raggi emessi possa essere determinata per ogni misurazione. Successivamente lo strumento, o l'oggetto stesso, viene ruotato per ottenere, ove possibile, una copertura della scansione completa. Esistono tre tipi di scanner disponibili per il rilievo del patrimonio esistente:

- Scanner a triangolazione. Calcolano le coordinate tridimensionali tramite la triangolazione di un punto o una striscia di un raggio laser riflesse dalla superficie dell'oggetto, il quale viene emesso e ricevuto da sensori con posizione ed orientamento noti.
- Scanner a comparazione di fase. Calcolano l'intervallo basato sulla differenza di fase tra la lunghezza d'onda

emessa e quella ricevuta.

- Scanner a tempo di volo. Calcolano l'intervallo di tempo, quindi la distanza, impiegato dall'impulso laser a viaggiare dalla sorgente all'oggetto e dall'oggetto al ricevitore dopo la riflessione.



Fig. 17 - Esempio di Laser Scanner, Faro Focus3D X330 HDR ([www.faro.com](http://www.faro.com))

La maggior parte dei moderni sistemi di scansione laser sono equipaggiati con una fotocamera digitale CCD (charge-coupled device - dispositivo ad accoppiamento di carica) e il dato fotografico catturato può essere utilizzato per riprodurre i colori sul rilievo della scansione laser, ovvero la nuvola di punti. La nuvola di punti rappresenta le coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$  dell'oggetto scansionato (Fig. 18, pag. 74). Per ottenere questo risultato, sia la fotocamera che il laser scanner devono essere opportunamente calibrati. La calibrazione

della fotocamera permette tra l'altro di correggere la distorsione ottica della lente, e, mappando l'immagine fotografica sulla nuvola di punti, si correggono anche le distorsioni prospettiche. In questa operazione si registra anche la posizione di montaggio e l'orientamento della fotocamera rispetto al sistema di coordinate dello scanner. Conoscendo la posizione e l'orientamento della fotocamera all'interno del sistema di riferimento del modello geometrico è possibile mappare con precisione le immagini ad alta definizione sul modello stesso. I sistemi più moderni tendono ad avere le ottiche della fotocamera posizionate in maniera coassiale con le ottiche del laser scanner.

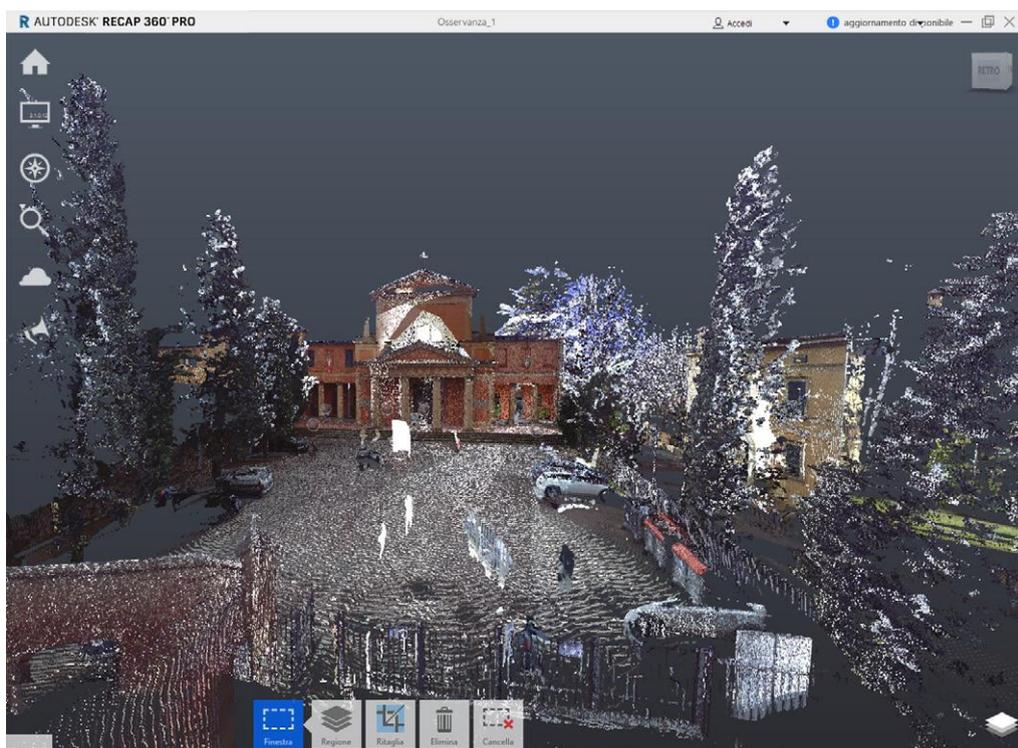


Fig. 18 - Nuvola di punti ottenuta dal rilievo (Ing. Garagnani, Arch. Poggioli, 2016)

## Errori nella raccolta dei dati

Nonostante l'alto livello di precisione dei sistemi laser, non mancano le possibili fonti di errore nella raccolta dei dati. Una calibrazione errata dello strumento, o errori sull'allineamento dell'asse verticale sono tra le cause principali. Gli strumenti più sofisticati sono dotati di una compensazione biassiale che evita questo genere di problema. Possono verificarsi errori nell'identificazione degli spigoli, questo accade quando il raggio laser si sposta su un angolo tra due superfici e il raggio cade da entrambe i lati, non riuscendo ad identificare la superficie che sta rilevando. I sistemi di scansione laser devono essere utilizzati all'interno di un intervallo di temperature, come del resto tutti i dispositivi elettronici, per funzionare correttamente. Infine il raggio laser è più facilmente riflesso da superfici con una grande riflettanza<sup>1</sup>, inviando un segnale di ritorno migliore allo scanner.

Per ridurre gli errori, si consiglia di integrare i dati raccolti tramite scansioni laser con altre informazioni raccolte da rilievi precisi. In questo modo si può ridurre anche il problema e gli errori indotti dall'interferenza di oggetti all'interno della scena o la totale occlusione della scansione. Si può inoltre aumentare il livello di dettaglio del rilievo, soprattutto per gli oggetti più piccoli, andando ad inserire informazioni derivanti da altre tecniche di rilevamento, ad esempio la fotogrammetria digitale.

---

<sup>1</sup> La riflettanza, in ottica, è una grandezza adimensionale che misura la capacità di riflettere la luce incidente da parte di una superficie o un materiale. E' quindi rappresentata dal rapporto tra l'intensità della radiazione riflessa e di quella incidente su una superficie riflettente.

### **Processo del rilievo**

Il risultato di un rilievo effettuato con un laser scanner è una nuvola di punti; questa rappresenta le coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$  dell'oggetto della scansione, e solitamente richiede una fase di pulizia, scelta e combinazione delle diverse scansioni prima di poter essere utilizzata.

La prima fase consiste nel pulire ed eliminare i punti di scarso interesse, raccolti per errore o dovuti ad artefatti come la riflessione dello scanner attraverso gli oggetti. Questi punti errati possono essere eliminati prima che la nuvola di punti venga registrata<sup>2</sup>. Una volta identificati, le riflessioni degli oggetti nello sfondo o nello spazio tra lo scanner e l'oggetto della scansione, ad esempio alberi, persone, traffico o effetti atmosferici dovuti alla polvere o pioggia, possono essere eliminati introducendo dei limiti alla scansione con l'ausilio di strumenti grafici. Spesso può rendersi necessario un ricampionamento della nuvola di punti per ridurre la densità, nel caso fosse troppo elevata, riducendo la quantità di dati non necessari e le dimensioni del file.

Successivamente si procede con la registrazione delle scansioni. La registrazione è la combinazione di due o più nuvole di punti generate da posizioni diverse (Fig. 19, pag. 77). Questo è possibile utilizzando tie point<sup>3</sup> e dei punti di controllo che possono essere sia parte dell'oggetto scansionato sia punti speciali. I software che eseguono la registrazione possono utilizzare entrambe i metodi, le scansioni vengono unite sovrapponendo questi punti riconoscibili. Possono essere utilizzati anche sistemi di posizionamento GPS che individuano la posizione dello scanner

---

<sup>2</sup> La registrazione di una nuvola di punti consiste nella combinazione, in un unico output, di tutte le scansioni effettuate dalle singole stazioni.

<sup>3</sup> I tie point sono punti omologhi tra diverse stazioni.

e lo seguono per ogni scansione, permettendo di ricostruire la nuvola di punti generale.

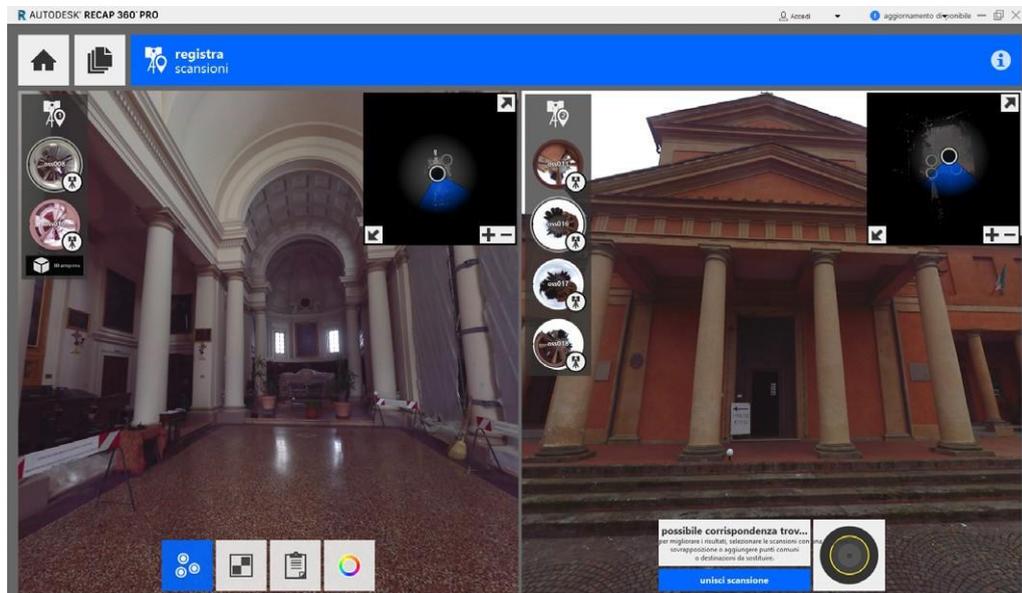


Fig. 19 - Registrazione della nuvola di punti

### 4.3 - Fotogrammetria digitale

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che permette di acquisire dei dati metrici di un oggetto, ovvero forma e posizione, tramite l'acquisizione e l'analisi di fotogrammi. Questa tecnica viene utilizzata in cartografia, topografia e in architettura. E' una tecnica molto legata alla geometria descrittiva, che ne determinai principi teorici, e naturalmente all'ottica e alla fotografia. L'immagine fotografica, infatti, è assimilabile al concetto di prospettiva centrale; la fotogrammetria, quindi, sfruttando le conoscenze di queste due discipline permette la restituzione di un rilievo con una grado di precisione soddisfacente.

È possibile differenziare i diversi tipi di fotogrammetria secondo due criteri fondamentali: in base alla distanza di ripresa o in base al tipo di output. In funzione della distanza di ripresa si

possono distinguere:

- Microfotogrammetria. Trova applicazione in laboratorio, mediante utilizzo di immagini, analogiche o digitali, ricavate con stereomicroscopi.
- Fotogrammetria “degli Oggetti vicini” (Close Range Photogrammetry). Utilizzata per il rilevamento su distanze da 1m a 30m.
- Fotogrammetria Architettonica. Caratterizzata da una distanza tra la fotocamera e l’oggetto al massimo di una qualche decina di metri. Utilizzata principalmente per il rilievo architettonico, eventualmente integrabile con il laser scanner.
- Fotogrammetria Terrestre. E’ stata all’origine dei rilevamenti topografici accurati. Nonostante la fotogrammetria terrestre sia stata in gran parte soppiantata dalla fotogrammetria aerea, rimane un metodo insostituibile, per accuratezza di dettaglio e precisione conseguibile, quando si debbano rilevare pareti rocciose a picco od a strapiombo, là dove gli aeroplani non possono operare. Le distanze fra le camere ed il terreno sono comprese fra 50 m ed oltre un chilometro.
- Fotogrammetria aerea, che viene realizzata montando delle apparecchiature fotografiche su aerei che volano al di sopra del territorio da osservare.
- Fotogrammetria satellitare, realizzata da Space Shuttle, satelliti meteorologici o per lo studio delle risorse terrestri.
- Fotogrammetria da UAV, ovvero Aeromobile a pilotaggio remoto. Viene realizzata montando differenti sensori, quali

camere ottiche, termocamere, sensore multi spettrale, di dimensioni ridotte sui sistemi utilizzati. Questa tecnica è utilizzata principalmente per aree non particolarmente estese e può affiancare la fotogrammetria architettonica per il rilievo di edifici ed infrastrutture.

In funzione del tipo di output, invece si distinguono:

- Fotogrammetria tradizionale. Fornisce in output un dato disponibile su un supporto fotografico tradizionale, analogico.
- Fotogrammetria digitale. Il cui dato in uscita è digitalizzato. In questo tipo di fotogrammetria le immagini sono gestibili attraverso l'utilizzo di un computer.

La fotogrammetria architettonica è una tecnica che consente di rilevare la forma, le dimensioni e la posizione di un elemento architettonico mediante una serie di fotografie scattate con una fotocamera.

La tecnica di rilievo fotogrammetrico tradizionale prevedeva due fasi. In un primo momento si effettua la ripresa, si fotografa l'oggetto con la camera stereometrica, o con la camera metrica posta in due punti distinti. In seguito utilizzando la coppia di fotogrammi stereometrici, osservando il modello ottico tridimensionale è possibile rilevare le dimensioni che interessano, o elaborare proiezioni ortogonali dell'oggetto.

Con l'avvento della fotografia digitale e l'evoluzione dei computer, si sono compiuti grossi passi avanti in questa tecnologia, rendendola sempre più semplice e rapida. E' infatti possibile utilizzare fotocamere di tipo commerciale, anche non metriche, e unire numerose fotogrammi per costruire il modello tridimensionale digitale dell'oggetto.

La tecnica della fotogrammetria digitale è stata utilizzata per realizzare i modelli tridimensionale di alcuni degli oggetti di decoro presenti all'interno della chiesa. In particolare si è realizzato il modello degli angeli che ornano l'oculo sull'abside tramite fotografie realizzate da una fotocamera montata su un drone, e il modello dei putti che sorreggono delle mensole agli angoli del presbiterio tramite un sensore che combina fotografie e scansione laser montato su Apple iPad, si veda il cap. 7.4.

## **Capitolo 5 - Autodesk Revit**

---

## **5.1 - Panoramica del capitolo**

Nel presente capitolo si illustrano brevemente le caratteristiche e le funzionalità del software adottato per la modellazione, ossia Autodesk Revit. Si comincerà da una panoramica del software in quanto tale e dei requisiti necessari al suo funzionamento. Successivamente si descriveranno le peculiarità degli oggetti modellabili ed il flusso di lavoro consigliato. Si ricorda infine che la versione del software adottata è la 2016 nonostante sia attualmente disponibile sul mercato la più recente 2017. Questa scelta nasce dal fatto che il lavoro è iniziato quando la versione più aggiornata era la prima e si è ritenuto non necessario eseguire l'aggiornamento del modello per le scarse novità introdotte e alcuni problemi di stabilità riscontrati dalla community online.

## **5.2 - Caratteristiche di Autodesk Revit**

Le piattaforme BIM possono essere utilizzate da diversi attori in diverse fasi della vita di un edificio: l'architetto per la progettazione e la generazione dei disegni, l'ingegnere per i calcoli strutturali e gli impianti, l'appaltatore per lo sviluppo di un modello per la coordinazione delle operazioni di costruzione. E' quindi necessario scegliere accuratamente a che software affidarsi. Per lo sviluppo di questa tesi si è scelto di utilizzare Autodesk Revit 2016. Revit è il software più famoso e il leader del mercato, grazie alla posizione predominante di Autodesk con il software di disegno tridimensionale AutoCad. Revit è una famiglia di prodotti integrati, infatti dalla versione 2014 integra in un unico software

le versioni Architecture, Structure e MEP, quest'ultima dedicata alla progettazione impiantistica. E' un software basato sul sistema operativo Microsoft Windows e supporta sia le versioni 32-bit che 64-bit; inoltre grazie allo strumento Windows BootCamp di Apple, è possibile eseguirlo anche sui sistemi Mac senza calo di prestazioni. Sarebbe possibile eseguire il software su sistemi operativi diversi da Windows anche tramite macchine virtuali, ma a parer dello scrivente si possono verificare cali di prestazioni dovuti al maggior consumo di risorse, dati dalla simultanea apertura di due sistemi operativi ed il software.



Fig. 20 - Logo Autodesk Revit 2016 (Autodesk)

Come strumento BIM Revit fornisce un'interfaccia utente intuitiva con suggerimenti che appaiono al passaggio del cursore del mouse sulle icone. Offre la possibilità di eseguire modifiche in maniera bidirezionale, da qualsiasi vista del modello, compresi gli abachi. Supporta lo sviluppo di nuovi oggetti parametrici personalizzati, chiamati famiglie, come la modifica di quelli esistenti. Inoltre possiede già una vasta libreria di oggetti, sia integrata nel software che disponibili online.

Come piattaforma BIM, Revit dispone del maggior numero

di applicazioni associate; alcune dialogano con un collegamento diretto grazie alle API (Application Programming Interface) di Revit, altre tramite formati di interscambio come l'IFC. In qualunque campo c'è modo di comunicare con Revit: a livello strutturale Revit Structure, ROBOT structural analysis; a livello meccanico impiantistico Revit MEP; analisi energetica Ecotect, Green Building Studio; visualizzazione 3DS Max, Mental Ray; analisi del sito AutoCad Civil 3D; inoltre può importare modelli da Google SketchUp, Rhinoceros, Google Earth e tramite file DXF.

**PRO:** Come strumento di progettazione Revit è potente, intuitivo e le sue capacità di generare disegni sono eccellenti; inoltre permette di effettuare modifiche da una qualsiasi vista del modello incluse le tabelle. E' semplice da imparare e anche l'interfaccia è user-friendly; inoltre, e soprattutto, occupa una posizione dominante nel mercato grazie all'ambiente Autodesk, che oltre alla diffusione garantisce una estesa compatibilità con altri sistemi.

**CONTRO:** è un sistema cosiddetto in-memory, che si rallenta molto per file di progetto molto grandi (oltre i 300 MB), anche se fin'ora nella mia esperienza non ho mai raggiunto tale limite (il modello della Chiesa dell'Osservanza, realizzato per la presente tesi, è all'incirca 80 MB). Ha qualche limitazione a livello di regole parametriche e un limitato supporto per le superfici curve complesse.

Inoltre è stato scelto Revit per la mia conoscenza del sistema ed esperienza nel suo utilizzo.

### 5.3 - Flusso di lavoro

Si passa ora ad analizzare il flusso di lavoro necessario per la realizzazione di un modello BIM all'interno del software Autodesk Revit. Non si è volutamente specificata la versione in quanto può applicarsi a tutte le versioni rilasciate ad oggi, compresa la più recente 2017. Autodesk Revit è stato concepito per simulare la costruzione reale di un edificio e delle sue componenti. Pertanto per il suo utilizzo è sufficiente comprendere la logica che si adotterebbe in cantiere.

In una prima fase vengono definiti i riferimenti spaziali entro cui si svilupperà l'edificio, ossia i fili fissi delle strutture, attraverso l'utilizzo di strumenti come le griglie e i livelli, per definire gli interpiani (Fig. 21, pag 86). A questi due tipi di riferimento faranno riferimento tutti gli elementi modellati; ad esempio un pilastro potrà essere posizionato all'intersezione di due griglie e la sua altezza si estenderà tra due livelli.

Stabiliti i riferimenti spaziali si può iniziare a posizionare gli elementi costruttivi dell'edificio, muri, pavimenti, tetti. Definito la volumetria, si procede inserendo le aperture, i collegamenti verticali e così via, fino al completamento dell'edificio. Completata la modellazione dell'edificio e della sua planimetria, è possibile iniziare a descrivere il modello. Si creano quindi nuove viste di pianta, prospetto, sezione o tridimensionali oltre a quelle utilizzate per la modellazione vera e propria. Si procede con la quotatura degli elementi, l'inserimento di locali e la creazione di abachi. Definite le viste, è possibile aggiungere elementi bidimensionali che arricchiscano le informazioni disponibili, come particolari costruttivi dei nodi, annotazioni di testo o numeriche.

Infine quando l'edificio è stato modellato con il livello di dettaglio necessario e corredato di tutte le informazioni volute, si passa alla produzione delle tradizionali tavole tecniche assemblando le viste create in precedenza.

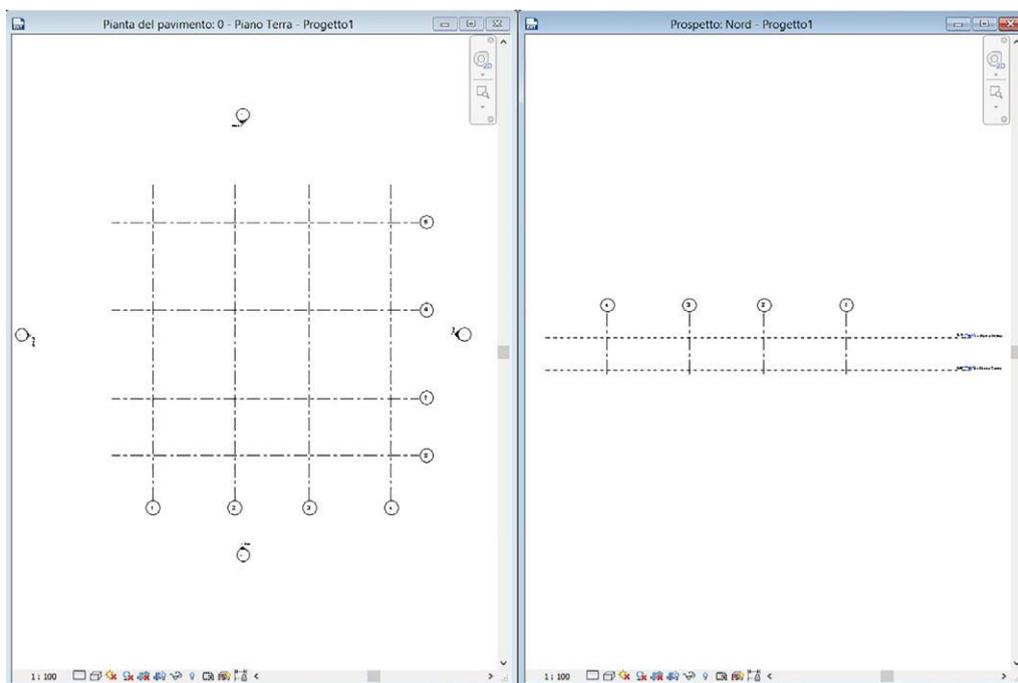


Fig. 21 - Esempio di griglia strutturale e livelli

## 5.4 - Famiglie

Per poter sfruttare a pieno le potenzialità di un software di modellazione BIM come Autodesk Revit è necessario comprenderne a pieno la sua strutturazione e la logica che ne gestisce i comportamenti. Ogni elemento realizzato al suo interno, dagli oggetti architettonici a quelli di documentazione, è considerato una *famiglia*. Una famiglia può essere definita come “un gruppo di elementi con un insieme di proprietà comuni denominate parametri ed una rappresentazione grafica associata”. Autodesk Revit struttura l'organizzazione delle famiglie in tre macro categorie:

- Famiglie di sistema.

- Famiglie caricabili.
- Famiglie locali.

### **Famiglie di sistema**

Comprendono tutti gli elementi di base normalmente utilizzati in una costruzione, quali muri, tetti, pavimenti, scale, ecc. Si possono facilmente riconoscere selezionandole e verificando che nella scheda relativa alle proprietà del *tipo*, il nome sia preceduto da *Famiglia di sistema*. Tra le famiglie di sistema sono comprese anche gli elementi affini l'ambiente di progetto, quali livelli, griglie strutturali, quote e le impostazioni di sistema come i parametri di progetto.

Le famiglie di sistema sono, in pratica, l'ossatura portante del progetto, di conseguenza data la loro importanza hanno dei limiti preimpostati di personalizzazione. Non sono limiti che confinano la libertà compositiva del progettista, ma che evitano una involontaria compromissione del funzionamento del software. Ad esempio non prevedono una editazione di tipo grafico, ma solo tramite parametri predefiniti. Inoltre questo genere di famiglia risiede unicamente all'interno di un file di progetto. Per la loro modifica è necessario duplicare una famiglia di sistema esistente e cambiarne i parametri, non è possibile crearne una da zero.

### **Famiglie caricabili**

Sono lo strumento più potente che Autodesk Revit mette a disposizione. Permettono di coprire ogni esigenza che la progettazione di un edificio comporta. Già il nome ne suggerisce la caratteristica principale, ovvero non risiedono all'interno di un file di progetto, ma vengono, appunto, caricate (inserite) all'interno

del progetto prelevandole da librerie esterne. La loro creazione avviene a partire da specifici file di modello in un ambiente di lavoro denominato *Editor delle famiglie* (Fig. 22), anch'esso esterno al progetto. E' un ambiente graficamente simile a quello di progetto, ma che mette a disposizione strumenti specifici per la modellazione tridimensionale. Il livello di personalizzazione delle famiglie caricabili è molto elevato in quanto devono coprire una casistica molto estesa; possono essere infatti paragonate, riferendosi al cantiere, a tutte quelle componenti che arrivano già assemblate da aziende esterne e vengono installate. La personalizzazione delle famiglie caricabili, decidendone la forma, l'aspetto, il livello di dettaglio, i parametri, è la chiave per un utilizzo al massimo delle sue potenzialità di Autodesk Revit.

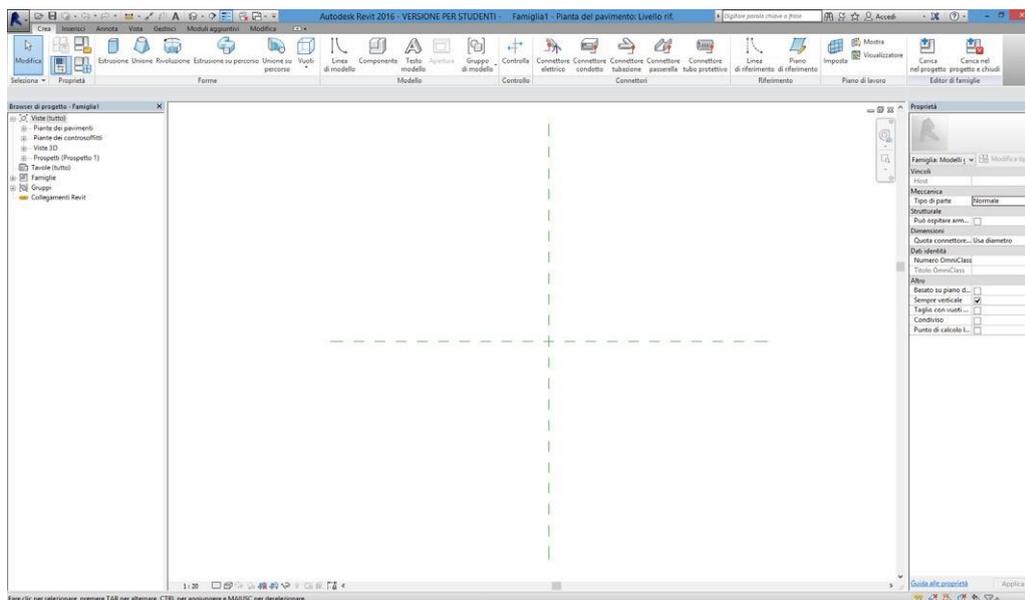


Fig. 22 - Ambiente di lavoro dell'editor di famiglie

## **Famiglie locali**

In questa categoria ricadono tutti quegli elementi del progetto per i quali, data la loro specificità, l'uso di famiglie caricabili risulta non conveniente. Sostanzialmente possono essere pensate come famiglie caricabili, in quanto ne possiedono le caratteristiche, ma che risiedono all'interno del progetto, come le famiglie di sistema, perché non è necessario un loro riutilizzo in progetti differenti. Nonostante possano apparire più semplici da utilizzare, è bene non abusarne dato che incidono significativamente sulle performance del software. Questo perché Autodesk Revit se si inserisce più volte una famiglia caricabile, la analizza comunque come una sola famiglia, invece copiando più volte una famiglia locale, verrà analizzata di volta in volta come una famiglia nuova.

## **5.5 - Organizzazione del file di progetto**

Autodesk Revit gestisce gli elementi all'interno del file di progetto secondo una logica propria dell'industria delle costruzioni, ogni famiglia appartiene ad una categoria. Questa categoria viene definita in base alla funzione che la famiglia sarà chiamata a svolgere all'interno del progetto, può contribuire alla sua costruzione, documentazione o visualizzazione. Questa classificazione consente al software l'organizzazione delle informazioni, di gestire in modo puntuale e coerente la rappresentazione grafica degli elementi.

Un file di Autodesk Revit è sostanzialmente un database nel quale vengono registrate le informazioni parametriche del progetto e delle famiglie che ne fanno parte. La suddivisione principale prevede;

- Oggetti di modello.
- Oggetti di annotazione.
- Viste.

Ogni categoria possiede a sua volta delle sottocategorie. Ad esempio all'interno degli oggetti modello è presente la sottocategoria finestra, che a sua volta presenta suddivisioni come infisso, vetro, telaio, ecc. Attraverso l'appartenenza ad una specifica categoria è possibile gestire la rappresentazione grafica di ogni elemento, in modo tale che rimanga costante all'interno del progetto. Grazie alle sottocategorie è possibile definire in maniera ancora più specifica l'aspetto grafico di una famiglia. Di ciascuna infatti si possono definire lo Spessore di linea, il Colore, il Tipo di linea, ecc.

### **Oggetti di modello**

In questa categoria rientrano tutti gli elementi presenti in un edificio, come muri, porte, finestre, tetti, ecc. Prerogativa degli oggetti di modello è che risultano visibili in ogni vista.

### **Oggetti di annotazione**

Fanno parte di questa categoria tutti gli elementi necessari ad integrare l'informazione grafica fornita dagli oggetti di modello, come le note, testi, quote, ecc. A differenza degli oggetti di modello, gli oggetti di annotazione sono visibili soltanto nelle viste in cui vengono creati. Unica eccezione a questa "regola" sono gli oggetti Livello, Linee di sezione e Griglie strutturali; questi risultano visibili in tutte le viste del progetto, a prescindere da dove vengano create.

## Viste

A questa categoria appartengono, come suggerisce il nome, tutti i tipi di vista creabili in Autodesk Revit: prospetti, piante, sezioni, dettagli, assonometrie, prospettive, render, abachi. Essendo famiglie di sistema, anche le viste possiedono dei parametri fissi che permettono di decidere come mostrare il modello (Fig. 23), ad esempio Scala, Livello di dettaglio, Orientamento. La modifica alle viste, non comporta modifiche al modello, ma queste sono come dei “filtri” che modificano il modo di visualizzarlo. Anche gli abachi e i computi sono particolari sottocategorie di viste del modello in formato tabellare o numerico. Ruolo importante nella caratterizzazione delle viste è svolto dai livelli di dettaglio. Revit ne prevede tre *Basso*, *Medio*, *Alto*; questi permettono, avendo realizzato correttamente le famiglie importate, di visualizzare un numero crescente di informazioni e dettagli.

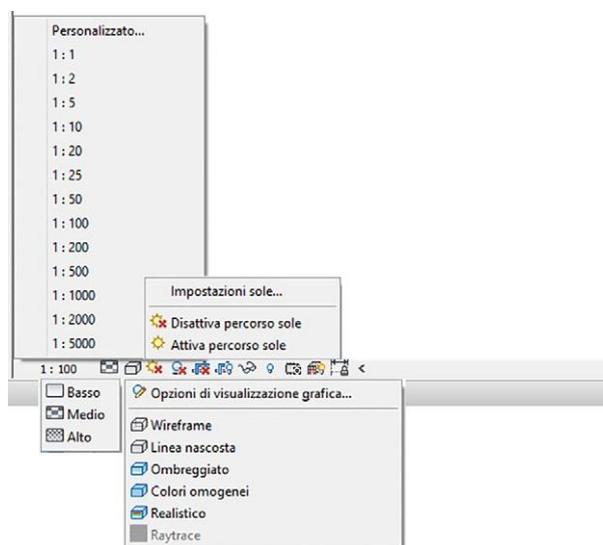


Fig. 23 - Opzioni disponibili per la configurazione delle viste

## 5.6 - Concetti di tipo e istanza

Come si è spiegato in precedenza, una famiglia è caratterizzata dai parametri, i quali possono assumere valori differenti. Lo strumento logico per gli insiemi di parametri e le relative variazioni di valore è il *tipo*. Per chiarire il concetto si pensi ad un muro; all'interno di un progetto se ne potranno incontrare diverse tipologie, chiamate all'interno di Autodesk Revit tipi; dato che per ogni tipologia di muro potranno essere necessari materiali, spessorie stratigrafie differenti, per ognuno di essi verrà definito un tipo di muro. L'oggetto mantiene le sue caratteristiche principali definite dalla famiglia di appartenenza, ma avrà per ogni parametro i propri valori definiti dal tipo.

Le variazioni di tipo non interessano soltanto gli oggetti di modello, ma anche quelli di annotazione, per i quali possono cambiare ad esempio unità di misura, font o dimensione del carattere. Le uniche famiglie che non dispongono dei tipi sono le famiglie locali, in quanto sono pensate per realizzare elementi unici e non hanno quindi la necessità di avere modelli differenti.

L'ultimo livello gerarchico che in Autodesk Revit definisce un elemento è l'*istanza*. Una volta determinata la famiglia e il tipo dell'elemento di cui necessitiamo, l'inserimento nel progetto di questo specifico elemento ne determina un'istanza. La comprensione della gerarchia dei concetti di Famiglia, Tipo ed Istanza è fondamentale per un utilizzo corretto e completo del software.

## I parametri tipo e istanza

I parametri tipo definiscono le caratteristiche di ogni specifico tipo all'interno di una famiglia. Si pensi ad una porta, di un determinato esemplare ne esisteranno diversi modelli con dimensioni e materiali differenti, in Autodesk Revit si creerà una famiglia con diversi tipi per ogni dimensione. I parametri tipo saranno quelli che regolano altezza e larghezza dell'apertura. E' importante comprendere che un parametro tipo controlla e modifica tutte le istanze presenti all'interno del progetto.

I parametri istanza, invece, riguardano le specifiche proprietà di una singola istanza. Rifacendosi all'esempio delle porte, il materiale può essere assegnato ad un parametro istanza, in modo che possano esistere due porte di uguale dimensione, ma materiale differente. I parametri istanza quindi hanno effetto solo sull'elemento selezionato, lasciando invariate le altre istanze dello stesso tipo.

## 5.7 - Vincoli

All'interno di Autodesk Revit è possibile inserire regole geometriche tra gli elementi sottoforma di *vincoli*. Questi possono riferirsi a delle misure, a condizioni di equidistanza, ad allineamenti. I primi due casi si possono ottenere utilizzando le quote. Infatti è possibile "bloccare" una quota, tramite l'icona a forma di lucchetto, per fare in modo che mantenga sempre quel valore. È il caso in cui si voglia, ad esempio, mantenere una distanza fissa tra due muri; procedendo in questa maniera, anche se uno dei due venisse spostato, la loro distanza relativa

rimarrebbe immutata. Anche la condizione di equidistanza si ottiene utilizzando le quote, tramite l'icona "EQ", in questo modo gli elementi quotati si dispongono ad intervalli regolari. È il caso di una scansione regolare delle finestre in prospetto. Infine i vincoli di allineamento si ottengono tramite l'omonimo comando, *allinea*, e l'icona a forma di lucchetto che compare. L'allineamento può essere effettuato tra due elementi qualsiasi, ma anche con i piani, o linee, di riferimento. Questa seconda opzione è fondamentale nella realizzazione delle famiglie.

# Parte 2

---



## **Capitolo 6 - Modellazione Semantica**

---

## 6.1 - Panoramica del capitolo

Nel presente capitolo si definisce il concetto di modellazione semantica analizzandone l'applicazione agli edifici. In seguito si descrive in che modo questo metodo è stato applicato all'edificio oggetto di studio.

## 6.2 - Definizione

L'analisi di una forma architettonica può essere condotta tramite l'identificazione del processo che ne ha permesso la costruzione. Lo studio della forma ha una doppia finalità: la prima è la rappresentazione, la seconda è il rilievo dell'oggetto. In questo senso, uno dei modi più efficaci di definire il rilievo architettonico è quello di ricostruzione del progetto. La descrizione semantica è definita da una struttura di concetti organizzati attorno ad una descrizione geometrica. I nodi della descrizione semantica sono collegati da un lato ad un termine architettonico, dall'altro ottengono gli elementi di descrizione geometrica da una struttura gerarchica. Associare la semantica alle forme architettoniche ci obbliga prima di tutto a considerare l'edificio un sistema di conoscenze, poi ad estrarre un modello dalla sua descrizione ed infine a definire la sua rappresentazione secondo gli obiettivi dell'analisi. Un sistema di conoscenze architettonico può essere descritto come una collezione di oggetti strutturati identificati da un preciso vocabolario. Oltre l'identificazione delle primitive architettoniche, la descrizione dello schema di questi elementi in un modo ordinato richiede osservazioni di natura complessa. Si possono identificare tre tipi

di relazione tra elementi architettonici:

- Relazioni geometriche. Esprimono la posizione relativa di un elemento, o di una sua parte.
- Relazioni topologiche di tipo “parte-unità”. La descrizione di un edificio può essere effettuata raggruppando elementi semplici in un insieme unitario o serie ordinate. Esprimono organizzazioni gerarchiche che possono essere lette nella composizione dell’edificio.
- Relazioni compositive. Sono diagrammi di composizione che si basano su serie di regole che controllano il relativo posizionamento e dimensionamento degli elementi in una disposizione geometrica generale.

Le relazioni che più interessano l’ambito dell’analisi di edifici storici sono quelli di tipo “parte-unità”. Questo perché le altre relazioni si riferiscono prettamente a problemi di composizione architettonica. Le relazioni parte-unità possono essere di tre tipi:

- *Parte-tutto*. Esprimono il modo in cui le sottoparti di un oggetto sono organizzate per formare l’elemento. All’interno dei trattati di architettura, si trova un termine per ogni sottocomponente. Questa divisione a volte corrisponde alla divisione fisica dell’oggetto reale, altre a transizioni geometriche.
- *Membro-collezione*. Questo tipo di relazione è alla base della classificazione tipologica. Comparate con l’identificazione dei tipi, queste relazioni possono organizzare gli elementi in categorie secondo criteri di comparazione. In architettura sono basate sulla classificazione delle correnti stilistiche in relazione al periodo storico o all’area geografica.
- *Componente-gruppo*. Esprimono gli stili architettonici secondo una logica basata sull’analisi della composizione dell’edificio.

La composizione di stili armoniosi è condotta da principi di classificazione come proporzioni, ritmo e simmetria. Sono le relazioni che caratterizzano la logica di rappresentazione dei trattati classici di architettura.

Il modello descrittivo viene definito da tre livelli: semantico, strutturale e rappresentativo; a questi tre livelli corrispondono tre fasi:

- *Livello semantico.* La prima fase consiste nell'isolare e riconoscere le componenti architettoniche ed associarle alle parti della forma.
- *Livello strutturale.* La seconda fase rende possibile stabilire un diagramma di relazioni tra questi concetti e organizzare gli elementi.
- *Livello rappresentativo.* L'ultima fase permette di associare varie rappresentazioni alla stessa entità morfologica in funzione di ciò che si vuole descrivere.

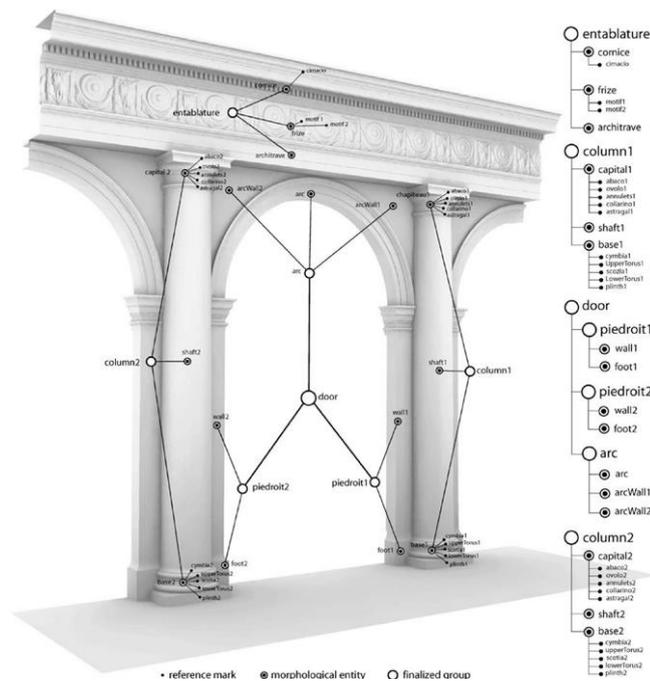


Fig. 24 - Grafico 3D per la descrizione semantica di un edificio (De Luca, 2007)

### 6.3 - Modellazione semantica

Una delle caratteristiche peculiari dei software di modellazione BIM è che gli oggetti realizzati al loro interno non sono dei semplici volumi geometrici, ma corrispondono alle componenti reali degli edifici. In particolare ne ereditano non soltanto i parametri geometrici di base, ma anche il comportamento e le relazioni che possono avere con gli altri elementi. Ad esempio se si vuole inserire nel modello una finestra, questa presenta già i parametri necessari per adattarne larghezza ed altezza dell'apertura, la quota del bancale, ma soprattutto ha già intrinsecamente la relazione di appartenenza ad un muro, e non può essere posizionata fuori da esso, in maniera aderente alla realtà. Proprio per questo motivo è importante pianificare in anticipo con che classe di elementi modellare le varie componenti dell'edificio, in quanto se si scegliesse quella errata, si potrebbe ottenere un comportamento non idoneo alle sue caratteristiche o non corrispondente alla realtà.

Si è scelto quindi, prima di procedere con la modellazione vera e propria, di effettuare una scomposizione semantica dell'edificio, identificando le sue componenti e le relazioni che intercorrono tra loro, per individuare tutti gli elementi necessari alla modellazione e poterne scegliere la classe di appartenenza più adatta.

La prima fase consiste in una discretizzazione dell'edificio scomponendolo in componenti architettoniche riconoscibili sia per una separazione fisica degli elementi sia per una transizione geometrica o di materiale. Questa fase assume carattere di un procedimento iterativo in quanto l'edificio viene scomposto in un primo momento in macroelementi, poi in componenti, e sotto-

componenti fino al livello di dettaglio voluto.

La seconda fase consiste nel comprendere il comportamento di ogni specifica componente riconosciuta e le sue relazioni con gli altri oggetti. In particolar modo si deve prestare attenzione alle relazioni topologiche e di tipo “parte-unità”. E’ fondamentale infatti riconoscere se un elemento è parte di un insieme più ampio, ad esempio base fusto e capitello formano una colonna, e come questo elemento si posiziona nell’edificio. Ci si deve chiedere se è un elemento ospitato da un altro. In caso positivo se è sempre ospitato da quel tipo di elemento, come una porta in un muro, o se invece può essere accolto da diversi elementi. Ci si deve domandare se è un elemento che si estende tra due quote precise all’interno di un edificio, un muro generalmente si estende tra due piani, o se ha un’altezza libera da un livello di base.

Una volta discretizzato l’edificio e aver compreso a fondo il comportamento degli elementi individuati, si procede con l’individuare la classe di appartenenza più adatta tra quelle proposte dal software. Nel caso specifico di Autodesk Revit, le classi di oggetti vengono chiamate famiglie, ed ognuna, già dalla creazione, contiene alcune caratteristiche peculiari, non modificabili, senza le quali non sarebbe possibile il corretto funzionamento della stessa, ma che, allo stesso tempo, non rendono possibile un cambio di famiglia in un secondo tempo.

Sono stati così individuati gli elementi appartenenti alle famiglie già esistenti all’interno del software quali: muri, pavimenti, tetti, porte, finestre, colonne.

Successivamente si è andati ad individuare le altre categorie di elementi per i quali si fosse resa necessaria la creazione di famiglia, ovvero: decori, arredi, ringhiere, volte, capriate.

Per molte di queste categorie è stato necessario individuare una ulteriore suddivisione. Infatti in un oggetto, ad esempio una porta, si possono riconoscere diversi sotto-elementi, non sempre tutti contemporaneamente presenti: ante, sopra luce, inferriate, decorazioni.

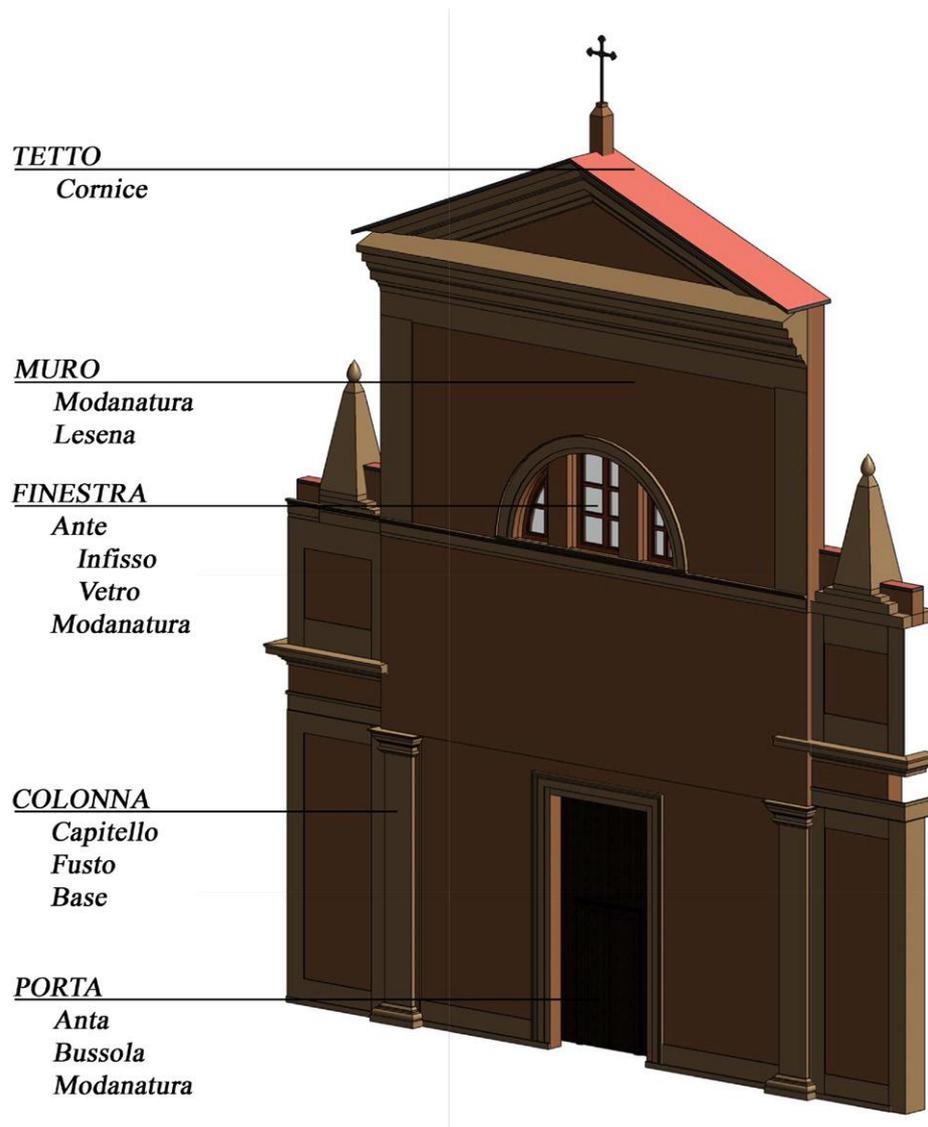


Fig. 25 - Esempio di suddivisione semantica di alcuni elementi della facciata

Allo stesso modo si sono individuate:

- Finestre: ante, oscuramenti, inferriate, decorazioni.
- Muri: stratigrafia, decorazioni.

- Colonne: base, fusto, capitello.
- Tetti: stratigrafia, cornice, grondaia.
- Ringhiere: montanti, correnti.

Come detto in precedenza, si è scelto di effettuare questa modellazione semantica in quanto permette di creare una corrispondenza biunivoca tra gli oggetti reali e gli oggetti del modello digitale grazie alle famiglie del software. In aggiunta alla suddivisione in categorie (finestre, muri, porte...) è anche necessario creare un elenco dei diversi modelli di ogni categoria. Si è quindi proceduto con l'analisi dell'edificio per individuare le diverse tipologie di ogni elemento, cercando di capire come poterne gestire le variazioni. In questo modo sarà possibile creare una famiglia per ogni tipologia individuata.

Una volta individuate tutte le categorie, sotto categorie e tipologie in cui scomporre l'edificio, si è proceduto alla suddivisione vera e propria della chiesa in elementi, appartenenti a queste categorie.

## **Capitolo 7 - Realizzazione del modello**

---

## 7.1 - Panoramica del capitolo

Nel presente capitolo si illustrerà il procedimento utilizzato per modellare l'edificio. Si descriveranno poi nei dettagli le tecniche sfruttate per realizzare alcune delle famiglie ritenute più significative alla comprensione del procedimento.

## 7.2 - Modellazione degli elementi principali

Come è stato detto, il primo passaggio necessario alla modellazione dell'edificio è stata la comprensione della sua composizione attraverso una scomposizione semantica. Solamente dopo questo processo conoscitivo si è proceduti con la modellazione vera e propria. L'approccio seguito è stato quello "dal generale al particolare".

Si è cominciata la modellazione studiando il rilievo per scegliere alcuni fili fissi da prendere come riferimento e su cui basare la costruzione degli elementi. Per fare ciò, sono stati realizzati differenti file dwg per ogni vista di pianta, prospetto o sezione, puliti delle informazioni non necessarie, ed importati all'interno del file di progetto di Revit. Sulla base di questi si è tracciata in pianta una griglia strutturale a cui allineare muri e colonne, ed in prospetto alcuni livelli di ausilio alla modellazione. In particolare per i livelli sono stati scelti: il livello del pavimento interno, l'altezza delle colonne esterne, di quelle interne, e le imposte della volta e del tetto (Fig. 26, pag. 107). A questi ne sono stati aggiunti altri in seguito per agevolare la modellazione. Si sono poi create le viste ritenute necessarie per la modellazione,

e comunque tutte quelle disponibili dal rilievo, quali piante a diverse quote, prospetti, sezioni e viste assonometriche.

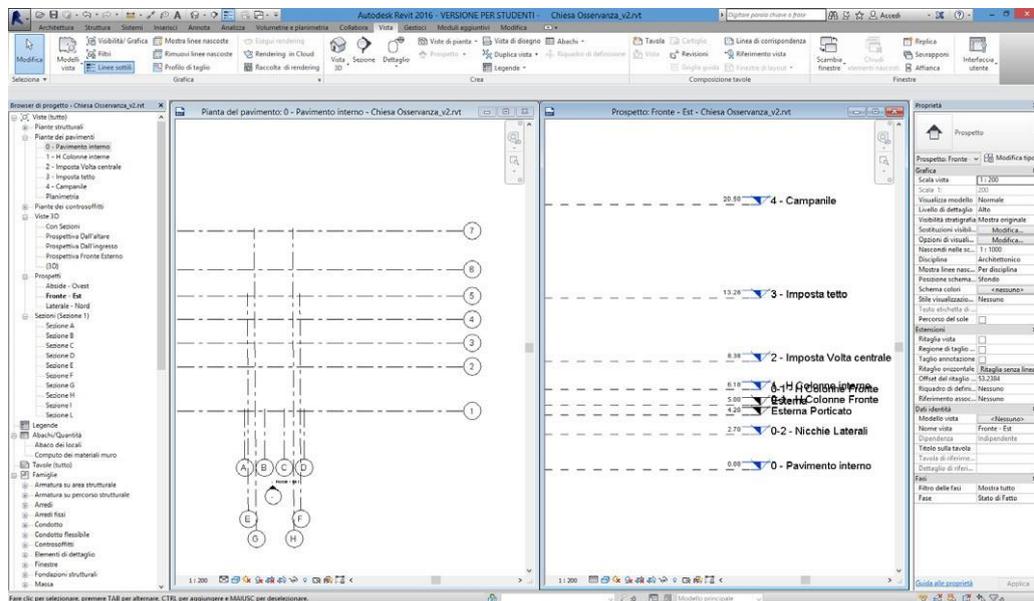


Fig. 26 - Griglie e livelli realizzati per la costruzione del modello

A questo punto si è proceduto a realizzare le volumetrie del complesso, tramite lo strumento *muro* si sono modellate tutte le pareti dell'edificio. In questa fase non ci si è preoccupati della stratigrafia delle diverse pareti, e quindi del loro spessore, ma lo scopo era quello di delineare la volumetria per poi affinare la modellazione in seguito. L'unico accorgimento necessario è stato quello di specificare per tutti i muri lo stesso allineamento, chiamato dal software *Linea di ubicazione*, in particolare si è scelto *Superficie di finitura: esterno*. Questa accortezza semplificherà successivamente le operazioni di affinamento in quanto risulterà più semplice comprendere l'orientamento dei muri nella definizione della loro stratigrafia. Allo stesso modo sono state inserite le colonne interne e dei porticati esterni tramite lo strumento *Pilastro strutturale*. Sia per quanto riguarda i muri che per le colonne, le loro rispettive altezze sono state vincolate ai livelli precedentemente

realizzati. Nel caso dei muri, essendo ancora in una fase di bozza, l'altezza è stata associata ai livelli corrispondenti alla massima estensione; in seguito sono poi stati divisi in funzione alle necessità di modellazione. Per quanto riguarda gli orizzontamenti, si sono realizzati il pavimento interno e il tetto della chiesa per mezzo degli strumenti *Pavimento* e *Tetto* del software. Per quanto riguarda il tetto, ci si è aiutati utilizzando anche viste di prospetto, sezione o tridimensionali, per realizzare la giusta pendenza. Particolare attenzione è stata prestata alla realizzazione della parte di copertura relativa all'abside. Lo strumento *Tetto* di Revit, infatti, permette di scegliere tra tre metodi di disegno: da perimetro, da estrusione o da superficie. Nel caso specifico il solido da realizzare è assimilabile ad una rivoluzione, impossibile da realizzare con le scelte standard. Per superare questo impedimento il software mette a disposizione la possibilità di realizzare solidi tridimensionali con tutti gli strumenti di modellazione disponibili (estrusione, rivoluzione, unione, estrusione su percorso e unione su percorso) tramite un *Modello locale* ed assegnargli in seguito la categoria di appartenenza, nel caso in questione un tetto. Con la stessa filosofia si è proceduto a realizzare anche parte del convento per contestualizzare meglio l'edificio. Per fare ciò, dato che si tratta di una parte non interessata dal rilievo, ci si è serviti di fotografie, riprese video effettuate con drone, ed il servizio Google Earth.

Una volta generata tutta la volumetria del complesso (Fig. 27, pag. 109), si è proceduto ad inserire porte e finestre. Seguendo la stessa filosofia si sono posizionati inizialmente degli elementi "segnaposto" utilizzando le famiglie generiche già presenti all'interno della libreria del software, per poi andare a creare le

famiglie personalizzate per ogni oggetto in un secondo momento. Questo genere di operazione è resa possibile dal fatto che un oggetto, appartenente ad una certa categoria di famiglia, può essere sostituito con un altro appartenente alla stessa categoria semplicemente cambiandogli famiglia.



Fig. 27 - Volumetria iniziale del modello, con famiglie “segnaposto”

Costruita la volumetria e posizionati gli oggetti segnaposto, si è proceduto con la modellazione dettagliata dei vari oggetti. Per la presente tesi, si è scelto di creare con tutte le potenzialità proprie del metodo BIM e del software Revit, soltanto alcuni casi studio rappresentativi di ogni categoria di famiglia. In particolare si è scelto un muro, una colonna, una porta (concettualmente identica ad una finestra), una volta e una capriata. Una ulteriore scelta da effettuare è stata quella se parametrizzare o meno le famiglie. Ai fini della presente tesi si è scelto di rendere parametriche solo alcune famiglie per mostrare le potenzialità del metodo BIM, ma ai fini della modellazione di un edificio storico è molto probabile che ciò non si renda necessario. Questo perché per realizzare un oggetto parametrico in tutte le sue componenti è necessaria una notevole

progettazione preliminare per comprendere la miglior strategia di realizzazione e decidere quali caratteristiche dell'oggetto rendere parametriche, con un notevole consumo di tempo e richiedendo un utente esperto. In secondo luogo proprio perché è un edificio storico, in cui si sono susseguite numerose evoluzioni e modifiche, ogni elemento è spesso unico; per cui, essendo la forza degli oggetti parametrici la loro adattabilità, questa non si rende necessaria.

### **7.3 - Creazione delle famiglie**

A questo punto è possibile iniziare con la modellazione nel dettaglio dei differenti elementi che compongono l'edificio. Come detto in precedenza, per ognuno si è reso necessario un progetto per la realizzazione della famiglia relativa. Innanzitutto è fondamentale la scelta della categoria; per alcuni oggetti è banale, ad esempio per modellare una porta si sceglierà la categoria di famiglia *porta*. Alcune tipologie di oggetti però non hanno la corrispettiva categoria di famiglia a disposizione all'interno del software, è quindi necessario scegliere accuratamente a quale fare affidamento in funzione del livello di parametrizzazione che si vuol conseguire, quali parametri si vogliono inserire, come si dovrà comportare la famiglia all'interno del progetto. Successivamente, in funzione del livello di parametrizzazione scelto, si deve pensare a quali parametri inserire, e a come realizzare i collegamenti logici formali necessari ad un corretto funzionamento della famiglia. A questo punto è possibile iniziare con la modellazione vera e propria. Il procedimento ricorda quello utilizzato per la modellazione dell'edificio. Infatti si comincia inserendo dei *piani di riferimento*

che costituiscono lo scheletro della famiglia, e a questi verranno collegati i parametri inseriti. È quindi consigliabile effettuare un test della famiglia, modificando il valore dei parametri, per verificare che tutto funzioni come previsto. Infine si procede con la modellazione solida degli oggetti che compongono l'elemento, andando, dove necessario, a *vincolare* il solido al corrispondente piano di riferimento. In questo modo il volume realizzato, al variare dei parametri impostati, seguirà il piano di riferimento, cambiando la sua forma o configurazione nello spazio.

Una tecnica che permette di ottenere grandi risultati nella realizzazione delle famiglie è la *nidificazione*. Consiste nello scomporre l'oggetto in sottocomponenti, ad esempio una porta e la sua anta, realizzarli separatamente e poi andare ad inserire la famiglia "anta" all'interno della famiglia "porta". Questo genere di operazione è già stato svolto, e descritto nel capitolo precedente, tramite la scomposizione semantica dell'edificio. Questa si rivela quindi utile sia per comprendere quanti e quali elementi compongono la costruzione, sia per comprendere come questi elementi sono a loro volta composti. La nidificazione è molto importante perché innanzitutto semplifica notevolmente la progettazione delle famiglie, in quanto il processo si riconduce a come parametrizzare i singoli componenti, operazione più semplice che considerando la famiglia nel suo complesso. Inoltre nidificando le famiglie si possono realizzare accortezze tecniche che si rivelano di grande utilità per l'utente finale che utilizzerà il modellatore. Si pensi ad esempio al movimento di elementi (apertura di un'anta), alla possibilità di scegliere un componente da un elenco di questi (diversi modelli di maniglia in una porta), a diverse visualizzazioni dell'elemento in funzione del livello di

dettaglio.

Nella modellazione dell'edificio oggetto di studio nella presente tesi, si sono realizzati tutti gli elementi con un livello di dettaglio geometrico sufficiente per una corretta rappresentazione architettonica, analogamente al dettaglio del rilievo fornito (scala 1:100). Come già detto in precedenza, trattandosi di un edificio monumentale, molte delle sue componenti, hanno carattere di unicità, o si ritrovano soltanto al suo interno, sempre uguali. Questa è una caratteristica propria degli edifici monumentali, che va quasi ad annullare uno dei vantaggi dell'utilizzo del metodo BIM, ovvero la possibilità di utilizzare oggetti parametrici che si adattino al contesto. Si pensi ad esempio ad una finestra da inserire in edifici di nuova costruzione. Questa da catalogo è disponibile in diverse misure, ed eventualmente anche in formati fuori standard, utilizzando oggetti parametrici è sufficiente realizzare la famiglia della finestra con i parametri dimensionali per creare tutti i tipi necessari. Per questo motivo, la parametrizzazione degli oggetti è stata spesso ridotta al minimo, in quanto non necessaria in questo genere di edifici. L'inserimento di parametri negli oggetti si è rivolto piuttosto alla documentazione del modello. In ogni caso, a scopo di esempio delle potenzialità del metodo BIM, si è scelto di modellare in maniera totalmente parametrica alcuni oggetti di particolare rilevanza, appartenenti a categorie di famiglie differenti.

### 7.3.1 - Muro

Come illustrato nel capitolo 5, i muri all'interno di Revit sono rappresentati per mezzo di un genere di famiglia particolare: le famiglie di sistema. Queste possono essere realizzate soltanto duplicando una famiglia già esistente. Effettuata questa operazione, rinominando il tipo, è stato possibile procedere realizzando tutti i tipi presenti. Per fare ciò si è andati a modificare la stratigrafia del muro (Fig. 28). Ad ogni strato vanno assegnati uno spessore, materiale e una funzione. Questo ultimo parametro, variabile tra *1 strutturale* e *5 finitura*, serve per stabilire la priorità nelle intersezioni tra muri e muri con orizzontamenti. Per la presente tesi, non avendo informazioni disponibili dal rilievo sulla stratigrafia dei muri ma solo sul loro spessore, ogni parete è stata ipotizzata composta da due strati di intonaco, a cui è stata assegnata funzione *4 finitura*, e uno di laterizio, *1 strutturale*. Quest'ultimo strato è quello che è stato fatto variare per realizzare i differenti tipi di muratura necessari, funzione dello spessore. Nella definizione della stratigrafia si deve prestare attenzione all'ordine degli strati dall'interno all'esterno, in quanto questi verranno definiti al posizionamento del muro nel progetto. Ultima accortezza a cui prestare attenzione è la funzione *ripiegatura*, in cui si deve specificare sia nel caso di bucatre che alle estremità delle pareti

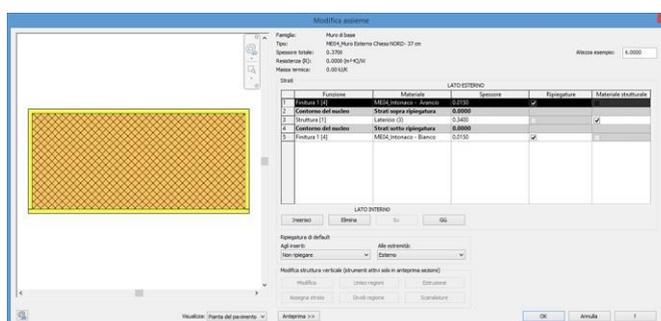


Fig. 28 - Modifica della stratigrafia di una famiglia muro

quale strato ripiega sugli altri.

In precedenza si è detto che durante l'inserimento dei muri si è scelto di impostare come linea di ubicazione la *Superficie di finitura: esterno*, si vuole sottolineare nuovamente l'importanza di questo passaggio per semplificare la modellazione. Infatti, ora che si sono definiti i tipi di muri, è sufficiente selezionare le istanze e modificarne il tipo; questi adatteranno il loro spessore mantenendo fisso il filo esterno. Se, al contrario, non si fosse prestato attenzione all'allineamento ed orientamento delle pareti, queste, di volta in volta, avrebbero adattato lo spessore verso l'interno o l'esterno dell'edificio rendendo necessaria una correzione manuale degli

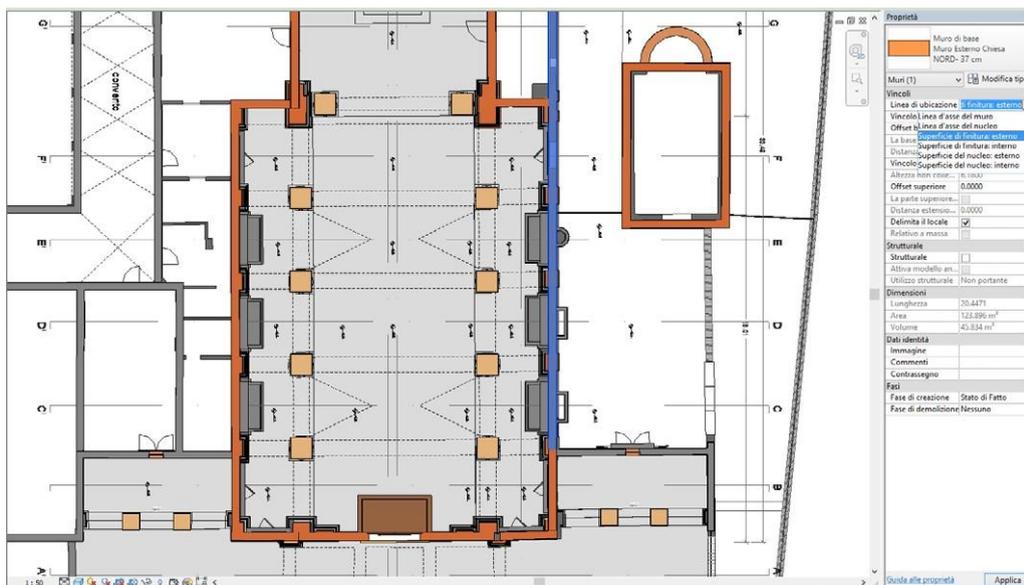


Fig. 29 - Posizionamento dei muri con Linea di ubicazione: Superficie di finitura esterno

allineamenti.

Al momento dell'inserimento di un elemento nel progetto, Revit lo vincola nello spazio a livelli, griglie, piani o altri elementi; per questo motivo è bene prestare da subito attenzione al posizionamento degli elementi. Nel caso specifico dei muri, due muri realizzati uno sopra l'altro a livelli consecutivi o allineati

in pianta, vengono vincolati dal software. Questo può essere un vantaggio in quanto spostandone uno, l'altro lo segue, ma nel caso di un posizionamento errato di uno dei due, per la sua correzione, è necessario eliminarlo e reinserirlo. Questa operazione può risultare molto complessa se si è già ad un livello avanzato di modellazione. Questo problema viene evitato prestando attenzione alla linea di ubicazione in fase di inserimento, ma può anche essere aggirato tramite lo strumento *separa*. In questo modo si dividono i due muri e vengono anche eliminati i vincoli tra loro. A questo punto è quindi possibile effettuare le modifiche necessarie, e si dovrà poi andare a ricollegare i muri, estendendo la geometria dell'elemento separato, ripristinando così anche il vincolo.

Ulteriore motivo di importanza della linea di ubicazione e dell'orientamento del muro è il fatto che, solitamente, i muri presentano finiture interne ed esterne differenti. Nel caso specifico della Chiesa di San Paolo in Monte, la quasi totalità dei muri presenta un intonaco bianco all'interno e un intonaco arancio all'esterno. In caso di errato posizionamento del muro, per cui risulti il lato esterno del muro in realtà all'interno dell'edificio, è possibile utilizzare un semplice comando di inversione per appunto capovolgerne l'orientamento. Gioca però nuovamente un ruolo fondamentale la linea di ubicazione. Infatti il muro verrà specchiato rispetto a questa linea immaginaria, per cui, invertendolo, cambierà anche posizione. Il modo per evitare questo effetto è di impostare temporaneamente la linea di ubicazione in *Linea d'asse del muro*, ovvero la mezzeria. In seguito è bene impostare nuovamente il parametro come si era scelto inizialmente.

### 7.3.2 - Porta

Si è scelto di analizzare nel dettaglio la realizzazione di una porta, evitando di trattare anche le finestre, in quanto sia la metodologia adottata che le problematiche riscontrabili sono analoghe. Per quanto riguarda la modellazione di una porta, la scelta della categoria di famiglia è banale e, praticamente, obbligata; Revit infatti mette a disposizione una categoria dedicata. All'interno dell'editor delle famiglie vi si trovano già due parametri fondamentali (altezza e larghezza) e l'host<sup>1</sup> di riferimento, ovvero un muro.

Come già evidenziato più volte, è importante la scomposizione semantica dell'edificio e degli oggetti. Infatti la prima operazione da eseguire è quella di riconoscere le componenti necessarie alla modellazione della porta. Si porta ad esempio la tipologia di porta presente nelle navate laterali (Fig. 30).



Fig. 30 - Foto della porta delle navate laterali (Arch. Poggioli, 2016)

---

<sup>1</sup> Un host è un elemento che ospita l'oggetto che si va ad inserire. Gli oggetti dotati di host non possono essere inseriti nel progetto all'infuori di esso. Infatti alla cancellazione dell'oggetto host, anche l'elemento ospitato viene eliminato. Esempio classico è la porta, viene ospitata da un muro e non può essere posizionata al di fuori di esso. È comunque possibile cambiare l'host di riferimento ad un oggetto anche dopo il suo posizionamento.

La porta in analisi è composta da due parti: la modanatura e la porta. Quest'ultima a sua volta si compone dell'anta apribile e della parte fissa. Si sono quindi realizzate differenti famiglie: una per la porta completa, in cui verranno nidificate una famiglia per la modanatura e una per la porta, nella quale, a sua volta vi è nidificata l'anta. Per la realizzazione di questa famiglia si parte dal livello più profondo di nidificazione, ovvero l'anta (Fig. 31).

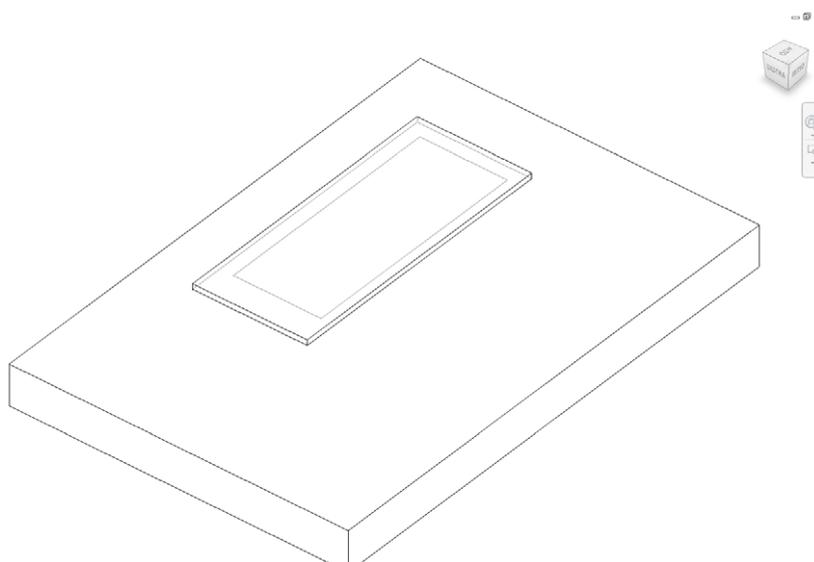


Fig. 31 - Famiglia dell'anta, modello generico basato su superficie

Si è scelto di realizzare l'anta dotata di un parametro che ne regoli l'apertura. Questa caratteristica, di per sé, non è fondamentale al corretto funzionamento del modello e ad una sua completa caratterizzazione, ma si è scelto di includerla per mostrare le potenzialità del modello BIM. Si rivela però utile nel caso si vogliano produrre immagini fotorealistiche (in cui un certo "movimento" delle aperture genera un risultato di grande effetto) o si vogliano fare analisi di flussi luminosi, di calore, di persone, molto dettagliati. Inoltre lo stesso procedimento, in seguito descritto, per realizzare questa funzionalità è applicabile anche per altri scopi. Per realizzare tale funzionalità è necessario

nidificare ulteriormente l'oggetto. Innanzitutto si realizza una famiglia della categoria *modello generico basato su superficie*, successivamente si capirà il motivo di questa scelta, in cui si realizza il solido dell'anta collegato ai parametri di "altezza" e "larghezza" che verranno ereditati fino a gestire le dimensioni della porta. In un'altra famiglia, di categoria *modello generico*, si vincola una *linea di riferimento* al punto attorno a cui dovrà ruotare l'anta e si crea un parametro di apertura angolare (Fig. 32). Si utilizza una linea di riferimento e non un piano perché, come dice la parola stessa, la linea ha una lunghezza definita ed è quindi possibile vincolarne gli estremi. Inoltre le linee di riferimento sono definite da quattro piani di riferimento: due di estremità e due dalla traccia della loro intersezione identificano la linea, uno

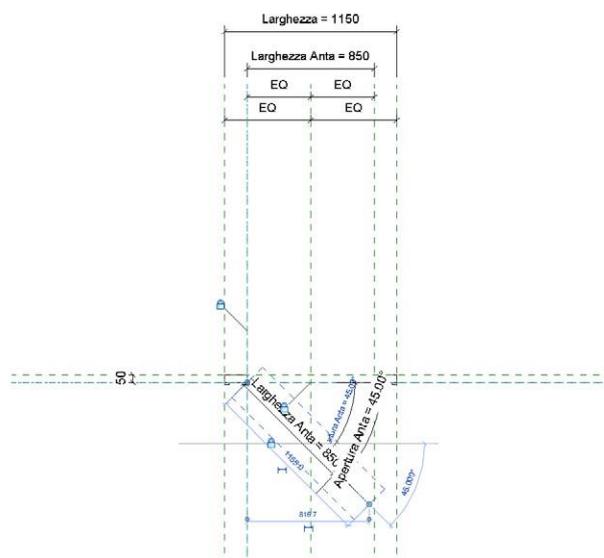


Fig. 32 - Piani e linee di riferimento per l'apertura parametrica dell'anta

verticale ed uno orizzontale. Proprio su questo piano verticale andrà inserita l'anta basata su superficie. Infine si creano e collegano i parametri necessari al corretto funzionamento tra cui "altezza" e "larghezza". È ora possibile nidificare la famiglia realizzata in una

nuova, sempre di categoria *modello generico*, in cui si modellerà anche la parte fissa della porta. Non si sente la necessità di creare un'ulteriore famiglia per questo sottocomponente in quanto non si avrebbero particolari benefici. Analogamente si costruirà una famiglia contenente i solidi della modanatura. Infine è possibile nidificare entrambe queste famiglie ed assemblarle in una famiglia di categoria *porta*, comprensiva di tutti i parametri necessari, accuratamente collegati ai rispettivi delle famiglie nidificate. Questa famiglia sarà quella da inserire all'interno del file di progetto. Tra i parametri inseriti all'interno della famiglia, oltre ai già citati "altezza", "larghezza" e "apertura anta", si sono inseriti anche dei parametri per assegnare il materiale ai componenti.

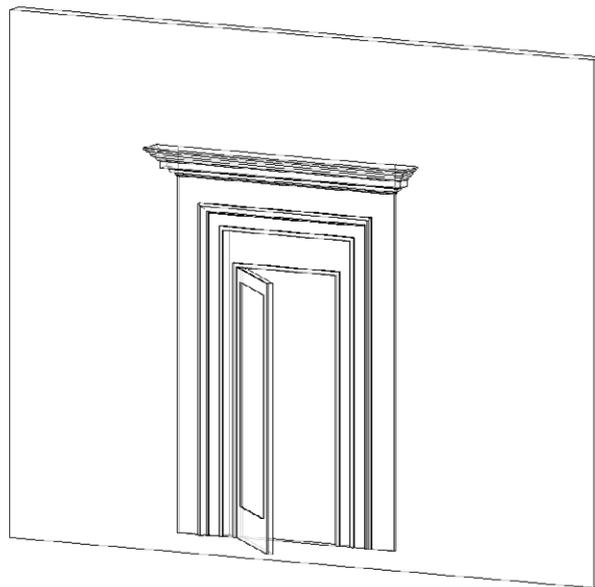


Fig. 33 - Famiglia completa della porta delle navate laterali

### 7.3.3 - Colonna

Un altro elemento che di cui si vuole analizzare la modellazione è la colonna. Il software Revit mette a disposizione due strumenti: il *Pilastro strutturale* ed il *Pilastro architettonico* (Fig. 34). La differenza d'utilizzo tra i due è intuitiva, il pilastro strutturale permette l'inserimento dell'elemento nel modello analitico strutturale. Oltre a questa differenza, è importante anche una diversità di comportamento: quando il pilastro si interseca con un muro, il pilastro strutturale ha una priorità maggiore, per cui il muro viene interrotto dal pilastro; al contrario il pilastro architettonico viene inglobato all'interno della stratigrafia del muro. Questa loro caratteristica è stata utilizzata per differenziare la modellazione delle colonne interne e dei portici sul fronte da quella delle lesene e paraste presenti sia all'interno che all'esterno della chiesa. Nel primo caso sono stati realizzati come *pilastri strutturali*, nel secondo come *architettonici*.



Fig. 34 - Differenza di comportamento tra pilastro strutturale (a) ed architettonico (b)

Per quanto riguarda la realizzazione della colonna, questa è piuttosto semplice. Alla creazione della nuova famiglia ci si trova di fronte due livelli a cui andare a vincolare l'altezza della colonna. Come prima cosa si è realizzato il fusto, vincolandolo a due piani di riferimento aggiuntivi che identificano l'estensione della base e del capitello. Come è noto, il fusto di una colonna non è un cilindro perfetto, ma presenta un'entasi in funzione del diametro alla base, come lo sono anche le altezze delle varie sottocomponenti.

Si è scelto però di non rendere parametrica questa relazione, in quanto non è necessaria una ripetizione, anche in altri edifici, di questo genere di colonna. Paul Aubin ha ampiamente dimostrato nel suo testo “Renaissance Revit” fino a che punto è possibile spingersi nell’inserire queste relazioni all’interno della famiglia, ma si tratta più di un esercizio stilistico che di effettiva utilità pratica. (Aubin, 2013). Si è quindi realizzato il fusto tramite una rivoluzione del profilo ottenuto dal rilievo. Per quanto riguarda la modellazione della base e del capitello, si è scelto di realizzarli come famiglie nidificate per poterne gestire il livello di dettaglio. Anche in questo caso sono stati modellati da semplici estrusioni, rivoluzioni o estrusioni su percorso dei profili. Come per il caso della porta, oltre ai parametri utilizzati per la costruzione, ne sono stati introdotti tre per la gestione dei materiali. Si fa nuovamente presente che nel caso della colonna non è necessario un parametro di altezza in quanto, all’inserimento nel progetto, questa si estende tra i due livelli scelti, con la possibilità di inserire anche un offset da questi.

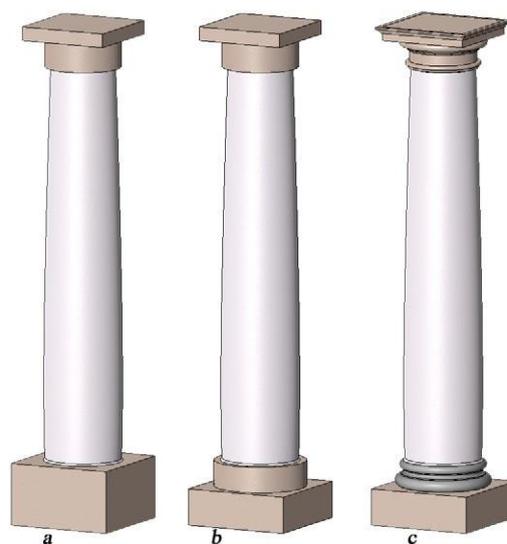


Fig. 35 - Famiglia della colonna interna, livello di dettaglio: basso (a), medio (b), alto (c)

### 7.3.4 - Volta

Per la realizzazione della volta della navata principale e delle voltine delle navate laterali sono stati sperimentati numerosi metodi di modellazione, sia per le differenti caratteristiche degli elementi, sia per verificare quale di questi metodi meglio si adattasse alla realizzazione di casi simili. Si analizzano quindi: la porzione di volta a botte nella navata centrale, la porzione di volta con unghie in corrispondenza delle aperture, la porzione di volta cassettonata nel presbiterio, il catino absidale, l'arco trionfale e la voltina a padiglione nella navata laterale.

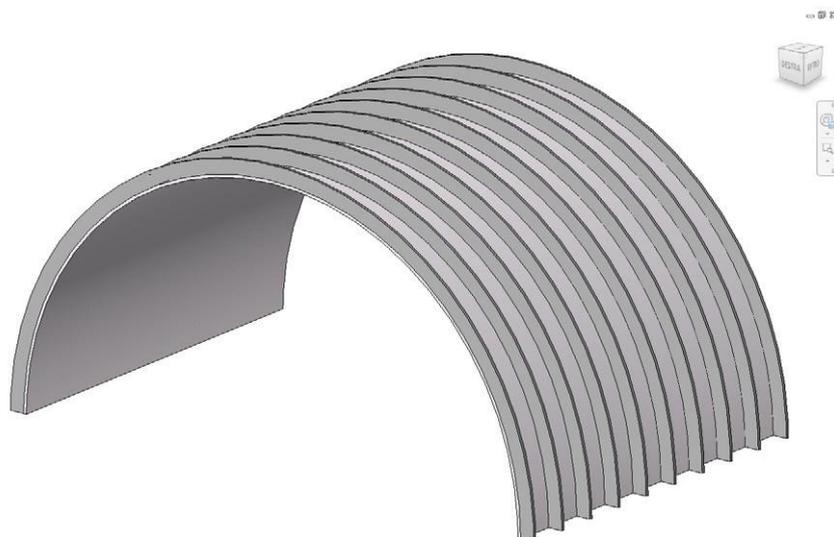


Fig. 36 - Famiglia della volta a botte, modello generico basato su linea

Si comincia la trattazione con il caso più semplice, ovvero la porzione di volta a botte della navata centrale (Fig. 36). Per la modellazione si è semplicemente realizzata un'estrusione del profilo della volta. Si è però voluto sperimentare l'utilizzo della categoria di famiglia *Modello generico basato su linea*. Questo per facilitarne l'inserimento all'interno del progetto. Si è infatti fatto corrispondere l'origine del modello ad un'imposta della volta, e si è vincolata la sua lunghezza a quella della linea di riferimento

presente all'interno della categoria di famiglia scelta. In questo modo per inserirla nel progetto è sufficiente disegnare una linea, lunga quanto la volta, lungo il muro su cui si imposta; ovviamente questa operazione va effettuata al livello giusto di imposta, tuttavia è possibile modificare la quota della volta in seguito al suo inserimento.

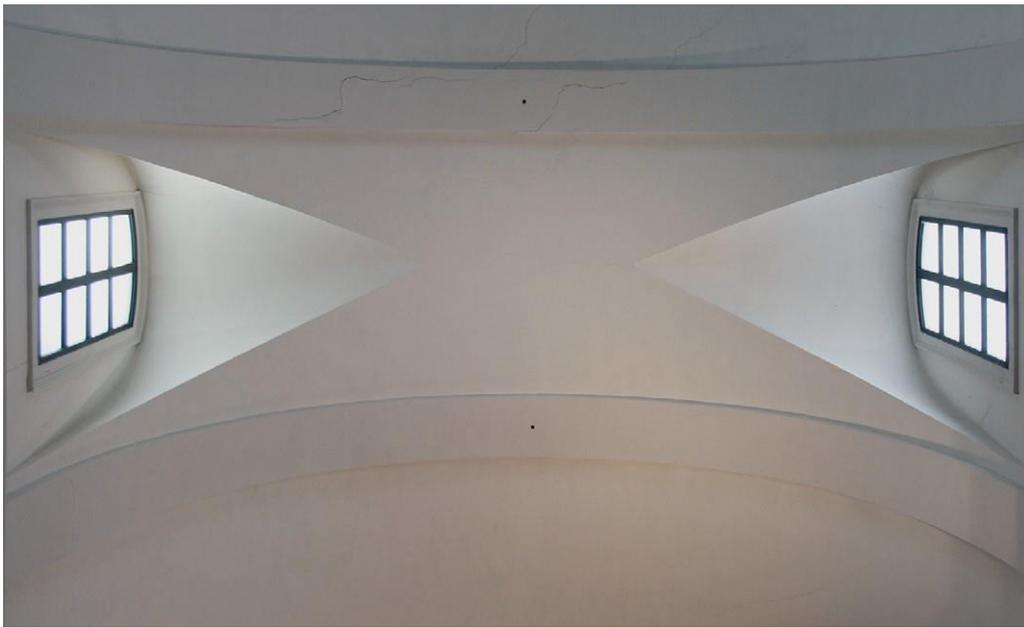


Fig. 37 - Foto della volta in corrispondenza delle aperture (Arch. Poggioli, 2016)

Nel caso di porzione di volta in corrispondenza delle aperture (Fig. 37), quelle con le unghie che permettono il passaggio della luce, si è reso necessario un accurato studio per comprendere la sua realizzazione. La volta a botte viene intersecata da due unghie composte da un profilo ad arco parabolico, ma con direttrice inclinata. Per la sua realizzazione si è quindi utilizzato una famiglia di categoria *Modello generico*, nidificando al suo interno le unghie. Un'automatismo come nel caso precedente sarebbe stato possibile, ma complicato nella realizzazione; non si è applicato perché, essendo soltanto due le istanze di questo tipo di volta, non

si avrebbero avuto benefici sufficienti a giustificare quel genere di modellazione.

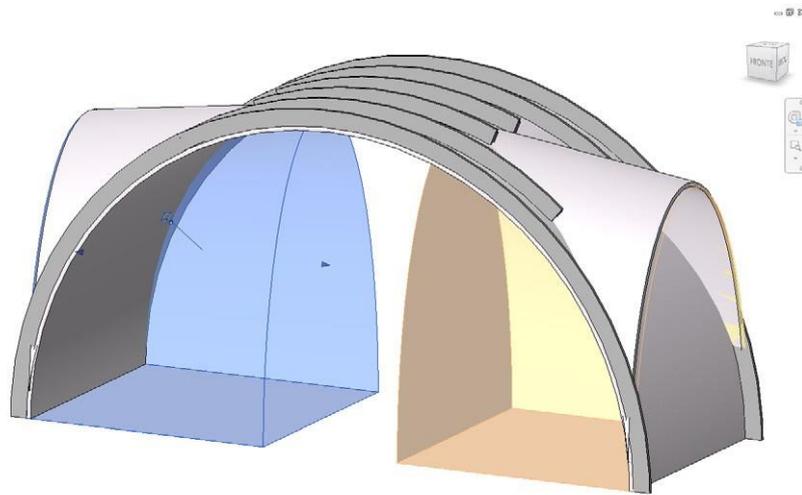


Fig. 38 - Famiglia della volta in corrispondenza delle aperture. Sono evidenziati i solidi di sottrazione

Per quanto riguarda la volta cassettonata nel presbiterio (Fig. 40, pag. 125), si è proceduto in maniera analoga. A partire da una famiglia *Modello generico*, si è realizzata l'estrusione del profilo

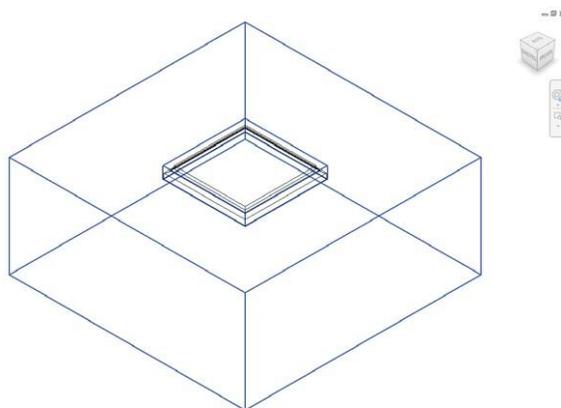


Fig. 39 - Famiglia dei cassettoni, modello generico basato su superficie

della volta in cui sono stati inseriti, nidificandoli, i cassettoni (Fig. 39). La particolarità di questa volta sta, appunto, nei cassettoni. Per

la loro modellazione si è utilizzata una famiglia *Modello generico basato su superficie*, in modo tale che al suo inserimento sulla superficie curva si orienti sempre ortogonale ad essa. Il metodo raggiunge un livello di dettaglio analogo a quello utilizzato per il rilievo e sufficiente per l'obiettivo della modellazione, ma non permette una modellazione totalmente precisa. Infatti l'intradosso del cassettone che nella realtà è curvo, seguendo l'andamento della volta, nel modello risulta piano. Questa approssimazione è tollerabile in questo particolare caso, ma non lo sarebbe nel caso, ad esempio, in cui i cassettoni presentassero decori di pregio su cui effettuare un restauro.

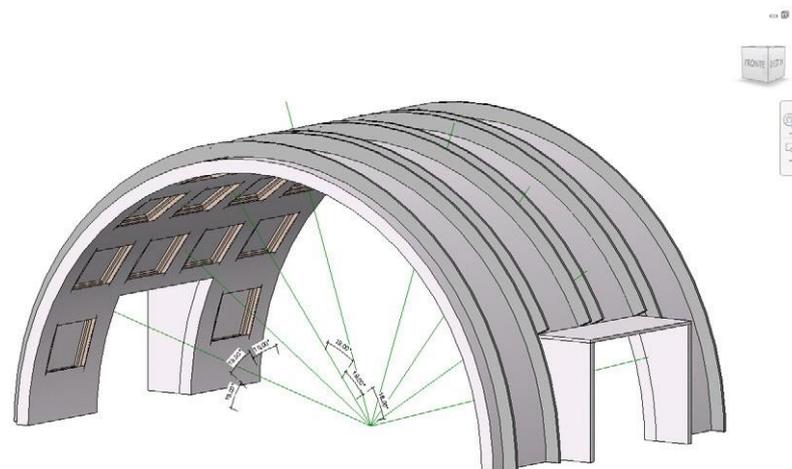


Fig. 40 - Famiglia della volta a cassettoni

Per questo motivo il successivo tratto di volta cassettonata ed il catino absidale sono stati realizzati sperimentando un altro procedimento. Sempre partendo da una famiglia *Modello generico*, in cui i cassettoni non sono stati realizzati come famiglie nidificate, ma modellati direttamente all'interno della famiglia principale, utilizzando la stessa tecnica di modellazione della volta (estrusione)

o del catino (rivoluzione). In questo modo l'intradosso dei cassettoni segue l'andamento curvo della volta o curvo nelle due direzioni del catino (Fig. 42, pag. 127). Nonostante questo miglioramento nella restituzione digitale, la tecnica presenta comunque un difetto. I cassettoni presentano nel loro perimetro una modanatura, per la cui realizzazione è necessario servirsi dello strumento *estrusione su percorso*. Dato che il percorso di queste estrusioni non è planare, a volte il software genera un errore e non realizza le estrusioni su percorso (Fig. 41). La soluzione adottata è stata quella di

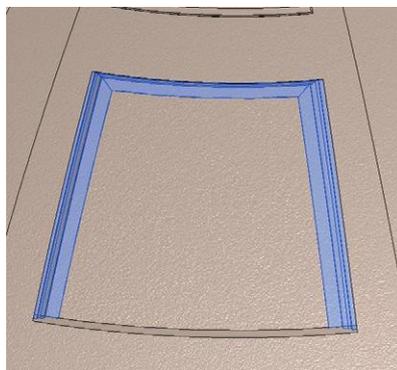


Fig. 41 - Estrusione su percorso errata

realizzare l'estrusione su percorso solo su tre lati di quattro del cassettoni e di realizzare un'estrusione ulteriore sul quarto lato in modo da chiudere la modanatura, in questo modo il software non ha mostrato limiti. Sebbene non sia concettualmente corretto, il risultato visivo è soddisfacente. Un'ulteriore problematica è stata quella del corretto allineamento dei cassettoni tra la volta, il catino e il decoro dell'arco trionfale. Questo problema nasce dal fatto che essendo famiglie differenti, durante la loro creazione o modifica, non sono visibili contemporaneamente. Per aggirarlo si è quindi sfruttata la possibilità del software di esportare disegni in formato dwg. Quindi, dopo aver esportato il prospetto necessario

e semplificato il disegno per renderlo facilmente leggibile, sono stati importati all'interno della famiglia e, una volta serviti al loro scopo, eliminati.

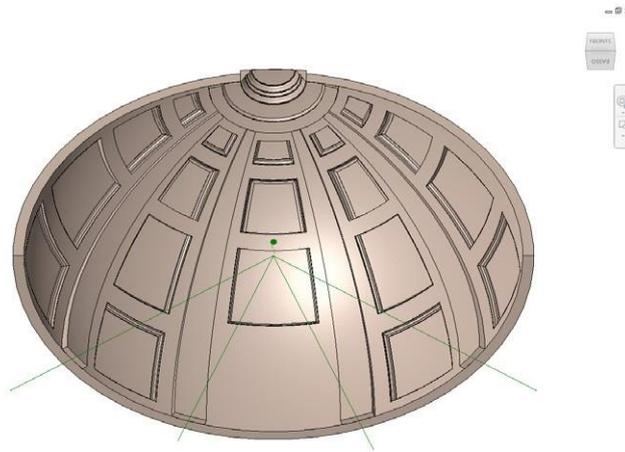


Fig. 42 - Famiglia del catino absidale

Per quanto riguarda le voltine delle navate laterali (Fig. 43), dovendo queste adattarsi ai quadrilateri formati dalle campate, si è scelto di utilizzare lo strumento *Modello locale*. In questo modo è possibile modellare con gli strumenti propri dell'editor delle famiglie direttamente all'interno del progetto. Per la modellazione della loro forma a padiglione si è realizzata un'estrusione su percorso del profilo della volta e chiuso lo spazio rimanente in

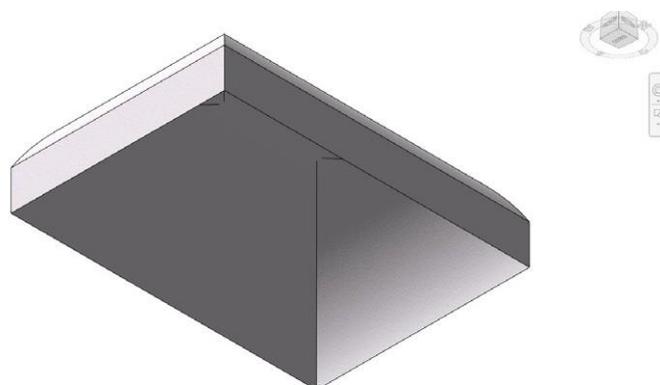


Fig. 43 - Famiglia della voltina della navata laterale

cima con una semplice estrusione. Questa operazione, per la natura di unicità del *modello locale*, si è quindi resa necessaria per ogni voltina.

Infine per la realizzazione degli archi trionfali (Fig. 44) si è scelto di non utilizzare una famiglia caricabile. Sono stati quindi realizzati tramite la modifica del profilo di un muro, andando quindi a disegnare l'andamento dell'arco. Per quanto riguarda le decorazioni presenti si sono realizzate tramite *modello locale*, in quanto non sarebbe stato possibile utilizzare gli strumenti di *estrusione muro* usati nelle altre pareti.



Fig. 44 - Modello dell'arco trionfale isolato

### 7.3.5 - Capriata

Per la modellazione delle capriate si era inizialmente pensato all'utilizzo della famiglia *Travi reticolari strutturali* che permettono la gestione dei componenti della trave. Si è però scelto, per una facilità di utilizzo senza perdita di funzionalità, di realizzarle come *Telaio strutturale*, ovvero come una semplice trave. Si vuole da subito evidenziare che delle capriate e del

sottotetto della chiesa non è stato effettuato un rilievo accurato, data la difficile accessibilità. Si hanno tuttavia a disposizione un archivio fotografico, e la nuvola di punti di alcuni tratti più facilmente raggiungibili. Le capriate presenti nella chiesa sono di due tipi: palladiana e composta; inoltre sono presenti due travi rinforzate da puntoni in corrispondenza degli archi trionfali (Fig. 45).

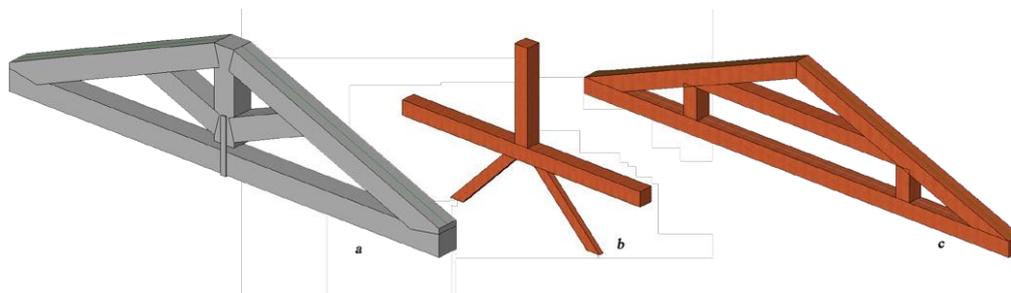


Fig. 45 - Famiglie delle capriate palladiana (a), composta (c) e delle travi rinforzate (b)

Per quanto riguarda la capriata palladiana, Revit mette già a disposizione una famiglia caricabile nella sua libreria di default. Si è quindi scelto di utilizzare questa, avendo preso la decisione di rappresentarle soltanto qualitativamente. Nel caso della capriata composta è stata realizzata una famiglia, modellando solamente gli elementi lignei. Si è effettuato il tentativo di rendere completamente parametrica la pendenza dei puntoni in funzione della pendenza del tetto tramite l'utilizzo di parametri condivisi, senza però ottenere il risultato sperato. Infine per la modellazione delle travi rinforzate si è proceduto analogamente.

## 7.4 - Modellazione dei decori

All'interno della chiesa sono presenti numerose decorazioni e modanature, tra cui spiccano gli angeli a coronamento dell'oculo nell'abside e i putti che sorreggono delle mensole nel presbiterio. Per la loro modellazione, di per sé complicata in un software di pura modellazione tridimensionale come Autodesk 3DS Max e pressoché impossibile all'interno di Revit, si è scelta la tecnica della fotogrammetria.

Per quanto riguarda gli angeli alla base del catino absidale (Fig. 46), sono state realizzate delle fotografie in quota grazie ad una fotocamera montata su un drone DJI Phantom. Si è deciso di realizzare due voli distinti cambiando la fotocamera montata, sfruttandone una per una ripresa più generale e una per ottenere maggior dettaglio. Le fotografie così ottenute sono state importate nel software Agisoft PhotoScan, il quale permette di generare, a partire dal rilievo fotografico, sia nuvole di punti che solidi tridimensionali. Il flusso di lavoro è piuttosto semplice, in quanto

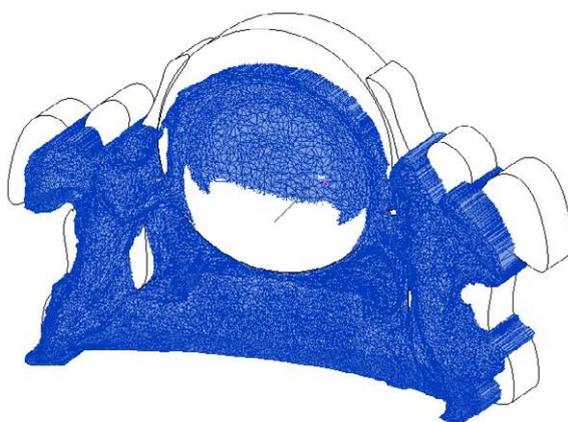


Fig. 46 - Famiglia del decoro dell'abside. In blu la mesh ottenute per fotogrammetria

il software è dotato di numerosi automatismi. Importata la serie di fotografie, ed eventualmente calibrata l'ottica per correggerne le distorsioni, si avvia il procedimento di allineamento delle fotografie durante il quale software riconosce la posizione in cui si trovava la fotocamera al momento di ogni scatto. Successivamente è in grado di ricostruire, in sequenza: la nuvola di punti, la mesh tridimensionale e la texture. Infine è possibile esportare il modello generato nei maggiori formati di interscambio di modelli tridimensionali.

Per quanto riguarda le mensole del presbiterio (Fig. 47), il procedimento utilizzato è ancora più semplificato grazie all'utilizzo di iSense, uno scanner tridimensionale disponibile come accessorio agli Apple iPad. Questo, grazie ad una coppia di sensori, permette di scansionare l'oggetto semplicemente riprendendolo tramite l'iPad. In tempo reale sul monitor, grazie alla realtà aumentata, appare il modello tridimensionale in costruzione. Una volta coperta tutta la

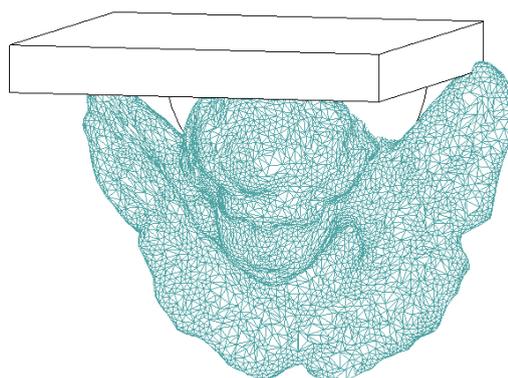


Fig. 47 - Famiglia delle mensole del presbiterio. In celeste la mesh ottenuta per fotogrammetria

superficie necessaria, è possibile inoltrarlo via email al proprio computer per un'ulteriore elaborazione.

Ottenuti con queste tecniche i modelli tridimensionali dettagliati dei decori, sono state realizzate due famiglie *Modello generico*, nelle quali sono stati inseriti. Per evitare di appesantire eccessivamente il modello, si è scelto di creare diversi livelli di dettaglio, in modo tale che solo impostando un livello alto si vedesse il modello dettagliato. Altrimenti sono visibili dei solidi che approssimano la forma dell'elemento.

## **7.5 - Ulteriori difficoltà incontrate**

La nuvola di punti ottenuta dal rilievo tramite laser scanner è estremamente dettagliata, evidenzia quindi ogni imperfezione delle superfici (sia orizzontali che verticali) ed eventuali pareti fuori squadra o solai non perfettamente piani. Permette anche di conoscere, con una sola scansione, l'andamento di un muro per tutta la sua altezza evidenziando eventuali spancamenti, cosa che in un rilievo tradizionale è notevolmente laboriosa da ottenere. Per un software come Revit un muro, o un pavimento, è un parallelepipedo perfetto, quindi risulta estremamente complicato e problematico gestire questo tipo di imperfezioni. Si è scelto quindi di semplificare le superfici di muri e pavimenti considerandole piane. Sono state anche approssimate alcune inclinazioni di scarsa entità, ad esempio la non perfetta ortogonalità tra due muri, questo genere di anomalie è stato modellato solamente nei casi ritenuti significativi.

Piuttosto problematico si è rivelata la modellazione di alcuni elementi di contesto, come il convento adiacente. Le problematiche sono state non tanto di modellazione quanto dovute alla mancanza

di informazioni, il rilievo infatti è circoscritto alla chiesa. In particolar modo è stata complicata la modellazione del tetto, data la sua complessità morfologica. Per tentare di comprenderne la geometria ci si è serviti in primo luogo dell'archivio fotografico e di video disponibili dal rilievo, nel quale, grazie a riprese effettuate per mezzo di drone, erano disponibili inquadrature a volo d'uccello. Inoltre si è rivelato molto utile il servizio Google Earth, ora integrato all'interno di Maps, il quale mette a disposizione per alcune città modelli tridimensionali semplificati degli edifici della topografia, foto satellitari ed aeree, e la possibilità di effettuare misure, seppur approssimate.

Ulteriore problematica è stata rappresentata dai dentelli presenti nelle modanature interne. Ad una attenta osservazione si può notare che sembrano realizzati come sequenza di 20 dentelli che si ripetono, quasi fossero un unico elemento; soltanto agli angoli si adatta cambiando il numero di dentelli. Per mantenere questa analogia concettuale, si è scelto di realizzare una famiglia *Modello generico*, in cui il numero dei dentelli fosse gestito da un parametro istanza, in modo da poter modificare il numero dei dentelli agli angoli tra muri come nella realtà.

Infine sono state riscontrate due difficoltà anche nella modellazione del timpano nella facciata principale. La facciata è leggermente più larga della navata principale della chiesa, per cui al di sopra delle navate laterali, più basse, sborda rispetto alle pareti ortogonali. Il problema nasce dal fatto che esternamente la facciata presenta un colore arancio, mentre all'interno bianco. Per il software però la stratigrafia del muro è la stessa per tutta la sua lunghezza. Per ovviare a questo problema sarebbe stato possibile gestire la facciata come più muri, andando però a complicare

ulteriormente il modello, si è scelto perciò di utilizzare lo strumento *Dividi superficie* che permette di “dipingere” di un materiale diverso una parte delimitata della superficie di un elemento. Inoltre il timpano della facciata, come quello del protiro, presenta una modanatura di forma triangolare, dove i due lati inclinati sono due fasce che seguono la pendenza del tetto. L’intersezione tra queste due parti inclinate e quella orizzontale può risultare problematica; la soluzione più efficace, ma più laboriosa sarebbe quella di realizzare un modello locale. In alternativa Revit mette a disposizione diverse terminazioni delle fasce e modanature tramite lo strumento *Modifica giunto angolato*, potendo scegliere tra *Verticale*, *Orizzontale*, *Perpendicolare*. Si è visto che scegliendo l’opzione orizzontale, e modellando correttamente i profili che originano la modanatura, si ottiene un risultato soddisfacente.

## **Capitolo 8 - Documentazione del modello**

---

## 8.1 - Panoramica del capitolo

Nel presente capitolo si vuole illustrare come all'interno di un modello BIM sia possibile inserire differenti tipi di informazioni riguardanti l'edificio, descrivendo anche il procedimento utilizzato. In seguito si mostra anche il processo per la realizzazione dei tradizionali disegni bidimensionali di pianta, prospetto e sezione, tutt'ora necessari ad una corretta documentazione del progetto.

## 8.2 - Individuazione ed inserimento delle informazioni

Di pari passo con la modellazione dei differenti elementi che compongono l'edificio, si è iniziato a raccogliere ed inserire alcune informazioni all'interno del modello BIM. È questa la caratteristica peculiare del processo BIM che lo distingue da un semplice modello tridimensionale. Si sono quindi individuate alcune categorie di informazioni da introdurre nel modello. La scelta è ricaduta su alcune tipologie facilmente reperibili a titolo di esercizio stilistico. Il fine della presente tesi, come detto in precedenza, è infatti quello di proporre ed illustrare un metodo per la realizzazione e documentazione di un modello BIM per edifici di carattere monumentale, con una particolare attenzione allo stato di danno e alla valutazione della sicurezza. L'obiettivo non è quindi quello di costruire un modello informativo completo dell'edificio oggetto di studio, la chiesa di San Paolo in Monte. Perciò individuate alcune categorie di informazioni, sono state immesse nel modello non nella loro totalità, ma solo in parte per descrivere il processo necessario. Di seguito si analizzano quindi

le informazioni inserite.

### **Localizzazione dell'intervento.**

Le prime informazioni inserite all'interno del modello BIM sono quelle riguardanti la localizzazione dell'intervento. All'interno del software è possibile precisare la posizione tramite latitudine e longitudine o utilizzando i servizi integrati di Bing Maps (Fig. 48, pag. 138). Inserite queste informazioni il software recupera automaticamente le informazioni sulle temperature medie della zona da una database online. È inoltre possibile specificare l'orientamento dell'edificio. Revit dispone di due orientamenti differenti: *Nord reale*, *Nord di progetto*. Specificando il *Nord reale* si comunica al software l'effettivo orientamento del progetto; il *Nord di progetto* invece è utile per allineare le direzioni principali dell'edificio alla verticale ed orizzontale. Risulta utile inserire gli orientamenti in quanto si potranno realizzare degli studi sull'ombreggiatura accurati. Nelle viste preposte a questa funzione, si potrà infatti analizzare l'ombreggiamento dell'edificio a diverse ore della giornata e periodi dell'anno, con la possibilità anche di visualizzare il percorso del sole relativo alla posizione specificata. Inserendo anche informazioni di tipo energetico, è inoltre possibile effettuare calcoli riguardo le prestazioni energetiche dell'edificio, sfruttando i servizi Autodesk360. In ogni vista, oltre ad inserire il tradizionale simbolo che indichi il nord, sarà anche possibile scegliere quale orientamento utilizzare, quindi scegliendo il nord reale, si avrà il nord automaticamente verso l'alto del disegno e l'edificio orientato correttamente.

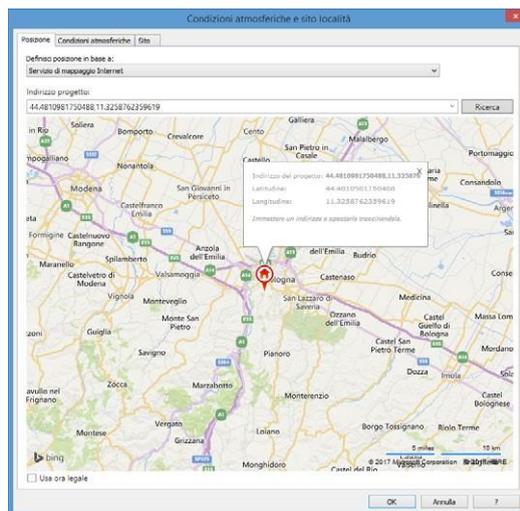


Fig. 48 - Localizzazione del progetto

## Materiali degli elementi

Un'altra informazione inserita all'interno del modello riguarda il materiale degli oggetti che compongono la chiesa. Revit offre la possibilità di assegnare un materiale per ogni oggetto modellato. Ogni materiale inserito è definito da cinque schede di informazioni (Fig. 49, pag. 139):

- **Identità.** Contiene nome e descrizione del materiale. Si possono specificare eventuali commenti, categoria di appartenenza, produttore, ecc.
- **Grafica.** Contiene un colore, con indicazioni sulla trasparenza, utilizzato nelle viste di tipo *Ombreggiato* e *Colori omogenei*. Il colore è definito tramite i valori RGB; è possibile anche specificare un retino da visualizzare sulla superficie degli oggetti e uno nel caso essi siano sezionati. Le informazioni di questa scheda sono state utilizzate per la gestione della visualizzazione dei macroelementi, si veda cap. 10.2.
- **Aspetto.** Contiene le informazioni per la visualizzazione realistica del materiale. Permette l'inserimento di

informazioni riguardo la tessitura diffusa, riflettività, trasparenza, ritagli, autoilluminazione, rilievo. In questa scheda sono state inserite le informazioni sull'aspetto realistico dei materiali.

- Fisico e Termico. In queste due schede, non utilizzate nella definizione dei materiali presenti, è possibile inserire informazioni riguardo le caratteristiche meccaniche e fisiche di trasmissione del calore del materiale. Queste informazioni sono necessarie nel caso si volessero fare analisi di tipo statico o energetico. Ai fini della presente tesi, non avendo effettuato tali analisi e non disponendo di informazioni riguardo tali caratteristiche dei materiali, si è scelto di lasciare quelle presenti di default all'interno del software.

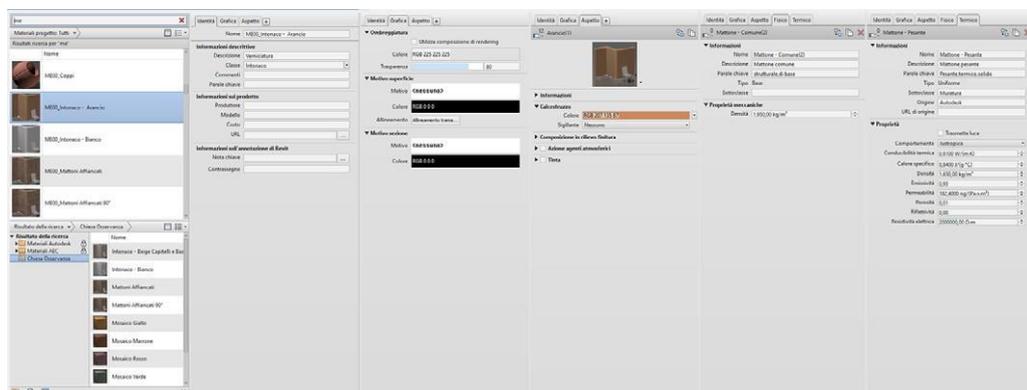


Fig. 49 - Finestra di gestione dei materiali

## Nuvola di punti

Si è scelto di introdurre nel modello anche la nuvola di punti derivata dal rilievo con laser scanner. Revit permette di importare questo genere di file dopo la conversione all'interno del software Autodesk Recap. Si è scelto di inserire la nuvola di punti per permettere una valutazione sulla precisione tra il modello BIM

ricostruito (Fig. 50), adottando qualche approssimazione come spiegato al cap. 7.5, ed il rilievo ad alta precisione. Tuttavia a causa delle dimensioni dell'edificio e, appunto, della precisione elevata del rilievo, la visualizzazione contemporanea della nuvola di punti e del modello richiede prestazioni eccessivamente elevate per i comuni computer, anche di fascia alta. Per questo motivo la nuvola di punti è stata nascosta in tutte le viste, con la possibilità di renderla visibile all'occorrenza.



Fig. 50 - Confronto tra la nuvola di punti ed il modello tridimensionale

### Server ftp

Si è scelto di rendere disponibile sottoforma di deposito in un server ftp tutte le informazioni raccolte. La realizzazione di un archivio del genere è piuttosto semplice e richiede poche risorse, ma soprattutto ha il grande vantaggio di essere raggiungibile da remoto. Per cui ovunque sia disponibile una connessione internet è possibile andare a sfogliare tale archivio. L'indirizzo ftp di questo

archivio è stato reso disponibile sia nell'ambito delle informazioni di progetto, sia all'interno di alcune delle famiglie caricabili realizzate indirizzando direttamente alla cartella dell'oggetto. Non si è estesa questa operazione a tutti gli elementi del modello, nonostante fosse possibile, restando aderenti alla filosofia di descrizione di un processo e non di una più completa descrizione dell'edificio. All'interno del server ftp sono disponibili tutte le informazioni raccolte durante il presente lavoro di tesi; il rilievo, l'archivio fotografico, la nuvola di punti, ecc.

### **Informazioni supplementari riguardo le colonne**

Infine si è voluto realizzare per una famiglia, le colonne interne, un esempio di ciò che è possibile realizzare utilizzando un procedimento simile. All'interno della famiglia caricabile delle colonne interne sono stati inseriti i parametri necessari alla realizzazione di una documentazione completa. Si è voluto inserire, oltre ai materiali, la foto dello stato di fatto, il file dwg riguardante la singola colonna, la sua nuvola di punti. Tutte queste informazioni sono rese disponibili tramite il server ftp sopra citato. Nel caso delle colonne interne, completamente intonacate e verniciate, è anche possibile, generare un abaco in cui siano indicate per ogni colonna la quantità di vernice necessaria per un intervento di restauro. Questa operazione è, ovviamente, effettuabile per qualsiasi oggetto sia in termini di superfici che volumetrici, ad esempio nel caso di interventi sulle murature.

### 8.3 - Realizzazione delle viste di disegno

La realizzazione delle tradizionali viste bidimensionali di pianta, prospetto e sezione dell'edificio è ancora al centro del processo edilizio, è quindi fondamentale che un software BIM posseda questa funzionalità. Si è quindi scelto di riprodurre i disegni realizzati per il rilievo estrapolandoli dal modello BIM. Si sono quindi realizzate:

- Viste di pianta. La realizzazione di questo genere di viste avviene automaticamente; ad ogni livello inserito Revit fa corrispondere una vista di pianta. È comunque possibile sia duplicarle che eliminarne senza ripercussioni sul livello collegato. Si sono quindi generate una vista di pianta, una di pianta dell'orditura di copertura, ed una ipografica delle volte. Per la realizzazione di quest'ultima si è sfruttato la *Pianta dei controsoffitti*, per le quali risulta visibile la parte superiore al piano di sezione.
- Viste di prospetto. All'apertura di un nuovo progetto sono presenti di default quattro viste di prospetto, una per ogni punto cardinale. Anche in questo caso è possibile aggiungerne o eliminarne. Si sono quindi mantenuti i prospetti Est, Nord e Ovest, eliminando il Sud in quanto su questo fronte si sviluppa il convento.
- Viste di sezione. Per questo genere di vista è necessario che vengano inserite nel progetto disegnando le linee di sezione. Si sono riprodotte quindi tutte le sezioni disponibili nel rilievo, ovvero tre longitudinali e sette trasversali.

Si è poi scelto di realizzare ulteriori viste non presenti nel

rilievo:

- Viste tridimensionali. Questo genere di viste possono essere di due tipi: assonometriche o prospettiche. Nel caso delle prime ne è già presente nel modello una di default, ma è possibile duplicarla. Si sono realizzate una vista assonometrica, e due spaccati assonometrici.
- Abachi. Si sono infine generati, a titolo di esempio, un abaco delle colonne, che sintetizzi le informazioni inserite, e un abaco dei materiali, il quale computa le quantità dei materiali presenti.

Per ogni vista generata, esclusi gli abachi, si è poi scelto in che modo visualizzarla. In primo luogo si è definita la *scala di rappresentazione*, scegliendo di mantenere una scala di 1:100 come nel rilievo. Il secondo parametro che Revit mette a disposizione è il *Livello di dettaglio*. È un parametro che dipende dalle capacità dell'utente del software, in quanto è necessario impostare tale funzione all'interno delle famiglie modellate, si veda il cap. 7. All'interno di ogni vista si è scelto di impostare il livello di dettaglio alto. Successivamente è possibile scegliere lo stile di visualizzazione. Nelle viste si è scelto lo stile *Realistico*, eccetto per la pianta con indicate le linee di sezione per la quale, con lo scopo di semplificarne la lettura, si è scelto *Linea nascosta*. Infine è possibile scegliere se visualizzare o meno le ombre proiettate del modello, impostando anche la posizione del sole, e quindi la direzione delle ombre. La proiezione delle ombre è stata attivata solamente nelle viste di prospetto. Si veda l'allegato A per le viste generate.



# Parte 3

---



## **Capitolo 9 - Rilievo dello stato di danno**

---

## 9.1 - Panoramica del capitolo

Nel presente capitolo si illustrano i criteri con cui si analizzano i danni causati da sismi. Verranno introdotti i concetti di *macroelemento* e di *meccanismo di danno*. Si descriveranno poi sinteticamente le linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale indicate dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Infine si effettuerà il rilievo dello stato di danno dell'edificio in esame.

## 9.2 - Teoria dei macroelementi

Una ricerca approfondita, in particolare per le chiese, ha portato a considerare il danno sismico come risultante di due componenti. La prima è legata alla conformazione propria della parte di manufatto (denominata convenzionalmente macroelemento) cui si associano di preferenza dati meccanismi generali di danno, e viene definita vulnerabilità tipica. La seconda si collega alle particolari modalità costruttive proprie di ciascun manufatto, come la presenza di discontinuità indotte da processi di costruzione e trasformazione, da dissesti pregressi; in sostanza ai fattori individuali che influenzano localmente l'evoluzione del meccanismo generale, Denominata vulnerabilità specifica.

L'insieme degli effetti di dissesto, denominati danni, presente in ciascun edificio, è considerato un patrimonio prezioso ed insostituibile. L'opera di riconoscimento, descrizione e interpretazione dei danni è necessaria per almeno due scopi. Il primo è rivolto a proseguire la ricerca epidemiologica sui manufatti, per

ampliare la base di dati che ha consentito di istituire correlazioni e rilevare le probabilità di insorgenza di un dato meccanismo di danno in manufatti dotati di determinati caratteri. Il secondo scopo è direttamente funzionale alla comprensione e descrizione del comportamento già acquisito dall'edificio, a formarne la storia evolutiva del tutto individuale e complessa pur se riconducibile a schemi interpretativi generali e semplificati. Questa anamnesi è fondamentale per la progettazione del miglioramento antisismico di un edificio. Se l'edificio non muta radicalmente assetto, il suo comportamento tende a riprodursi anche a grande distanza di tempo.

Non si vuole quindi proporre la soluzione dei problemi, quanto piuttosto un modo di riferimento con cui cercarla e metterla a fuoco in ciascun edificio tenendo conto di esperienze più generali. D'altro canto, va tenuto presente che il progetto di miglioramento non ha natura dimostrativa, come invece deve avere l'adeguamento, ma deve soltanto convincere dell'effettivo miglioramento prestazionale. Il progetto di miglioramento deve essere in grado di convincere che le soluzioni proposte sono, nella specifica situazione di quell'edificio, efficaci a contrastare i danni sismici. Al calcolo numerico è affidato un ruolo di dimensionamento e di verifica dell'entità del miglioramento apportato.

La legge del 30 marzo 1998, n.61, indica gli obiettivi del "ripristino, recupero e restauro" come contenuto generale del piano di interventi. Per ripristino possiamo intendere tutti quegli interventi necessari a riportare il bene verso una condizione di efficienza e completezza in cui si presume l'edificio si trovasse prima del danneggiamento e del degrado, includendo perciò le opere di riparazione, di risarcimento limitato o di ricostruzione

estesa a intere parti. Si può quindi affermare che alla restituzione di integrità fisica (ripristino), di efficienza funzionale (recupero), di conservazione e fruibilità del bene (restauro), si vuole associare una attività di prevenzione dei danni futuri attraverso il miglioramento sismico.

La definizione di miglioramento è contenuta nel D.M. 16 gennaio 1996: “si definisce intervento di miglioramento l’esecuzione di una o più opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell’edificio con lo scopo di conseguire un maggior grado di sicurezza senza modificarne in maniera sostanziale il comportamento globale”.

La consapevolezza che, inserendo presidi rivolti a mutare radicalmente il comportamento (come strutture intelaiate in murature continue, pannelli in c.a., ecc.) si determina un comportamento ibrido, difficilmente prevedibile e potenzialmente più sfavorevole di quello che si vuole evitare.

Il miglioramento tende a limitare il più possibile gli interventi, andando ad operare sulle singole parti, reindirizzare il comportamento di insieme in modo più favorevole, e di non mutarlo globalmente. Di fondamentale importanza è la capacità di saper interpretare attraverso i danni il comportamento passato per mettere a fuoco, insieme ad altre osservazioni, l’identità strutturale della fabbrica e per prevederne il comportamento futuro. Attraverso un’analisi accurata dei danni e dei dissesti, considerati perciò non solo come effetti da riparare, ma anche come manifestazioni fondamentali per la comprensione del comportamento, si individuano i punti critici (“vulnerabili”) della struttura e si indirizzano gli interventi correttivi. Si tenta quindi una analisi dell’esperienza di danno, per trarne insegnamenti il più

possibile codificati e trasmissibili.

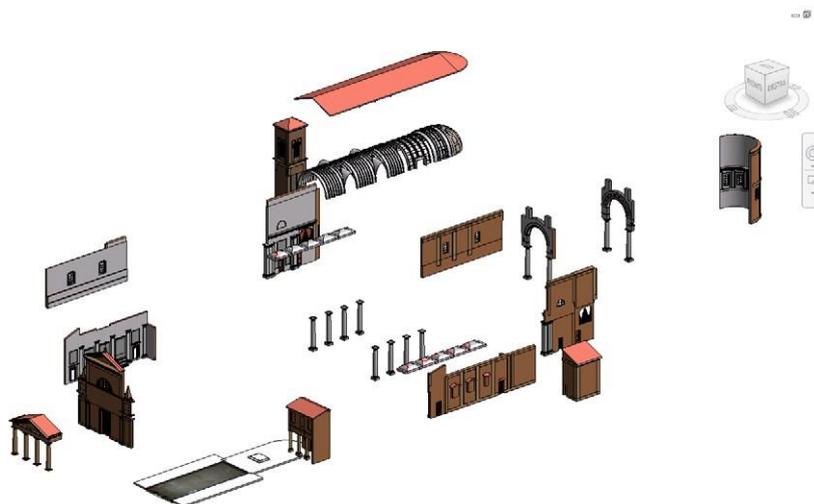


Fig. 51 - Esploso assonometrico dei macroelementi della chiesa

Le costruzioni monumentali assumono, al sisma, comportamenti riconducibili ad un numero relativamente limitato di meccanismi di danno, correlati soprattutto alla forma della parte colpita. Il meccanismo di danno diviene quindi lo strumento per descrivere il comportamento dell'edificio interpretando il danno che si è verificato. A sua volta, il danno è il risultato e la dimostrazione di una forma di vulnerabilità intrinseca della parte danneggiata, denominata macroelemento. Per macroelemento si intende una parte costruttivamente riconoscibile e compiuta del manufatto, che non necessariamente coincide con una parte identificabile anche sotto l'aspetto architettonico e funzionale. Essa è di norma estesa almeno ad una intera parete o ad un orizzontamento, ma solitamente è formata da più pareti ed elementi orizzontali connessi tra loro a costituire una parte costruttivamente unitaria. In alcuni casi, è volumetricamente definita, anche se in genere collegata e non indipendente dal complesso della costruzione. Per macroelemento si intende la parte edilizia nell'ambito della quale

è osservabile e compiutamente descrivibile un comportamento unitario e riconoscibile nei meccanismi di insieme a seguito delle azioni sismiche. È perciò una parte di costruzione definita come unitaria in base al comportamento osservato, e tale da consentire la descrizione dei fenomeni di danno con il minor grado di complessità, pur mantenendo unitaria la lettura del fenomeno che vi si verifica. Le interazioni tra i diversi macroelementi avvengono tendenzialmente al bordo di questi; bordo che non può essere definito da una netta linea di confine, ma semmai da un'area entro la quale, con maggiore frequenza, avvengono i danni.

Si può definire il comportamento come il modo caratteristico di una costruzione di resistere, deformarsi ed eventualmente dissestarsi fino al crollo, a fronte delle sollecitazioni indotte dai propri carichi o da azioni esterne. E' una manifestazione fondamentale dell'identità strutturale di una costruzione, ma è anche fortemente influenzata dall'insieme di evoluzioni, di origine antropica o naturale, che la fabbrica ha subito nel tempo. Raramente una struttura muraria è organizzata in modo da poter offrire resistenza rilevante ad azioni diverse da quelle verticali.

Si è constatato che se l'edificio non muta configurazione e struttura, il suo comportamento tende a riprodursi anche a grande distanza di tempo, recidivando i danni e i meccanismi che li generano. Si produce con il tempo un danno cumulato che determina l'affaticamento della struttura, la perdita della sua efficienza e della capacità di risposta strutturale. Il ripristino strutturale consiste nel ristabilire questa efficienza perduta. Per realizzarlo è necessario individuare sistematicamente nel corso della fase analitica tutte le forme di indebolimento che si sono prodotte.

Si definisce vulnerabilità la predisposizione di un manufatto

ad essere danneggiato in caso di sisma. Può essere descritta come stima e qualificazione del danno atteso, che può essere così inteso:

- come indice dei danni ulteriori probabili, in quanto prosecuzione di meccanismi la cui presenza sia già stata riconosciuta;
- come indice dei danni possibili, associando la memoria dei danni già verificati alla configurazione delle parti (vulnerabilità tipica) o a condizioni di debolezza locali (vulnerabilità specifica).

Si definisce meccanismo il modello di rappresentazione cinematica con cui si interpreta e si descrive il comportamento al sisma di una parte strutturale unitaria (denominata macroelemento) e il danno conseguente. Al meccanismo è affidato sia il ruolo di interpretazione dinamico-meccanica del danno accaduto sia di previsione del danno ulteriore. Vi sono meccanismi tendenzialmente unidirezionali che, una volta attivati, tendono a indurre spostamenti progressivi. Altri meccanismi ciclici sono bidirezionali. Questi tendono a produrre comunque una somma di danni, ma spostamenti assoluti più limitati.

Si possono formare gerarchie di meccanismi:

- meccanismo generale di macroelemento, quando investe la parte nel suo insieme;
- meccanismo parziale di macroelemento, quando ne investe una parte significativa;
- meccanismo locale, quando associato a forme di vulnerabilità specifica di parti limitate;
- meccanismo composito;

- meccanismi simmetrici, quando investono in modo bilaterale il macroelemento;
- meccanismo associato o acquisito, che si attiva localmente a seguito dell'avanzamento e sviluppo di un altro meccanismo generale.

Perchè il miglioramento di una costruzione sia efficace e duraturo, è condizione preliminare che essa sia dotata di una configurazione strutturale adeguata, non soffra di dissesti e non presenti danni. L'opera di riparazione ha come finalità il risarcimento di effetti di dissesto presenti. Gli effetti di dissesto costituiscono il risultato e la prova tangibile dell'avvenuto consumo di parte delle risorse di resistenza che l'edificio aveva nella fase precedente al danneggiamento.

L'opera di consolidamento statico, è rivolta ad aumentare l'efficienza e la capacità strutturale, in modo che la costruzione sia in grado di sopportare senza danno i normali carichi statici di esercizio. La riparazione inibisce gli effetti sulla compagine strutturale di un danno, tuttavia non interviene sulle cause che lo hanno provocato, compito che si affida al consolidamento.

L'opera di manutenzione è rivolta soprattutto a mantenere in efficienza le protezioni contro agenti atmosferici o contro l'usura accentuata.

### **9.3 - Linee guida per la valutazione del rischio sismico**

Le linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, successivamente chiamate soltanto linee guida, sono state redatte dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti con lo scopo di definire un percorso di conoscenza e di valutazione del livello di sicurezza, analogo a quello definito per le costruzioni non tutelate, per il patrimonio culturale, tenendo conto delle sue esigenze e peculiarità. Per attuare politiche di prevenzione sismica agli edifici tutelati del territorio, è necessaria la conoscenza del rischio cui sono soggetti i manufatti esistenti. Le linee guida si prefiggono di stabilire una metodologia con cui acquisire in tempi brevi un livello di conoscenza degli edifici.

Con questa intenzione sono stati ridefiniti gli stati limite di riferimento:

- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) , esigenze di salvaguardia del manufatto e dell'incolumità delle persone.
- Stato Limite di Danno (SLD), esigenze di salvaguardia della funzionalità del bene.
- Stato Limite di danno ai beni Artistici (SLA), esigenze di salvaguardia dei beni di valore artistico contenuti nell'edificio.

Nel caso dei beni culturali tutelati è necessario attenersi ad interventi di miglioramento, riparazione o interventi locali (punto 8.4 delle NTC). Le riparazioni e gli interventi locali interessano parti limitate della costruzione e devono essere soggetti a verifiche locali. Nel caso dei beni tutelati, è comunque richiesta una valutazione della sicurezza complessiva in modo da certificare

che non siano peggiorate le condizioni preesistenti. Si definiscono quindi tre diversi livelli di valutazione:

- LV1 (conoscenza speditiva). Consente la valutazione dell'azione sismica allo SLV attraverso metodi semplificati, basati su un numero limitato di parametri geometrici e meccanici che utilizzano dati qualitativi. In alternativa, i metodi semplificati LV1 possono fornire la vita nominale per la quale il manufatto presenta un indice di sicurezza pari a 1. In questo caso, la vita nominale rappresenta il periodo di tempo nel quale la costruzione può essere usata con lo stesso livello di sicurezza prescritto per le nuove costruzioni. E' molto utile per stilare delle graduatorie di rischio, nelle quali si definisce una priorità di interventi. Tuttavia, il livello di conoscenza acquisibile nelle valutazioni LV1 è piuttosto basso e l'adozione di differenti valori di  $F_c$  nei manufatti potrebbe alterare la graduatoria di rischio.
- LV2 (riparazione o intervento locale) Valutazioni da adottare in presenza di interventi su porzioni della costruzione. La valutazione per l'intero manufatto viene richiesta con gli strumenti del livello LV1.
- LV3 (miglioramento). Valutazione da adottare in presenza di interventi diffusi nella costruzione. Le valutazioni riguardano l'intero manufatto.

Dal punto di vista operativo, un possibile processo di applicazione di questi concetti è:

- Valutazione dell'indice di sicurezza sismica (definito in seguito) nella situazione attuale.
- Valutazione dell'indice di sicurezza sismica al quale il

bene può essere portato con interventi compatibili con le esigenze di tutela.

Ai fini di una attendibile valutazione della sicurezza sismica, la conoscenza della costruzione storica è fondamentale. Risulta importante conoscere le caratteristiche originarie della fabbrica e le modifiche intercorse nel tempo dovute a fenomeni di danneggiamento o ad interventi sull'edificio. Tuttavia, nell'ottica di impedire perdite irrimediabili, l'esecuzione di una completa campagna di indagini può risultare troppo invasiva. Per una completa conoscenza si rendono quindi necessari:

- Caratterizzazione funzionale dell'edificio e dei suoi spazi.
- Rilievo geometrico, comprensivo dell'eventuale quadro fessurativo.
- Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti. Ai fini della comprensione del comportamento della struttura è importante conoscere la natura degli interventi di consolidamento, la loro localizzazione ed efficacia.
- Rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione, facendo particolare attenzione alla qualità muraria e ai collegamenti tra gli elementi.
- Caratterizzazione meccanica dei materiali.
- Aspetti geotecnici.
- Monitoraggio.

$$F_c = 1 + \sum_{i=1}^4 F_{CK}$$

In base al livello di approfondimento della conoscenza

raggiunto, si definisce un fattore di confidenza  $F_c$  compreso tra 1 e 1.35. Questo fattore si applica in modo differente a seconda del modello utilizzato per la valutazione della sicurezza. In ogni caso il fattore di confidenza viene definito, con riferimento alla tabella, come:

Rilievo geometrico	Rilievo geometrico completo	$F_{C1}=0.05$
	Rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi	$F_{C1}=0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2}=0.12$
	Restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2}=0.06$
	Restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche)	$F_{C2}=0$
Proprietà meccaniche dei materiali	Parametri meccanici desunti da dati già disponibili	$F_{C3}=0.12$
	Limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3}=0.06$
	Estese indagini sui parametri meccanici dei materiali	$F_{C3}=0$
Terreno e fondazioni	Limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni	$F_{C4}=0.06$
	Disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4}=0.03$
	Estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni.	$F_{C4}=0$

### **Modello di valutazione LV1 per le chiese**

L'esperienza dei recenti terremoti suggerisce che il comportamento sismico delle chiese possa essere interpretato attraverso la loro scomposizione in porzioni architettoniche, denominate macroelementi, caratterizzate da una risposta strutturale sostanzialmente autonoma rispetto alla chiesa nel suo complesso. Nella maggior parte dei casi è quindi preferibile procedere con verifiche locali riferite ai diversi macroelementi. L'individuazione dei macroelementi e dei corrispondenti meccanismi di collasso, dovrà necessariamente essere correlata al funzionamento accertato attraverso la lettura del danno sismico.

La metodologia considera 28 meccanismi di danno, associati ai diversi macroelementi che possono essere presenti in una chiesa.

Si riporta ora l'Allegato C delle linee guida, nel quale sono indicati i 28 meccanismi di danno unitamente ad una lista di presidie di indicatori di vulnerabilità.

#### **“ALLEGATO C**

#### **Modello per la valutazione della vulnerabilità sismica delle chiese**

[...] In primo luogo è necessario verificare se alcuni macroelementi non sono presenti, ovvero quali meccanismi non si potrebbero verificare nella chiesa a seguito di un sisma, ed a questi assegnare  $\rho_k=0$ ; agli altri dovrebbe essere attribuito il valore  $\rho_k=1$ , ad eccezione dei meccanismi 4 e 15 ( $\rho_k=0.5$ ) e di alcuni meccanismi (10, 11, 12, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 26) nei quali si dovrà scegliere un valore  $0.5 < \rho_k < 1$ , in relazione all'importanza dell'elemento nel contesto della costruzione.

Per ogni meccanismo vengono suggeriti i possibili elementi di

presidio antisismico e gli indicatori di vulnerabilità; a queste liste possono essere aggiunti altri elementi che dovessero emergere, a seguito di una specifica conoscenza della costruzione, come significativi per la valutazione del comportamento sismico della chiesa. A ciascun presidio o indicatore di vulnerabilità rilevato deve essere attribuito, rispettivamente, un grado di efficacia o di gravità, con un punteggio da 1 a 3. [...]

### **1-RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA**

Distacco della facciata dalle pareti o evidenti fuori piombo.

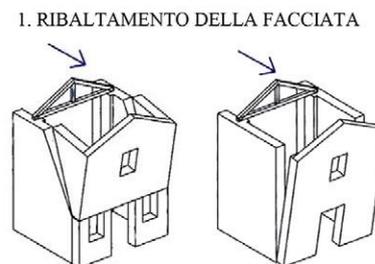


Fig. 52 - Ribaltamento della facciata (D.P.C., 2011)

#### *Presidi antisismici*

Presenza di catene longitudinali

Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)

Ammorsamento di buona qualità tra la facciata ed i muri della navata

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di elementi spingenti (puntoni di copertura, volte, archi)

Presenza di grandi aperture nelle pareti laterali in vicinanza del cantonale

## 2-MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA

Ribaltamento del timpano, con lesione orizzontale o a V -  
Disgregazione della muratura o scorrimento del cordolo - Rotazione delle capriate.

*Presidi antisismici*

2. MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA

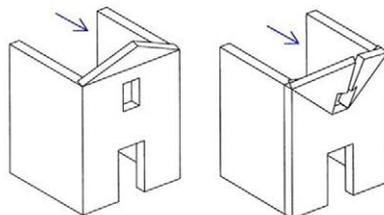


Fig. 53 - Meccanismi in sommità della facciata (D.P.C., 2011)

Presenza di collegamenti puntuali con gli elementi della copertura

Presenza di controventi di falda

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di grandi aperture (rosone)

Presenza di una sommità a vela di grande dimensione e peso

Cordoli rigidi, trave di colmo in c.a., copertura pesante in c.a.

### 3-MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA

Lesioni inclinate (taglio) - Lesioni verticale o arcuate (rotazione)

- Altre fessurazioni o spancamenti.

#### 3. MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA

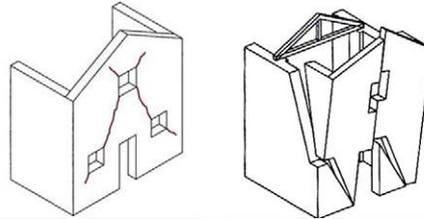


Fig. 54 - Meccanismi nel piano della facciata (D.P.C., 2011)

#### *Presidi antisismici*

Presenza di una catena in controfacciata

Contrasto laterale fornito da corpi addossati; chiesa inserita in aggregato

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di aperture di grandi dimensioni o in numero elevato (anche se tamponate)

Elevata snellezza (rapporto altezza/larghezza)

### 4-PROTIRO - NARTECE

Lesioni negli archi o nella trabeazione per rotazione delle colonne

- Distacco dalla facciata - Martellamento.

#### 4 - PROTIRO - NARTECE

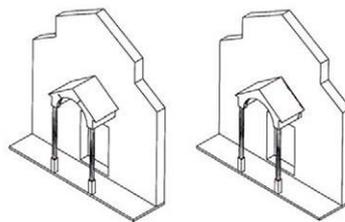


Fig. 55 - Protiro (D.P.C., 2011)

#### *Presidi antisismici*

Presenza di catene

Presenza di colonne/pilastri di adeguata dimensione

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di elementi spingenti (archi, volte)

### **5-RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA**

Lesioni negli arconi (con eventuale prosecuzione nella volta) -

Rotazione delle pareti laterali - Lesioni a taglio nelle volte - Fuori piombo e schiacciamento nelle colonne.

5 - RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA

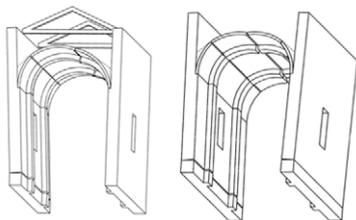


Fig. 56 - Risposta trasversale dell'aula (D.P.C., 2011)

*Presidi antisismici*

Presenza di paraste o contrafforti esterni

Presenza di corpi annessi adiacenti

Presenza di catene trasversali

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di grandi aperture (rosone)

Presenza di pareti con elevata snellezza

Presenza di volte e archi

## **6-MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA LONGITUDINALE)**

Lesioni inclinate (singole o incrociate) - Lesioni in corrispondenza di discontinuità nella muratura.

6 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA LONGITUDINALE)

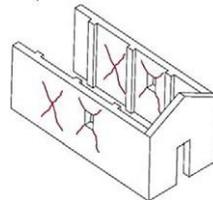


Fig. 57 - Meccanismi di taglio nelle pareti laterali (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità

Presenza di buoni architravi nelle aperture

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore

Cordoli in c.a. molto rigidi, copertura pesante in c.a.

## 7-RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO NELLE CHIESE A PIÙ NAVATE

Lesioni negli archi o negli architravi longitudinale - Schiacciamento e/o lesioni alla base dei pilastri - Lesioni a taglio nelle volte delle navate laterali.

7 - RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO

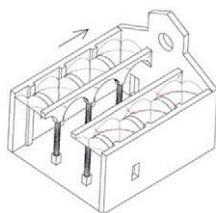


Fig. 58 - Risposta longitudinale del colonnato (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene longitudinali

Presenza di contrafforti in facciata

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di volte pesanti nella navata laterale

Copertura pesante in c.a., cappe armate di significativo spessore nelle volte

## 8-VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE

Lesioni nelle volte dell'aula centrale - Sconnessioni delle volte dagli arconi.

8 - VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE

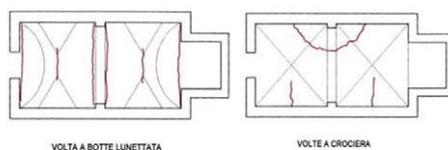


Fig. 59 - Volte della navata centrale (D.P.C., 2011)

*Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchi o frenelli

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

**9-VOLTE DELLE NAVATE LATERALI**

Lesioni nelle volte o sconessioni dagli arconi o dalle pareti laterali.

9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI

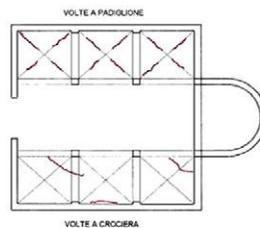


Fig. 60 - Volte delle navate laterali (D.P.C., 2011)

*Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchio o frenelli

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

## 10-RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITÀ DEL TRANSETTO

Distacco della parete frontale dalle pareti laterali - Ribaltamento o disgregazioni del timpano in sommità.

10 - RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITÀ DEL TRANSETTO

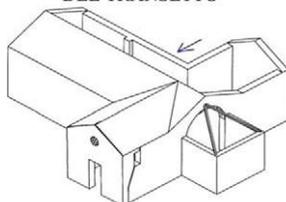


Fig. 61 - Ribaltamento delle pareti del transetto (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene longitudinali

Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)

Buon collegamento con la copertura (travi-catena, controventi)

Ammorsamento di buona qualità tra la parete frontale ed i muri laterali

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di cordoli rigidi, travi di colmo in c.a., copertura pesante

Presenza di grandi aperture nella parete frontale (rosone) e/o quelle laterali

Presenza di una sommità a vela di grande dimensione

## 11-MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO

Lesioni inclinate (singole o incrociate) - Lesioni attraverso discontinuità.

11 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO

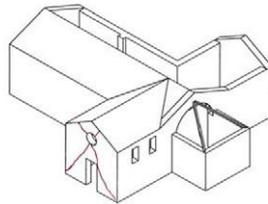


Fig. 62 - Meccanismi di taglio nelle pareti del transetto (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità

Presenza di buoni architravi nelle aperture

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore

## 12-VOLTE DEL TRANSETTO

Lesioni nelle volte o sconnessioni dagli arconi e dalle pareti laterali.

12 - VOLTE DEL TRANSETTO

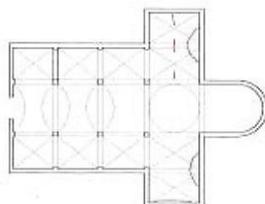


Fig. 63 - Volte del transetto (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchi o frenelli

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

## 13-ARCHI TRIONFALI

Lesioni nell'arco - Scorrimento di conci - Schiacciamento o lesioni orizzontali alla base dei piedritti.

13 - ARCHI TRIONFALI

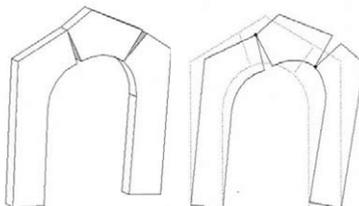


Fig. 64 - Archi trionfali (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Pareti contrasto efficaci (basso rapporto luce/larghezza aula, transetto, altri corpi di fabbrica)

Presenza di una catena in posizione efficace

Conci di buona fattura e/o adeguato spessore dell'arco

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di copertura pesante in c.a.

Presenza di cupola o tiburio

#### **14-CUPOLA - TAMBURO/TIBURIO**

Lesini nella cupola (ad arco) con eventuale prosecuzione nel tamburo.

14 - CUPOLA - TAMBURO / TIBURIO

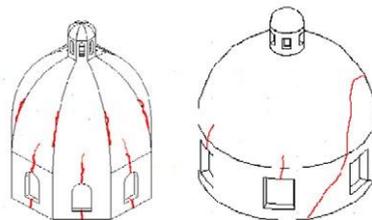


Fig. 65 - Lanterna - Tamburo (D.P.C., 2011)

*Presidi antisismici*

Presenza di una cerchiatura esterna, anche a più livelli

Presenza nel tamburo di contrafforti esterni o paraste

Cupola direttamente impostata sugli archi trionfali (assenza di tamburo)

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di grandi aperture nel tamburo

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

## 15-LANTERNA

Lesioni nel cupolino della lanterna - Rotazioni o scorrimenti dei piedritti.

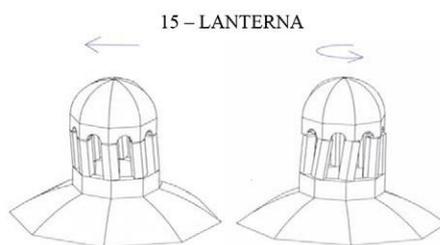


Fig. 66 - Lanterna (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di catene o di una cerchiatura esterna

Presenza di paraste o contrafforti

Dimensioni contenute rispetto a quelle della cupola

### *Indicatori di vulnerabilità*

Lanterna di elevata snellezza, con grandi aperture e piccoli pilastri

## 16-RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE

Lesioni verticali o arcuate nelle pareti dell'abside - Lesioni verticali negli absidi poligonali - Lesione ad U negli absidi semicircolari.

### *Presidi antisismici*

16 - RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE

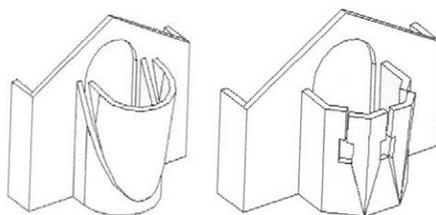


Fig. 67 - Ribaltamento dell'abside (D.P.C., 2011)

Presenza di cerchiatura (semicircolare e poligonale) o catene (rettangolare)

Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati)

Presenza di copertura controventata, non spingente

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di un forte indebolimento per la presenza di aperture (anche tamponate) nelle pareti

Presenza di volte spingenti

Cordoli rigidi, copertura pesante, puntoni di falda in c.a.

## **17-MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE**

Lesioni inclinate (singole o incrociate) - Lesioni in corrispondenza di discontinuità murarie.

17 - MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE

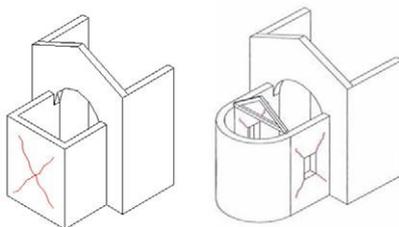


Fig. 68 - Meccanismi di taglio nell'abside (D.P.C., 2011)

*Presidi antisismici*

Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità

Presenza di buoni architravi nelle aperture

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore

### 18-VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE

Lesioni nelle volte o sconnessioni dagli arconi o dalle pareti laterali.

18 - VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE

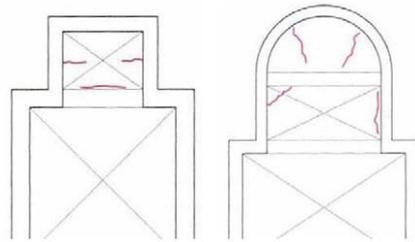


Fig. 69 - Volte dell'abside (D.P.C., 2011)

#### *Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchi o frenelli

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

## 19-MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA - PARETI LATERALI DELL'AULA

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse  
- Sconnessione tra cordoli e muratura - Movimenti significativi del manto di copertura.

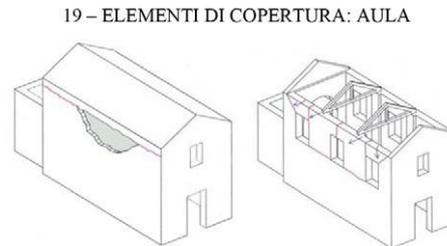


Fig. 70 - Elementi di copertura dell'aula (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Presenza di collegamenti delle travi alla muratura

Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)

Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di copertura staticamente spingente

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

## 20-MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA - TRANSETTO

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse  
- Sconnessione tra cordoli e muratura - Movimenti significativi  
del manto di copertura.

20 - ELEMENTI DI COPERTURA: TRANSETTO

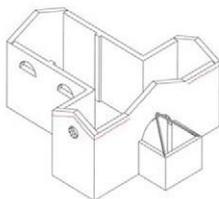


Fig. 71 - Elementi di copertura del transetto (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Presenza di collegamenti delle travi alla muratura

Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)

Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di copertura staticamente spingente

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

## **21-MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA - ABSIDE E PRESBITERIO**

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse  
- Sconnessione tra cordoli e muratura - Movimenti significativi  
del manto di copertura.

21 - ELEMENTI DI COPERTURA: ABSIDE

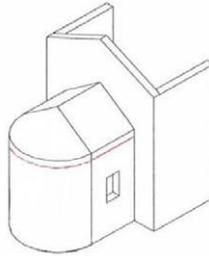


Fig. 72 - Elementi di copertura dell'abside (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Presenza di collegamenti delle travi alla muratura

Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)

Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di copertura staticamente spingente

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

## 22-RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE

Distacco della parete frontale dalle pareti laterali.

22 - RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE

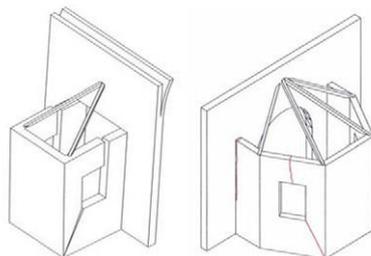


Fig. 73 - Ribaltamento delle cappelle (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, edifici addossati)

Presenza di cerchiatura o incatenamento

Ammorsamento di buona qualità tra la parete frontale ed i muri laterali

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di forte indebolimento per la presenza di aperture nelle pareti

## 23-MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DELLE CAPPELLE

Lesioni inclinate (singole o incrociate) - Lesioni in corrispondenza di discontinuità murarie.

23 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE CAPPELLE

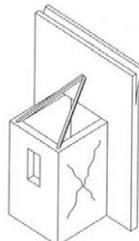


Fig. 74 - Meccanismi di taglio nelle cappelle (D.P.C., 2011)

*Presidi antisismici*

Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità

Presenza di buoni architravi nelle aperture

Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

Presenza di grandi aperture (anche tamponate), muratura di limitato spessore

## **24-VOLTE DELLE CAPPELLE**

Lesioni nelle volte o sconnessioni dalle pareti laterali.

24 - VOLTE DELLE CAPPELLE

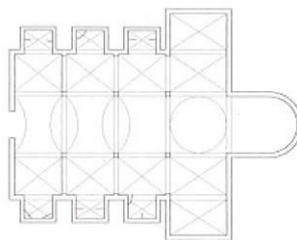


Fig. 75 - Volte delle cappelle (D.P.C., 2011)

*Presidi antisismici*

Presenza di catene in posizione efficace

Presenza di rinfianchi o frenelli

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, specialmente se molto ribassate

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

## 25-INTERAZIONI IN PROSSIMITÀ DI IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE

Movimento in corrispondenza di discontinuità costruttive - Lesioni nella muratura per martellamento.

25 - INTERAZIONI IN PROSSIMITÀ DI IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE

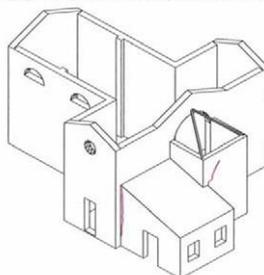


Fig. 76 - Irregolarità piano-altimetriche (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di un'adeguata connessione tra le murature di fasi diverse

Presenza di catene di collegamento

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di un'elevata differenza di rigidezza tra i due corpi

Possibilità di azioni concentrate trasmesse dall'elemento di collegamento

## 26-AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)

Evidenza di rotazioni permanenti o scorrimento - Lesioni.

26 - AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)

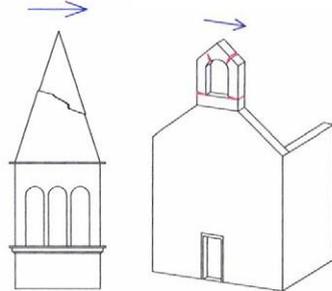


Fig. 77 - Aggetti (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di perni di collegamento con la muratura o elementi di ritegno

Elementi di limitata importanza e dimensione

Muratura monolitica (a conci squadrati o comunque di buona qualità)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Elementi di elevata snellezza

Appoggio in falso sulle murature sottostanti

Posizione asimmetrica rispetto all'elemento sottostante (specie se l'aggetto ha notevole massa)

## 27-TORRE CAMPANARIA

Lesioni vicino allo stacco dal corpo della chiesa - Lesioni a taglio scorrimento - Lesioni verticali o arcuate (espulsione di uno o più angoli).

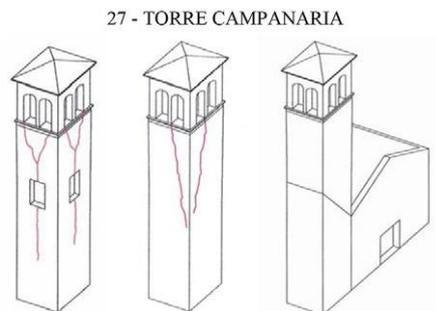


Fig. 78 - Torre campanaria (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità

Presenza di catene a diversi ordini

Presenza di adeguata distanza dalle pareti della chiesa (se adiacente)

Presenza di buon collegamento con le pareti della chiesa (se inglobata)

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di aperture significative su più livelli

Vincolo asimmetrico sulle murature alla base (torre inglobata)

Appoggio irregolare a terra della torre (presenza di archi su alcuni lati, pareti a sbalzo)

## 28-CELLA CAMPANARIA

Lesioni negli archi - Rotazioni o scorrimenti dei piedritti.

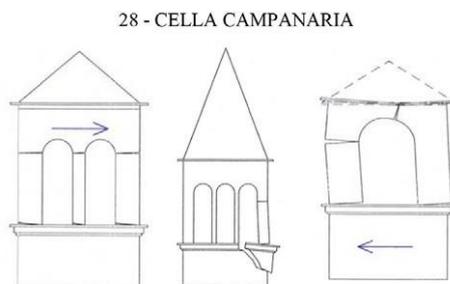


Fig. 79 - Cella campanaria (D.P.C., 2011)

### *Presidi antisismici*

Presenza di piedritti tozzi e/o archi di luce ridotta

Presenza di catene o cerchiature

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di copertura pesante o di altre masse significative

Presenza di copertura spingente”

Il comportamento sismico dell'intero edificio è rappresentato da un indice di vulnerabilità, variabile tra 0 e 1, definito come media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa:

$$i_v = \frac{1}{6} \frac{\sum_{k=1}^{28} \rho_k (v_{ki} - v_{kp})}{\sum_{k=1}^{28} \rho_k} + \frac{1}{2}$$

dove, per il  $k$ -esimo meccanismo:  $v_{ki}$  e  $v_{kp}$  sono, rispettivamente, il punteggio ottenuto dal rilievo degli indicatori di vulnerabilità e dei presidi antisismici, con riferimento alla tabella.  $\rho_k$  è il peso attribuito al meccanismo.

Attraverso l'esperienza dei terremoti passati, si è valutato il livello di danno subito da ogni macroelemento, in relazione ai possibili meccanismi di danno. Ciò permette di definire un indice

di danno, compreso tra 0 e 1, come medie normalizzata dei danno locali:

$$i_d = \frac{1 \sum_{k=1}^{28} \rho_k d_k}{5 \sum_{k=1}^{28} \rho_k}$$

dove,  $d_k$  è il livello di danno subito nei riguardi del k-esimo meccanismo (da 0 a 5).

Dall'analisi statistica dei danni subiti, sono state valutate le distribuzioni probabilistiche associate a diverse intensità sismiche, al variare dell'indice di vulnerabilità. Attraverso una relazione tra l'intensità e l'accelerazione di picco al suolo, è stato possibile definire una correlazione diretta tra l'input sismico e la vulnerabilità rilevata. È quindi possibile calcolare, per ogni chiesa, i valori dell'accelerazione al suolo, corrispondenti allo SLD o allo SLV:

Accanto alla valutazione dell'indice di sicurezza complessivo della costruzione, è opportuno segnalare la presenza di elementi o meccanismi ai quali è associata una vulnerabilità particolarmente alta. A partire dalla metodologia sopra indicata, si evidenziano i meccanismi la cui differenza tra il punteggio degli indicatori di vulnerabilità e di presidio ( $v_{ki} - v_{kp}$ ) risulti maggiore o uguale a 2.

## 9.5 - Rilievo dello stato di danno

Il rilievo dello stato di danno, propriamente detto, consiste in elaborati grafici e fotografici con relazione esplicativa (Direttive Tecniche, 1999). In particolare:

- Analisi nel dettaglio delle modalità con cui le varie parti

strutturali partecipano al comportamento di insieme dell'organismo, tenendo conto dello stato di degrado presente.

- Individuazione delle condizioni di collasso della struttura già realizzate o potenziali.
- Rilievo completo del quadro fessurativo ed individuazione dei meccanismi che lo hanno determinato.
- Descrizione dei beni di carattere storico-artistico fissi e mobili contenuti nell'edificio, ed individuazione dei danni subiti o potenziali.
- Rilievo fotografico di corredo.
- Descrizione del comportamento di insieme della struttura considerata nella sua configurazione originaria e nell'eventuale configurazione storica modificata.

Questa fase di lavoro è stata svolta in parte durante il rilievo geometrico dall'Architetto Caterina Poggioli, in parte dallo scrittore della presente tesi. Questo perchè il lavoro qui presentato è iniziato quando le operazioni di rilievo eseguite dall'Architetto, finalizzate ad un rilievo geometrico, erano già concluse. Inoltre era già in corso un procedimento per la richiesta di fondi pubblici per gli interventi necessari al recupero della chiesa. Al momento dell'avvio delle attività relative al lavoro qui illustrato, erano già presenti interventi di messa in sicurezza della chiesa con puntellamenti, cerchiature, ecc. ed un progetto di intervento presentato presso la Regione Emilia Romagna per la richiesta di fondi. Non è quindi stato possibile effettuare tutte le operazioni necessarie ad un completo rilievo dello stato di danno, ma, sempre nell'ottica della definizione di un metodo e non di

un'operazione di rilievo vera e propria, si sono raccolte sufficienti informazioni a compiere un lavoro esaustivo.

La prima fase del lavoro è stata quindi una ricerca di archivio per analizzare e comprendere lo sviluppo della costruzione, si veda cap. 3. Per quanto riguarda il rilievo delle lesioni, questo è stato effettuato all'interno del rilievo geometrico. Si è quindi aggiunto a questo alcune considerazioni riguardo la causa scatenante tali lesioni, identificando il meccanismo di danno responsabile, ed una breve descrizione. Successivamente, noti il quadro fessurativo e la storia evolutiva della costruzione, si è andati a riconoscere e scomporre la costruzione in macroelementi. Infine seguendo le indicazioni delle linee guida del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, si è calcolato l'indice di vulnerabilità sismica (LV1). Per le informazioni raccolte durante il rilievo dello stato di danno si faccia riferimento al cap. 10.4.

Si vuole inoltre far notare che al termine del rilievo dello stato di danno, ci si è resi conto che la quasi totalità delle lesioni è stata generata da cedimenti delle fondazioni, non da un sisma. Questo ha portato a definire prima altri meccanismi di danno di origine statica, per arrivare al calcolo di un ulteriore indice di vulnerabilità, analogo a quello introdotto dalle linee guida. Infine si vuole evidenziare che la causa diretta delle lesioni è un cedimento delle fondazioni, ma non è da escludere che tale cedimento si sia originato a seguito di un consolidamento o a movimenti del terreno causati dal sisma del Maggio 2012.

## **Capitolo 10-Inserimento del rilievo delle lesioni**

---

## 10.1 - Panoramica del capitolo

Nel presente capitolo si illustrerà il procedimento utilizzato per inserire le informazioni acquisite tramite il rilievo dello stato di danno all'interno del modello BIM. Si descriveranno poi nei dettagli le tecniche sfruttate per realizzare le famiglie delle lesioni e gli abachi riassuntivi del rilievo, analizzando anche il percorso affrontato per arrivare a tale risultato.

## 10.2 - Processo di creazione dei macroelementi

Prima di poter inserire nel modello tutte le informazioni rilevate riguardo lo stato di danno, è necessario creare gli elementi ai quali andranno associate queste informazioni. Come prima operazione si è quindi studiato un metodo per realizzare all'interno di Revit i macroelementi individuati.

All'interno di Revit non è presente nessun comando che permetta di creare immediatamente un elemento simile. Però se si pensa alla definizione di macroelemento, ovvero la parte edilizia nell'ambito della quale è osservabile e compiutamente descrivibile un comportamento unitario e riconoscibile nei meccanismi di insieme a seguito delle azioni sismiche (si veda il cap. 9), si può affermare che un macroelemento è un insieme di componenti dell'edificio. Il software mette a disposizione due strumenti per raggruppare diversi elementi in un unico oggetto: *Gruppo* e *Assieme*. Utilizzando questi comandi è quindi possibile raggiungere il risultato sperato; di seguito si analizzano le caratteristiche degli oggetti così creati che permettono di ottenere le funzionalità volute

dal modello.

La prima strada intrapresa è stata quella di creare un *gruppo* per ogni macroelemento identificato. Il processo di creazione è piuttosto semplice, si selezionano tutti gli elementi che si vuole facciano parte del gruppo e, tramite il relativo comando, lo si crea specificandone un nome. Si è scelto di nominarli come in tabella al cap. 9, ovvero “Id - Nome”. L’unica accortezza da avere è quella di verificare se alcuni elementi appartengono a più macroelementi, in quel caso è necessario dividerli tramite lo strumento *separa*. Nel caso in studio, ad esempio, il muro al di sopra del colonnato nord, era stato originariamente pensato e modellato come un unico elemento. Scomponendo poi l’edificio in macroelementi, ci si è resi conto che una parte appartiene al macroelemento “ME06 - Parete alta nord” e una al macroelemento “ME05 - Parete laterale presbiterio nord”. Realizzando in questo modo i macroelementi è possibile isolarli, singolarmente o a gruppi, nella vista per permettere un’analisi dello stato di danno più attenta.

Tra le funzionalità richieste all’oggetto macroelemento all’interno del modello BIM vi sono la generazione di tabelle riassuntive dei macroelementi presenti, e la possibilità di associare alcuni parametri, uno su tutti l’eventuale rotazione rigida subita a seguito del sisma. Entrambe queste funzionalità, gestendo i macroelementi come gruppi, sono però negate dalle possibilità del software.

Si è allora esplorata la tecnica dell’*assieme*. Il processo per la sua realizzazione è lo stesso dei gruppi, con alcune eccezioni. Possono infatti fare parte di un assieme solo elementi di costruzione, quindi non elementi di dettaglio o annotazione, e tutti gli elementi appartenenti all’assieme devono avere la stessa fase di creazione

e demolizione.

Si vuole ora fare una precisazione. Nonostante la creazione dei macroelementi e delle lesioni vengano descritte nella presente tesi come operazione consecutive, nella realtà operativa si è trattato di un procedimento sperimentale iterativo. Si saggiava una tecnica e, nel caso non avesse prodotto i risultati attesi, si ripeteva il processo provando un altro metodo. Quindi inizialmente si sono creati in contemporanea i gruppi relativi ai macroelementi e alle lesioni. Si sono anche realizzate, sfruttando le *fasi*, diverse versioni della stessa vista. Ad esempio “Prospetto nord - Stato lesionato” e “Prospetto nord - Stato recuperato”, in modo da mostrare sia il quadro fessurativo che la geometria della chiesa precedentemente al sisma, o a intervento di messa in sicurezza e recupero avvenuto. Per realizzare questa doppia visualizzazione è stata impostata la stessa fase di creazione a tutti gli elementi, ossia lo “Stato lesionato”, e soltanto alle lesioni è stata assegnata la fase di demolizione “Stato recuperato”. Come detto in precedenza però, questa distinzione di fase non è compatibile con lo strumento dell’*assieme*. Per cui si è dovuta effettuare la scelta se privilegiare la visualizzazione o se privilegiare l’analisi dello stato di danno. Dato lo scopo della presente tesi, e grazie al fatto che vi sono altri metodi per la realizzazione di queste viste, si è ovviamente scelto il secondo. Avendo fatto questa scelta, le viste ora disponibili sono tutte riferite allo stato lesionato. Per generare le viste necessarie alla descrizione della chiesa anche nello stato recuperato, si è proceduto duplicando le viste volute. In seguito, una vista alla volta, si sono selezionate le lesioni visibili e nascoste tramite il comando *Nascondi istanza nella vista*. Certo è un procedimento più laborioso e non sempre utilizzabile, ad esempio non può essere

utilizzato per il tamponamento di una finestra in quanto rimarrebbe l'apertura nel muro, ma per il caso specifico ha permesso di raggiungere lo scopo prefissato.

Eliminati i gruppi, tramite lo strumento *Scomponi gruppo*, e si è potuto realizzare gli assiemi con lo stesso sistema di nomenclatura.



Fig. 80 - Assonometria della chiesa a colori falsati per l'evidenziazione dei macroelementi

A questo punto si è scelto di implementare un codice colore per realizzare una vista assonometrica tridimensionale in cui a colpo d'occhio fossero riconoscibili i macroelementi (Fig. 80), e che, tramite effetti di trasparenza, evidenziasse le lesioni per agevolarne l'analisi. Per poter raggiungere questo obiettivo si è pensato di approfittare del comando *Stili di visualizzazione*. Per ogni vista, infatti, è possibile scegliere una modalità di visualizzazione tra: *Wireframe*, *Linea nascosta*, *Ombreggiato*, *Colori omogenei*, *Realistico*, *Raytrace*. Dato che ad ogni elemento è associato un materiale, si è immaginato di utilizzare lo *stile di visualizzazione: colori omogenei* per realizzare questo genere di vista. Ogni materiale possiede due diverse possibilità di essere visualizzato. La prima è quella realistica, con texture, mappe per

trasparenza, riflettanza, rilievo, ritagli; la seconda è una stilizzata in cui, nell'utilizzo tradizionale, viene impostato un colore che riproduca la tessitura reale ed eventualmente una trasparenza complessiva per riprodurre i materiali come il vetro. Sfruttando questa caratteristica si sono realizzate tante copie di ogni materiale quanti sono i macroelementi, rinominandoli in modo univoco, "MEid\_NomeMateriale". Nel colore di grafica si è assegnata la tinta definita dal codice colore dei macroelementi, nonché un livello di trasparenza. A questo punto per tutti gli oggetti di ogni macroelemento si è sostituito il materiale originale con quello così creato. È quindi possibile generare viste di "disegno" in linea nascosta, comparabili a quelle realizzabili con un tradizionale tecnigrafo; viste di "analisi" a colori falsati che rappresentano il codice colore adottato, per mezzo dello *stile di visualizzazione ombreggiato*; viste "realistiche", in cui si visualizza il materiale con la sua tessitura. Se fosse necessario è anche possibile generare viste renderizzate fotorealistiche all'interno di Revit, o esportando il modello in software dedicati come Autodesk 3DS Max.

Si è infine proceduto alla realizzazione degli abachi riassuntivi e dell'inserimento dei parametri necessari.



Fig. 81 - Macroelementi isolati come ausilio all'analisi delle lesioni

### 10.3 - Inserimento delle lesioni

Come per i macroelementi, Revit non ha a disposizione uno strumento diretto per la modellazione delle lesioni. Si è quindi realizzato un nuovo file di modello di prova contenente alcuni elementi base, tra cui muri, porte e lesene, in cui effettuare dei tentativi per trovare la tecnica migliore. Le ipotesi valutate tra gli strumenti disponibili nel software sono state: *decalcomania*, *modifica del profilo del muro*, *divisione della superficie*, *famiglia* realizzata ad hoc. La caratteristica che il metodo deve presentare è la possibilità di aggiungere parametri all'elemento in modo da inserire le informazioni rilevate.

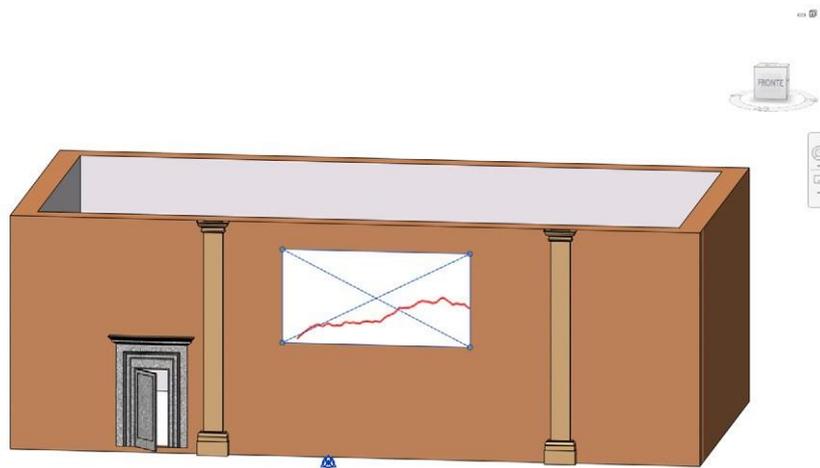


Fig. 82 - Lesione realizzata utilizzando lo strumento decalcomania

L'utilizzo delle *decalcomanie* (Fig. 82) è di certo quello più rapido. Consiste nel realizzare un'immagine della lesione che viene importata nel modello e posizionata a piacere. È anche possibile utilizzare un'immagine di ritaglio, nel caso particolare la stessa convertita in bianco e nero, per rendere trasparente lo sfondo. Questa tecnica permette, sebbene in maniera abbastanza laboriosa, di realizzare lesioni che si estendono su più piani, come nel caso

di una lesione che interessa una parasta. È sufficiente inserire la decalcomania della stessa immagine su ogni piano e manualmente allinearle correttamente. Grande difetto di questo metodo è il fatto di non poter aggiungere parametro all'oggetto decalcomania. Di conseguenza è negata la possibilità di inserire le informazioni nel modello BIM.

Il secondo procedimento analizzato è quello della *modifica del profilo del muro* (Fig. 83). Questo strumento, già utilizzato per la realizzazione degli archi trionfali, permette di modificare, in prospettiva, il profilo inizialmente rettangolare del muro che viene estruso per il suo spessore. Già dalla descrizione del comando si capisce che è un'operazione che interessa il muro soltanto, quindi nel caso di lesene non sarebbe applicabile. Inoltre andando a modificare il profilo di estrusione, si crea un vuoto per tutto lo spessore del muro, che nel caso di lesene non passanti sarebbe errato. Questa particolare problematica sarebbe risolvibile "sdoppiando" il muro in due muri di spessore dimezzato, ma risulta una pratica molto complessa da gestire. Infine si tratta di un'operazione che agisce sul muro e non genera un elemento "lesione", quindi anche in questo caso non è possibile assegnare parametri all'elemento.



Fig. 83 - Lesione realizzata tramite la modifica del profilo del muro

Un'altra tecnica possibile è quella della *divisione della superficie* (Fig. 84). In linea teorica sarebbe applicabile anche nel caso di lesioni che interessino paraste, in quanto è applicabile a qualsiasi superficie. Tuttavia si tratta di un metodo piuttosto complicato dovendo proiettare e disegnare la lesione su ogni piano. Nonostante la sua teorica applicabilità, di nuovo, si tratta di un metodo che non genera un oggetto "lesione", ma opera solo un cambio di materiale alla superficie. Anche questa ipotesi è quindi da escludere per l'impossibilità di creare i parametri necessari all'inserimento delle informazioni rilevate.



Fig. 84 - Lesione realizzata utilizzando lo strumento dividi superficie

Un'ulteriore lacuna delle tecniche fin'ora studiate, è che sono state tutte applicate al modello di prova con muri rettilinei. Nel caso delle lesioni sulle pareti curve dell'abside, o sulle volte, tutte queste tecniche, che si sono rivelate efficaci nel solo aspetto geometrico, sarebbero totalmente inapplicabili.

Si quindi scelto di realizzare una famiglia apposita per l'inserimento delle lesioni. Con questo metodo non si hanno problemi né di modellazione né per quanto riguarda l'aggiunta

di parametri. Unico aspetto negativo, è la necessità di modellare ogni singola lesione, processo che richiede tempo. Tuttavia non è molto differente dall'attuale processo in cui ogni lesione viene disegnata bidimensionalmente nel file CAD. Per la creazione di questa famiglia si è scelto di utilizzare la categoria *Modello generico*. Inoltre si è deciso di effettuare una semplificazione: il comportamento di un macroelemento, ad esempio la facciata principale, è approssimativamente lo stesso che si considerino o meno le lesioni ed altri decori. Per cui, nonostante il metodo lo permetta, si è scelto di modellare le lesioni soltanto nel muro, o nell'elemento interessato che sia volta o pavimento, e non anche relative agli elementi secondari presenti. In questo modo si è semplificata notevolmente la modellazione, rendendo il processo più speditivo e più semplice da gestire per il computer. È tuttavia necessario effettuare una distinzione delle famiglie in base "all'host" della lesione, ovvero in base a quale elemento dell'edificio è danneggiato. Si sono realizzate differenti famiglie per le lesioni su muri rettilinei, su pavimento, e tutti gli altri casi.

Le lesioni che interessano tratti di muro rettilineo, ovvero la maggior parte dei casi, sono state realizzate utilizzando la famiglia *Modello generico basato su muro* (Fig. 85). In questo modo, l'inserimento della lesione nel progetto, è possibile soltanto all'interno di un muro, e, soprattutto, è in grado di conoscerne le caratteristiche. Nuovamente ci si è trovati davanti al problema di come realizzare la famiglia. Concettualmente sarebbe corretto creare una famiglia lesione e quindi i differenti tipi, uno per ogni lesione rilevata, con i relativi andamenti. Inoltre, sempre in linea teorica, una lesione non è altro che un'apertura nell'oggetto

danneggiato. Si è quindi pensato di realizzare un *solido di sottrazione* che bucase l'host, per poi riempire il vuoto con un solido geometricamente identico che evidenziasse la lesione all'interno del modello sfruttando la colorazione del materiale. Ci si è però presto resi conto che questa piena corrispondenza concettuale non è possibile. Infatti dal momento che si inserisce un solido di sottrazione, e questo taglia il muro, anche cambiando tipo, il foro rimane. Per cui creando i differenti tipi per le lesioni, si otterrebbe un muro con tanti fori quanti tipi. Si è allora pensato di eliminare il solido di sottrazione e realizzare le lesioni soltanto tramite un estrusione. Inoltre si è fatto sporgere il solido così creato di un paio di millimetri, sporgenza invisibile alle scale a cui si sta lavorando, per evitare artifici dovuti alla complanarità delle superfici del muro e della lesione. La soluzione tecnica per la modellazione risulta efficace, ma ancora si presentano problemi riguardo la concezione funzionale della famiglia. Infatti andando ad inserire il parametro di lunghezza della lesione, si veda il cap. 10.4 per la definizione di tutti i parametri presenti nella famiglia, si è notato che si manifestava un'ulteriore problematica. Nel verificare il corretto funzionamento della famiglia, quello che P. Aubin chiama "flexing" (Aubin, 2009), ci si è resi conto che cambiando il tipo, i solidi modellati per rappresentare la lesione si distorcevano seguendo i piani di riferimenti necessari al calcolo della lunghezza della lesione. Per motivi non chiari, Revit instaura dei vincoli tra i solidi presenti ed i piani che non si è riusciti ad eliminare. Quindi per risolvere questa nuova situazione si è scelto di realizzare una famiglia per ogni lesione, in tal modo tutto funziona a dovere.

Per quanto riguarda la pura modellazione dei solidi per la

rappresentazione delle lesioni, è necessario fare una distinzione tra lesioni passanti e quelle non passanti. Nel primo caso, importati i file dwg contenenti l'andamento della lesione, sui rispettivi lati del muro, si è costruito un solido tramite lo strumento *Unione*, il quale genera un volume, appunto, unendo due superfici, e vincolandolo alle estremità interna ed esterna della parete. Per le lesioni non passanti, invece, si è utilizzato lo strumento *Estrusione*, vincolando il solido al lato, interno o esterno, corretto e alla mezzeria del muro; ipotizzando che questa sia l'estensione della lesione. Infine si sono inseriti tutti i parametri necessari a documentare le informazioni raccolte attraverso il rilievo.

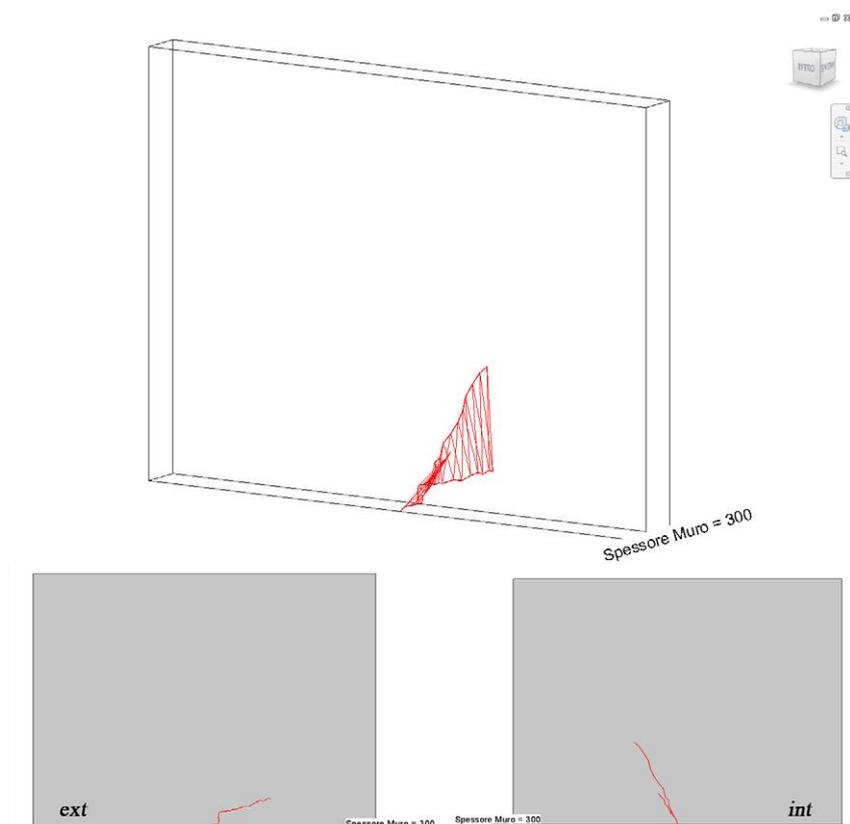


Fig. 85 - Famiglia di una lesione su muro, con andamento differente tra interno ed esterno del muro

Risolto il problema concettuale di progettazione della famiglia, le lesioni sul pavimento sono state realizzate analogamente, a

partire da una famiglia di categoria *Modello generico basato su pavimento*, senza incontrare ulteriori difficoltà.

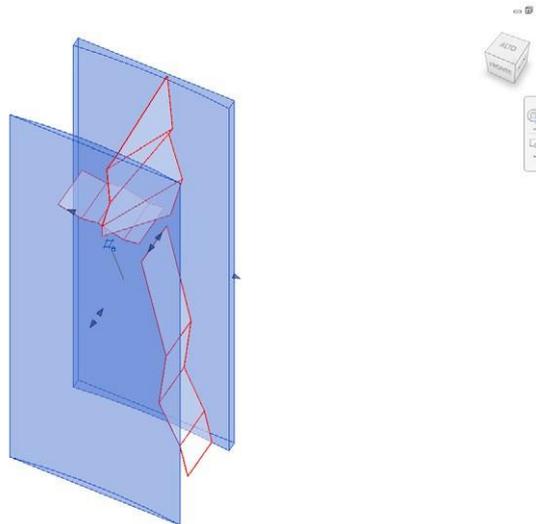


Fig. 86 - Famiglia di una lesione su superficie curva, in blu sono evidenziati i solidi di sottrazione

Differente è stata invece la realizzazione delle lesione su pareti curve (Fig. 86), come nel caso dell'abside. Se si fosse utilizzata la famiglia realizzata basata su muro, avrebbe certo funzionato, ma il solido della lesione non si sarebbe adattato all'andamento del muro e sarebbe, invece, fuoriuscito dal volume. Si è quindi scelto di realizzare una terza famiglia per le lesioni presenti sulle superfici curve, quindi sia l'abside sia le volte. In questo caso si è utilizzato la famiglia *Modello generico*, con lo stesso scheletro di piani di riferimento delle famiglie precedenti. Per adattare l'andamento della lesione a quello della superficie curva, si è utilizzato un escamotage simile a quello utilizzato per allineare i cassettoni delle volte con i decori degli archi trionfali. Si è infatti esportata la pianta, la sezione nel caso delle volte, dell'abside in formato dwg. Dopo aver adeguatamente pulito il file, è stata importata nella famiglia. Utilizzando la traccia del

muro si è modellato un solido di sottrazione che eliminasse le parti in eccesso della lesione. Infine si sono inseriti i parametri necessari come nei casi precedenti. La famiglia così creata risulta lievemente più difficoltosa nel suo posizionamento all'interno del progetto, ma si rivela pienamente funzionante sia a livello delle informazioni inserite che a livello di visualizzazione grafica.

Inoltre in tutte e tre le tipologie di famiglie realizzate, sono stati introdotti i comandi di *Controlla*, che permettono di invertire orizzontalmente o verticalmente la famiglia, per agevolarne il posizionamento nel modello.

Infine si è scelto di generare le stesse viste di pianta, prospetto e sezione realizzate al cap. 8, con le famiglie delle lesioni inserite, si veda l'allegato B.

## **10.4 - Creazione degli abachi**

Realizzati tutti gli elementi necessari ad una corretta analisi dello stato di danno, completi dei parametri necessari ad includere nel modello BIM le informazioni rilevate, si è passati alla formazione di viste di *Abaco* riassuntive. Gli abachi, considerati all'interno di Revit come viste vere e proprie, non sono altro che tabelle contenenti i parametri associati alla categoria di famiglia selezionata. Ulteriore caratteristica degli abachi è che permettono di effettuare dei calcoli al loro interno. Proprio questa funzionalità è stata sfruttata per calcolare l'indice di vulnerabilità sismica. Altra caratteristica interessante è quella di poter nascondere alcuni parametri all'interno dell'abaco. Questa funzionalità si rivela utile per effettuare calcoli complessi senza appesantire eccessivamente

la lettura della tabella.

### **Abaco delle lesioni**

Inizialmente si è realizzato l'abaco delle lesioni (Fig. 87, pag. 203). I parametri visualizzati sono:

- **Identificativo (Id).** Parametro di *testo*. Contiene il codice identificativo assegnato alla lesione, del tipo “LXX”.
- **Descrizione.** Parametro di *testo multilinea*. Contiene una breve descrizione della lesione.
- **Origine.** Parametro di *testo*. Contiene la causa scatenante il meccanismo di danno che ha generato la lesione. Può essere “sismica” o “cedimento”.
- **Lunghezza della lesione.** Parametro di *Lunghezza*. Contiene la lunghezza della lesione, è un parametro calcolato. Anche in questo caso si sono analizzati due diversi modi per calcolare il parametro, entrambi approssimati. Il primo sfrutta i piani di riferimento presenti all'interno della famiglia. Nella sua costruzione sono stati inseriti due piani, uno orizzontale e uno verticale, posizionati in modo tale da formare con i piani che definiscono l'origine della famiglia un rettangolo circoscritto alla lesione. In questo modo si conoscono altezza e larghezza di tale rettangolo di “massima occupazione”; tramite il teorema di Pitagora si calcola la diagonale che viene assunta come lunghezza della lesione. Il secondo metodo ipotizzato prevede il calcolo della lunghezza a partire dal volume del solido della lesione. Essendo noto lo spessore del muro su cui si è creata la lesione, si conosce quindi l'area della superficie della lesione. Approssimandola ad un rettangolo

e dividendo tale area per l'apertura della lesione si ottiene un valore approssimato della sua lunghezza. Tra i due metodi, si è scelto di utilizzare il primo, in quanto introduce meno possibilità di errore. Infatti nel secondo caso, ipotizzando la superficie della lesione rettangolare, dato che la sua apertura è di qualche millimetro, la lunghezza risulta molto elevata. Nel primo procedimento, i valori anche se approssimativi, sono verosimili, nel secondo si sono osservati valori anche decuplicati rispetto al primo caso.

- **Angolo sull'orizzontale.** Parametro di *Angolo*. Contiene l'inclinazione della lesione sull'orizzontale, è un parametro calcolato. Come nel caso precedente si sono sfruttati i piani di lavoro presenti nella famiglia. L'inclinazione assunta è quella della diagonale del rettangolo di "massimo ingombro", calcolata tramite semplici formule trigonometriche.
- **Apertura della lesione.** Parametro di *Lunghezza*. Contiene la misura dell'apertura della lesione.
- **Foto.** Parametro di *Immagine*. Contiene il riferimento alla fotografia della lesione effettuata durante il rilievo.
- **Ftp.** Parametro di *URL*. Contiene l'indirizzo remoto di un server ftp in cui sono inserite tutte le informazioni relative al progetto. L'indirizzo inserito è quello relativo alla directory lesione in questione.
- **Macroelemento.** Parametro di *Testo*. Contiene il codice identificativo del macroelemento interessato dal meccanismo di danno che ha generato la lesione. Non è detto che corrisponda al macroelemento su cui

si trova effettivamente la lesione. Ad esempio è il caso del ribaltamento della facciata; questo interessa il macroelemento facciata, ma le lesioni si avranno sulle pareti ad essa ortogonali.

- Volume di scuci-cuci. Parametro di *Volume*. Contiene il volume, indicativo, di muratura oggetto d'intervento per il risanamento della lesione, è un parametro calcolato. E' ottenuto dalla moltiplicazione della lunghezza della lesione, dello spessore del muro, e di un parametro funzione dell'inclinazione della lesione.
- Costo intervento. Parametro di *Prezzo*. Contiene il costo, indicativo, dell'intervento di scuci-cuci. Calcolato moltiplicando il volume di scuci-cuci per il costo unitario della lavorazione. Questo valore è stato reperito dall'elenco prezzi dell'Emilia-Romagna, voce B02007a (Emilia-Romagna).

<Abaco Lesioni>												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Id	Macroelemento	Descrizione Lesione	Origine	LunghezzaLesione	Inclinazione	Spessore	Spessore Muro	Foto	Intervento	ftp	Volume Scuci-Cuci	Costo Intervento
L1	ME02		Cedimento fondale	1.27 m	53°	3 mm	35 cm	L1ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L1/	0.27 m³	139.33
L2	ME02		Cedimento fondale	0.79 m	44°	2 mm	37 cm	L2ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L2/	0.18 m³	92.09
L3	ME02		Cedimento fondale	0.62 m	57°	2 mm	37 cm	<Nessuno>	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L3/	0.14 m³	72.24
L4	ME02		Cedimento fondale	0.34 m	28°	3 mm	37 cm	L4int.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L4/	0.08 m³	40.05
L5	ME02		Cedimento fondale	1.52 m	55°	1 mm	30 cm	L5int.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L5/	0.27 m³	143.46
L6	ME02		Cedimento fondale	1.41 m	56°	1 mm	37 cm	L6ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L6/	0.31 m³	163.66
L7	ME02		Cedimento fondale	1.04 m	31°	4 mm	30 cm	L7ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L7/	0.06 m³	32.72
L8a	ME02		Cedimento fondale	1.05 m	71°	3 mm	35 cm	L8a_ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L8a/	0.08 m³	39.70
L8b	ME02		Cedimento fondale	1.72 m	11°	2 mm	35 cm	L8b_ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L8b/	0.21 m³	110.35
L9	ME02		Cedimento fondale	0.98 m	11°	2 mm	30 cm	L9ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L9/	0.10 m³	53.71
L10	ME02		Cedimento fondale	2.63 m	15°	3 mm	35 cm	L10ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L10/	0.32 m³	168.42
L11	ME02		Cedimento fondale	0.74 m	37°	3 mm	37 cm	L11ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L11/	0.16 m³	86.27
L14	ME02		Cedimento fondale	0.81 m	16°	2 mm	35 cm	L14ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L14/	0.10 m³	52.17
L15	ME02		Cedimento fondale	0.30 m	74°	4 mm	35 cm	<Nessuno>	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L15/	0.06 m³	33.24
L16	ME02		Cedimento fondale	2.11 m	17°	1 mm	35 cm	L16ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L16/	0.26 m³	135.19
L17	ME02		Cedimento fondale	1.27 m	53°	1 mm	35 cm	L17ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L17/	0.27 m³	139.33
L18	ME02		Cedimento fondale	1.73 m	26°	3 mm	35 cm	L18ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L18/	0.36 m³	189.86
L19	ME02		Cedimento fondale	0.89 m	19°	3 mm	35 cm	L19ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L19/	0.08 m³	44.13
L20	ME02		Cedimento fondale	1.01 m	56°	3 mm	35 cm	L20ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L20/	0.21 m³	111.49
L21	ME02		Cedimento fondale	1.17 m	49°	2 mm	35 cm	L21ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L21/	0.25 m³	129.02
L22	ME02		Cedimento fondale	3.22 m	35°	2 mm	35 cm	L22ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L22/	0.68 m³	353.89
L23	ME02		Cedimento fondale	1.36 m	77°	1 mm	35 cm	L23ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L23/	0.29 m³	149.95
L24	ME02		Cedimento fondale	0.75 m	53°	2 mm	35 cm	L24ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L24/	0.16 m³	82.16
L25	ME02		Cedimento fondale	0.42 m	55°	3 mm	35 cm	L25int.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L25/	0.09 m³	45.77
L26	ME02		Cedimento fondale	1.27 m	53°	3 mm	35 cm	<Nessuno>	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L26/	0.27 m³	139.33
L27	ME02		Cedimento fondale	0.57 m	69°	4 mm	37 cm	L27ext.jpg	Scuci-cuci	ftp://79.62.79.33/Lesioni/L27/	0.13 m³	65.86
												2813.40

Fig. 87 - Estratto dell'abaco delle lesioni relativo al macroelemento ME02 facciata principale

### Abaco dei macroelementi

Il secondo abaco realizzato è quello riassuntivo dei macroelementi (Fig. 88, pag. 204). I parametri visualizzati sono:

- Identificativo (Id). Parametro di *Testo*. Contiene il codice identificativo assegnato al macroelemento, del tipo “MEXX”.
- Nome. Parametro di *Testo*. Contiene il nome del macroelemento.
- Angolo di rotazione rigida. Parametro di *Angolo*. Contiene il valore dell’angolo di inclinazione rispetto la verticale subita dal macroelemento in seguito al sisma.
- Meccanismo attivato. Parametro di *Tipo di famiglia*. Contiene quale meccanismo di danno si è attivato nel macroelemento. Sono stati realizzati tre campi di questo tipo, in quanto, come indicato nelle linee guida, uno stesso macroelemento può essere interessato al più da tre meccanismi di danno. La compilazione di questo campo avviene tramite la scelta del meccanismo da un menù a tendina. Si è effettuata questa scelta in modo da limitare l’identificazione dei meccanismi a quelli individuati dalla normativa e quelli in seguito introdotti. Tramite l’utilizzo di un campo di testo, si sarebbe lasciata troppa discrezionalità al progettista, col risultato di una disomogeneità dei rilievi.

<Abaco Macroelementi>					
A	B	C	D	E	F
Id	Nome	Angolo di rotazione rigida	Meccanismo attivato 1	Meccanismo attivato 2	Meccanismo attivato 3
ME01	Protiro	0°	Meccanismi di danno: 31 - Cedimento protiro	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME02	Facciata Principale	0°	Meccanismi di danno: 29 - Cedimento facciata	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME03	Portico Destra	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME04	Parete Laterale Bassa Nord	0°	Meccanismi di danno: 30 - Cedimento parete later	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME05	Parete Laterale Nord 2	0°	Meccanismi di danno: 30 - Cedimento parete later	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME06	Parete Laterale Alta Nord	0°	Meccanismi di danno: 30 - Cedimento parete later	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME07	Parete Laterale Bassa Sud	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME08	Parete Laterale Alta Sud	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME09	Centrale/Organo	0°	Meccanismi di danno: 30 - Cedimento parete later	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME10	Abside	0°	Meccanismi di danno: 35 - Cedimento abside	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME11	Campanile	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME12	Colonnato Interno Nord	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME13	Colonnato Interno Sud	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME14	Arco Trionfale 1	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME15	Arco Trionfale 2	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME16	Parete Laterale Sud 3	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME17	Volta Navata Principale	0°	Meccanismi di danno: 33 - Volte navata centrale	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME18	Copertura	0°	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME19	Pavimento	0°	Meccanismi di danno: 40 - Pavimento Navata cent	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME20	Volta Navata Laterale Nord	0°	Meccanismi di danno: 34 - Volte navata laterale	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno
ME21	Volta Navata Laterale Sud	0°	Meccanismi di danno: 34 - Volte navata laterale	Meccanismi di danno: Nessuno	Meccanismi di danno: Nessuno

Fig. 88 - Abaco dei macroelementi

### **Abachi per il calcolo dell'indice di vulnerabilità sismica**

Infine si sono realizzati gli abachi per il calcolo della vulnerabilità sismica. Si è preferito generare due abachi differenti data la complessità delle operazioni necessarie al calcolo dell'indice, operazione non direttamente permessa dal software. Si hanno quindi un primo abaco dei meccanismi di danno (Fig. 89, pag. 206), nel quale vengono inseriti i valori dei parametri richiesti, ed un secondo, nel quale vengono effettuate le operazioni di calcolo, in cui si visualizza l'indice di vulnerabilità sismica. Per quanto riguarda il primo, i parametri visualizzati sono:

- **Identificativo (Id).** Parametro di tipo *Numero*. Contiene il codice identificativo del meccanismo, così come indicato nelle linee guida.
- **Descrizione del meccanismo.** Parametro di tipo *Testo*. Contiene la denominazione del meccanismo di danno, così come indicato nelle linee guida.
- **Immagine del meccanismo.** Parametro di tipo *Immagine*. Contiene il riferimento all'immagine schematica del meccanismo di danno, così come è raffigurata sulle linee guida.
- **Tipo di meccanismo.** Parametro di tipo *Testo*. Contiene la descrizione dell'origine del meccanismo di danno, ovvero "sismico" o "cedimento".
- **Peso specifico del meccanismo.** Parametro di tipo *Numero*. Contiene il valore del parametro  $\rho$  definito nelle linee guida, si veda il cap. 9.4.
- **Punteggio di vulnerabilità.** Parametro di tipo *Numero*. Contiene il valore attribuito al parametro  $v_{ki}$  come indicato nelle linee guida, si veda il cap. 9.4.

- Punteggio di presidio. Parametro di tipo *Numero*. Contiene il valore attribuito al parametro  $v_{kp}$  come indicato nelle linee guida, si veda il cap. 9.4.

<Abaco Meccanismi di danno sismici>						
A	B	C	D	E	F	G
Id Meccanismo	Descrizione Meccanismo	Immagine Meccanismo	Tipo meccanismo	Peso specifico meccanismo	Punteggio vulnerabilità	Punteggio presidi
1	Ribaltamento della Facciata	mecc-1.jpg	Sismico	1	0	1
2	Meccanismi nella sommità della facciata	mecc-2.jpg	Sismico	1	1	0
3	Meccanismi nel piano della facciata	mecc-3.jpg	Sismico	1	2	1
4	Protiro - Narthex	mecc-4.jpg	Sismico	0.5	0	1
5	Risposta trasversale dell'aula	mecc-5.jpg	Sismico	1	1	3
6	Meccanismi di taglio nelle pareti laterali (risposta longitudinale)	mecc-6.jpg	Sismico	1	0	1
7	Risposta longitudinale del colonnato	mecc-7.jpg	Sismico	1	0	0
8	Volte della navata centrale	mecc-8.jpg	Sismico	1	2	0
9	Volte delle navate laterali	mecc-9.jpg	Sismico	1	1	0
10	Ribaltamento delle pareti di estremità del transetto	mecc-10.jpg	Sismico	0	0	0
11	Meccanismo di taglio nelle pareti del transetto	mecc-11.jpg	Sismico	0	0	0
12	Volte del transetto	mecc-12.jpg	Sismico	0	0	0
13	Archi triforci	mecc-13.jpg	Sismico	1	0	0
14	Cupola - Tamburo/Tiburio	mecc-14.jpg	Sismico	0	0	0
15	Lanterna	mecc-15.jpg	Sismico	0	0	0
16	Ribaltamento dell'abside	mecc-16.jpg	Sismico	1	2	0
17	Meccanismi di taglio nel presbitero o nell'abside	mecc-17.jpg	Sismico	1	0	1
18	Volte del presbitero o dell'abside	mecc-18.jpg	Sismico	1	1	0
19	Elementi di copertura: Aula	mecc-19.jpg	Sismico	1	0	0
20	Elementi di copertura: Transetto	mecc-20.jpg	Sismico	0	0	0
21	Elementi di copertura: Abside	mecc-21.jpg	Sismico	1	1	0
22	Ribaltamento delle cappelle	mecc-22.jpg	Sismico	0	0	0
23	Meccanismi di taglio nelle cappelle	mecc-23.jpg	Sismico	0	0	0
24	Volte delle cappelle	mecc-24.jpg	Sismico	0	0	0
25	Interazioni in prossimità di irregolarità piano-altimetriche	mecc-25.jpg	Sismico	0.5	1	0
26	Aggetti (Vela, Guglie, Pinnacoli, Statue)	mecc-26.jpg	Sismico	0.5	0	1
27	Torre campanaria	mecc-27.jpg	Sismico	1	0	1
28	Cella campanaria	mecc-28.jpg	Sismico	1	0	0

Fig. 89 - Abaco dei meccanismi di danno di tipo sismico

Per ultimo si è realizzato l'abaco deputato al calcolo dell'indice di vulnerabilità sismica (Fig. 90, pag. 209), tramite duplicazione dell'abaco precedente. Al suo interno sono presenti numerosi parametri, molti più di quelli strettamente necessari al calcolo, utilizzati per orientarsi più facilmente nella "programmazione" della tabella. Tutti i parametri utili solo ai fini del calcolo sono poi stati nascosti per mezzo del comando *Campo nascosto*. I parametri utilizzati sono i seguenti:

- Identificativo (Id). Parametro di tipo *Numero*. Contiene il codice identificativo del meccanismo, così come indicato nelle linee guida. Visibile.
- Descrizione del meccanismo. Parametro di tipo *Testo*. Contiene la denominazione del meccanismo di danno, così

come indicato nelle linee guida. Visibile.

- Peso specifico del meccanismo. Parametro di tipo *Numero*. Contiene il valore del parametro  $\rho$  definito nelle linee guida. Nascosto.
- Punteggio di vulnerabilità. Parametro di tipo *Numero*. Contiene il valore attribuito al parametro  $v_{ki}$  come indicato nelle linee guida. Nascosto.
- Punteggio di presidio. Parametro di tipo *Numero*. Contiene il valore attribuito al parametro  $v_{kp}$  come indicato nelle linee guida. Nascosto.
- Delta punteggi. Parametro di tipo *Numero*. Calcola la differenza tra i due punteggi:  $v_{ki} - v_{kp}$ . Nascosto.
- Numeratore i-esimo. Parametro di tipo *Numero*. Calcola il numeratore del meccanismo di danno i-esimo:  $\rho_k(v_{ki} - v_{kp})$ . Nascosto.
- 6Peso. Parametro di tipo *Numero*. Calcola il denominatore del meccanismo di danno i-esimo:  $6\rho_k$ . Nascosto.
- Num Perc. Parametro di tipo *Valore calcolato: Percentuale*. Calcola il rapporto, espresso in percentuale, tra il numeratore i-esimo e la loro sommatoria. Nascosto. Questo parametro, come il successivo “Peso Perc”, è l’escamotage utilizzato per aggirare uno dei limiti degli abachi. Questi, infatti, al contrario di un foglio di Excel, non permettono di effettuare operazioni in tutta la tabella. E’ possibile effettuare calcoli soltanto all’interno di una stessa riga, ovvero tra parametri relativi allo stesso oggetto. L’unica operazione “trasversale”, ossia tra parametri di oggetti diversi, è un’operazione di sommatoria dei parametri di una colonna della tabella. Il risultato di questa operazione

però è soltanto visualizzato e non è possibile utilizzarlo per ulteriori calcoli. Si è quindi pensato all'utilizzo di questo genere di parametro: è infatti l'unico caso in cui la sommatoria degli elementi è inclusa in un'operazione matematica.

- **Peso Perc.** Parametro di tipo *Valore calcolato: Percentuale*. Calcola il rapporto, espresso in percentuale, tra il denominatore *i*-esimo e la loro sommatoria. Nascosto.
- **Tot Num.** Parametro di tipo *Numero*. Calcola il rapporto tra il numeratore *i*-esimo ed il parametro percentuale "Num Perc", ovvero restituisce la sommatoria dei numeratori. Nascosto. L'escamotage adottato si conclude calcolando nuovamente il rapporto tra il numeratore e il suo "peso percentuale" ottenendo così la sommatoria degli elementi. In questo modo la sommatoria non è più un valore visualizzato passivo, ma entra all'interno dei campi dell'abaco, rendendo possibile il suo utilizzo in ulteriori calcoli.
- **Tot. Peso.** Parametro di tipo *Numero*. Calcola il rapporto tra il denominatore *i*-esimo ed il parametro percentuale "Peso Perc", ovvero restituisce la sommatoria dei denominatori. Nascosto. Analogo al precedente.
- **Indice.** Parametro di tipo *Numero*. Calcola il rapporto tra le due sommatorie e, a questo, somma  $1/2$ ; in questo modo si ottiene il valore dell'indice cercato. Visibile.

Il procedimento adottato presenta però due difetti. Il primo, meno grave, è che il valore dell'indice di vulnerabilità è inserito nell'abaco come un parametro del singolo meccanismo di danno, e così viene visualizzato, quando invece è un valore riferito all'intero



edificio. Ciò comporta la ripetizione, in ogni riga, del valore dell'indice. Questo difetto ha come “effetto collaterale” il fatto di non mostrare l'indice nelle righe dei meccanismi non attivati. Questa peculiarità si rivela utile per capire a colpo d'occhio quali meccanismi siano attivi nell'edificio. Il secondo invece riguarda il metodo di calcolo. Essendo presente al numeratore una differenza tra i punteggi assegnati, nel caso che questa sia sempre uguale a zero, il numeratore diventa uguale a zero e l'indice non viene calcolato. Questo perché per poter calcolare la sommatoria è necessario l'escamotage sopra descritto, passando per il rapporto tra il numeratore  $i$ -esimo e la sommatoria dei numeratori. Se il numeratore  $i$ -esimo è zero, anche il rapporto percentuale è nullo. Per ottenere poi la sommatoria degli elementi all'interno dell'abaco è necessario dividere il numeratore  $i$ -esimo per il rapporto, ma se questo è nullo, l'operazione è impossibile. Quindi se tutti i numeratori sono nulli, l'indice non viene calcolato. Questo è un caso abbastanza improbabile; nel caso in cui si verifici, il campo corrispondente al valore dell'indice rimane vuoto, che può essere assimilato al valore zero che invece dovrebbe assumere. Nei casi più generali in cui solo qualche numeratore è zero, ma non tutti, si avranno alcune righe, corrispondenti ai meccanismi con punteggi di vulnerabilità e presidio identici, con il campo dell'indice di vulnerabilità vuoto. Questo lato negativo può anche essere visto come effetto positivo. Infatti la differenza in questione è uguale a zero quando i punteggi di vulnerabilità e presidio sono uguali; ossia quando, per il meccanismo di danno considerato, esistono sì delle vulnerabilità, ma sono già state compensate da dei presidi antisismici. Ciò equivale a dire che l'attivazione del meccanismo è stata impedita.

Infine si è scelto di evidenziare con una campitura verde la colonna dell'abaco contenente i valori del campo dell'indice per evidenziare il risultato. Analogamente si sono campite di giallo le colonne la cui compilazione è a carico dell'utente.

<Abaco Indice di vulnerabilità sismica>			
A	B	C	D
Id Meccanismo	Descrizione Meccanismo	Indice	Nome indice
1	Ribaltamento della Facciata	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
2	Meccanismi nella sommità della facciata	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
3	Meccanismi nel piano della facciata	0.52	
4	Protiro - Narcece	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
5	Risposta trasversale dell'aula	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
6	Meccanismi di taglio nelle pareti laterali (risp)	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
7	Risposta longitudinale del colonnato		Indice di Vulnerabilità Sismica
8	Volte della navata centrale	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
9	Volte delle navate laterali	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
10	Ribaltamento delle pareti di estremità del tran		Indice di Vulnerabilità Sismica
11	Meccanismo di taglio nelle pareti del transett		Indice di Vulnerabilità Sismica
12	Volte del transetto		Indice di Vulnerabilità Sismica
13	Archi trifonali		Indice di Vulnerabilità Sismica
14	Cupola - Tamburo/Tiburio		Indice di Vulnerabilità Sismica
15	Lanterna		Indice di Vulnerabilità Sismica
16	Ribaltamento dell'abside	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
17	Meccanismi di taglio nel presbitero o nell'ab	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
18	Volte del presbitero o dell'abside	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
19	Elementi di copertura: Aula		Indice di Vulnerabilità Sismica
20	Elementi di copertura: Transetto		Indice di Vulnerabilità Sismica
21	Elementi di copertura: Abside	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
22	Ribaltamento delle cappelle		Indice di Vulnerabilità Sismica
23	Meccanismi di taglio nelle cappelle		Indice di Vulnerabilità Sismica
24	Volte delle cappelle		Indice di Vulnerabilità Sismica
25	Interazioni in prossimità di irregolarità plano-	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
26	Aspetti (Vela, Guglie, Pinnacoli, Statue)	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
27	Torre campanaria	0.52	Indice di Vulnerabilità Sismica
28	Cella campanaria		Indice di Vulnerabilità Sismica

Fig. 91 - Abaco di calcolo dell'indice di vulnerabilità sismica

## 10.5 - Definizione dell'indice di vulnerabilità statica

Come spiegato nel capitolo precedente, la quasi totalità delle lesioni non è stata causata da meccanismi di danno di origine sismica, bensì da cedimenti delle fondazioni. Si è quindi voluto realizzare, analogamente alle linee guida del ministero, un abaco dei meccanismi di danno (Fig. 92, pag. 212) e introdurre un nuovo indice di vulnerabilità (Fig. 93, pag. 212).

Ad ogni meccanismo sono stati assegnati anche alcuni presidi ed indicatori di vulnerabilità affini al metodo ufficiale. Per quanto riguarda il calcolo dell'indice, il procedimento sarà identico a quello previsto dalla normativa. Ad ogni meccanismo si assegna un punteggio  $\rho_k$ , funzione della loro importanza all'interno della costruzione. Si attribuisce  $\rho_k=0$  se il macroelemento interessato

non è presente, altrimenti  $\rho_k=1$ . Per i meccanismi 31, 40 e 41 si assegna  $\rho_k=0.5$ . Per ogni meccanismo vengono inoltre suggeriti alcuni possibili elementi di presidio ed indicatori di vulnerabilità. A ciascun presidio o indicatore di vulnerabilità rilevato deve essere attribuito, rispettivamente, un grado di efficacia o di gravità, con un punteggio da 1 a 3.

<Abaco Meccanismi di danno statici>						
A	B	C	D	E	F	G
Id Meccanismo	Descrizione Meccanismo	Immagine Meccanismo	Tipo meccanismo	Peso specifico meccanismo	Punteggio vulnerabilità	Punteggio presidi
29	Cedimento fondale della facciata	<Nessuno>	Cedimento	1	2	0
30	Cedimento fondale della parete laterale	<Nessuno>	Cedimento	1	2	0
31	Cedimento fondale del protiro	<Nessuno>	Cedimento	0.5	1	1
32	Colonnato interno	<Nessuno>	Cedimento	1	2	1
33	Volte della navata centrale	<Nessuno>	Cedimento	1	2	0
34	Volte della navata laterale	<Nessuno>	Cedimento	1	1	0
35	Cedimento fondale dell'abside	<Nessuno>	Cedimento	1	2	1
36	Volte del presbitero e dell'abside	<Nessuno>	Cedimento	1	1	0
37	Cedimento fondale del transetto	<Nessuno>	Cedimento	0	1	0
38	Volte del transetto	<Nessuno>	Cedimento	0	1	0
39	Cedimento fondale della torre campanaria	<Nessuno>	Cedimento	1	2	1
40	Pavimento della navata centrale	<Nessuno>	Cedimento	0.5	1	0
41	Pavimento delle navate laterali	<Nessuno>	Cedimento	0.5	1	0

Fig. 92 - Abaco dei meccanismi di danno di tipo statico-geotecnico  
Si sono individuati i seguenti meccanismi:

<Abaco Indice di vulnerabilità statica>			
A	B	C	D
Id Meccanismo	Descrizione Meccanismo	Indice	Nome indice
29	Cedimento fondale della facciata	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
30	Cedimento fondale della parete laterale	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
31	Cedimento fondale del protiro	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
32	Colonnato interno	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
33	Volte della navata centrale	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
34	Volte della navata laterale	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
35	Cedimento fondale dell'abside	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
36	Volte del presbitero e dell'abside	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
37	Cedimento fondale del transetto	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
38	Volte del transetto	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
39	Cedimento fondale della torre campanaria	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
40	Pavimento della navata centrale	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica
41	Pavimento delle navate laterali	0.71	Indice di Vulnerabilità Statica

Fig. 93 - Abaco di calcolo dell'indice di vulnerabilità statica-geotecnica

## 29-CEDIMENTO FONDALE DELLA FACCIATA

Lesioni pressochè orizzontali con andamento curvo.

### *Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

### **30-CEDIMENTO FONDALE DELLA PARETE LATERALE**

Lesioni pressochè orizzontali con andamento curvo.

#### *Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

### **31-CEDIMENTO FONDALE DEL PROTIRO**

Lesioni all'intradosso del pronao - Distaccamento dalla facciata.

#### *Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

Buon ammorsamento tra le murature

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

### **32-RISPOSTA DEL COLONNATO NELLE CHIESE A PIÙ NAVATE**

Lesioni sulle pareti al di sopra del colonnato - Lesioni da compressione sulle colonne.

#### *Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

Sezione delle colonne adeguata

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

### **33-VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE**

Lesioni nelle volte dell'aula centrale - Distacco delle volte dalle pareti laterali.

*Presidi*

Presenza di rinfianchi

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, o in cannucciato, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

### **34-VOLTE DELLE NAVATE LATERALI**

Lesioni nelle volte delle navate laterali - Distacco delle volte dalle pareti laterali.

*Presidi*

Presenza di rinfianchi

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, o in cannucciato, specialmente se su campate di

grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

### **35-CEDIMENTO FONDALE DELL'ABSIDE**

Lesioni con andamento curvo - Distacco dal corpo dell'aula.

#### *Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

Ammorsamento di buona qualità tra l'abside ed i muri della navata

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

### **36-VOLTE DELL'ABSIDE E DEL PRESBITERIO**

Lesioni nelle volte dell'abside - Distacco delle volte dalle pareti.

#### *Presidi*

Presenza di rinfianchi

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, o in cannucciato, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

### **37-CEDIMENTO FONDALE DEL TRANSETTO**

Lesioni pressochè orizzontali con andamento curvo - Distacco dalle pareti dell'aula.

#### *Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

Ammorsamento di buona qualità tra la pareti del transetto ed i muri della navata.

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

### **38-VOLTE DEL TRANSETTO**

Lesioni nelle volte del transetto - Distacco delle volte dalle pareti laterali.

#### *Presidi*

Presenza di rinfianchi

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

#### *Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

Volte in foglio, o in cannucciato, specialmente se su campate di grande luce

Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

### **39-TORRE CAMPANARIA**

Lesioni vicino allo stacco dal corpo della chiesa.

*Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

Presenza di fondazioni adeguatamente dimensionate

Presenza di buon collegamento con le pareti della chiesa (se inglobata)

Presenza di adeguata distanza dalle pareti della chiesa (se adiacente)

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

Presenza di aperture significative su più livelli.

**40-PAVIMENTO DELLA NAVATA LATERALE**

Lesioni di andamento vario - Depressioni.

*Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

**41-PAVIMENTO DELLE NAVATE LATERALI**

Lesioni di andamento vario - Depressioni.

*Presidi*

Presenza di buone caratteristiche geotecniche del terreno

*Indicatori di vulnerabilità*

Presenza di fondazioni sottodimensionate o totalmente assenti

Elevati carichi trasmessi al suolo

Infine per quanto riguarda l'inserimento dei meccanismi così definiti ed il calcolo del nuovo indice all'interno di Revit, si è proceduto in modo analogo a quanto fatto per l'indice definito in normativa.

## **Capitolo 11 - Conclusioni**

---

## **11.1 - Panoramica del processo proposto**

Nella presente tesi si è presentato un metodo per l'applicazione del processo BIM al patrimonio storico. L'obiettivo non è soltanto quello di generare modelli tridimensionali, ma quello di poter disporre, a partire proprio dal modello, di tutte le informazioni disponibili sull'edificio in questione. Il processo esposto parte da un rilievo tradizionale, non sono quindi necessarie strumentazioni particolari. All'estremo, sarebbe possibile applicare il processo qui proposto direttamente a partire dagli elaborati già in possesso degli enti pubblici. Tuttavia per un lavoro più dettagliato è bene realizzare un nuovo rilievo, o quantomeno numerosi sopralluoghi, dato che la conoscenza diretta dell'edificio è fondamentale alla costruzione del modello BIM. Durante la sua costruzione è inoltre possibile inserire tutte le informazioni disponibili o necessarie allo scopo previsto.

Si è inoltre proposto una metodologia per inserire all'interno di questo processo BIM anche le informazioni riguardo lo stato di danno delle chiese, come descritto nelle Linee guida del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Applicando il processo qui proposto, si arriva quindi alla definizione dell'indice di vulnerabilità sismica. Infine data la particolarità del caso di studio, si è proposto un indice analogo che tenga conto delle vulnerabilità di tipo statico-geotecnico.

## 11.2 - Potenzialità del processo BIM

Per quanto il metodo BIM sia già piuttosto popolare negli Stati Uniti ed in alcuni stati europei, in Italia è ancora poco utilizzato e soprattutto conosciuto. Negli ultimi anni si è iniziato a parlare del suo utilizzo in ambito pubblico, ma è necessario un rinnovamento di tutta l'industria edile. Stanno nascendo i primi tentativi di questa "rivoluzione" con l'emanazione della norma UNI 11337:2017 e i decreti attuativi del Codice degli Appalti. Un utilizzo corretto del processo BIM può portare da subito ad un risparmio di risorse a tutti i livelli, a partire dai grandi appalti, fino alle realtà più piccole. È certo necessario un primo approccio di apprendimento piuttosto complicato soprattutto per coloro che da anni sono abituati ad una concezione tradizionale di disegno. Ma una volta compresa la filosofia alla base del processo, si riscontreranno guadagni in termini di tempo, errori evitati ed eventualmente qualità della progettazione.

Si svilupperanno nuove competenze e quindi saranno richieste nuove figure lavorative. Saranno infatti necessarie persone con competenze non solo di modellatori ma anche del processo costruttivo degli edifici. Lo sviluppo di modelli tridimensionali integrati a qualsiasi tipo di informazione, renderanno possibile l'esecuzione di analisi energetiche, di costi, strutturali a qualsiasi stadio di avanzamento della progettazione, migliorandola. Sarà infatti possibile andare a correggere eventuali errori o valutare differenti opzioni già nelle fasi preliminari.

Sarà possibile effettuare un controllo migliore sui materiali e componenti che arrivano in cantiere, avendo a disposizione computi estrapolati direttamente dal modello e non realizzati manualmente.

Si avrà inoltre la possibilità di realizzare pezzi speciali per le costruzioni, diversi l'uno dall'altro, con la possibilità di collegare le informazioni presenti nel modello (codice identificativo, posizione nella costruzione, periodo di montaggio in cantiere) direttamente con l'impianto produttivo e il cantiere.

I produttori di componenti per l'edilizia (arredi, serramenti, impianti, ecc.) cominciano già a realizzare cataloghi di elementi correlati di tutte le informazioni necessarie. I progettisti dovranno quindi solamente inserire i componenti all'interno del modello del proprio progetto.

Anche i committenti potranno godere dei benefici offerti dal BIM, sarà più facile infatti mostrare differenti opzioni del progetto e generare la documentazione necessaria per una loro valutazione. I costi stimati alla realizzazione dell'opera saranno più realistici. Le pubbliche amministrazioni potranno disporre, al momento del deposito, non solo dei disegni architettonici, ma anche di tutto il corredo di informazioni indicizzate nel modello, tutte raccolte in un'unica posizione.

Infine un'ulteriore possibilità è quella di abbandonare supporti cartacei, con un ulteriore beneficio ambientale, a favore della visualizzazione diretta del modello tramite supporti informatici. Si potrà presentare ai committenti, depositare presso le pubbliche amministrazioni, effettuare sopralluoghi in cantiere direttamente visualizzando il modello su un notebook o un tablet; integrando poi le possibilità che si stanno sviluppando in termini di realtà virtuale e aumentata potrà essere possibile concepire un nuovo modello di processo edilizio, dalla fase ideativa alla manutenzione dell'opera.

### 11.3 - Criticità e sviluppi futuri

Nello sviluppo del lavoro qui presentato, si sono incontrate numerose difficoltà. Le principali sono conseguenti all'uso improprio fatto dello strumento Revit; infatti questo non è stato concepito per l'applicazione ad edifici monumentali. Grazie ad una combinazione di esperienza, tentativi, e alle risorse condivise dalla community online, si è però riusciti ad arrivare all'obiettivo preposto. Si è spesso dovuti ricorrere ad escamotage più o meno sofisticati ed eleganti, con risultati non sempre del tutto soddisfacenti. Si descrivono ora alcune delle maggiori problematiche incontrate che, a parere dello scrivente, possono essere risolte tramite l'implementazione di funzionalità all'interno del software.

In primo luogo nel caso di edifici di carattere storico o monumentale, ci si trova spesso a dover modellare delle superfici complesse (volte di vario tipo, capitelli, decorazioni, modanature, ecc.). Sarebbe quindi utile se oltre agli strumenti attualmente disponibili (estrusione, rivoluzione, estrusione su percorso ed unione) si aggiungessero altre possibilità di modellazione freeform. Tale ipotesi non sembra del tutto irrealizzabile; altri software di pura modellazione (Autodesk 3DS Max, Autodesk Maya, Rhinoceros, ecc.) già ne dispongono. Un aspetto negativo di questa integrazione è di sicuro un appesantimento dei modelli così generati, ma potrebbe essere compensato dal rapido sviluppo di potenza di calcolo dei computer.

Un'ulteriore funzionalità la cui integrazione non sembra così problematica è quella di ampliare le possibilità di calcolo all'interno delle viste di abaco. Renderle più simili a veri e propri

fogli di calcolo, permettendo non solo un utilizzo maggiore di operazioni logiche e matematiche, ma anche introducendo la possibilità di effettuare calcoli “tra le righe” delle tabelle, ossia tra diversi elementi tabellati. Si risolverebbe il problema affrontato al momento del calcolo degli indici di vulnerabilità, cap. 10. Questa possibilità aprirebbe la strada a numerose possibilità di automazione di processi oggi giorno manuali. Si pensi ad esempio al calcolo di rapporti urbanistici di aree o dei rapporti illuminanti/ventilanti.

Anche per quanto riguarda le analisi del quadro fessurativo e della messa in sicurezza degli edifici ci si è dovuti inventare un metodo per arrivare agli obiettivi preposti. Questo utilizzo però si ritiene sia particolarmente utile ed applicabile ad un numero estremamente elevato di casi. Risulterebbe molto utile uno strumento con cui si potessero modellare le lesioni semplicemente disegnando sulla superficie dell'elemento, in modo simile alla modifica del profilo di un muro, e che questa poi si sviluppasse per tutto il suo spessore. La creazione e la gestione di un numero elevato di famiglie, una per ogni lesione rilevata, come ipotizzato nella presente tesi, necessita di molto tempo per una corretta realizzazione. È un metodo analogo a quanto fatto ora nei sistemi CAD, per cui il vantaggio risiede soltanto nella possibilità di avere le informazioni necessarie all'interpretazione della lesione accessibili direttamente da questa.

Anche il metodo qui proposto può essere ulteriormente sviluppato sia dal punto di vista della realizzazione di modelli BIM di edifici storici, sia dell'analisi dello stato di danno e della messa in sicurezza degli edifici. Si propone infatti la possibilità di inserire i parametri necessari o una nuova metodologia per arrivare

ad un'analisi dell'edificio più accurata, sviluppando il cosiddetto livello LV2 delle linee guida.

Infine uno sviluppo da tanto sperato ed inseguito dalla comunità scientifica è quello dello “Scan to BIM” ovvero la possibilità di ottenere automaticamente un modello BIM dalla nuvola di punti. Un'operazione del genere pare ancora molto lontana, quasi fantascientifica. Sarebbe infatti necessario che il computer autonomamente riconoscesse all'interno della nuvola di punti rilevata le differenti componenti dell'edificio e le trasformasse in solidi tridimensionali parametrici. Oltre a questa prima grossa difficoltà si aggiunge il fatto che esistono numerosi software di modellazione BIM, tutti diversi tra loro. L'ipotesi dello Scan to BIM è certamente allettante, ridurrebbe notevolmente i tempi necessari al rilievo, ma soprattutto restituirebbe un rilievo perfetto con precisioni di decimi di millimetro. D'altra parte proprio questa altissima precisione può essere un limite, sia perchè non sempre si rivela necessaria, sia perchè appesantirebbe eccessivamente i computer, anche tenendo presente la crescita esponenziale della potenza di calcolo. Attualmente la soluzione che più tenta di avvicinarsi a questa ipotesi è data dal flusso di lavoro proposto da Autodesk tramite i software Recap e Revit che godono di una buona interoperabilità.



## **Bibliografia**

---

ALLEN, P. K., TROCCOLI, A., SMITH, B., MURRAY, S. STAMOS, I., LEORDEANU, M. (2003), New methods for Digital Modeling of Historic Sites, in *IEEE Computer Graphics and Applications*, Novembre-Dicembre 2003, pp. 32-41.

AUBIN P. (2013), *Renaissance Revit*, ed. G3B Press, Oak Lawn.

BIAGI MAINO, D.; GANDOLFI G. a cura di (2009), *L'osservanza di Bologna - Convento e chiesa di san Paolo in monte*, ed. Tipografia San Francesco, Bologna.

BOSELLO, F. (1828), *Nuova chiesa di S. Paolo in monte*, Bologna.

BRUSAPORCI, S., MAIEZZA, P. (2016), BIM per i beni architettonici - Una questione aperta, in *Ingenio*, Settembre 2016.

CORNA, A. (1927), Santuario della Madonna del monte e suoi rapporti col senato bolognese, in *Il comune di Bologna*, n. 03/1927, Bologna.

CORNA, A. (1928), S. Paolo in monte (Osservanza) nella storia, in *Il comune di Bologna*, n. 05/1928, Bologna.

CORNA, A. (1929), Francescani bolognesi dei sec. XII-XV. Nunzi e Legati apostolici di oriente, in *Il comune di Bologna*, n. 05/1929, Bologna.

CORNA, A. (1933), Storia ed arte nel Convento e nella Chiesa dell'Osservanza (San Paolo in monte) presso Bologna, in *Il comune di Bologna*, n. 07/1933, Bologna.

DE LUCA, L., VÉRON, P., FLORENZANO, M. (2005), Semantic-based modelling and representation of patrimony buildings, in *SVE Workshop towards Semantic Virtual Environments*, Marzo 2005, Villars, pp.1-11.

DE LUCA, L., VÉRON, P., FLORENZANO, M. (2007), A generic formalism

for the semantic modeling and representation of architectural elements, in *The visual computer*, n° 3 Marzo 2007, pp. 181-205.

DOGLIONI F., MORETTI M., PETRINI V. a cura di (1994), *Le chiese e il terremoto*, ed. Lint, Trieste.

DOGLIONI, F., MAZZOTTI, P. a cura di (2007), *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico. Integrazioni alla luce delle esperienze nella regione marche*, Regione Marche.

DORE, C., MURPHY, M. (2012), Integration of HBIM and 3D GIS for digital heritage modeling, in *Arrow@dit*, Dublin.

DORE, C., MURPHY, M. (2013), Semi-Automatic modelling of building façades with shape grammars using historic building information modelling, in *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. XL-5/W1 2013.

DORE, C., MURPHY, M. (2014), Semi-automatic generation of as-built BIM façade geometry from laser and image data, in *ITcon*, Vol. 19, pp. 20-46.

DORE, C., MURPHY, M., MCCARTHY, S., BRECHIIN, F., CASIDY, C., DIRIX, E., (2015), Structural simulations and conservation analysis - Historic Building Information Model (HBIM), in *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. XL-5/W4 2015, pp. 351-357.

EASTMAN, C. M. (1999), *Building Product Models: Computer environments supporting design and construction*, ed. CRC Press, Boca Raton.

EASTMAN, C. M., TEICHOLZ, P., SACKS, R., LISTON, K. (2011), *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. Second Edition*, ed. John Wiley & Sons,

Hoboken.

FAI, S., GRAHAM, K., DUCKWOTH, T., WOOD, N., ATTAR, R., (2011), Building Information Modeling and Heritage documentation, in *CIPA 2011 Conference proceedings: XXIIIrd International CIPA Symposium*.

FAI, S., FILIPPI, M., PALIAGA, S. (2013), Parametric modeling (BIM) for the documentation of vernacular construction methods: a BIM model for the commissariat building Ottawa, Canada, in *ISPRS Annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. II-5/W1 2013, pp. 115-120.

FAI, S., RAFEIRO, J. (2014), Establishing an appropriate level of detail (LOD) for a building information model (BIM) - Westblock, Parliament Hill, Ottawa, Canada, in *ISPRS Annals of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. II-5, 2014, pp. 123-130.

FANTI, M., RICCOMINI, E., RUBBI, P. E., TASSINARI CLÒ, O. (1992), *Le chiese di Bologna*, ed. L'inchiostro blu, Bologna.

FINI, M. (2007), *Bologna sacra. Tutte le chiese in due millenni di storia*, ed. Pendragon, Bologna.

FLAMINIO DA PARMA (1760-1761), *Memorie storiche delle chiese, e dei conventi dei Frati Minori dell'osservante, e riformata Provincia di Bologna*, Parma.

GALLAHER, M. P., et al (2004), *Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry*, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce Technology Administration, Gaithersburg.

GARAGNANI, S. (2015), HBIM nell'esistente storico. Potenzialità e limiti

degli strumenti integrati nel recupero edilizio, in *Ingenio*, Ottobre 2015.

GARAGNANI, S. (2015), Semantic Representation of Accurate Surveys for the cultural heritage: BIM applied to the existing domain, in *Handbook of Research on Emerging Digital Tools for Architectural Surveying, Modeling, and Representation*, ed. IGI Global, Hershey.

GARAGNANI, S. (2017), Digitalizzazione di processo e modello - L'introduzione consapevole dell'approccio HBIM nel recupero degli edifici esistenti, in *Ingenio*, Gennaio 2017.

GONZAGA F. (1603), *De origine seraphicae religionis francisanae, eiusque progressibus, de regularis obseruantie, forme, administrationis, ac legibus, admirabilique eius propagatione*, Venezia.

KRYGIEL E., VANDEZANDE J. (2015), *Mastering Autodesk Revit Architecture 2016*, ed. Sybex, Hoboken.

MCGOVERN, E., MURPHY, M., PAVIA, S. (2007), Parametric vector modeling of laser and image surveys of 17th century classical architecture in Dublin, in *The 8th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. MURPHY, M., MCGOVERN, E., PAVIA, S., (2011), Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys, in *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, Vol. XXXVIII-5/W16 2011, pp. 1-7.

MINIATO, D., NALE D. (2010), *Autodesk Revit Architecture 2011. Guida completa*, ed. Apogeo, Milano.

MURPHY, M., DORE, C., PAVIA, S. (2013), Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture, in *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*,

NIETO, J. E., CAMPOS, J. J. (2014), El estudio Paramental en el Modelo de Informacion del edificio historico o “Proyecto HBIM”,in *Virtual Archeology Review*, n° 11 Novembre 2014, pp. 73-85.

POLI, M.; RUBBINI M. a cura di (1999), *Frà Luigi Rinieri. Memorie del convento dell'Osservanza di Bologna*, ed. Costa, Bologna.

POZZOLI, S., VILLA, W. S. (2010), *Revit Achitecture 2011 Guida avanzata*, ed. Tecniche Nuove, Milano.

POZZOLI, S., BONAZZA, M. (2015), *Revit Architecture 2016*, ed. Tecniche Nuove, Milano.

PRUNERI, E. (2010), *Autodesk Revit Architecture 2011 - La grande guida*, ed. Mondadori, Milano.

SACKS, R., EASTMAN, C. M., LEE, G. (2003), Process Improvements in Precast Concrete Construction Using Top-Down Parametric 3-D Computer-Modeling, in *Journal of the Precast/Prestressed Concrete Institute*, n. 48, pp. 46–55.

SCIANNA, A., SERLORENZI, M., GRISTINA, S., FILIPPI, M., PALIAGA, S. (2015), Sperimentazione di tecniche BIM sull'archeologia romana: il caso delle strutture rinvenute all'interno della cripta della chiesa dei SS. Sergio e Bacco in Roma, in *Archeologia e calcolatori*, Supplemento 7, pp. 199-212.

SIMEONE, D., CURSI, S., TOLDO, I., CARRARA, G. (2014), B(H)IM - Built Heritage Information Modelling. Expanding BIM approach to historical and archaeological heritage representation, in *eCAADe*, n°32, pp. 613-622.

TEICHOLZ P. (2007), *CIFE Study of Construction Industry Labor Productivity*, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) at Stanford University.

VITTORI ANTISARI, C., RIZZARDA, C. C. (2016), Tra analogico e digitale - Breve storia dei modelli analitici, in *Ingenio*, Settembre 2016.

WADDING, L. (1625-1654), *Annales Minorum seu trium Ordinum a S. Francisco institutorum*, Lione-Roma.

ZUCCHINI G. , ROVERSI, G. a cura di (1976), *Edifici di Bologna*, ed. Atesa, Bologna.

### **Documenti d'archivio**

Gabinetto disegni e stampe Archiginnasio: Cartella Gozzadini 42, nn.186-187; Cartella Disegni autori vari 1, n.158; Stampe per soggetto cart. D, n.241/a.

Archivio di Stato Bologna: fondo demaniale, serie 11/6073, 18/6080, 2/6064, 11/6073, 16/6078, 1/6063, 12/6074.

Archivio archiginnasio: *Gazzetta di Bologna* n.49, 20 Giugno 1826; *Gazzetta di Bologna* n.85, 24 Ottobre 1826.

### **Normative**

D.M. 16 Gennaio 1996, *Norme tecniche per le costruzioni*.

Deliberazione G.R. Marche n. 78, 18 Gennaio 1999, *Direttive Tecniche - Opere pubbliche*, Allegato A.

D.P.C., 9 Febbraio 2011, *Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*.

Deliberazione G.R. Emilia Romagna n. 683, 8 Giugno 2015, *Approvazione*

*aggiornamento e integrazione con capitoli specialistici dell'elenco regionale dei prezzi delle opere pubbliche, come previsto dall'art. 8 della legge regionale n. 11/2010 ai sensi dell'art. 133 del d. lgs. n. 163/2006.*

ISO 29481-2:2012

UNI 11337:2017

### **Sitografia**

*210 king project*, <http://digital210king.org/index.php>, Autodesk Research, Ottobre 2015.

*Carleton Immersive Media Studio (CIMS)*, [www.cims.carleton.ca](http://www.cims.carleton.ca), Carleton University, Ottobre 2015.

*Città del Vaticano: Storia, preghiere e turismo religioso*, [http://www.vaticanoweb.com/monasteri/emiliaromagna/convento\\_della\\_osservanza.asp](http://www.vaticanoweb.com/monasteri/emiliaromagna/convento_della_osservanza.asp), Novembre 2015.

*Frati Minori dell'Emilia Romagna*, [www.cpv.fratiminorier.it/dove-siamo/il-convento-dell-osservanza.html](http://www.cpv.fratiminorier.it/dove-siamo/il-convento-dell-osservanza.html), Novembre 2015.

*Manuale utente Revit 2016*, <http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/ITA/>, Ottobre 2015 - Febbraio 2017.

*National Building Information Modeliling Standard (NIBS)*, [www.nationalbimstandard.org/faqs#faq1](http://www.nationalbimstandard.org/faqs#faq1), Febbraio 2017.

*Provincia di Cristo Re dei Frati Minori dell'Emilia Romagna*, [www.fratiminorier.it/provbologna.php?id=3&prov=4&chiesa=2](http://www.fratiminorier.it/provbologna.php?id=3&prov=4&chiesa=2), Novembre 2015.

*RevitCat - Blog su Autodesk Revit*, <http://revitcat.blogspot.it/>, Ottobre 2015 -

Febbraio 2017.

*RevitCity - Forum su Autodesk Revit*, <https://www.revitcity.com/index.php>,  
Ottobre 2015 - Febbraio 2017.

*RevitForum - Forum su Autodesk Revit*, <https://www.revitforum.org/forum.php>,  
Ottobre 2015 - Febbraio 2017.

*RevitLandia - Blog su Autodesk Revit Architecture*, <http://revit-landia.blogspot.it>,  
Ottobre 2015 - Gennaio 2017.

